



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

ODIRLAN IARONKA

**METODOLOGIA PARA DIMENSIONAMENTO
DO PROJETO DIELÉTRICO DE TRANSFORMADORES**

FLORIANÓPOLIS

2019

Odirlan Iaronka

**METODOLOGIA PARA DIMENSIONAMENTO
DO PROJETO DIELÉTRICO DE TRANSFORMADORES**

Dissertação submetido(a) ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. João Pedro Assumpção Bastos
Coorientador: Prof. Dr. Walter Pereira Carpes Junior

Florianópolis

2019

Ficha de identificação da obra.

Iaronka, Odirlan

Metodologia para dimensionamento do projeto dielétrico de transformadores / Odirlan Iaronka ; orientador, João Pedro Assumpção Bastos, coorientador, Walter Pereira Carpes Junior, 2019.

87 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Florianópolis, 2019.

Inclui referências.

1. Engenharia Elétrica. 2. Método do estresse elétrico cumulativo. 3. Margem de segurança. 4. Projeto dielétrico. 5. Transformador à óleo. I. Assumpção Bastos, João Pedro . II. Carpes Junior, Walter Pereira . III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. IV. Título.

Odirlan Iaronka

**METODOLOGIA PARA DIMENSIONAMENTO
DO PROJETO DIELÉTRICO DE TRANSFORMADORES**

O presente trabalho em nível de Mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof.º Nelson Sadowski, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof.º Sérgio Luciano Avila, Dr.
Instituto Federal de Santa Catarina

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Prof. Bartolomeu Ferreira Uchoa-Filho, Dr.
Coordenador(a) do Programa

Prof.º João Pedro Assumpção Bastos, Dr.
Orientador(a)

Florianópolis, 18 de outubro de 2019.

A minha família
pela compreensão, paciência, incentivo e apoio.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Natalino e Laureti, e irmão, Odair, pelo amor e incentivo nesta jornada mesmo com a distância física que nos separa.

À minha mulher Fabíola, pelo amor, compreensão e apoio nos momentos mais difíceis de conciliação do trabalho com o estudo.

Ao meu amigo Luiz Fernando de Oliveira, pela parceria e companheirismo nas viagens até Florianópolis - UFSC. Também pelos momentos de estudo e discussões técnicas enriquecedoras de conhecimento sobre transformadores.

Ao Programa Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFSC, pela organização de sua grade curricular que possibilitou a realização das disciplinas como aluno especial mesmo com a distância e logística envolvida.

Aos professores da Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFSC, mais especificamente do Grupo GRUCAD, que compartilharam seu conhecimento técnico sobre dispositivos eletromagnéticos com maestria e excelência em todas as disciplinas.

À WEG, por permitir a flexibilização do horário de trabalho para comparecimento às aulas e demais compromissos do curso.

Aos professores orientadores, João Pedro Assumpção Bastos e Walter Pereira Carpes Junior, que contribuíram na revisão e estruturação do trabalho e direcionaram o desenvolvimento pessoal e profissional durante todo o curso.

Aos professores Nelson Sadowski da UFSC e Sérgio Luciano Avila do IFSC pelo aceite ao convite de participação na Banca de Defesa desta Dissertação e pelas contribuições ao trabalho.

E, por fim, a todos que indiretamente contribuíram para que este trabalho pudesse ser realizado.

Muito obrigado!

RESUMO

Transformadores de potência são equipamentos importantes do sistema de transmissão e distribuição de energia porque são responsáveis por transferir grandes quantidades de energia no Sistema Interligado Nacional. Considerando esta condição, este trabalho propõe uma metodologia de projeto dielétrico de elementos da parte ativa do transformador para que seja possível a operação com elevada confiabilidade através de uma margem de segurança adequada. Para isto, esta metodologia é baseada na análise do comportamento dielétrico dos sistemas de isolamento de transformadores utilizando ferramentas de mapeamento de distribuição do campo elétrico interno ao transformador. Com os valores de campo elétrico disponíveis, obtidos analítica ou numericamente dependendo da complexidade da geometria analisada, é implementado o método de estresse elétrico cumulativo. Este método identifica o ponto de máxima amplitude e reordena os demais valores de campo elétrico da linha de provável ruptura em ordem decrescente. Depois, compara estes valores reordenados com uma curva de estresse elétrico limite pré-determinada, a qual foi definida estatisticamente com fundamentação empírica. A relação entre os valores obtidos na análise com os valores limite definidos pela curva estabelece a margem de segurança da configuração analisada. A metodologia proposta neste trabalho foi aplicada no projeto de um transformador de potência trifásico isolado a óleo. Foram mapeados e avaliados os principais pontos de estresse elétrico nos elementos potencializados da parte ativa para obter um projeto dielétrico do transformador com uma margem de segurança otimizada.

Palavras-chave: Método do estresse elétrico cumulativo; Margem de segurança; Projeto dielétrico; Transformador à óleo.

ABSTRACT

Power transformers are important equipment of the power transmission and distribution system because they are responsible for transferring large amounts of energy into the National Interconnected System. Considering this condition, this work proposes a dielectric design methodology of elements of the active part of the transformer so that it is possible to operate with high reliability through an adequate safety margin. For this, this methodology is based on the analysis of the dielectric behavior of transformer isolation systems using mapping tools of distribution of the electric field internal to the transformer. With the available electric field values, obtained analytically or numerically depending on the complexity of the analyzed geometry, the cumulative electric stress method is implemented. This method identifies the maximum amplitude point and reorders the other electric field values of the likely break line in descending order. It then compares these reordered values with a predetermined limit electrical stress curve, which was statistically defined on an empirical basis. The relationship between the values obtained in the analysis and the limit values defined by the curve establishes the safety margin of the analyzed configuration. The methodology proposed in this work was applied to the design of an oil insulated three phase power transformer. The main electrical stress points were mapped and evaluated in the active part of the potentialized elements to obtain a transformer dielectric design with an optimized safety margin.

Keywords: Cumulative stress method; Dielectric design; Oil transformer; Safety margin.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Circuito equivalente de transformadores para frequências até 1kHz. | 21 |
| Figura 2 - Circuito equivalente para frequências maiores que 1kHz. | 22 |
| Figura 3 - Circuito de dois enrolamentos em uma configuração típica de um transformador concebido com a associação de resistores, capacitores e indutores. | 23 |
| Figura 4 - Fator DIL de relação do sinal de tensão à frequência industrial. | 27 |
| Figura 5 - Configuração de dois eletrodos com dielétricos com diferentes permissividades elétrica entre eles. | 29 |
| Figura 6 - Cilindros concêntricos com múltiplos dielétricos entre eles. | 30 |
| Figura 7 - Dois condutores cilíndricos idênticos e com campo elétrico máximo nos pontos tangentes entre si. | 31 |
| Figura 8 - Conductor cilíndrico potencializado contra plano com potencial nulo. | 31 |
| Figura 9 - Conductor potencializado e isolado contra superfície plana do tanque potencial nulo. | 32 |
| Figura 10 - Modelo de um feixe de cabos isolados e potencializados contra o tanque do transformador com a utilização de uma barreira de material isolante. | 37 |
| Figura 11 - Distribuição do campo elétrico e linhas equipotenciais de tensão no modelo. Detalhe para a linha de provável ruptura desde o condutor até o tanque | 38 |
| Figura 12 - Distribuição de campo elétrico no duto entre o eletrodo potencializado e a barreira isolante. | 39 |
| Figura 13 - Distribuição de campo elétrico no duto de óleo entre a barreira isolante e o tanque com potencial nulo. | 39 |
| Figura 14 - Modelo de dois cabos com potencial diferente fixados em um elemento estrutural fabricado de material isolante. | 40 |
| Figura 15 - Distribuição do campo elétrico e linhas equipotenciais de tensão modelo. Detalhe para a linha de provável ruptura superficial no isolante. | 41 |
| Figura 16 - Distribuição de campo elétrico superficial na geometria analisada. | 41 |
| Figura 17 - Campos elétricos máximos da configuração analisada. | 44 |
| Figura 18 - Gráfico da função da densidade da probabilidade de <i>Weibull</i> | 45 |
| Figura 19 - Gráfico da função da distribuição cumulativa de <i>Weibull</i> | 46 |
| Figura 20 - Gráfico da função da densidade da probabilidade e da função da distribuição cumulativa de <i>Weibull</i> | 46 |

| | |
|--|----|
| Figura 21 - Gráfico comparativo das curvas de suportabilidade do óleo isolante mineral novo. | 48 |
| Figura 22 - Interface do software desenvolvido em VBA para aplicar o método e analisar os resultados das simulações desenvolvidas. | 49 |
| Figura 23 - Visualização interna do equipamento do lado de baixa tensão. | 51 |
| Figura 24 - Visualização interna detalhada do lado de baixa tensão. | 52 |
| Figura 25 - Visualização interna do equipamento do lado de alta tensão. | 52 |
| Figura 26 - Detalhe das conexões do lado da alta tensão do equipamento. | 53 |
| Figura 27 - Detalhe da conexão da alta tensão e do neutro do equipamento. | 53 |
| Figura 28 - Saída do enrolamento de baixa tensão contra o núcleo e ferragens da parte ativa do equipamento. | 54 |
| Figura 29 - Resultado do comportamento do campo elétrico da saída do enrolamento de baixa tensão contra o núcleo e ferragens da parte ativa. | 55 |
| Figura 30 - Planos que interceptam o ponto de máximo campo elétrico para a definição das linhas de provável ruptura e as respectivas margens de segurança. | 56 |
| Figura 31 - Entrada central do enrolamento de alta tensão para diminuir o campo elétrico das extremidades dos enrolamentos próximas ao núcleo e ferragens. | 56 |
| Figura 32 - Linha de alta tensão que interliga a bucha com o enrolamento da alta tensão com entrada central. | 57 |
| Figura 33 - Resultado da distribuição do campo elétrico na saída do enrolamento de alta tensão contra o tanque e respectivas margens de segurança. | 57 |
| Figura 34 - Detalhe da barreira de material isolante inserida no duto de óleo entre o cabo de entrada de alta tensão potencializado e o tanque aterrado. | 58 |
| Figura 35 - Resultado do comportamento do campo elétrico da saída do enrolamento de alta tensão contra o tanque e a respectiva margem de segurança com a inserção de uma barreira isolante retilínea próxima ao condutor. | 59 |
| Figura 36 - Tubo isolante moldado sobre a linha de entrada de alta tensão. | 60 |
| Figura 37 - Resultado do comportamento do campo elétrico da saída do enrolamento de alta tensão contra o tanque e a respectiva margem de segurança com o tubo de material isolante moldado sobre toda a linha. | 60 |
| Figura 38 - Feixe de saída dos cabos do enrolamento de regulação do tipo hélice múltipla para ligação com o comutador. | 61 |
| Figura 39 - Posicionamento dos cabos de ligação da regulação, linha de alta tensão e fechamento do neutro da ligação estrela da alta tensão. | 62 |

| | |
|---|----|
| Figura 40 - Resultado do comportamento do campo elétrico considerando o feixe de cabos da ligação do enrolamento de regulação contra o tanque..... | 62 |
| Figura 41 - Resultado do comportamento do campo elétrico considerando uma barreira isolante entre o feixe de cabos da regulação e o tanque. | 63 |
| Figura 42 - Cabos da ligação da baixa tensão com diferença de potencial entre as fases do equipamento. | 64 |
| Figura 43 - Resultado da distribuição do campo elétrico nos cabos de ligação com diferença de potencial na parte inferior do enrolamento da baixa tensão | 64 |
| Figura 44 - Feixes dos cabos de ligação do comutador próximos à entrada da linha de alta tensão. | 65 |
| Figura 45 - Resultado do comportamento do campo elétrico nos cabos de ligação de regulação das fases com o comutador. | 65 |
| Figura 46 - Tubo extra na linha de alta tensão na região dos condutores de ligação. | 66 |
| Figura 47 - Resultado do comportamento do campo nos cabos de ligação do comutador próximos à entrada da linha de alta tensão. | 66 |
| Figura 48 - Feixes dos cabos de ligação do comutador próximos ao cabo de fechamento de neutro da ligação em estrela da alta tensão..... | 67 |
| Figura 49 - Resultado do campo elétrico nos cabos de ligação do comutador próximos ao cabo de fechamento de neutro da ligação em estrela da alta tensão. | 67 |
| Figura 50 - Cabo de baixa tensão causando um estresse elétrico contra a entrada da caixa de bucha e a própria caixa de buchas de saída. | 68 |
| Figura 51 - Parte inferior da bucha de alta tensão no interior do caneco de saída. | 68 |
| Figura 52 - Resultado do comportamento do campo elétrico considerando o <i>shield</i> da bucha de alta tensão contra o caneco de saída..... | 69 |
| Figura 53 - Papel isolante moldado inserido sobre o <i>shield</i> da bucha para diminuição do campo elétrico máximo em contato direto com o óleo isolante. | 70 |
| Figura 54 - Resultado do comportamento do campo elétrico considerando o <i>shield</i> isolado da bucha de alta tensão contra o caneco de saída. | 70 |
| Figura 55 - Cabos potencializados próximos dispostos paralelamente..... | 71 |
| Figura 56 - Cabos potencializados próximos dispostos perpendicularmente..... | 71 |
| Figura 57 - Distribuição do campo elétrico e margem de segurança dos cabos potencializados dispostos paralelamente..... | 72 |
| Figura 58 - Cabos potencializados próximos dispostos perpendicularmente..... | 72 |

| | |
|---|----|
| Figura 59 - Modelo bidimensional de um cabo potencializado com 375kV contra o tanque retilíneo de um equipamento..... | 74 |
| Figura 60 - Distribuição das linhas equipotenciais de tensão (<i>streamlines</i>), campo elétrico resultante e linha de provável ruptura..... | 75 |
| Figura 61 - Campo elétrico e suportabilidade elétrica da configuração..... | 75 |
| Figura 62 - Geometria para avaliar a influência do posicionamento da barreira no duto. | 76 |
| Figura 63 - Margem de segurança do duto de 0,1 mm entre o condutor e a barreira isolante..... | 76 |
| Figura 64 - Margens de segurança com duto de 5 mm entre condutor e barreira isolante. | 77 |
| Figura 65 - Margens de segurança com duto de 10 mm entre condutor e barreira isolante..... | 77 |
| Figura 66 - Margem de segurança em função do posicionamento da barreira isolante entre o eletrodo potencializado e o tanque. | 78 |
| Figura 67 - Margem de segurança da configuração com o duto entre o eletrodo e a barreira de 8,3 mm..... | 78 |
| Figura 68 - Distribuição ótima das duas barreiras isolantes com a distribuição equilibrada das margens de segurança calculadas com a metodologia proposta. | 79 |
| Figura 69 - Distribuição das três barreiras isolantes com a distribuição equilibrada das margens de segurança calculadas com a metodologia proposta..... | 80 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 - Dados exportados de uma linha de provável ruptura do exemplo. | 42 |
| Tabela 2 - Representação do algoritmo do método <i>cumulative stress</i> completo. | 43 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

SIN - Sistema Interligado Nacional;

ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico;

IEC - International Electrotechnical Commission;

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas;

NBR - Norma Técnica Brasileira;

CIGRE - Comitê Nacional Brasileiro de Produção e Transmissão de Energia Elétrica;

IEEE - Institute of Electrical and Electronics Engineers;

RMS - Root Mean Square (em português, valor eficaz);

2D - Bidimensionais;

3D - Tridimensionais;

DIL - Design Insulation Level

MEF - Método de Elementos Finitos;

$E_{\text{máx}}$ - Máximo campo elétrico suportável pelo duto;

VBA - Visual Basic for Applications;

WORKSPOT - Workshop Internacional sobre Transformadores de Potência, Equipamentos, Subestações e Materiais.

LISTA DE SÍMBOLOS

T: Transformador ideal;

V_n : Tensão nos terminais do enrolamento n [kV];

N_n : Número de espiras do enrolamento n;

R_o : Parte resistiva da impedância magnetizante [Ω];

L_o : Parte indutiva da impedância magnetizante [H];

R_n : Parte resistiva da impedância intrínseca do enrolamento n [Ω];

L_n : Parte indutiva da impedância intrínseca do enrolamento n [H];

C_n : Parte capacitiva da impedância intrínseca do enrolamento n [F];

V: Tensão elétrica [kV];

I: Corrente elétrica [A];

E: Campo elétrico [kV/mm];

D: Densidade de campo elétrico [C/m^2];

d: Distância entre eletrodos [mm];

ϵ_0 : permissividade do vácuo [F/m]

ϵ_r : Permissividade relativa;

ρ : Densidade de carga elétrica [C/m];

r: Raio do eletrodo [mm];

α : Parâmetro de escala da função de Weibull;

β : Parâmetro de forma da função de Weibull.

P: Probabilidade da função de Weibull;

V_{-1} : Tensão com probabilidade de 1% de falha;

A: Campo elétrico suportado pela configuração em um duto de 1 mm;

B: Fator exponencial da equação de suportabilidade limite.

SUMÁRIO

| | | |
|--------------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 15 |
| 1.1 | MOTIVAÇÃO..... | 16 |
| 1.2 | JUSTIFICATIVA..... | 17 |
| 1.3 | OBJETIVOS..... | 17 |
| 1.3.1 | Objetivo geral..... | 17 |
| 1.3.2 | Objetivos específicos..... | 18 |
| 1.4 | ESTRUTURA DO TRABALHO | 19 |
| 2 | CARACTERÍSTICAS DIELÉTRICAS DOS TRANSFORMADORES | 20 |
| 2.1 | MODELOS ANALÍTICOS DE TRANSFORMADORES..... | 21 |
| 2.2 | TENSÕES DO SISTEMA - COMPOSIÇÃO DO SINAL | 24 |
| 2.2.1 | Sinais de tensão típicos do sistema elétrico | 25 |
| 2.2.2 | Fator DIL | 26 |
| 2.3 | MECANISMOS DE FALHA DIELÉTRICA | 27 |
| 2.4 | CAMPO ELÉTRICO NO TRANSFORMADOR..... | 28 |
| 2.4.1 | Campo elétrico - Abordagem analítica..... | 28 |
| 2.4.2 | Campo elétrico - Abordagem numérica | 33 |
| 2.5 | MÉTODO ESTRESSE ELÉTRICO CUMULATIVO..... | 35 |
| 2.5.1 | Descrição do Método Estresse Elétrico Cumulativo | 36 |
| 2.5.2 | Suportabilidade dielétrica - Análise estatística..... | 45 |
| 2.5.3 | Software para implementação da metodologia..... | 49 |
| 3 | APLICAÇÃO DA METODOLOGIA - ESTUDO DE CASO | 51 |
| 3.1 | MODELO DO TRANSFORMADOR | 51 |
| 3.2 | DIMENSIONAMENTO ELÉTRICO DO EQUIPAMENTO | 54 |
| 3.2.1 | Saídas de enrolamentos | 54 |
| 3.2.2 | Ligações dos enrolamentos | 63 |
| 3.2.3 | Ligação para buchas..... | 68 |

| | | |
|-------|--|----|
| 3.3 | DISPOSIÇÃO DE CABOS PARALELOS E PERPENDICULARES..... | 71 |
| 3.4 | POSICIONAMENTO DAS BARREIRAS ISOLANTES | 73 |
| 3.4.1 | Avaliação para inserção de uma barreira | 74 |
| 3.4.2 | Avaliação para inserção de múltiplas barreiras | 79 |
| 4 | CONCLUSÃO | 81 |
| 5 | PUBLICAÇÕES | 84 |

1 INTRODUÇÃO

Os transformadores elétricos são fundamentais para o sistema elétrico porque são os responsáveis pela adequação dos níveis de tensão do Sistema Interligado Nacional (SIN), viabilizando a transmissão e distribuição de energia pelo extenso território nacional. Estes equipamentos devem cumprir as especificações e apresentar adequada margem de segurança de projeto, garantindo a confiabilidade e a continuidade da operação no sistema elétrico. O nível de exigência dielétrica e a complexidade do projeto de um transformador de potência estão relacionadas diretamente ao nível de tensão do sistema e potência de operação do equipamento.

O projeto da parte ativa de um transformador pode ser estudado e desenvolvido separadamente em dois domínios físicos: o projeto magnético e o projeto dielétrico. O projeto magnético determina, principalmente, o nível de indução magnética no núcleo, a amplitude e distribuição da corrente elétrica nos condutores e magnitude do campo magnético correspondente. O projeto dielétrico é responsável pela determinação da isolamento elétrica entre os elementos potencializados do transformador, como por exemplo, os enrolamentos e os elementos de ligação da parte ativa¹.

Embora o projeto magnético do transformador seja importante, o projeto dielétrico é extremamente crítico e tem importância relevante na determinação da vida útil do equipamento. Isto se deve ao fato de que uma falha do projeto dielétrico do transformador expõe o mesmo à uma situação bastante crítica em relação à sua recomposição no sistema. Muitas vezes uma ruptura dielétrica gera sinistros tais que a recuperação do transformador se torna economicamente inviável, deixando o equipamento fora de operação por um longo período até a recuperação. Ainda cabe ressaltar que qualquer não conformidade no transformador que possa retirá-lo de operação (mesmo que o equipamento seja preservado de danos mais severos e permanentes) pode gerar prejuízos com valores extremamente elevados. As resoluções vigentes empregam multas extremamente altas para interrupções do fornecimento não programadas, devido à indisponibilidade operacional do equipamento no sistema (ONS, 2011).

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma metodologia de projeto do isolamento dielétrico das ligações da parte ativa de um transformador. Usualmente, para o

¹ A parte ativa de um transformador é o conjunto formado pelos enrolamentos e núcleo magnético.

dimensionamento dielétrico destes pontos, os fabricantes de transformadores utilizam dados empíricos e tabelas com distâncias mínimas de isolamento. Entretanto, estes dados empíricos se tornam obsoletos na medida que a tensão dos equipamentos apresenta níveis mais elevados. Com isso, a simples utilização de uma distância maior entre os pontos potencializados não é suficiente para garantir a margem de segurança adequada. Tal fato se deve ao comportamento não-linear da suportabilidade dielétrica do fluido isolante do transformador em relação à distância de isolamento utilizada (K. J. Rapp; J. Luksich, 2011). Deste modo, é necessário desenvolver uma metodologia para o projeto de um transformador de potência com adequadas margens de segurança e um dimensionamento otimizado de toda a parte ativa para qualquer nível de tensão de operação.

A metodologia proposta será baseada no mapeamento do campo elétrico nos elementos de ligação da parte ativa. Este mapeamento pode ser feito analiticamente para configurações simples e numericamente para eletrodos com geometrias mais complexas. Com o mapeamento do campo elétrico é possível desenvolver o projeto dielétrico da parte ativa de transformadores com adequada margem de segurança utilizando metodologias de análise do estresse dielétrico correspondente.

1.1 MOTIVAÇÃO

O projeto dielétrico pode ser considerado o ponto de principal importância no dimensionamento de um transformador porque qualquer que seja a falha no isolamento dielétrico de um equipamento, independente da gravidade, condena um transformador a ser retirado de operação para sua recuperação. Neste sentido, busca-se um projeto de isolamento dielétrico da parte ativa com uma adequada margem de segurança para uma garantia de continuidade de operação do transformador.

Este trabalho desenvolverá uma metodologia de projeto dielétrico de elementos da parte ativa de um transformador utilizando o método do estresse elétrico cumulativo, ou, no termo em inglês, *cumulative stress method*. Esta metodologia será baseada em simulações numéricas computacionais com geometrias bidimensionais (2D) e tridimensionais (3D), de acordo com a complexidade da geometria analisada. Depois, com base na distribuição de tensão e conseqüentemente campo elétrico, será possível determinar a margem de segurança do projeto e estabelecer uma relação otimizada entre utilização de recursos de fabricação e o dimensionamento dielétrico adequado do transformador.

1.2 JUSTIFICATIVA

Atualmente no projeto de transformadores elétricos de qualquer faixa de potência o dimensionamento elétrico dos elementos de ligação da parte ativa é realizado com base, principalmente, em tabelas, curvas e direcionamentos fundamentados em dados empíricos e na própria experiência do projetista. Estes dados empíricos, que servem como base para curvas e tabelas com distâncias mínimas, foram obtidos na época que o custo computacional para uma análise detalhada era elevado e, em algumas vezes, até inacessível para a grande parte dos fabricantes de transformadores. Ainda, cabe ressaltar que desde a época que estes dados empíricos foram gerados, as características das matérias primas utilizadas na fabricação de transformadores têm evoluído continuamente e, em consequência disto, alguns direcionamentos básicos de dimensionamento para garantir a margem de segurança mínima se tornaram obsoletos. Com a facilitação do acesso aos softwares computacionais para análises numéricas, os fabricantes de transformadores têm a possibilidade de implementar ferramentas de análise para aumentar a margem de segurança dielétrica do projeto. Com estas ferramentas também é possível otimizar a utilização de matéria prima para fabricação do equipamento e minimizar a relação peso/potência, características fundamentais para viabilizar as questões referentes à logística de transporte de máquinas cada vez maiores pela estrutura viária nacional.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo geral

O objetivo deste trabalho é desenvolver uma metodologia para o dimensionamento de isolamento elétrico dos elementos de ligação da parte ativa de transformadores baseada em simulações numéricas computacionais e o método de elementos finitos. Com esta metodologia será possível obter um projeto dielétrico de transformadores com uma adequada margem de segurança para qualquer nível de tensão de operação. Também, utilizando a metodologia deste trabalho, será possível otimizar as distâncias elétricas dos projetos de parte ativa de transformadores atualmente desenvolvidos, buscando a melhor relação peso/potência sem perder a confiabilidade da operação do equipamento.

1.3.2 Objetivos específicos

Com a metodologia deste trabalho será possível analisar e quantificar as margens de segurança de equipamentos importantes, determinando a margem de segurança do projeto para qualquer nível de tensão e potência. Especificamente, o desenvolvimento deste trabalho abrange objetivos particulares como:

- Realizar uma abordagem teórica do comportamento dielétrico de eletrodos isolados em óleo isolante;
- Caracterizar o projeto e o dimensionamento elétrico de transformadores de potência com foco, principalmente, nos elementos de ligação da parte ativa;
- Mapear pontos de oportunidade de otimização do projeto e dimensionamento elétrico da isolação do transformador;
- Desenvolver uma metodologia de dimensionamento dielétrico de otimização das distâncias dielétricas utilizadas em eletrodos isolados à óleo com base no cálculo do estresse elétrico cumulativo e o método de elementos finitos;
- Desenvolver um algoritmo para efetuar a compilação dos dados obtidos na simulação computacional e calcular a margem de segurança da linha de provável ruptura com base nas curvas de suportabilidade dielétrica máxima de dutos de óleo isolante;
- Aplicar a metodologia desenvolvida em um modelo de transformador de potência trifásico modelado para aplicação e validação da metodologia proposta;
- Propor estudos e desenvolvimentos futuros para aprimoramento da metodologia de projeto elétrico, principalmente em relação à abrangência da análise dos diferentes espectros e amplitudes de sinais de tensão intrínsecos do sistema de potência de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Para uma organização dos assuntos abordados neste trabalho, são descritos resumidamente os tópicos de cada um dos capítulos desta dissertação.

O capítulo 1 faz uma abordagem inicial do tema deste trabalho, com as exposições relativas à motivação, justificativa e objetivos gerais e específicos deste estudo.

O capítulo 2 traz uma revisão teórica sobre as características dielétricas de transformadores de potência. Foram abordados modelos analíticos de transformadores para estudos dielétricos desde a frequência industrial até espectros de frequências mais elevadas. Também é apresentada uma descrição das tensões do sistema elétrico e os principais mecanismos de falha em transformadores. Neste capítulo é mostrada uma abordagem com a utilização de métodos numéricos para o cálculo da distribuição do campo elétrico e a descrição da metodologia de cálculo da margem de segurança com o método do estresse elétrico cumulativo. Também são descritos os itens relativos à implementação desta metodologia no dimensionamento dielétrico do transformador, as curvas de suportabilidade do óleo isolante e o software construído com o algoritmo da metodologia desenvolvida.

O capítulo 3 é utilizado para a demonstração da aplicação da metodologia em um modelo teórico de transformador de potência trifásico isolado à óleo. Serão destacados os principais pontos de dimensionamento dielétrico da parte ativa de um transformador. Também serão apresentadas as principais estratégias de melhoramento da margem de segurança de equipamentos e a possibilidade de melhoria na relação peso/potência dos transformadores projetados com esta metodologia.

O capítulo 4 fará o fechamento do trabalho com a conclusão do mesmo. Será feita a abordagem em relação à implementação desta metodologia durante a fase do projeto de elementos potencializados da parte ativa de transformadores de todas as classes de tensão e potência. Serão elencados alguns trabalhos futuros que podem ser desenvolvidos para adicionar subsídios e ampliar a aplicabilidade da metodologia proposta neste trabalho.

2 CARACTERÍSTICAS DIELÉTRICAS DOS TRANSFORMADORES

Os transformadores são equipamentos importantes para o sistema elétrico porque são responsáveis pela transferência de grandes quantidades de energia elétrica através do acoplamento eletromagnético de circuitos elétricos de diferentes níveis de tensão. Desde que se tem registro na literatura, vários autores têm publicado trabalhos que buscam o entendimento completo da ruptura elétrica que ocorre em transformadores devido ao campo elétrico (Planck, 1941) (Hutton, 1947). Os cálculos de dimensionamento dielétrico levam em consideração os *streamers* elétricos² iniciais gerados nos eletrodos antes mesmo da ruptura completa do isolante, considerando as propriedades específicas de cada fluido, como por exemplo, coeficientes da avalanche de *Townsend's* (Pedersen, 1970). Foram publicados estudos em relação ao efeito da área do eletrodo em contato com o óleo (L. R. Hill, P. L. Schmidt, 1948) e do volume de fluido sob o estresse dielétrico próximo ao eletrodo potencializado (Wilson, 1953) e (S. Palmer, W. A. Shorpley, 1969).

A maioria dos trabalhos consideram o campo elétrico uniforme ou quase-uniforme e, também, eletrodos com formas geométricas simples e ou que apresentavam determinada simetria, possibilitando sua discretização analítica. Por isto, estes métodos de dimensionamento são difíceis de serem aplicados genericamente em projetos de transformadores, uma vez que, nestes equipamentos é encontrada uma gigantesca variabilidade de formatos geométricos de elementos potencializados.

Para contornar a grande variedade de modelos geométricos de eletrodos em transformadores, este trabalho propõe um método baseado no estresse elétrico cumulativo ou, do termo em inglês, *cumulative stress method*. Utilizando este método, em conjunto com o mapeamento do campo elétrico de um transformador através de métodos numéricos, é possível determinar a margem de segurança de qualquer configuração geométrica de isolamento. Este método é baseado no estudo do campo elétrico em uma linha de provável ruptura elétrica ou linha de máximo estresse elétrico em conjunto com a análise estatística baseada na distribuição de *Weibull* (X. Wang, Z. Wang, 2012).

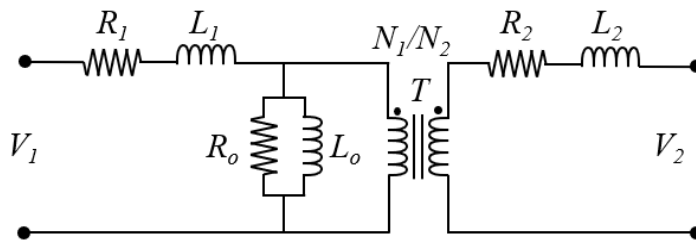
Este capítulo vai fazer uma abordagem das principais características dos transformadores em relação ao seu dimensionamento dielétrico.

² Pequenas descargas elétricas no óleo causadas pelo elevado campo elétrico determinado pelas partículas carregadas na superfície do eletrodo.

2.1 MODELOS ANALÍTICOS DE TRANSFORMADORES

Para avaliar o desempenho dielétrico de um transformador é necessário determinar os valores de tensão que são induzidos nos enrolamentos primário e secundário. Para este estudo utilizam-se modelos que descrevem na forma de circuitos elétricos o comportamento ideal de um transformador, conforme mostrado na Figura 1.

Figura 1 - Circuito equivalente de transformadores para frequências até 1kHz.



Fonte: Elaborado pelo autor.

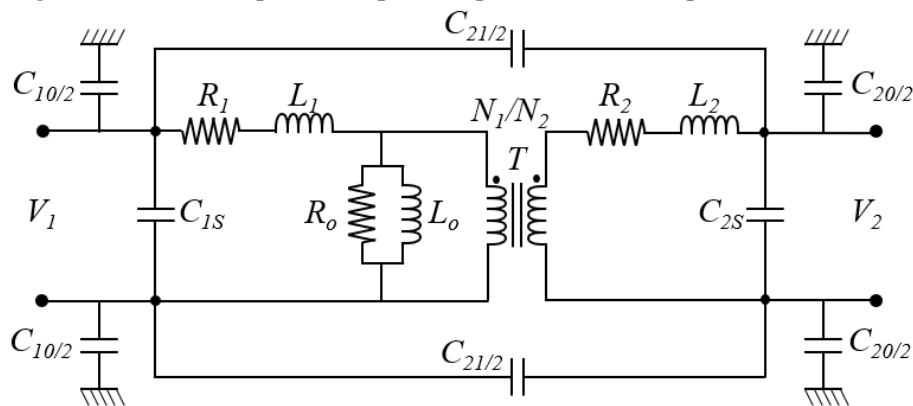
onde:

- T : Transformador ideal;
- V_1 : Tensão nos terminais do enrolamento 1;
- V_2 : Tensão nos terminais do enrolamento 2;
- N_1 : Número de espiras do enrolamento 1;
- N_2 : Número de espiras do enrolamento 2;
- R_o e L_o : Impedância magnetizante referida ao 1;
- R_1 e L_1 : Impedância intrínseca do enrolamento 1;
- R_2 e L_2 : Impedância intrínseca do enrolamento 2.

Este modelo da Figura 1 apresenta resultados analíticos coerentes do equipamento para frequências de até 1kHz, além de considerar dois enrolamentos perfeitamente acoplados através de uma relação de transformação ideal de um transformador N_1/N_2 . Entretanto, sabe-se que o potencial elétrico que determina a margem de segurança dielétrica dos enrolamentos e dos elementos de ligação de um transformador é composto da associação de vários sinais de tensão com diferentes frequências e amplitudes. Estes sinais dependem de uma série de parâmetros relacionados às variáveis construtivas do equipamento, operacionais do próprio sistema elétrico onde o equipamento está inserido (transientes elétricos) e da carga.

Para obter um modelo que represente o comportamento de um transformador para sinais com frequências mais elevadas (considerando a faixa acima de 1kHz) é necessária a inserção de mais elementos no circuito elétrico equivalente apresentado na Figura 1. Para frequências mais elevadas, as capacitâncias têm maior influência no resultado da distribuição de tensão (Freire, 2007). As principais capacitâncias de um transformador que devem ser incluídas no circuito equivalente são mostradas na Figura 2. As capacitâncias entre cada um dos enrolamentos e terra são distribuídas no circuito equivalente e, conforme indicado na Figura 2 pela divisão do valor por 2, são consideradas metade no início e a outra metade no fim de cada enrolamento do transformador.

Figura 2 - Circuito equivalente para frequências maiores que 1kHz.



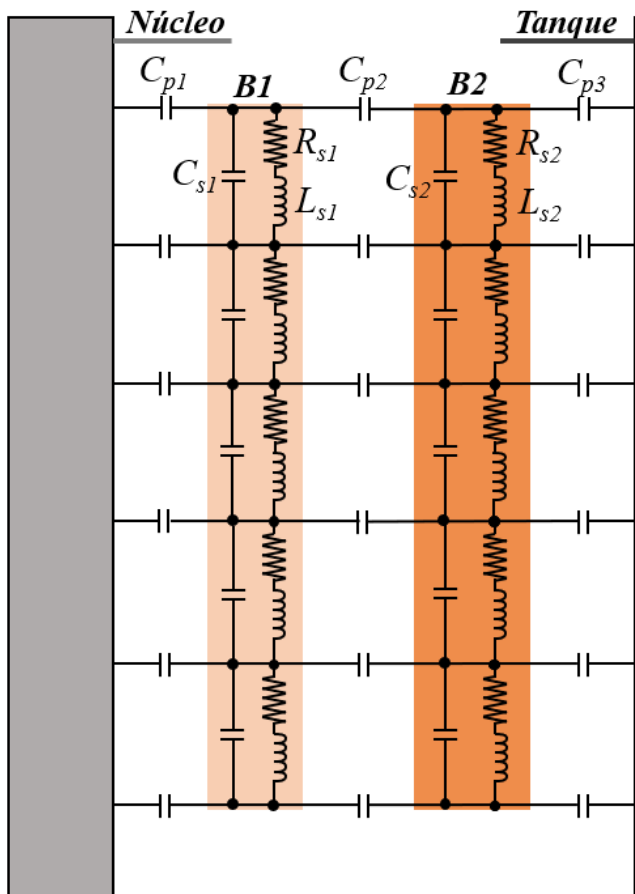
Fonte: Elaborado pelo autor.

onde:

- C_{1S} : Capacitância série do enrolamento 1;
- C_{2S} : Capacitância série do enrolamento 2;
- C_{21} : Capacitância entre o enrolamento 2 e o enrolamento 1;
- C_{10} : Capacitância entre o enrolamento 1 e terra;
- C_{20} : Capacitância entre o enrolamento 2 e terra.

Para melhorar o modelo proposto na Figura 2 e considerar sinais transitórios de mais elevada frequência (faixa de frequência de 30 kHz até 100MHz), o modelo do transformador deve ser construído de maneira que cada elemento do circuito represente um fragmento do enrolamento do transformador com tamanho igual ou menor ao comprimento de onda mais reduzido do sinal de alta frequência o qual ao transformador está submetido. Desta forma, é necessário dividir o comprimento total do enrolamento em porções com tamanho igual ou menor ao comprimento da onda da frequência mais elevada da análise, de acordo com a abordagem no grupo de trabalho sobre modelo de transformadores para sinais transientes de tensão (A2/C4-03_JWG, 2011). Para contemplar as frequências mais elevadas do sistema, o modelo dos enrolamentos do transformador é construído com mais elementos de circuitos elétricos, conforme mostrado na Figura 3.

Figura 3 - Circuito de dois enrolamentos em uma configuração típica de um transformador concebido com a associação de resistores, capacitores e indutores.



Fonte: Elaborado pelo autor.

onde:

Núcleo: Núcleo ferromagnético do transformador com potencial nulo;

Tanque: Invólucro metálico do transformador com potencial nulo;

B_1 : Enrolamento 1 do transformador (alta ou baixa tensão);

B_2 : Enrolamento 2 do transformador (alta ou baixa tensão);

C_{p1} : Capacitância paralela parcial entre o enrolamento 1 e o núcleo;

C_{p2} : Capacitância paralela parcial entre o enrolamento 1 e o 2;

C_{p3} : Capacitância paralela parcial entre o enrolamento 2 e o tanque;

C_{s1} : Capacitância série parcial do enrolamento 1;

R_{s1} : Resistência série parcial do enrolamento 1;

L_{s1} : Indutância série parcial do enrolamento 1;

C_{s2} : Capacitância série parcial do enrolamento 2;

R_{s2} : Resistência série parcial do enrolamento 2;

L_{s2} : Indutância série parcial do enrolamento 2;

Quanto maior o número de componentes no modelo do transformador, melhor será a acuracidade da resposta do modelo em relação ao comportamento elétrico do equipamento. Entretanto, para obter e resolver tais modelos mais complexos exige-se recursos computacionais relativamente elevados e, por isso, diversos estudos são desenvolvidos para obter um modelo equilibrado entre custo computacional e acuracidade dos resultados (CIGRE, 2014) (B. Gustavsen, Á. Portillo, 2014) (B. Gustavsen, Á. Portillo, 2018). Vale ressaltar que sempre haverá diferenças entre o valor obtido com a aplicação do modelo em relação ao valor medido no equipamento porque são inseridas variáveis no transformador durante a sua construção que não são contempladas por completo no projeto do equipamento.

2.2 TENSÕES DO SISTEMA - COMPOSIÇÃO DO SINAL

A suportabilidade à ruptura de um meio dielétrico está relacionada à característica de amplitude e tempo do sinal de tensão aplicado neste material. Se o sinal apresentar um nível de tensão elevado, um pequeno período de tempo é suficiente para estabelecer o rompimento elétrico. Se o nível de tensão apresentar menor intensidade (mas com amplitude suficiente para ionizar os elétrons na região do eletrodo), um tempo maior de aplicação deste sinal precisa ser submetido ao isolamento para estabelecer a falha. Uma determinada quantidade de energia é necessária para romper um isolamento elétrico, relacionando tempo e amplitude do sinal de tensão (Kulkarni, S. V.; Khaparde, S. A., 2004).

2.2.1 Sinais de tensão típicos do sistema elétrico

Diferentemente dos sinais de tensão aplicados em laboratório (que são totalmente controlados e conhecidos), os sinais de tensão transitórios do sistema elétrico onde o transformador será instalado para operação podem apresentar características bastante distintas e determinar um estresse elétrico diferenciado. Uma das principais fontes de transientes de tensão resultantes no transformador estão relacionadas, por exemplo, com a ocorrência de descargas atmosféricas e transientes gerados por manobras do sistema elétrico que envolvam o equipamento. Outros fenômenos de sobretensão típicos de transformadores são causados pela magnetização do núcleo, diminuição da carga, efeito *Ferranti*, entre outros (IEEE_Guide, 2013).

Ainda que seja possível prever sua ocorrência, os surtos de tensão mais danosos ao transformador são gerados pelos equipamentos de manobra do sistema elétrico (A2/C4-03_JWG, 2011). A operação de interrupção de circuitos energizados gera sinais transientes de tensão de extrema elevada frequência. Isto ocorre porque, com o equipamento em operação, uma quantidade de energia se acumula na forma de campo magnético nos enrolamentos, conforme Equação (1)

$$Energia_{magnética} = \frac{1}{2} L I^2 \quad (1)$$

onde:

L : indutância característica do enrolamento do transformador;

I : corrente elétrica passante no enrolamento.

Quando ocorre a manobra, repentinamente o circuito que está conduzindo a corrente elétrica é aberto e a energia armazenada nas indutâncias dos enrolamentos, na forma de campo magnético, se transforma em campo elétrico. Com isso, a energia é armazenada nas capacitâncias intrínsecas dos enrolamentos, conforme relação mostrada na Equação (2).

$$Energia = \frac{1}{2} L I^2 = \frac{1}{2} C V^2 \quad (2)$$

onde:

C : capacitância característica do enrolamento do transformador;

V : tensão interna consequência da interrupção do circuito.

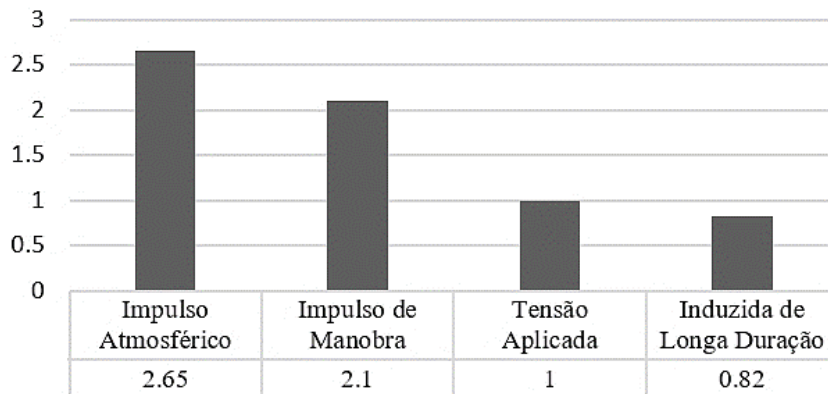
Com a energia concentrada na capacitância dos enrolamentos surge uma elevada tensão interna entre as espiras e nas extremidades dos enrolamentos. Este estresse elétrico causa uma corrente de deslocamento de elétrons entre as camadas do isolamento e um consequente aquecimento, levando à um desgaste da isolação e à falha dielétrica (K. J. Rapp, C. P. McShane, J. Luksich, 2005).

Ainda não há uma forma de onda normalizada para testar a suportabilidade da isolação para todas as sobretensões transientes. Alguns trabalhos estão sendo desenvolvidos para a determinação de um fator de severidade para qualquer forma de onda do sinal de tensão, para estabelecer uma relação com um sinal de tensão senoidal de frequência fundamental. Um Grupo de Trabalho já trabalhou no tema e gerou um guia de interação entre transformadores e transientes do sistema elétrico em 2011 (A2/C4-03_JWG, 2011). Para os sinais de tensão aplicados nos ensaios de transformadores com frequência diferente da fundamental há um fator de correlação de exigência do isolamento, conforme será abordado no item a seguir 2.2.2.

2.2.2 Fator DIL

Os sinais de tensão aplicados ao transformador apresentam variações bastante particulares em relação à frequência e amplitude. Deste modo, com base na densidade espectral de energia de cada sinal, estabeleceu-se um fator para relacionar um sinal senoidal de frequência industrial com os sinais de tensão com frequências mais elevadas aplicados ao transformador, este fator é denominado fator DIL (*Design Insulation Level*). Este fator pode ser gerado para qualquer forma de onda de tensão, mas os sinais aplicados no transformador durante o ensaio são o impulso atmosférico, impulso de manobra e aplicações com tensão induzida de curta e longa duração, conforme relacionados na Figura 4 (Taylor, 1977). A tensão aplicada com frequência de 50 ou 60 Hz é considerada o sinal de referência para determinação dos demais fatores (DIL = 1).

Figura 4 - Fator DIL de relação do sinal de tensão à frequência industrial.



Fonte: Adaptado de (Taylor, 1977).

2.3 MECANISMOS DE FALHA DIELÉTRICA

No âmbito do estudo do isolamento de transformadores, é importante abordar os principais mecanismos de falha dielétrica, a qual pode ser definida como a extinção da capacidade isolante do material dielétrico entre dois eletrodos com potenciais elétricos diferentes. Ocorre principalmente envolvendo os enrolamentos, cabos de ligação do comutador e terminais de saída das buchas do equipamento e pode ser dividida em dois tipos: ruptura elétrica instantânea e ruptura em função da perda lenta e progressiva do isolamento dielétrico.

A ruptura dielétrica instantânea ocorre em função de um campo elétrico extremamente elevado, ou seja, um estresse elétrico com nível suficiente para determinar a imediata extinção do isolamento. Quando a capacidade de isolamento de uma configuração é superada, uma descarga elétrica se estabelece na forma de arco elétrico e a energia é transferida entre dois eletrodos. Esse tipo de falha com perda total do isolante dielétrico, normalmente, leva o equipamento ao completo sinistro e retirada imediata do ativo de operação. (Bechara, 2010).

Uma disrupção com desgaste progressivo do sistema de isolamento dielétrico em um transformador pode ser motivada pelo surgimento de pequenas descargas elétricas, conhecidos como *streamers*. Estes *streamers* elétricos são gerados por campos elétricos pontuais que, embora tenham elevada amplitude, não têm energia o suficiente para romper o isolamento dielétrico de maneira imediata e estabelecer uma descarga elétrica. A razão para a ocorrência deste fenômeno é que, mesmo com um nível de estresse elétrico imediatamente superior à suportabilidade do isolamento, quando ocorre o início da descarga elétrica a energia disponível

é dissipada na forma de calor e o arco elétrico entre os eletrodos não se completa (Nelson, 1989).

No fenômeno de desgaste lento e progressivo do isolamento pode-se destacar que é gerada uma aceleração dos elétrons na superfície dos eletrodos em direção ao eletrodo de potencial oposto, internamente ao isolamento de papel ou óleo isolante. Este fenômeno ocorre com as moléculas do material que está em contato com o condutor, causando uma ionização localizada nesta região, mas sem energia suficiente para estabelecer o rompimento imediato do isolamento. Em uma espécie de efeito cascata, então, ocorre a liberação de novos elétrons num processo conhecido como *Avalanche de Townsend* (Hutton, 1947) e há um crescimento da região com papel/óleo ionizado na direção do potencial oposto que gerou o campo elétrico na superfície condutora, formando pequenos arcos elétricos ou *streamers* elétricos (mesma origem do conhecido efeito Corona em elementos de subestações isoladas a ar). Se o fenômeno de descargas parciais não for diagnosticado em tempo, a descarga elétrica ocorre no equipamento em função da deterioração do sistema de isolação entre os eletrodos (desgaste pelo aquecimento do isolamento pela movimentação de elétrons (Kulkarni, S. V.; Khaparde, S. A., 2004).

2.4 CAMPO ELÉTRICO NO TRANSFORMADOR

Definido como uma grandeza física vetorial que mede o módulo da força elétrica exercida sobre cada unidade de carga no espaço, o campo elétrico pode ser analisado separadamente do campo magnético no eletromagnetismo de baixas frequências (faixa considerada até algumas dezenas de kHz) (Bastos, 2012). Nesta faixa de frequência estão inseridos a maioria dos equipamentos eletromagnéticos do sistema de geração, transmissão e distribuição de energia, inclusive os transformadores.

2.4.1 Campo elétrico - Abordagem analítica

De um modo geral para uma abordagem analítica em equipamentos elétricos, o campo elétrico pode ser definido como a diferença de potencial entre eletrodos separados por uma determinada distância elétrica. Quando um estudo se refere ao projeto elétrico da parte ativa de um transformador, são considerados como eletrodos seus próprios elementos construtivos, como por exemplo os enrolamentos, cabos de ligação das buchas, o tanque e demais elementos metálicos com características de condutividade elétrica no transformador. O meio dielétrico, neste caso, é uma combinação de materiais isolantes sólidos à base de celulose impregnada e o próprio fluido isolante, que pode ser de origem mineral, vegetal ou sintética. O equacionamento

analítico base para o projeto dielétrico de eletrodos de transformadores com forma geométrica simétrica simples pode ser obtido em (Kulkarni, S. V.; Khaparde, S. A., 2004).

Para calcular um campo elétrico uniforme entre dois eletrodos com diferença de potencial em um único material dielétrico pode ser utilizada a Equação (3).

$$E_u = \frac{\Delta V}{\Delta d} \quad (3)$$

onde:

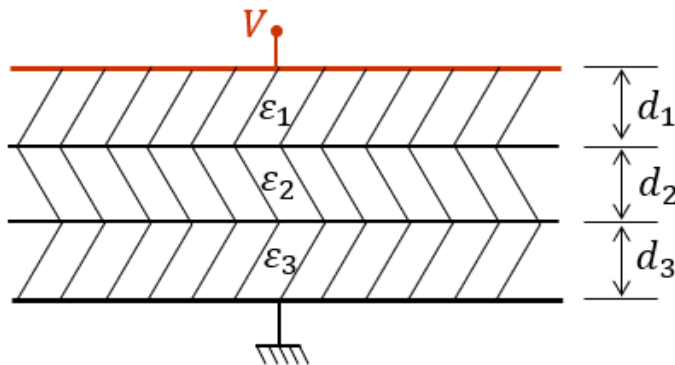
E_u : Campo elétrico uniforme;

ΔV : Tensão aplicada no dielétrico;

Δd : Distância entre eletrodos.

Analogamente, pode-se calcular o campo elétrico máximo em uma configuração com a combinação de materiais dielétricos isolantes com características distintas de permissividade elétrica, conforme mostrado na Figura 5. A característica de permissividade elétrica de cada material é definida como a capacidade de interação elétrica de um material com o campo elétrico incidindo sobre ele.

Figura 5 - Configuração de dois eletrodos com dielétricos com diferentes permissividades elétrica entre eles.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para calcular o campo elétrico desta configuração com uma combinação de materiais com diferentes permissividades dielétricas, considera-se, na ausência de carga livre, a continuidade da componente normal da indução elétrica dada pela Equação (4).

$$D_1 = D_2 = D_3 \text{ ou } E_1 \varepsilon_{r1} = E_2 \varepsilon_{r2} = E_3 \varepsilon_{r3} \quad (4)$$

onde:

D_n : Densidade de campo elétrico ou indução elétrica;

E_n : Campo elétrico total na configuração;

ε_n : Permissividade relativa de cada dielétrico específico;

Para calcular o campo elétrico interno à configuração utiliza-se a Equação (5).

$$E_n = \frac{V}{\varepsilon_n \left(\frac{d_1}{\varepsilon_1} + \frac{d_2}{\varepsilon_2} + \frac{d_3}{\varepsilon_3} \right)} \quad (5)$$

onde:

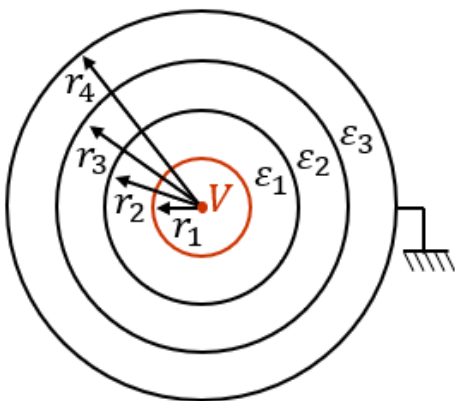
V : Tensão aplicada na configuração;

d_n : Distância de cada meio dielétrico.

Analicamente também é possível calcular o campo elétrico internamente a cilindros concêntricos, conforme mostrado na Figura 6. O máximo estresse elétrico ocorre na superfície do eletrodo com raio r_1 . Para calcular o campo elétrico E_r em qualquer raio nesta configuração ($r_1 < r < r_4$) é utilizada a Equação (6).

$$E_n = \frac{V}{r \varepsilon_n \left(\frac{1}{\varepsilon_1} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} \ln \frac{r_3}{r_2} + \frac{1}{\varepsilon_3} \ln \frac{r_4}{r_3} \right)} \quad (6)$$

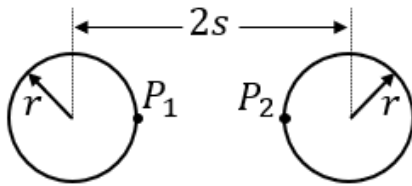
Figura 6 - Cilindros concêntricos com múltiplos dielétricos entre eles.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A avaliação analítica do campo elétrico também é possível em dois condutores cilíndricos de mesmo diâmetro. Neste caso, os cabos têm uma variação de tensão V entre si e geram um campo elétrico nas superfícies mais próximas com amplitude máxima nos pontos tangentes P_1 e P_2 , conforme mostrados na Figura 7. O campo elétrico máximo pontual em P_1 e em P_2 tem a mesma amplitude e é definido pela Equação (7).

Figura 7 - Dois condutores cilíndricos idênticos e com campo elétrico máximo nos pontos tangentes entre si.

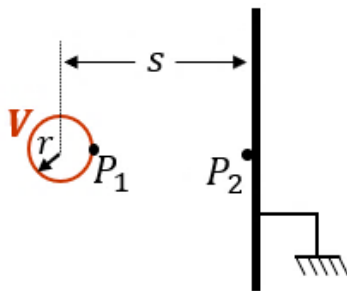


Fonte: Elaborado pelo autor.

$$E_{P_1} = E_{P_2} = \frac{V}{2(s-r)} \frac{\sqrt{\left(\frac{s}{r}\right)^2 - 1}}{\ln\left(\sqrt{(s-r)^2 - 1} + \left(\frac{s}{r}\right)\right)} \quad (7)$$

O cálculo analítico também pode ser realizado para um condutor potencializado contra um eletrodo plano com potencial diferente. O campo elétrico máximo nesta configuração se dá na superfície do condutor, no ponto mais próximo da superfície plana que, conforme mostrado na Figura 8, está localizado no ponto P_1 .

Figura 8 - Condutor cilíndrico potencializado contra plano com potencial nulo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

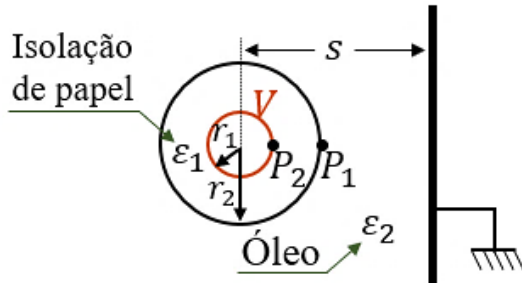
A Equação (8) determina analiticamente o maior estresse elétrico no ponto P_1 no cabo potencializado e, por sua vez, a Equação (9) determina o maior campo elétrico no ponto P_2 no eletrodo plano do tanque com potencial nulo.

$$E_{P1} = \frac{V}{(s-r)} \frac{\sqrt{\left(\frac{s}{r}\right)^2 - 1}}{\ln\left(\sqrt{(s-r)^2 - 1} + \left(\frac{s}{r}\right)\right)} \quad (8)$$

$$E_{P2} = \frac{V}{(s-r)} \frac{2 \sqrt{\frac{\left(\frac{s}{r}\right) - 1}{\left(\frac{s}{r}\right) + 1}}}{\ln\left(\sqrt{(s-r)^2 - 1} + \left(\frac{s}{r}\right)\right)} \quad (9)$$

Comumente se utiliza uma camada de papel isolante nos cabos potencializados³ em transformadores para aumentar sua suportabilidade dielétrica. Neste caso, é necessário calcular o campo elétrico na superfície externa do papel (ponto em contato com o óleo) e, também, na superfície do eletrodo internamente ao papel isolante. Esse campo elétrico máximo interno no papel isolante é o principal responsável por gerar as descargas parciais que acelera seu envelhecimento. Para esta avaliação, considerou-se os cabos de ligação com uma camada de isolamento posicionados próximo à um eletrodo plano, conforme mostrado na Figura 9.

Figura 9 - Conductor potencializado e isolado contra superfície plana do tanque potencial nulo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Neste caso o máximo campo elétrico no duto de óleo ocorre no ponto P_1 , sendo determinado conforme Equação (10). O máximo campo elétrico internamente ao papel isolante ocorre no ponto P_2 , definido conforme Equação (11).

$$E_{P1} = \frac{V}{r_2 \varepsilon_2 \left\{ \frac{\left(\frac{s}{r_2} - 1\right) \ln\left[\frac{s}{r_2} + \sqrt{\left(\frac{s}{r_2}\right)^2 - 1}\right]}{\varepsilon_2 \sqrt{\left(\frac{s}{r_2}\right)^2 - 1}} + \frac{\left(\frac{r_2}{r_1} - 1\right) \ln\left[\frac{r_2}{r_1} + \sqrt{\left(\frac{r_2}{r_1}\right)^2 - 1}\right]}{\varepsilon_1 \sqrt{\left(\frac{r_2}{r_1}\right)^2 - 1}} \right\}} \quad (10)$$

³ Cabo potencializado refere-se a um cabo ou eletrodo com um determinado nível de tensão aplicado internamente ao transformador.

$$E_{p2} = \frac{V}{r_1 \varepsilon_1 \left(\frac{\left(\frac{s}{r_2} - 1 \right) \ln \left[\left(\frac{s}{r_2} \right) + \sqrt{\left(\frac{s}{r_2} \right)^2 - 1} \right]}{\varepsilon_2 \sqrt{\left(\frac{s}{r_2} \right)^2 - 1}} + \frac{\left(\frac{r_2}{r_1} - 1 \right) \ln \left[\left(\frac{r_2}{r_1} \right) + \sqrt{\left(\frac{r_2}{r_1} \right)^2 - 1} \right]}{\varepsilon_1 \sqrt{\left(\frac{r_2}{r_1} \right)^2 - 1}} \right)} \quad (11)$$

Como as equações determinantes dos campos elétricos máximos apresentadas são analíticas, as mesmas podem ser implementadas facilmente em softwares de cálculo e dimensionamento de distância elétrica para transformadores. Entretanto, para outros formatos de eletrodos ou configurações de isolamento, a viabilidade da implementação analítica diminui consideravelmente. Nestes casos a avaliação analítica se torna praticamente inexecutável devido à complexidade do equacionamento analítico do campo elétrico para estes formatos de eletrodos.

2.4.2 Campo elétrico - Abordagem numérica

A dificuldade de implementação do equacionamento analítico se apresenta com a variabilidade de geometrias de eletrodos existentes em um transformador. A construção de um método analítico genérico para o dimensionamento elétrico de transformadores com eletrodos de variadas formas geométricas é complexa. Para contornar esta condição é necessária uma ferramenta de mapeamento de tensão e campo elétrico que seja aplicável com efetividade em qualquer formato geométrico de eletrodo e de isolamento de transformadores. Para isto, pode-se utilizar então de uma ferramenta numérica para simulação e descrição do campo elétrico em geometrias típicas de transformadores através do cálculo da distribuição de tensão com métodos numéricos e simulações computacionais.

Os softwares de simulação mais utilizados para o dimensionamento elétrico de transformadores são concebidos com base no MEF - Método de Elementos Finitos e sua formulação de cálculo é baseada nas equações de *Maxwell* (Andersen, 1973). Este método pode utilizar desde de polinômios de primeira ordem até ordens elevadas para o cálculo da distribuição do potencial nos elementos que exigem uma determinada acuracidade numérica. A solução deste método utiliza equações lineares e a solução pode ser obtida pelo método matricial direto ou através de métodos iterativos.

Neste trabalho, para o cálculo da distribuição de tensão e o conseqüente campo elétrico na configuração, serão realizados estudos numéricos computacionais com geometrias em duas

dimensões (2D) e com três dimensões (3D). Os modelos tridimensionais são usados para aumentar a acuracidade da solução e a abrangência da gama de geometrias de eletrodos. Os estudos serão realizados considerando campos elétricos estáticos e o completo desacoplamento do campo elétrico do campo magnético devido à baixa frequência da análise.

Para análises considerando geometrias 2D, a aplicação da formulação para problemas eletrostáticos considera o comportamento da intensidade do campo elétrico \mathbf{E} e a densidade do fluxo elétrico (alternativamente deslocamento elétrico) \mathbf{D} . O algoritmo relativo à metodologia de cálculo do campo elétrico estático determina o potencial elétrico de todos os pontos do modelo considerando a Equação de *Maxwell* que é a definição da Lei de Gauss, conforme Equação (12).

$$\text{div } \mathbf{D}(x, y) = \rho \quad (12)$$

onde $\mathbf{D}(x, y)$ é a densidade de fluxo elétrico bidimensional. Adequando com a relação $\mathbf{D} = \epsilon_r \epsilon_0 \mathbf{E}$, tem-se:

$$\text{div}(\epsilon_r \epsilon_0 \mathbf{E}(x, y)) = \rho \quad (13)$$

onde:

ϵ_r : permissividade elétrica relativa de cada material;

ϵ_0 : permissividade do vácuo, definida por $8,854 \times 10^{-12}$ [F/m];

$\mathbf{E}(x, y)$: campo elétrico nas coordenadas x e y (geometria 2D).

Considerando a condição de campo elétrico estático, pode-se considerar a relação para a Lei de Faraday $\mathbf{E} = -\text{grad } V$. Tem-se então a Equação (14):

$$\text{div}(\epsilon_r \epsilon_0 \text{grad } V(x, y)) = -\rho \quad (14)$$

onde:

$V(x, y)$: potencial elétrico nas coordenadas x e y (geometria 2D);

$\rho(x, y)$: densidade de carga elétrica no ponto da coordenada (x, y) .

A Equação (14) é resolvida então pelos algoritmos dos softwares que descrevem o campo elétrico através da utilização do MEF. Com a solução completa desta Equação (14) é definida a distribuição do potencial elétrico em todo o domínio e, com isso, são determinadas as grandezas \mathbf{E} e \mathbf{D} , usando as relações $\mathbf{E} = -grad V$ e $\mathbf{D} = \epsilon_r \epsilon_0 \mathbf{E}$.

Para análises considerando geometrias 3D, a base analítica do equacionamento é a mesma, salvo adequações relativas às condições de contorno. A Equação (14) é reescrita para resolver modelos tridimensionais, conforme Equação (15).

$$div(\epsilon_r \epsilon_0 grad V(x, y, z)) = -\rho_v \quad (15)$$

onde:

$V(x, y, z)$: potencial elétrico escalar da posição tridimensional;

$\epsilon_r(x, y, z)$: permissividade relativa, que é uma função da posição e pode ser isotrópica ou anisotrópica;

$\rho_v(x, y, z)$: densidade volumétrica da carga elétrica em (x, y, z) .

Do mesmo modo que no domínio de análise 2D, utilizando as relações constitutivas com as características dos materiais é possível determinar as grandezas \mathbf{E} e \mathbf{D} tridimensionalmente em todos os pontos do modelo analisado.

2.5 MÉTODO ESTRESSE ELÉTRICO CUMULATIVO

Com o mapeamento do campo elétrico, determinado analiticamente ou via softwares com formulação baseada no MEF - Método Elementos Finitos, é possível determinar a margem de segurança de uma configuração através da utilização de um método de cálculo do estresse elétrico acumulado no meio isolante dielétrico, o método do Estresse Elétrico Cumulativo ou do inglês *Cumulative Stress Method*. Este método de análise do estresse elétrico pode ser adotado com efetividade para analisar quaisquer situações de distribuição de campo elétrico interno ao transformador (Tschudi D., Heinzig zig P., 2009) (H. Goshima, N. Hayakawa, M. Hikita, H. Okubo, K. Uchida, 1995).

Então, para o projeto elétrico utilizando o método *Cumulative stress*, o dimensionamento pode ser dividido em duas etapas: primeiro, obtenção da distribuição de tensão e campo elétrico e, segundo, utilizar destes dados obtidos para aplicar a metodologia

proposta neste trabalho para obter a margem de segurança da configuração. As principais distribuições de tensão e campo elétrico de geometrias típicas para transformadores serão apresentadas para entendimento prévio e apresentação do método de análise deste trabalho.

2.5.1 Descrição do Método Estresse Elétrico Cumulativo

Para a aplicação deste método, com os dados da distribuição de tensão e o campo elétrico disponíveis, é necessário definir o caminho de provável ruptura da configuração. Este caminho é definido como o caminho de maior possibilidade de ruptura dielétrica entre dois eletrodos. Após a definição do caminho de provável ruptura, aplica-se então o *Cumulative stress Method*, que consiste em quantificar os valores de campo elétrico ao longo deste caminho pré-definido de menor suportabilidade dielétrica. Este método calcula e organiza os valores de campo elétrico do caminho em ordem decrescente e, com base em equações limites pré-determinadas, define a margem de segurança da configuração (Nelson, 1994).

2.5.1.1 Determinação do caminho de maior susceptibilidade dielétrica

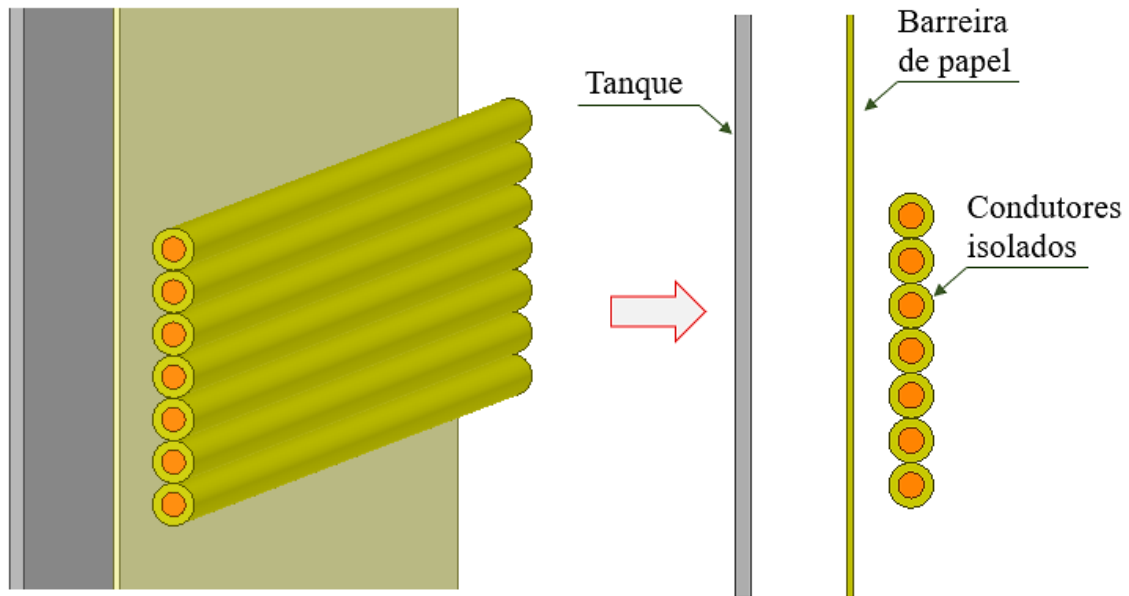
Com a realização da simulação e determinação da distribuição do campo elétrico em função da tensão e distância entre eletrodos é possível determinar o caminho de provável ruptura dielétrica.

a) Caminho de ruptura do dielétrico entre dois eletrodos

Para determinar o caminho de menor suportabilidade elétrica de uma configuração com um meio dielétrico entre dois eletrodos, primeiramente localiza-se o ponto de máximo campo elétrico próximo ao eletrodo. Deste ponto inicial, segue-se traçando a linha de provável ruptura até o eletrodo oposto. O traçado desta linha de provável ruptura tem início no ponto de máximo campo elétrico e é definido na sua totalidade cruzando perpendicularmente as linhas equipotenciais de tensão, mapeando o máximo campo elétrico da configuração. A definição desta linha pode ser manual, com base nos resultados visuais de distribuição de tensão e campo elétrico, e, também, pode ser determinada via software, através do tratamento dos dados numéricos dos resultados do próprio software de simulação. Em todos os casos de simulação numérica apresentados neste trabalho será utilizado o pacote comercial *ANSYS Electronics Desktop (AEDT)* para modelamento e resolução numérica dos problemas apresentados (ANSYS, 2019).

Para demonstrar esta metodologia entre eletrodos é utilizado um modelo de um cabo potencializado contra o tanque do transformador com potencial nulo, conforme Figura 10.

Figura 10 - Modelo de um feixe de cabos isolados e potencializados contra o tanque do transformador com a utilização de uma barreira de material isolante.



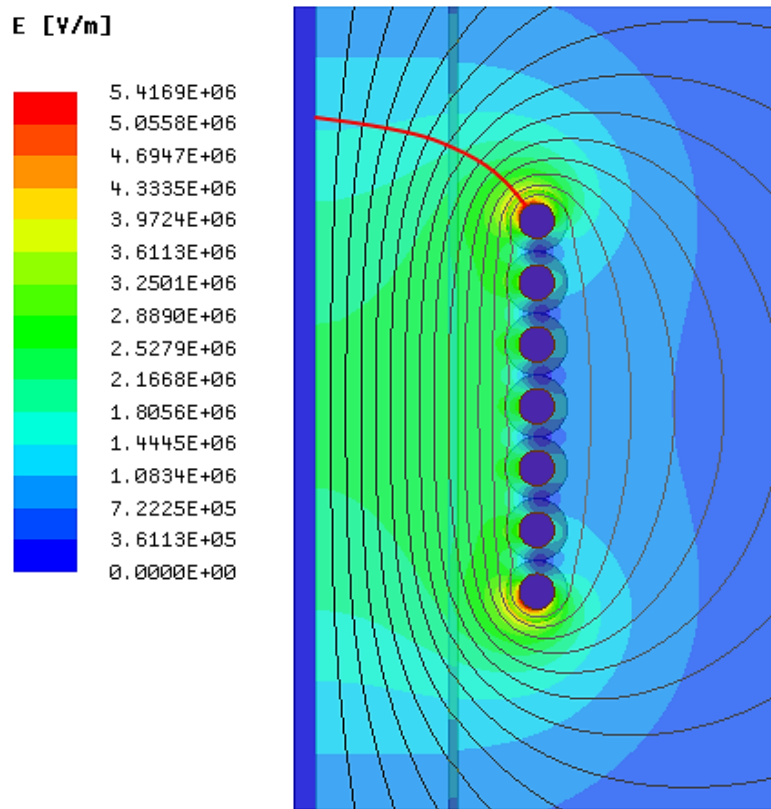
(a) - Visualização do modelo 3D

(b) - Visualização do modelo 2D

Fonte: Elaborado pelo autor.

Calculou-se a distribuição de tensão e conseqüente campo elétrico desta geometria, conforme resultado da Figura 11. Foi considerado condutores com condutividade infinita e a permissividade elétrica dos materiais foi definida conforme segue: óleo isolante = 2,4; barreira isolante = 3,2 e condutores = 1. Nesta mesma figura é mostrada a linha de provável ruptura desde o cabo potencializado até o tanque com potencial nulo, cruzando o isolamento do próprio cabo e também a barreira isolante.

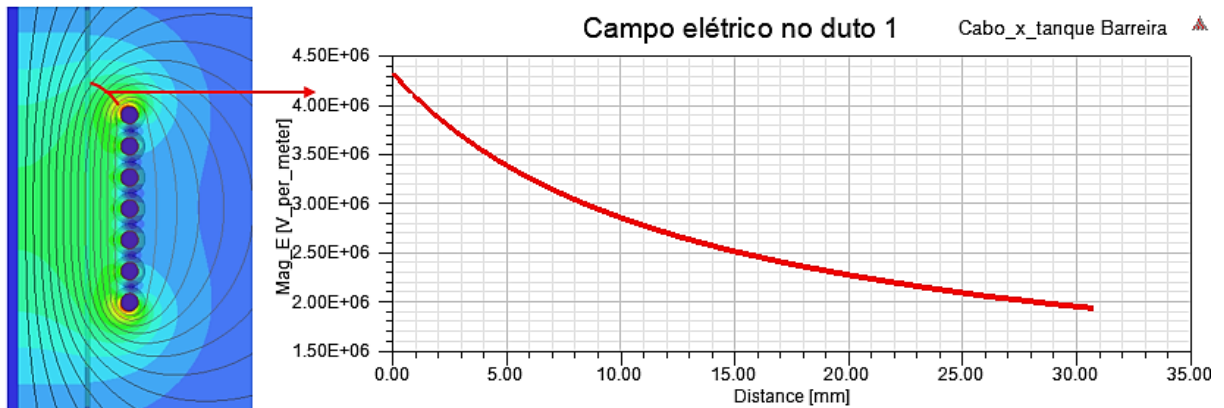
Figura 11 - Distribuição do campo elétrico e linhas equipotenciais de tensão no modelo. Detalhe para a linha de provável ruptura desde o condutor até o tanque



Fonte: Elaborado pelo autor

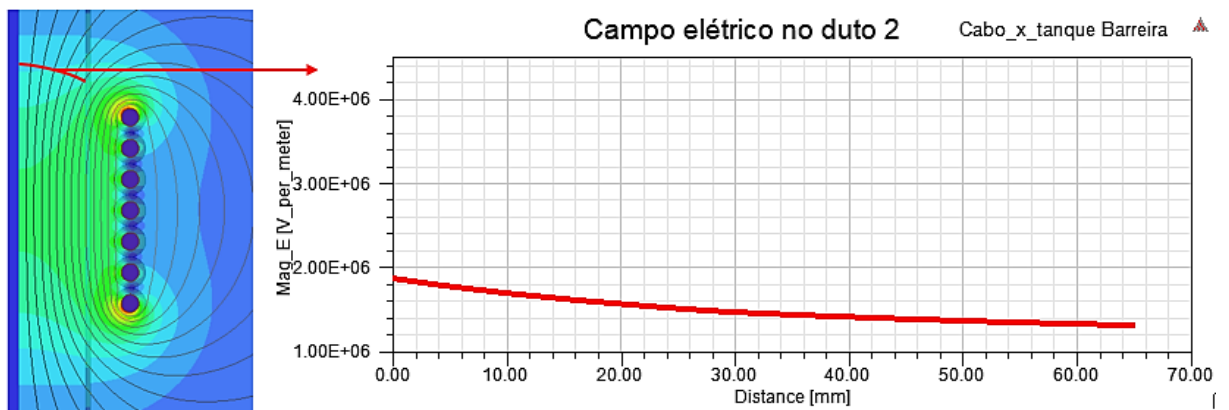
Após avaliação, como o duto do óleo foi dividido pela barreira em dois segmentos, a definição da linha de provável ruptura e a análise do campo elétrico deve ser realizada separadamente para cada um deles. Na Figura 12 é mostrado o comportamento do campo elétrico no duto de óleo mais próximo ao eletrodo. Na Figura 13 é mostrado o campo elétrico no duto de óleo entre a barreira e o tanque. Comparando a Figura 12 com a Figura 13 é possível perceber com bastante efetividade a influência da forma geométrica do eletrodo na amplitude e na uniformidade do campo elétrico resultante.

Figura 12 - Distribuição de campo elétrico no duto entre o eletrodo potencializado e a barreira isolante.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 13 - Distribuição de campo elétrico no duto de óleo entre a barreira isolante e o tanque com potencial nulo.



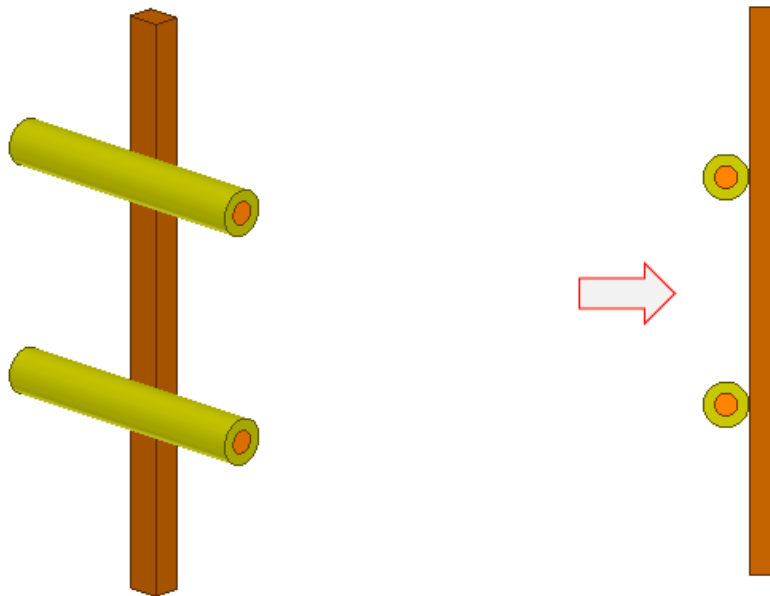
Fonte: Elaborado pelo autor.

Estes gráficos da Figura 12 e Figura 13 apresentaram os resultados de campo elétrico somente para o duto de óleo. É possível separar e analisar também o comportamento do campo elétrico internamente ao papel isolante. Para isto, a técnica é separar os fragmentos da linha de provável ruptura interna ao papel isolante. Embora existam curvas de suportabilidade para o isolamento celulósico, o nível de suportabilidade deste material é bastante mais elevado que o óleo isolante e, por isso, as metodologias de projeto são baseadas principalmente na otimização do estresse elétrico no fluido isolante (D. Tschudi, V. Dahinden, F. Derler, 1995).

b) Caminho de ruptura dielétrica superficial

Este fenômeno de descarga superficial ou também conhecido como *creepage* ocorre através de um deslocamento de elétrons sobre a superfície de um material isolante, impulsionado pela diferença de tensão e um caminho favorável de descarga. Uma vez estabelecido esse deslocamento de elétrons na superfície de um material, a suportabilidade dielétrica do caminho isolante como um todo se anula e a falha elétrica ocorre entre os eletrodos potencializados. Em elementos de ligação da parte ativa, esta condição de falha pode ocorrer, por exemplo, em suportes de cabos potencializados, na condição mostrada na Figura 14.

Figura 14 - Modelo de dois cabos com potencial diferente fixados em um elemento estrutural fabricado de material isolante.



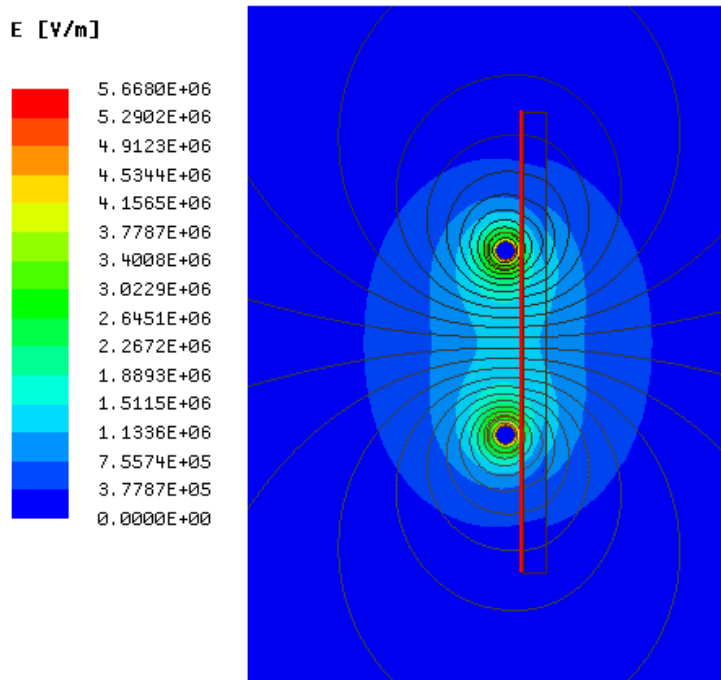
(a) - Visualização do modelo 3D

(b) - Visualização do modelo 2D

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para avaliar esta condição, foi calculada a distribuição de tensão e campo elétrico, conforme resultado da Figura 15. Nesta mesma figura é mostrada a linha de provável ruptura superficial no detalhe em vermelho. O estresse elétrico superficial neste caso pode ser visualizado analisando as linhas equipotenciais de diferentes níveis de tensão cruzando o material isolante sólido.

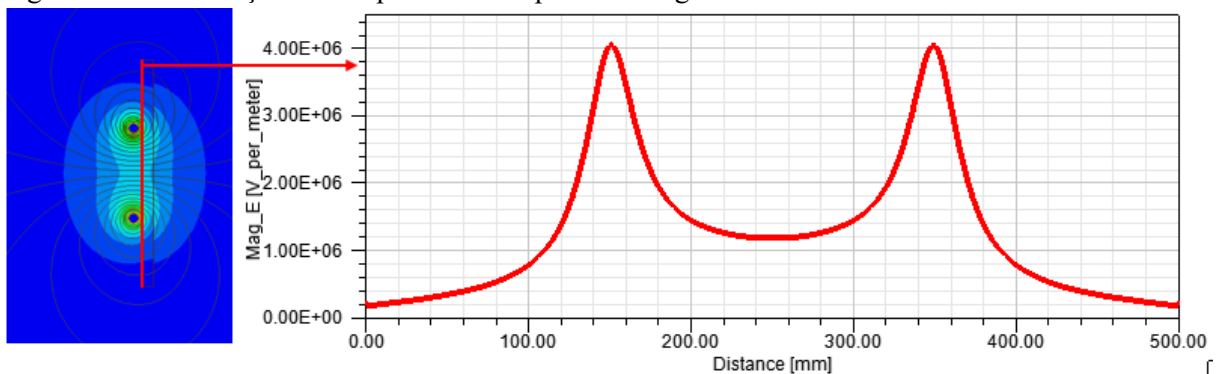
Figura 15 - Distribuição do campo elétrico e linhas equipotenciais de tensão modelo. Detalhe para a linha de provável ruptura superficial no isolante.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A distribuição dos valores da amplitude do campo elétrico na linha de provável ruptura é mostrada na Figura 16. Neste caso, é possível perceber o máximo campo elétrico não está em uma das extremidades da linha de análise, e sim, na superfície do isolante de fixação mais próxima dos eletrodos.

Figura 16 - Distribuição de campo elétrico superficial na geometria analisada.



Fonte: Elaborado pelo autor.

2.5.1.2 Algoritmo de cálculo do método *cumulative stress*

O método *cumulative stress* tem o potencial de determinar a margem de segurança de qualquer configuração de isolamento através da informação de distribuição de tensão e definição da linha de menor suportabilidade elétrica. Os valores de tensão e distância da linha de provável ruptura são analisados, gerando um valor de campo elétrico para cada ponto desta linha. Depois, conforme a construção do método, é necessária a ordenação dos valores de campo elétrico em amplitude decrescente para comparação com os valores da curva de suportabilidade limite com característica exponencial decrescente (Prevost, 2009).

Segundo esta metodologia, para definir o estresse elétrico cumulativo, inicialmente deve ser localizado o segmento de máximo campo elétrico da linha de provável ruptura, o qual é calculado com a diferença da tensão entre dois pontos consecutivos. Após, calcula-se o máximo campo elétrico com 2 segmentos da linha, imediatamente próximo à esquerda e à direita do ponto inicial. No próximo passo, é calculado o máximo campo elétrico para 3 segmentos da linha, sempre buscando localizar o maior estresse elétrico imediatamente inferior ao último localizado. Este procedimento é iterativo e é estendido para ambas as direções até atingir o tamanho completo da linha de provável ruptura. A cada iteração o tamanho do segmento da linha analisado aumenta e os máximos campos elétricos são ordenados em ordem decrescente. Para definir o valor numérico da margem de segurança, estes valores obtidos são comparados com a curva limite de suportabilidade dielétrica do material definida previamente.

Será elaborado um exemplo utilizando valores numéricos, adaptando da literatura (Nelson, 1994). Considerando uma determinada configuração de isolamento, a distribuição de tensão na linha de provável ruptura e as posições são exportados, preenchendo as linhas iniciais da Tabela 1. Para completar a Tabela 1, calcula-se o campo elétrico de todos os segmentos do caminho para localização do ponto com o máximo estresse elétrico inicial.

Tabela 1 - Dados exportados de uma linha de provável ruptura do exemplo.

| Distância [mm] | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|------------------------|----------|----------|----------|----------|-------------|----------|----------|----------|
| Tensão [kV] | 5,3 | 16,5 | 29,7 | 47,4 | 73,4 | 96,3 | 109,9 | 118,5 |
| Campo elétrico [kV/mm] | | 11,3 | 13,1 | 17,7 | 26,0 | 22,9 | 13,65 | 8,6 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

O máximo campo elétrico de 26k,0 V/mm foi localizado no segmento entre o ponto 4 e 5. Com a localização deste ponto inicial de máximo campo elétrico, o algoritmo analisa todos os segmentos dividindo a diferença de potencial pela distância entre os pontos, aumentando o tamanho do segmento de linha analisado a cada iteração. O número total de pontos com o cálculo do estresse elétrico é igual ao número de pontos de tensão obtidos na linha de provável ruptura diminuído de 1. Busca-se sempre a direção do maior estresse elétrico. A Tabela 2 foi elaborada para demonstrar graficamente o algoritmo do método *cumulative stress* e seu processo iterativo.

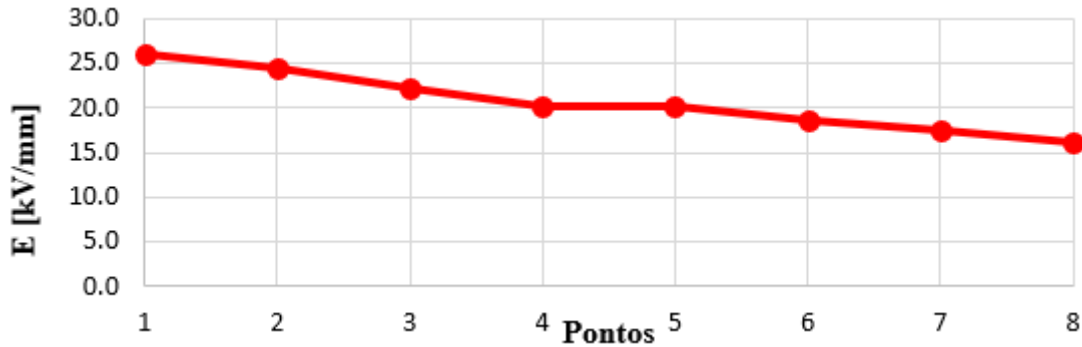
Tabela 2 - Representação do algoritmo do método *cumulative stress* completo.

| Distância [mm] | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|--|-----|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|
| Tensão [kV] | 5,3 | 16,5 | 29,7 | 47,4 | 73,4 | 96,3 | 109,9 | 118,5 |
| Tamanho do caminho: | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | |
| 1 segmento Campo elétrico [kV/mm] | | | | 26,0 | | | | |
| 2 segmentos Campo elétrico [kV/mm] | | | 21,85 | 24,45 | | | | |
| 3 segmentos Campo elétrico [kV/mm] | | | 22,2 | | 20,83 | | | |
| 4 segmentos Campo elétrico [kV/mm] | | 19,95 | | | 20,05 | | | |
| 5 segmentos Campo elétrico [kV/mm] | | 18,68 | | | | | 17,76 | |
| 6 segmentos Campo elétrico [kV/mm] | | 17,43 | | | | | 17,0 | |
| 7 segmentos Campo elétrico [kV/mm] | | | | | | | 16,17 | |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os máximos campos elétricos calculados para cada um dos segmentos do tamanho 1 ao 7, conforme indicados em vermelho na Tabela 2, e dispostos na ordem decrescente conforme Figura 17.

Figura 17 - Campos elétricos máximos da configuração analisada.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A metodologia proposta neste trabalho para projeto dielétrico de transformadores, baseada na utilização do método *cumulative stress*, pode ser definida sequencialmente nos passos enumerados a seguir:

Passo 1: Define-se a geometria da configuração a ser analisada;

Passo 2: Define-se as condições de contorno e características dos materiais;

Passo 3: Realiza-se a simulação numérica computacional para obtenção da distribuição de tensão e mapeamento do campo elétrico;

Passo 4: Com base no mapeamento do campo elétrico, é traçada linha de menor suportabilidade dielétrica da configuração, ou seja, caminho de provável ruptura elétrica;

Passo 5: Com a linha traçada, exporta-se para um software externo os valores de tensão e distância para cálculo do campo elétrico máximo para todos os tamanhos de segmentos da linha de menor suportabilidade;

Passo 6: Com a utilização de um software é possível analisar os resultados dos valores de campo elétrico cumulativo para todos os tamanhos de segmentos da linha de provável ruptura e, com o método *cumulative stress*, reordenar os valores calculados na ordem decrescente. Depois, é feita a comparação destes valores resultantes de campo elétrico reordenados, mostrados na Figura 17, com a curva exponencial de suportabilidade padrão de cada configuração de eletrodo. A razão entre os resultados obtidos na análise e a curva de máximo estresse elétrico determina a margem de segurança da configuração.

2.5.2 Suportabilidade dielétrica - Análise estatística

A margem de segurança é definida comparando a amplitude do estresse elétrico cumulativo (obtido no caminho de provável ruptura) com o valor limite definido para a configuração correspondente. Estes valores máximos de campo elétrico foram definidos compilando uma grande quantidade de dados de ensaios de eletrodos com sistemas de isolamento de características específicas (Prevost, 2009). O tratamento destes dados é realizado com a distribuição de *Weibull* (Tschudi D., Heinzig zig P., 2009). A função da densidade da probabilidade de *Weibull* é dada conforme Equação (16).

$$f(V, \alpha, \beta) = \frac{\alpha}{\beta^\alpha} V^{\alpha-1} e^{-\left(\frac{V}{\beta}\right)^\alpha} \quad (16)$$

onde:

$f(V, \alpha, \beta)$: função da densidade da probabilidade de *Weibull*;

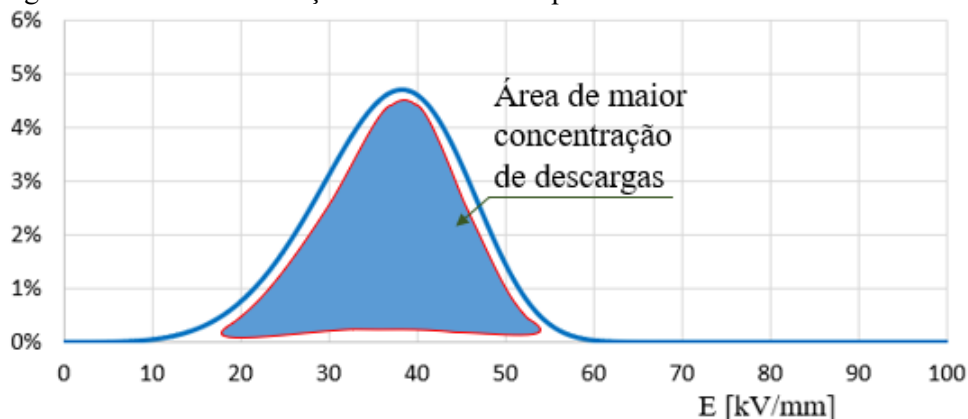
V : é o valor da tensão em Volts que foi aplicada às amostras;

α : parâmetro de escala da função de *Weibull*;

β : parâmetro de forma da função de *Weibull*.

Utilizando os parâmetros $\alpha = 5$ e $\beta = 40$ é representada a função da densidade de probabilidade de *Weibull* para uma dada configuração de distância entre eletrodos e o conseqüente campo elétrico necessário para a ruptura desta configuração, conforme Figura 18. Para esta configuração, a distribuição do campo elétrico necessário para a ruptura dielétrica se concentra em uma região de amplitude entre 20 e 50 kV/mm.

Figura 18 - Gráfico da função da densidade da probabilidade de *Weibull*.

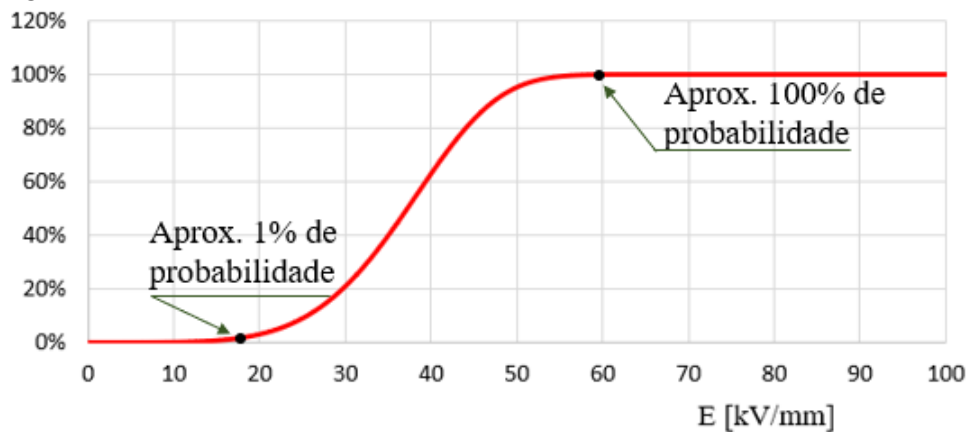


Fonte: Adaptado pelo autor de (Tschudi D., Heinzig zig P., 2009).

Dada a função de densidade da probabilidade, é necessário considerar a distribuição acumulativa de *Weibull* para definir a probabilidade absoluta de falha dielétrica em relação ao campo elétrico aplicado na configuração. A probabilidade acumulativa é definida pela Equação (17) e é mostrada graficamente na Figura 19.

$$F(V, \alpha, \beta) = 1 - e^{-\left(\frac{V}{B}\right)^\alpha} \quad (17)$$

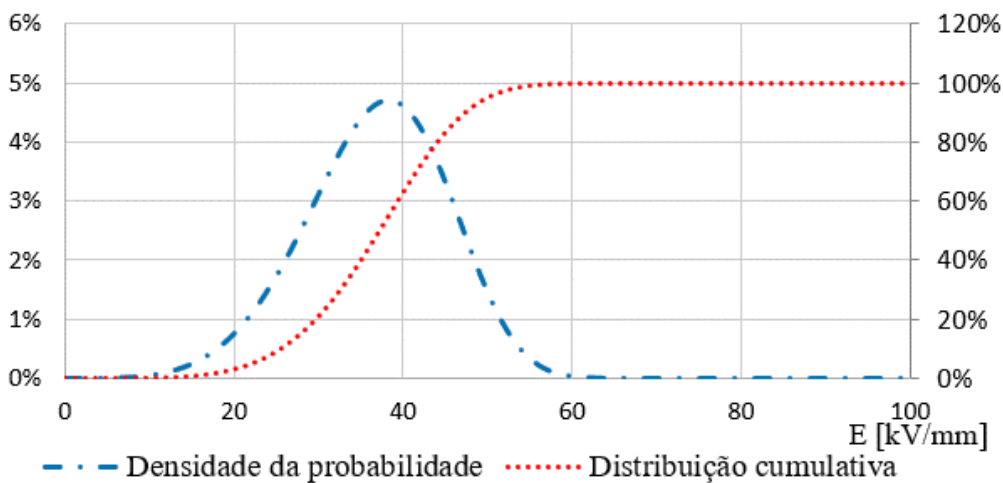
Figura 19 - Gráfico da função da distribuição cumulativa de *Weibull*.



Fonte: Adaptado pelo autor de (Tschudi D., Heinzig zig P., 2009).

Para uma melhor visualização da função da densidade e da função cumulativa da probabilidade de falha dielétrica, as duas grandezas foram plotadas simultaneamente no gráfico da Figura 20.

Figura 20 - Gráfico da função da densidade da probabilidade e da função da distribuição cumulativa de *Weibull*.



Fonte: Adaptado pelo autor de (Tschudi D., Heinzig zig P., 2009).

Utilizando a função cumulativa da probabilidade de *Weibull*, a Equação (17) pode ser reescrita simplificadamente em termos de probabilidade em função da tensão, conforme Equação (18). Isolando o termo relacionado à tensão, é possível definir o valor de estresse elétrico que pode ser aplicado à configuração para determinada probabilidade de falha, conforme Equação (19).

$$P = 1 - e^{-\left(\frac{V}{\beta}\right)^\alpha} \quad (18)$$

$$V = \alpha (-\ln(1 - P))^{\frac{1}{\beta}} \quad (19)$$

Com a Equação (19) totalmente definida é possível definir o valor de V_0 , ou seja, o valor de tensão que determina 0 % de probabilidade de ruptura elétrica. Entretanto, o parâmetro V_0 é um valor teórico e, conforme equação exponencial apresentada, pode resultar em um valor de tensão bastante baixo e totalmente inviável do ponto de vista de custo benefício de fabricação de equipamentos elétricos. Em função do comportamento exponencial desta curva, definiu-se o valor de probabilidade de falha de 1% como parâmetro de referência do projeto dielétrico, resolvendo a Equação (20).

$$V_1 = \alpha (-\ln(1 - P))^{\frac{1}{\beta}} \text{ com } P = 0,01 \quad (20)$$

Com base nas equações de distribuição de *Weibull* foram elaboradas as curvas limites de suportabilidade da *Weidmann* (Prevost, 2006). Estas curvas foram levantadas com a compilação de um grande número de dados e indicam o máximo campo elétrico para uma probabilidade de falha de 1%. São definidas de acordo com o tipo de isolamento e tamanho do duto de óleo da geometria do eletrodo analisado, obedecendo uma tendência exponencial de amplitude $E_{m\acute{a}x}$ em função do tamanho do duto, conforme definido pela Equação (21).

$$E_{m\acute{a}x}(d) = A * d^{-B} \quad (21)$$

onde:

$E_{m\acute{a}x}(d)$: máximo campo elétrico suportável pelo duto de determinado tamanho;

d : tamanho do duto sob avaliação;

A : campo elétrico suportado pela configuração em um duto de 1 mm $E_{m\acute{a}x}(1 \text{ mm})$;

B : fator exponencial da equação de suportabilidade limite.

Nesta análise, resalta-se que para cada configuração de eletrodo da parte ativa, há uma curva limite de suportabilidade dielétrica correspondente. As curvas mais utilizadas para o projeto dielétrico de eletrodos, considerando o óleo isolante mineral novo (Kulkarni, S. V.; Khaparde, S. A., 2004), são descritas a seguir:

- Para campo elétrico não uniforme, normalmente em eletrodo com raio minimizado;

$$E_{m\acute{a}x}(d) = 17,5 * d^{-0,37} \quad (22)$$

- Para campo elétrico uniforme, normalmente em dutos de óleo entre isolantes ou entre os enrolamentos;

$$E_{m\acute{a}x}(d) = 21 * d^{-0,37} \quad (23)$$

- Para campo elétrico superficial de isolantes (*creepage*), normalmente em cilindros isolantes, elementos de fixação não metálicos e outras partes da parte ativa;

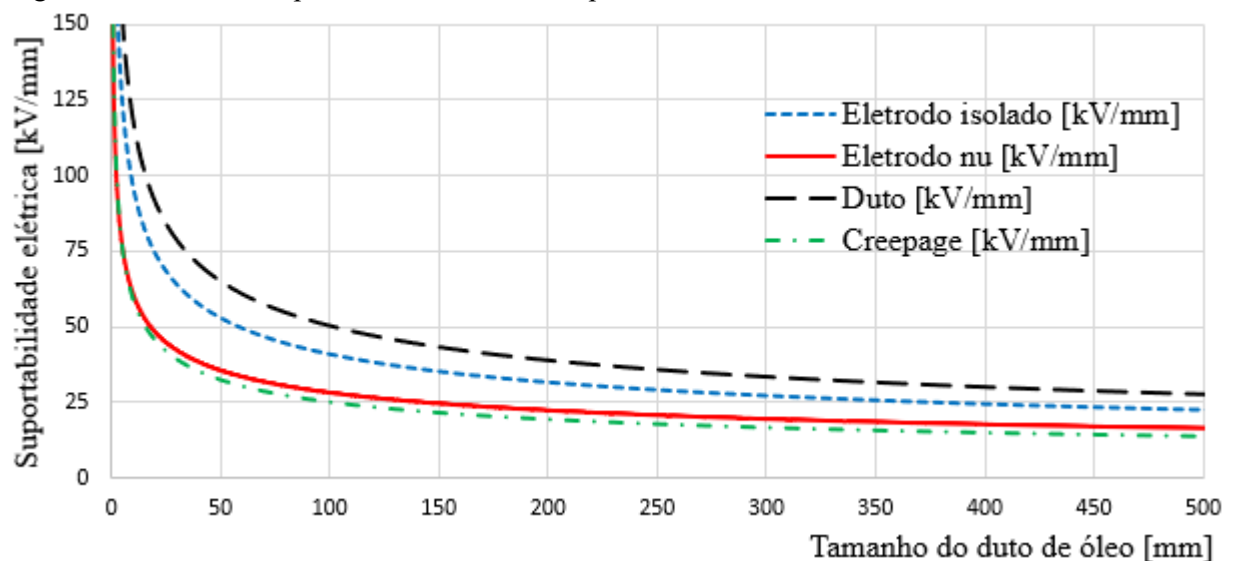
$$E_{m\acute{a}x}(d) = 10,75 * d^{-0,37} \quad (24)$$

- Para campo elétrico em condutores sem isolamento de papel ou algum composto sólido, normalmente em barramentos nus ou ferragens do tanque;

$$E_{m\acute{a}x}(d) = 13,1 * d^{-0,334} \quad (25)$$

Para possibilitar uma comparação direta entre a suportabilidade elétrica de cada uma das curvas características para o óleo mineral, elaborou-se um gráfico com todas as curvas, conforme Figura 21.

Figura 21 - Gráfico comparativo das curvas de suportabilidade do óleo isolante mineral novo.



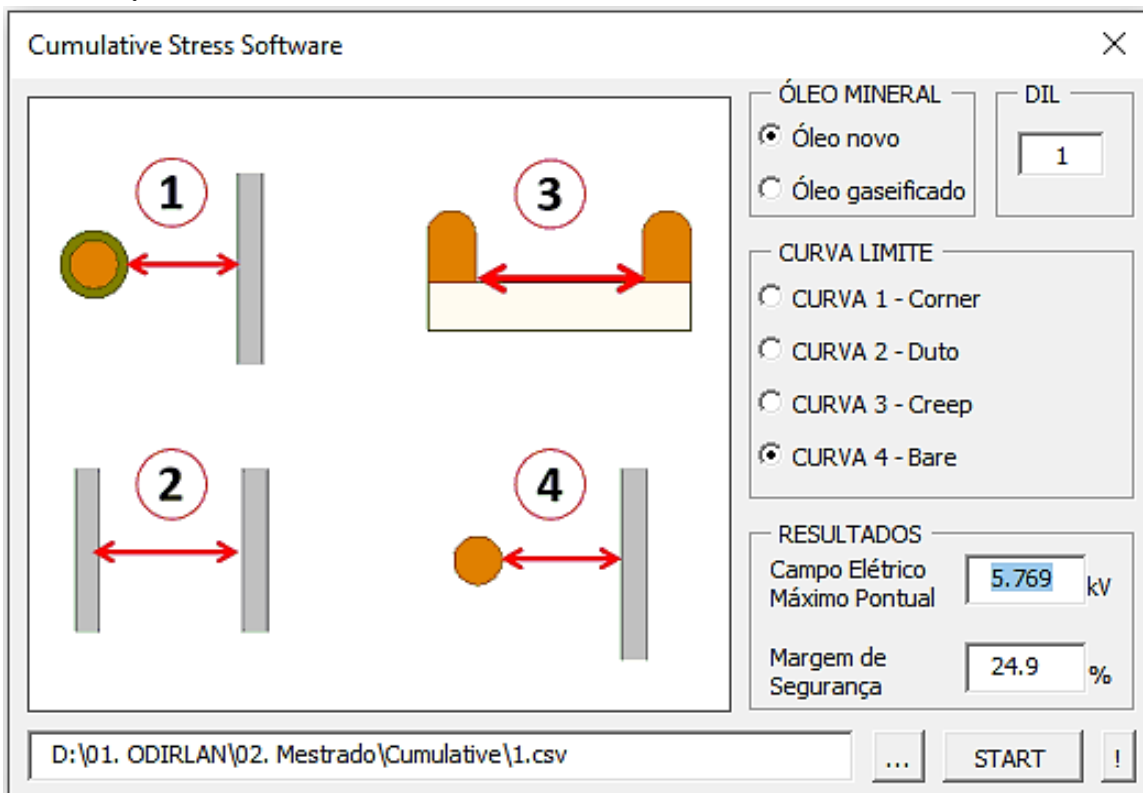
Fonte: Elaborado pelo autor.

Para transformadores preenchidos com óleo vegetal ou com óleo mineral velho, conhecido na literatura como óleo gaseificado, devem ser determinados os coeficientes das curvas exponenciais de suportabilidade elétrica de acordo com a característica do fluido isolante correspondente (Prevost, 2006). A metodologia de análise estatística baseada na distribuição de *Weibull* pode ser utilizada para qualquer meio dielétrico isolante, incluindo materiais isolantes sólidos impregnados, (L. Cheim, D. Platts, T. Prevost, S. Xu, 2012).

2.5.3 Software para implementação da metodologia

Com base nesta metodologia foi desenvolvido um software para avaliar a margem de segurança de todos os casos exemplos abordados. Este software foi construído na linguagem *Visual Basic for Applications* (VBA), aplicado sobre recursos do software Microsoft Excel. Para a interface de entrada e saída dos dados (retorno dos resultados) foi desenvolvida uma interface com os principais parâmetros da análise, conforme mostrado na Figura 22.

Figura 22 - Interface do software desenvolvido em VBA para aplicar o método e analisar os resultados das simulações desenvolvidas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Utilizando este software é possível importar os dados com os resultados da distribuição de tensão através de um arquivo gerado por um software de análise numérica, por exemplo. O software faz a leitura destes dados e aplica a metodologia proposta neste trabalho, considerando as condições de contorno pré-determinadas com as características da configuração de isolamento. Com isso obtém-se o valor do máximo campo elétrico da configuração e a margem de segurança correspondente.

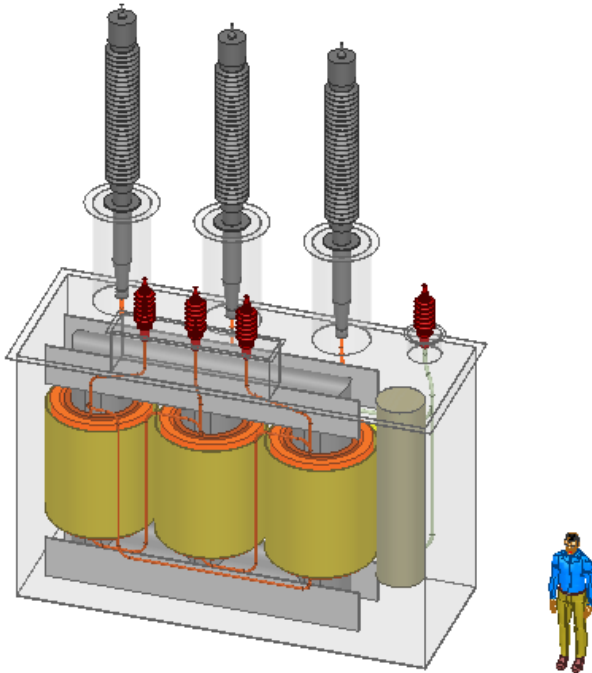
3 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA - ESTUDO DE CASO

Neste capítulo será aplicada e validada a metodologia proposta neste trabalho considerando um modelo de transformador trifásico teórico de 120 MVA, com tensões de operação de 230 kV na alta tensão e 34 kV na baixa tensão. A distribuição da tensão em cada ponto da parte ativa do transformador é determinada previamente via cálculo analítico.

3.1 MODELO DO TRANSFORMADOR

Para este trabalho, um transformador foi modelado com dimensões e características ilustrativas para demonstrar os principais pontos de análise com a metodologia apresentada. Para isto foram desprezados os radiadores e elementos periféricos externos que não têm influência direta na análise dielétrica da parte ativa. Este equipamento tem dimensões aproximadas de 2,0 x 5,0 x 3,5 metros (largura, comprimento, altura), com um volume de óleo de aproximadamente 32 mil litros, dados característicos a um equipamento de 120 MVA. O transformador completamente montado e operativo tem um peso total de aproximadamente 120 toneladas. Na Figura 23 é mostrada uma visualização interna do equipamento com o tanque transparente com a perspectiva do lado de baixa tensão.

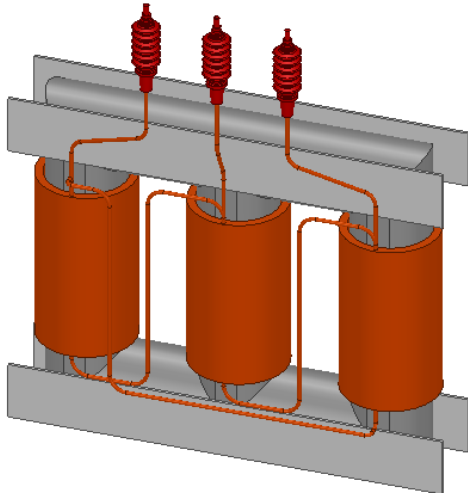
Figura 23 - Visualização interna do equipamento do lado de baixa tensão.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para uma visualização com mais detalhes do núcleo, ferragens da parte ativa, enrolamentos da baixa tensão e do esquema de ligação (baixa tensão com ligação em delta) é mostrada a Figura 24.

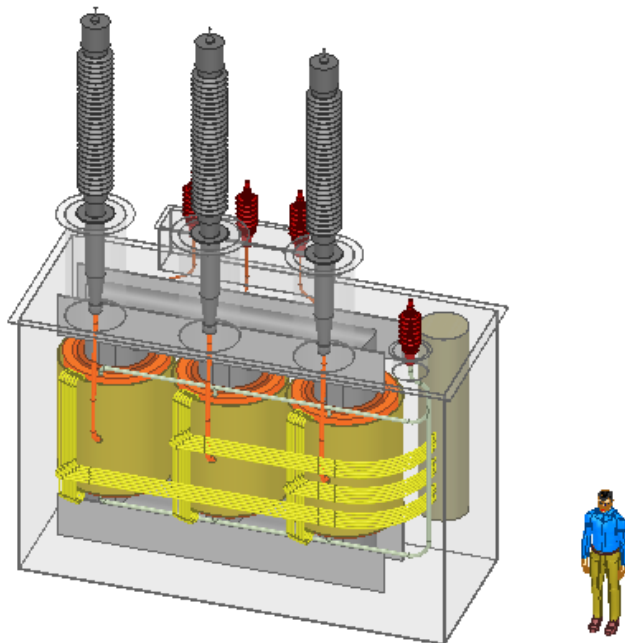
Figura 24 - Visualização interna detalhada do lado de baixa tensão.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Do lado de alta tensão pode-se destacar os cabos de ligação das buchas com os enrolamentos da alta tensão, o próprio tanque e os elementos de ligação entre os enrolamentos e comutador, conforme mostrado na Figura 25.

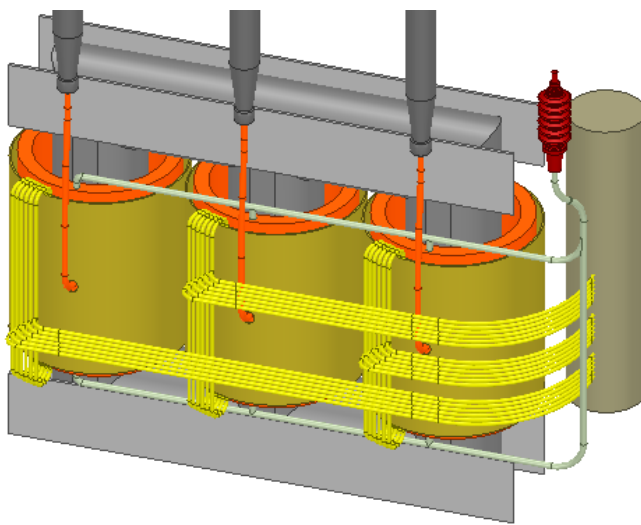
Figura 25 - Visualização interna do equipamento do lado de alta tensão.



Fonte: Elaborado pelo autor.

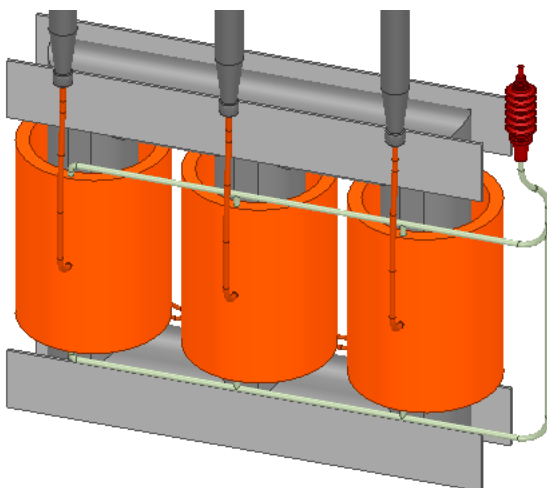
O lado de alta tensão apresenta uma maior complexidade de projeto e dimensionamento elétrico devido à amplitude da tensão nestes pontos e pela quantidade de elementos de conexão para a ligação do enrolamento de regulação até o comutador. Suprimiu-se o tanque e os enrolamentos de baixa tensão para exibir o lado de alta tensão do equipamento, conforme Figura 26. A ligação em estrela do lado da alta tensão do transformador com entrada central no enrolamento é mostrada na Figura 27. O neutro é disponibilizado externamente (neutro acessível) por uma bucha extra no tanque do transformador.

Figura 26 - Detalhe das conexões do lado da alta tensão do equipamento.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 27 - Detalhe da conexão da alta tensão e do neutro do equipamento.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2 DIMENSIONAMENTO ELÉTRICO DO EQUIPAMENTO

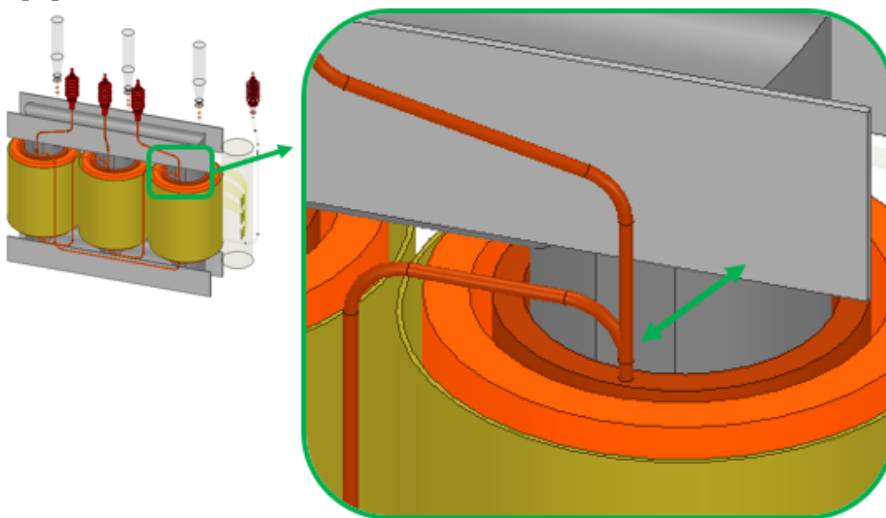
Utilizando os modelos apresentados no item 3.1, será aplicada a metodologia proposta neste trabalho com o objetivo de otimização do volume total da parte ativa, garantindo a margem de segurança adequada. O projeto dielétrico dos elementos potencializados da parte ativa determina diretamente o tamanho do tanque do transformador.

O dimensionamento elétrico será realizado considerando o nível de tensão definido conforme norma vigente para transformadores desta classe de tensão 230kV (ABNT_NBR_5356-3, 2007). A tensão aplicada terá uma amplitude de 460kV para o enrolamento de alta tensão 230kV. Para o enrolamento de baixa tensão, com a tensão nominal de 34,5kV, a norma não exige o ensaio de tensão induzida. Neste caso a norma estabelece que, para um enrolamento de 34,5kV, deve ser aplicado um impulso atmosférico de 200kV. Utilizando o fator DIL para relacionar este nível de impulso atmosférico com um sinal de frequência industrial, conforme abordado no item 2.2.2, define-se que a amplitude da tensão senoidal que será aplicada no enrolamento de baixa tensão será de 75 kV.

3.2.1 Saídas de enrolamentos

Destaca-se as saídas dos condutores de ligação da baixa tensão posicionadas na cabeceira superior e inferior de cada um dos enrolamentos, conforme Figura 28.

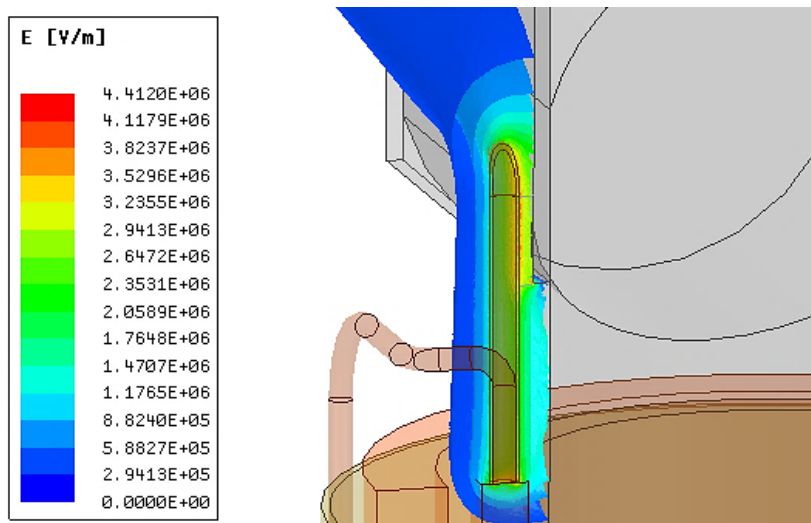
Figura 28 - Saída do enrolamento de baixa tensão contra o núcleo e ferragens da parte ativa do equipamento.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Estes condutores, embora sejam da baixa tensão, estão próximos aos pontos aterrados da parte ativa e do núcleo devido ao posicionamento mais interno dos enrolamentos da baixa tensão no conjunto de cada fase. Para avaliar este ponto da ligação da baixa tensão mostrado na Figura 28, aplicou-se o potencial de tensão correspondente no cabo e avaliou-se o resultado do campo elétrico contra o núcleo e as ferragens da parte ativa, ambas com potencial nulo. Na Figura 29 é mostrado o resultado da simulação com a distribuição das superfícies equipotenciais do campo elétrico resultante da análise.

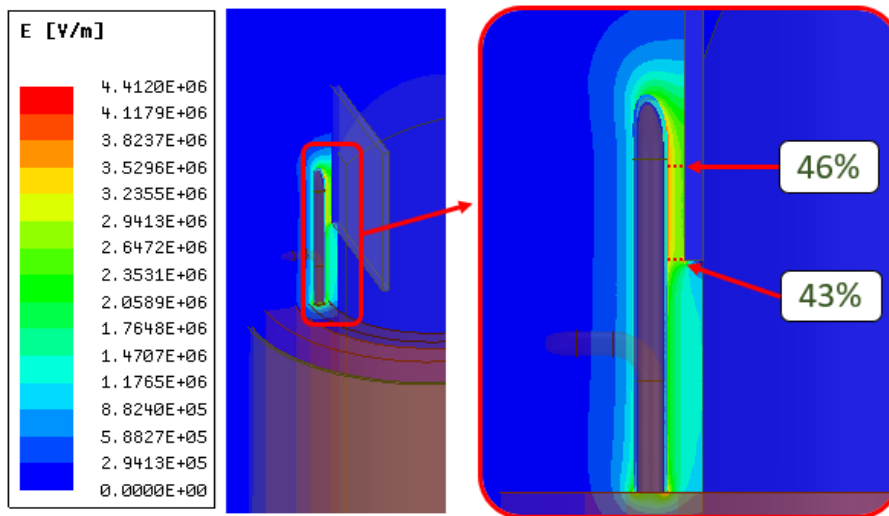
Figura 29 - Resultado do comportamento do campo elétrico da saída do enrolamento de baixa tensão contra o núcleo e ferragens da parte ativa.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Localiza-se o ponto de maior campo elétrico e, através de planos desenhados que coincidem com este ponto, são traçadas as linhas de provável ruptura para exportar os valores da tensão dos pontos desta linha. Com estes dados, a margem de segurança correspondente de cada uma das linhas traçadas é calculada aplicando a metodologia proposta. Os resultados da análise indicam que o dimensionamento elétrico destes pontos está adequado porque os valores da margem de segurança apresentam um nível satisfatório, conforme mostrado na Figura 30

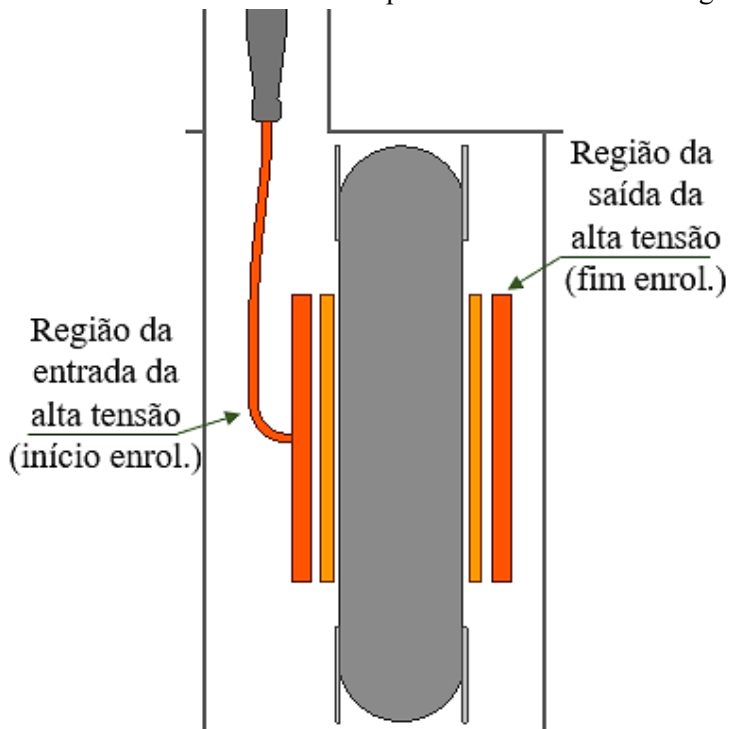
Figura 30 - Planos que interceptam o ponto de máximo campo elétrico para a definição das linhas de provável ruptura e as respectivas margens de segurança.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Nos enrolamentos de alta tensão, a maior exigência dielétrica está na linha de alta tensão do transformador, a qual interliga a bucha e a entrada central do enrolamento. A entrada central no enrolamento de alta tensão é utilizada para evitar a aproximação da linha (com elevado nível de tensão) do núcleo e ferragens da parte ativa, conforme Figura 31.

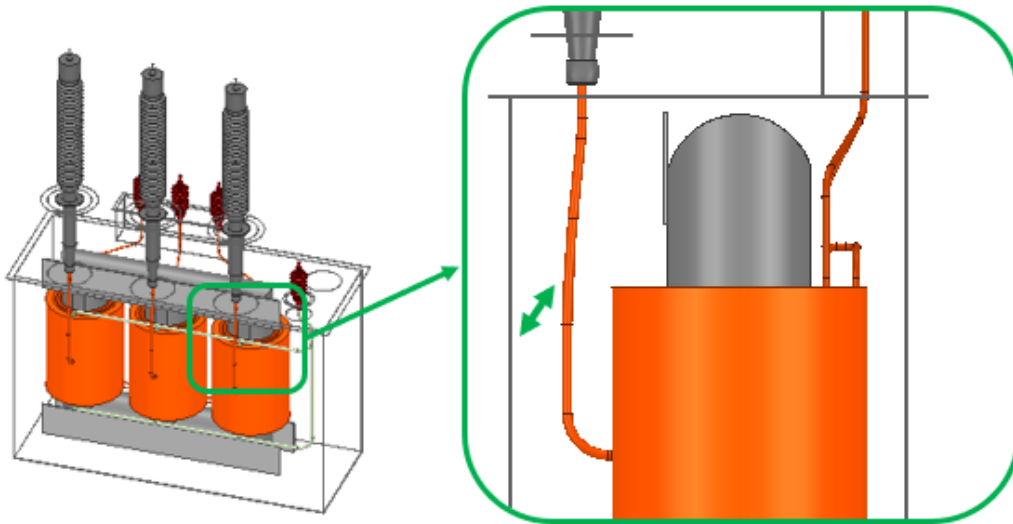
Figura 31 - Entrada central do enrolamento de alta tensão para diminuir o campo elétrico das extremidades dos enrolamentos próximas ao núcleo e ferragens.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Considerando esta condição, a avaliação da linha de alta tensão será realizada com o ponto de maior solicitação dielétrica contra o tanque do equipamento, conforme mostrado na Figura 32.

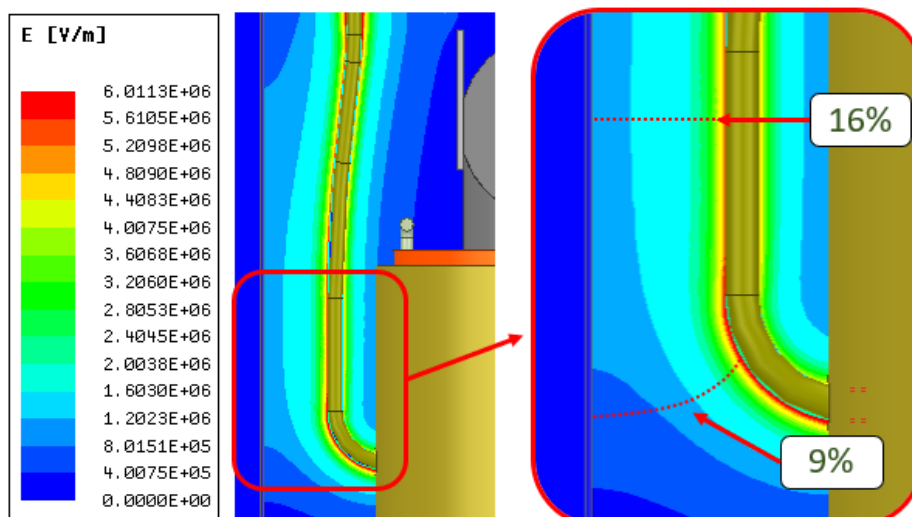
Figura 32 - Linha de alta tensão que interliga a bucha com o enrolamento da alta tensão com entrada central.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com o nível de tensão correspondente aplicado, o resultado da distribuição do campo elétrico nesta região com as respectivas margens de segurança é mostrado na Figura 33.

Figura 33 - Resultado da distribuição do campo elétrico na saída do enrolamento de alta tensão contra o tanque e respectivas margens de segurança.

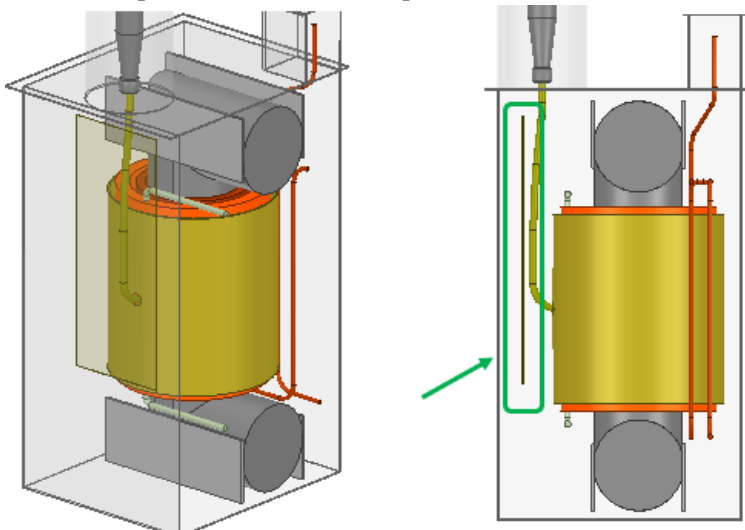


Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados expostos na Figura 33 mostram um valor mínimo de margem de segurança para este ponto do projeto de 9 %. Embora este valor seja positivo o que significa que a probabilidade de falha, segundo a distribuição de *Weibull*, ainda está abaixo de 1 %, é um valor que pode ser considerado crítico devido à característica totalmente artesanal do processo de fabricação de um transformador. Este processo, quase que totalmente manual de fabricação, aumenta as possibilidades de alterações dimensionais durante o processo fabril. Neste processo também podem haver falhas pontuais no fornecimento da matéria prima e defeitos impostos pela ferramentaria utilizada. No projeto de transformadores, normalmente, são utilizados valores de margem de segurança acima de 15% ou até 20%. Utiliza-se estes valores mínimos para que seja possível desenvolver um projeto com margens capazes de absorver qualquer irregularidade que possa ocorrer durante a fabricação sem comprometer a confiabilidade operacional do equipamento.

Para melhorar a margem de segurança desta configuração, conforme metodologia apresentada neste trabalho, em uma primeira configuração será utilizada a inserção de uma barreira no duto de óleo entre o condutor de entrada de alta tensão e o tanque. Com isso, este duto de óleo será subdividido em dutos menores, conforme mostrado na Figura 34, melhorando assim a suportabilidade dielétrica da configuração.

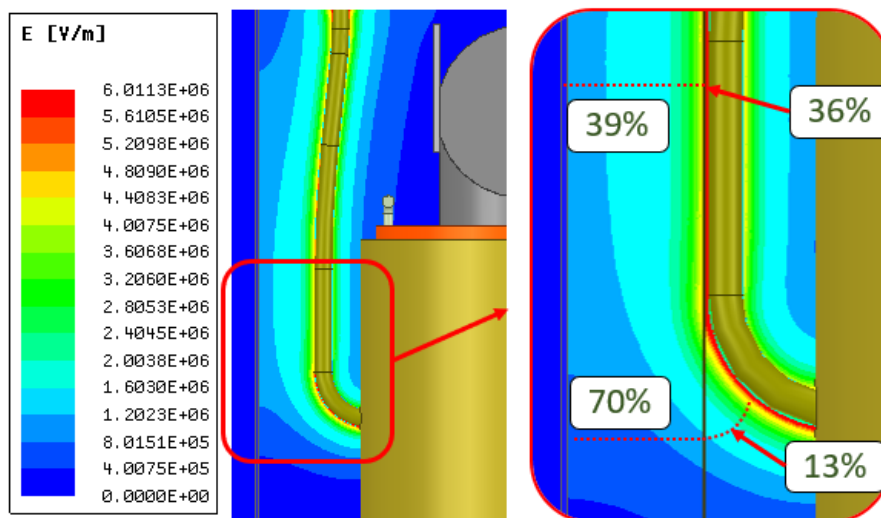
Figura 34 - Detalhe da barreira de material isolante inserida no duto de óleo entre o cabo de entrada de alta tensão potencializado e o tanque aterrado.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O resultado da distribuição do campo elétrico com esta nova configuração não apresenta variação significativa porque a distância entre eletrodos não foi alterada. Somente foi modificada a proporção do meio dielétrico entre os eletrodos com a inserção da barreira de material isolante com permissividade dielétrica diferente do óleo. A permissividade dielétrica relativa do óleo é de $\epsilon_r = 2,4$ e para o papel de $\epsilon_r = 3,2$. A avaliação numérica foi realizada e, como o duto de óleo de cada canal foi reduzido, a margem de segurança aumentou significativamente, conforme os resultados mostrados na Figura 35.

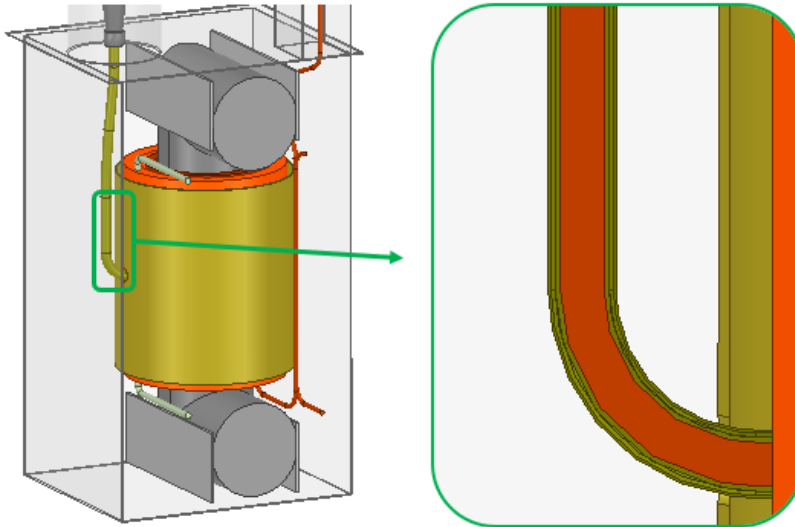
Figura 35 - Resultado do comportamento do campo elétrico da saída do enrolamento de alta tensão contra o tanque e a respectiva margem de segurança com a inserção de uma barreira isolante retilínea próxima ao condutor.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Avaliando os resultados expostos na Figura 35, é possível visualizar que a margem de segurança melhorou de um modo geral com a inserção da barreira. Entretanto, este procedimento não melhorou satisfatoriamente a amplitude da margem de segurança em todos os pontos do cabo de ligação. A curvatura da linha da entrada central do enrolamento gerou um duto de óleo relativamente grande e a margem de segurança neste ponto não apresentou um valor adequado para o projeto. Para um aumento da margem de segurança deste ponto da configuração, será aplicado um tubo de material isolante modelado exatamente no formato do condutor de alta tensão. Este procedimento garante que o tamanho do duto de óleo seja constante em toda a extensão da linha, conforme Figura 36.

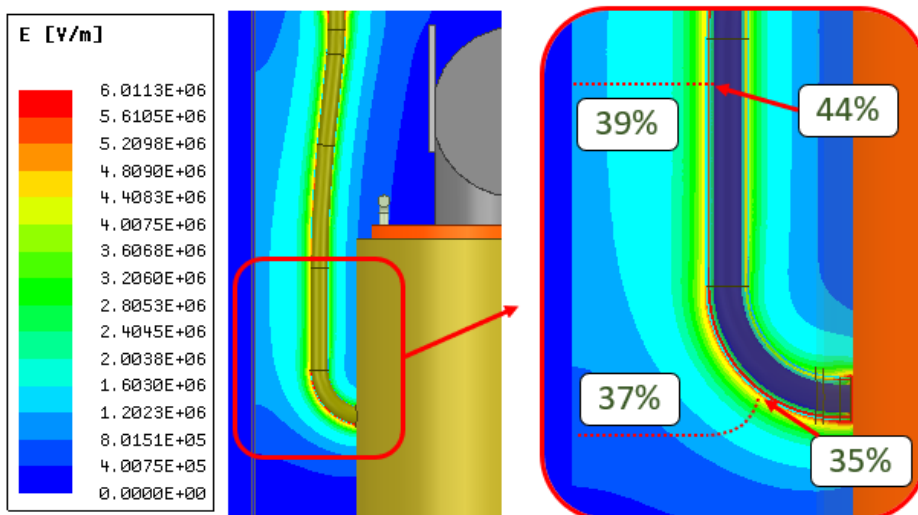
Figura 36 - Tubo isolante moldado sobre a linha de entrada de alta tensão.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com a utilização do tubo isolante sobre a linha, as margens de segurança dos caminhos mais críticos da nova configuração de isolamento apresentam-se conforme Figura 37. Os valores, com a utilização do tubo isolante, se mostraram muito mais equilibrados e com amplitudes adequadas para aplicação no projeto dielétrico de isolamento de elementos da parte ativa de transformadores.

Figura 37 - Resultado do comportamento do campo elétrico da saída do enrolamento de alta tensão contra o tanque e a respectiva margem de segurança com o tubo de material isolante moldado sobre toda a linha.

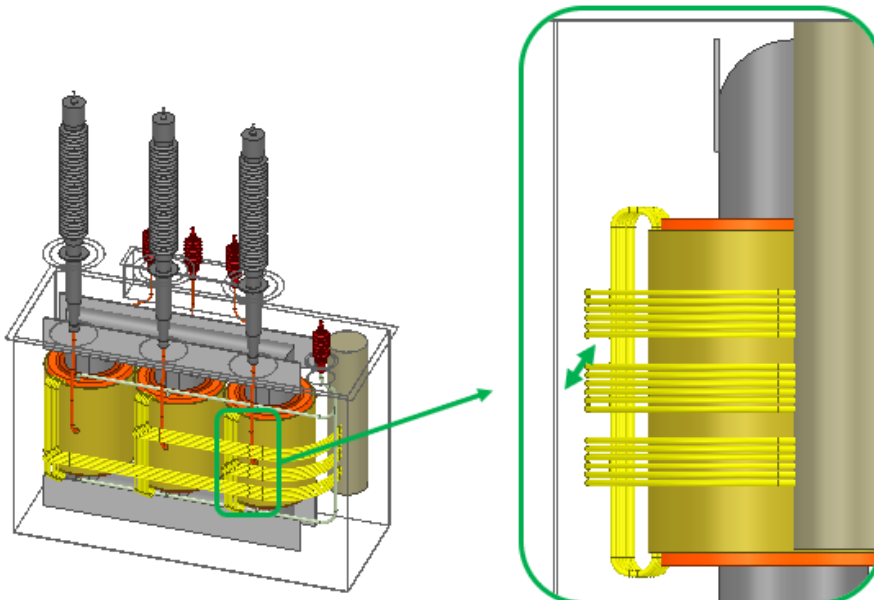


Fonte: Elaborado pelo autor.

A distância do cabo de saída da alta tensão até o tanque tem uma influência direta no tamanho do transformador, conforme pode ser visualizado na Figura 37. Qualquer otimização na distância de projeto entre o cabo da alta tensão e o tanque, desde que mantida a margem de segurança mínima adequada, proporciona uma redução direta do peso do equipamento. Em caso de necessidade de otimização da relação peso/potência do equipamento, pode se fazer uso de mais um tubo isolante moldado sobre a linha para aumentar ainda mais os valores da margem de segurança. Com isso seria possível reduzir a distância entre o tanque e a linha de alta tensão, diminuindo o tamanho e o peso final do equipamento, sem comprometer a margem de segurança mínima de projeto.

Além do cabo de saída do enrolamento de alta tensão posicionado próximo ao tanque, podem haver também os cabos de ligação dos enrolamentos de regulação numa condição de estresse elétrico contra o tanque do transformador. A ligação dos enrolamentos de regulação pode apresentar diferentes características e, com isso, diferentes geometrias potencializadas contra o tanque. No caso deste trabalho o enrolamento de regulação é do tipo hélice múltipla, resultando na conexão deste enrolamento até o comutador com um feixe de cabos potencializados (Yu Chao, Wang Xiangzhong, Xie Dexin, 2001), conforme Figura 38.

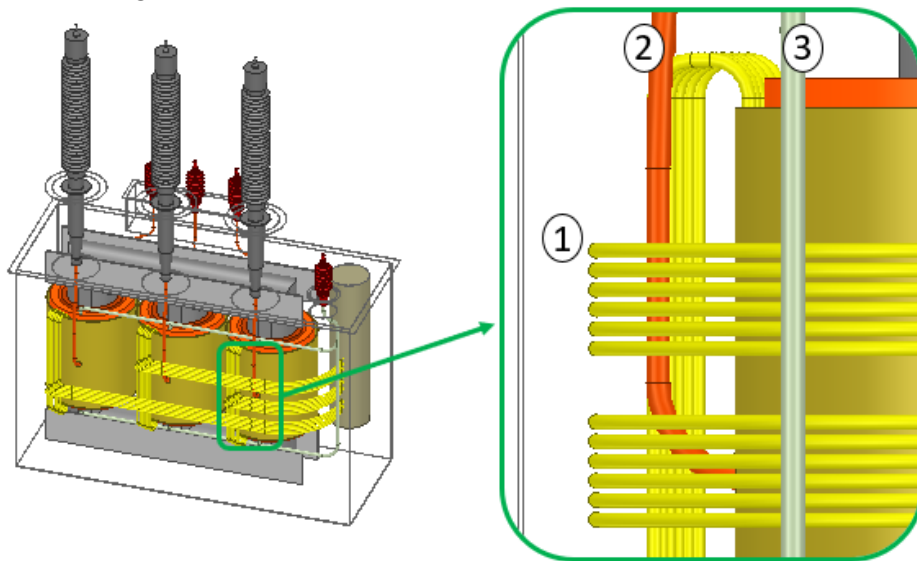
Figura 38 - Feixe de saída dos cabos do enrolamento de regulação do tipo hélice múltipla para ligação com o comutador.



Fonte: Elaborado pelo autor.

No caso de enrolamentos com regulação na alta tensão, a tensão que é aplicada a estes enrolamentos pode atingir a mesma amplitude que a do próprio enrolamento da alta tensão. Neste caso, calculou-se analiticamente que o potencial que é imposto aos cabos de regulação é de 360kV contra qualquer ponto de potencial nulo. Nestas condições, o modelo foi desenvolvido conforme Figura 39. O resultado da distribuição do campo elétrico com as linhas de provável ruptura e as margens de segurança correspondentes são apresentadas na Figura 40.

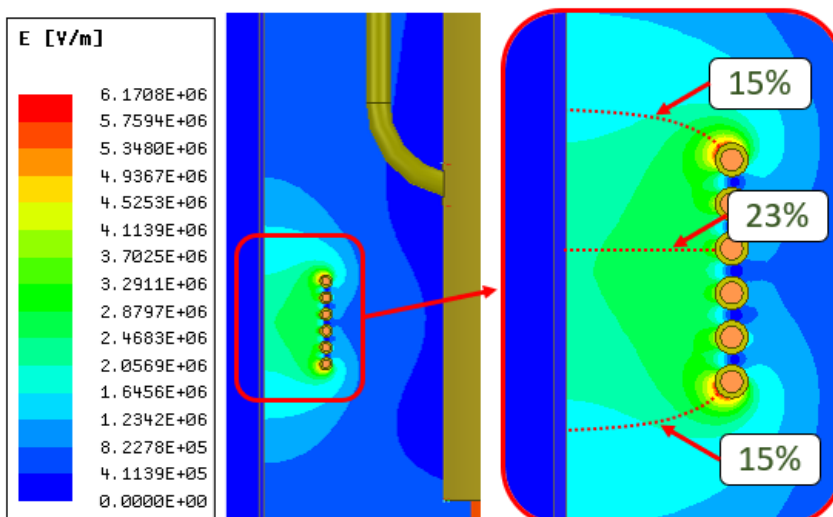
Figura 39 - Posicionamento dos cabos de ligação da regulação, linha de alta tensão e fechamento do neutro da ligação estrela da alta tensão.



- 1) Cabos de ligação do enrolamento de regulação;
- 2) Linha de alta tensão da entrada central no enrolamento;
- 3) Cabo do neutro da alta tensão.

Fonte: Elaborado pelo autor.

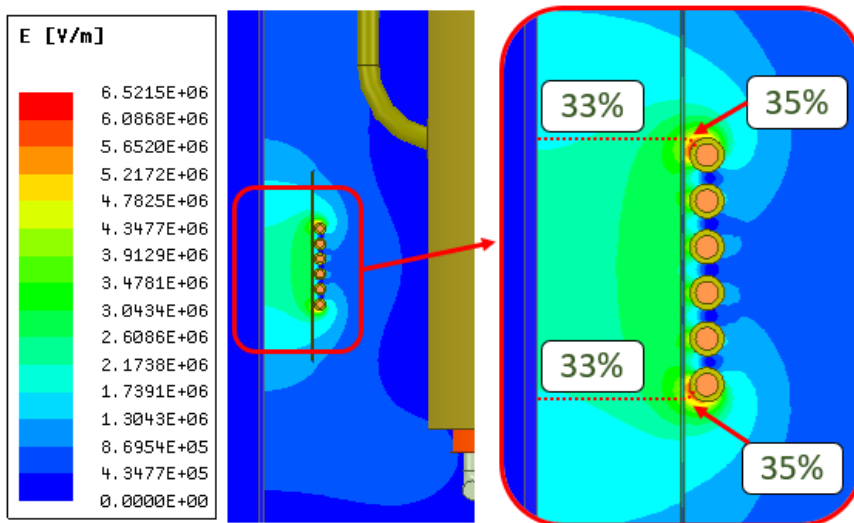
Figura 40 - Resultado do comportamento do campo elétrico considerando o feixe de cabos da ligação do enrolamento de regulação contra o tanque.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Como os resultados da margem de segurança desta análise apresentaram uma amplitude próxima ao limite inferior, o projeto será alterado para melhorar esta condição. Para isso será adicionada uma barreira entre os cabos da regulação e o tanque. Com esta intervenção os resultados da margem de segurança atingiram os valores mostrados na Figura 41. O posicionamento ótimo da barreira no duto de óleo entre os dois eletrodos que estabelece a máxima margem de segurança será abordado no item deste 3.4 trabalho.

Figura 41 - Resultado do comportamento do campo elétrico considerando uma barreira isolante entre o feixe de cabos da regulação e o tanque.

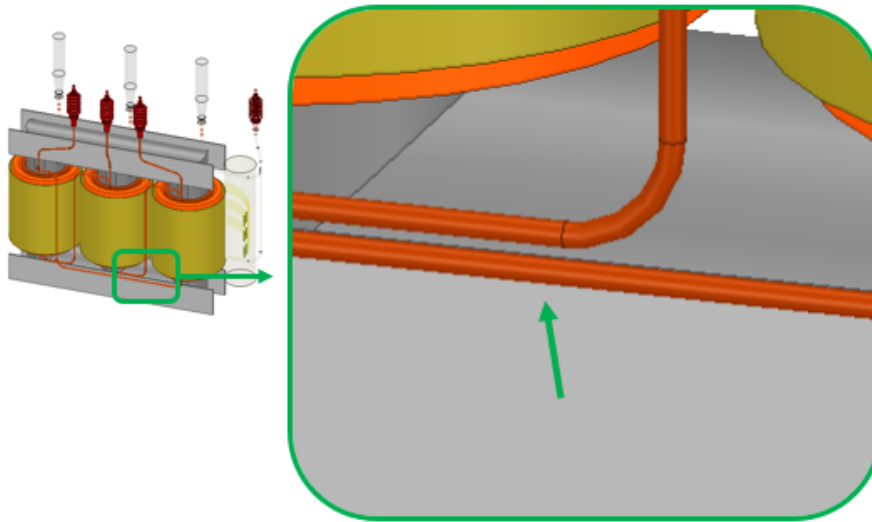


Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.2 Ligações dos enrolamentos

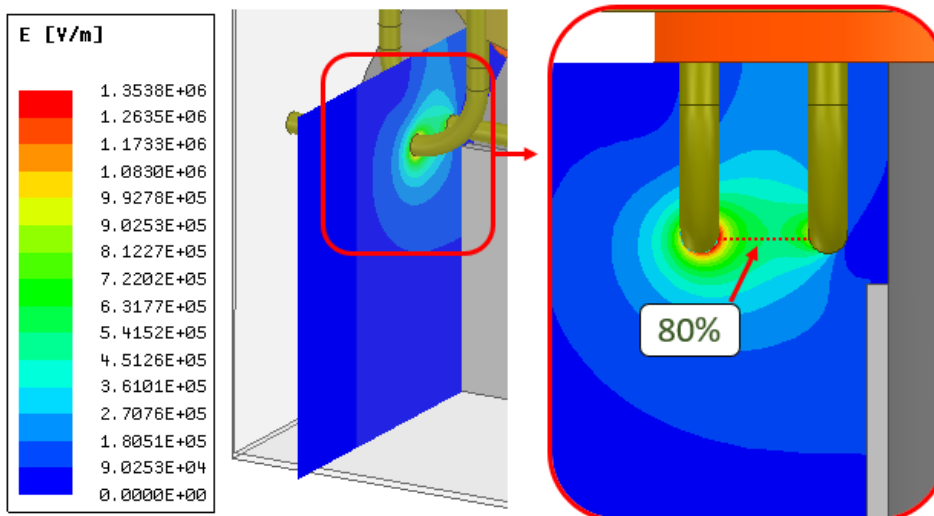
A ligação entre as fases dos enrolamentos de baixa tensão deste equipamento está posicionada bastante próxima, conforme Figura 42. Entretanto, mesmo na parte inferior onde há dois condutores posicionados praticamente justapostos, não há pontos de estresse elétrico elevado porque os níveis de tensão são bastante baixos. Aplicando a tensão correspondente na baixa tensão de 75kV e fazendo o estudo da distribuição do campo elétrico é possível determinar que a margem de segurança é bastante elevada na configuração proposta, conforme mostrado na Figura 43.

Figura 42 - Cabos da ligação da baixa tensão com diferença de potencial entre as fases do equipamento.



Fonte: Elaborado pelo autor.

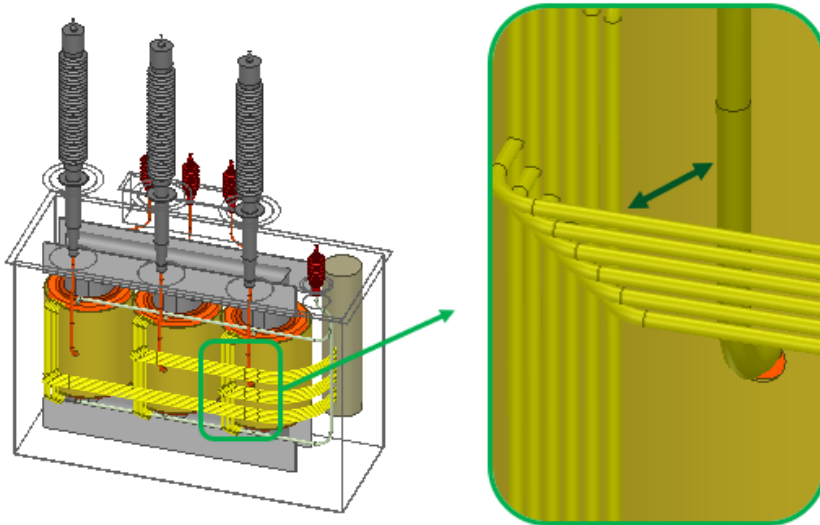
Figura 43 - Resultado da distribuição do campo elétrico nos cabos de ligação com diferença de potencial na parte inferior do enrolamento da baixa tensão



Fonte: Elaborado pelo autor

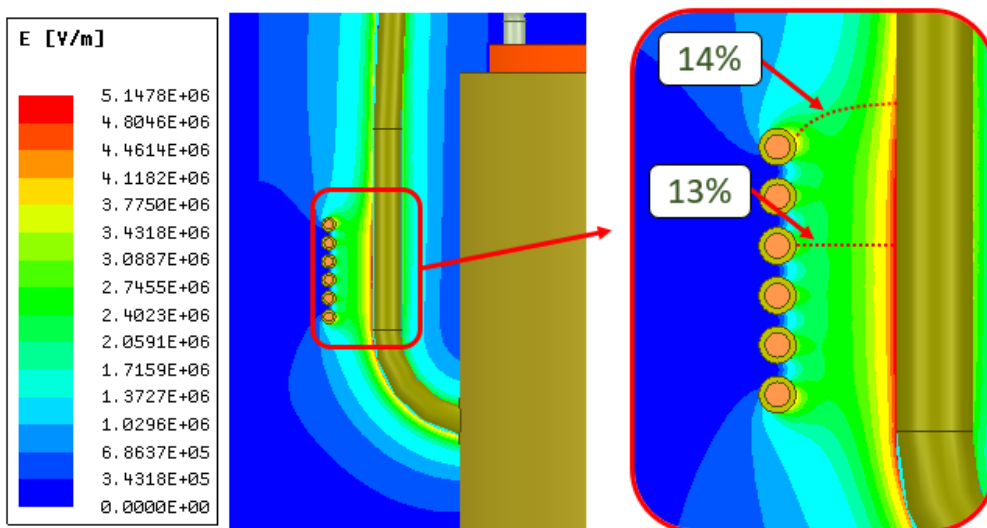
Na linha de entrada central do enrolamento de alta tensão há um ponto em que a mesma se posiciona relativamente próxima aos cabos de ligação da regulação, conforme Figura 44. O resultado da distribuição do campo elétrico nesta região e a conseqüente margem de segurança são mostrados na Figura 45.

Figura 44 - Feixes dos cabos de ligação do comutador próximos à entrada da linha de alta tensão.



Fonte: Elaborado pelo autor.

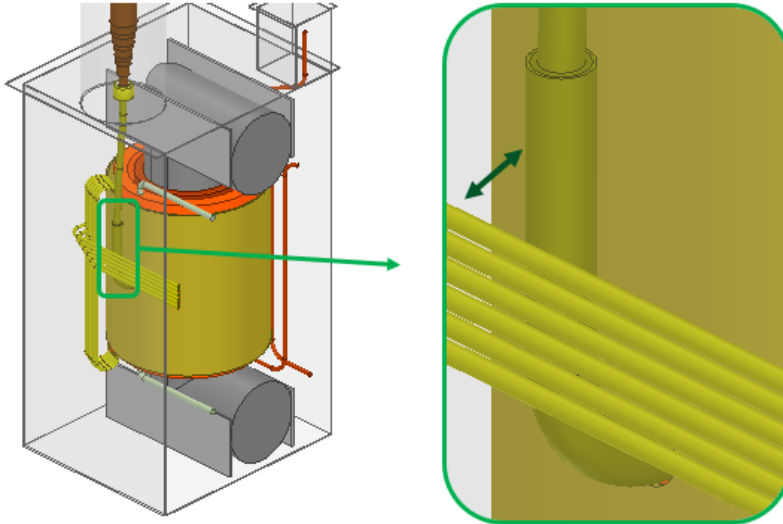
Figura 45 - Resultado do comportamento do campo elétrico nos cabos de ligação de regulação das fases com o comutador.



Fonte: Elaborado pelo autor.

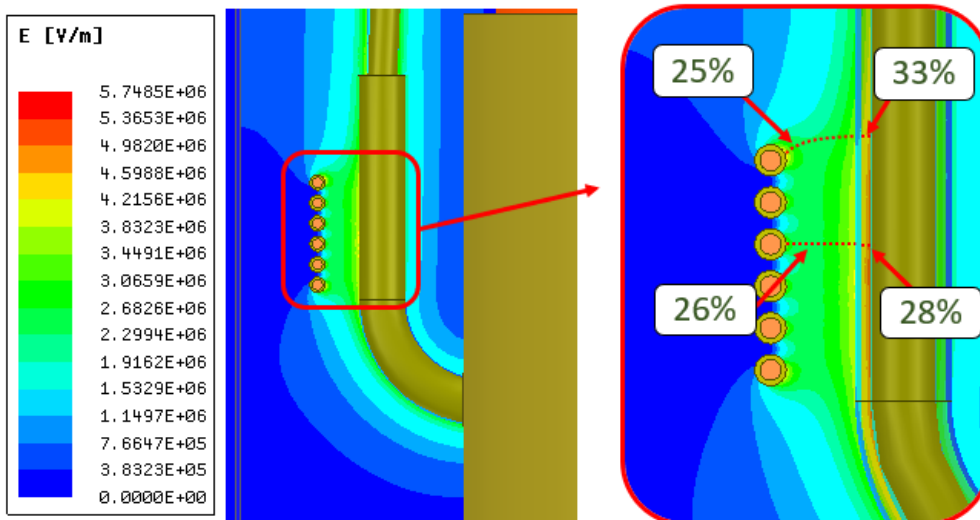
Avaliando os resultados obtidos, verifica-se que para obter uma margem de segurança adequada neste ponto será necessário inserir um segundo tubo de material isolante sobre a linha de alta tensão para controlar o campo elétrico neste ponto, conforme Figura 46. A distribuição do campo elétrico e a margem de segurança neste ponto com a utilização do cilindro extra sobre a linha é mostrada na Figura 47.

Figura 46 - Tubo extra na linha de alta tensão na região dos condutores de ligação.



Fonte: Elaborado pelo autor.

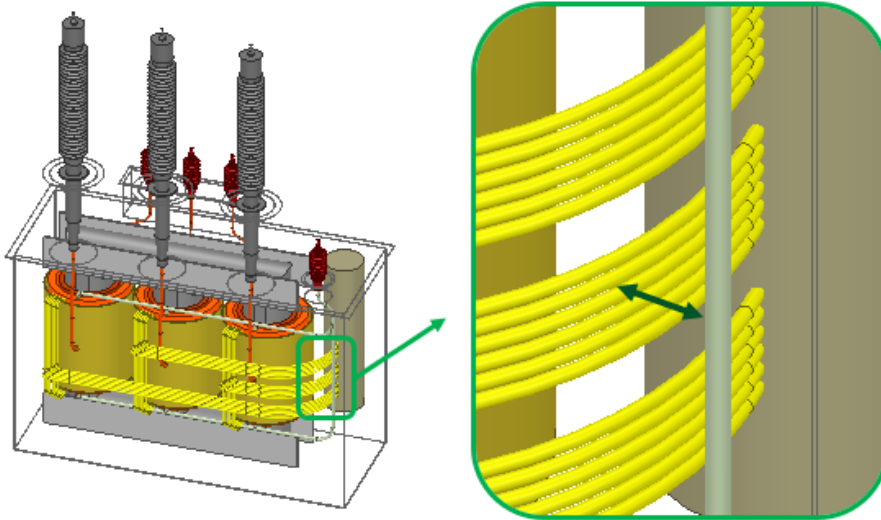
Figura 47 - Resultado do comportamento do campo nos cabos de ligação do comutador próximos à entrada da linha de alta tensão.



Fonte: Elaborado pelo autor.

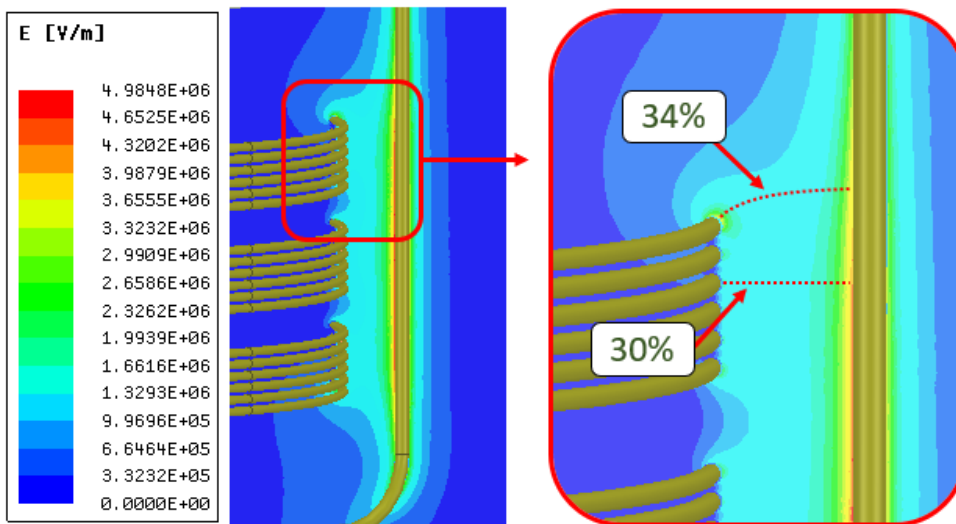
Um pouco mais afastado da região dos enrolamentos, há uma aproximação entre os cabos de ligação do comutador e o condutor de fechamento do neutro (conexão estrela da alta tensão), conforme mostrada na Figura 48. O resultado da distribuição do campo elétrico e as consequentes margens de segurança são mostradas na Figura 49.

Figura 48 - Feixes dos cabos de ligação do comutador próximos ao cabo de fechamento de neutro da ligação em estrela da alta tensão.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 49 - Resultado do campo elétrico nos cabos de ligação do comutador próximos ao cabo de fechamento de neutro da ligação em estrela da alta tensão.

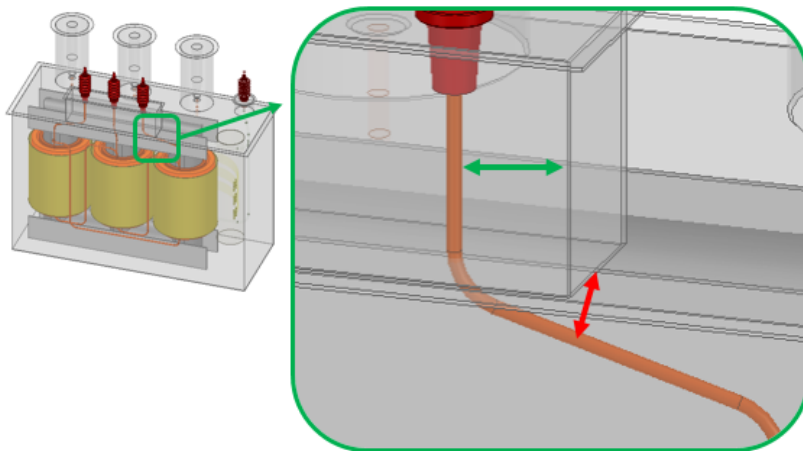


Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.3 Ligação para buchas

Em relação aos cabos de conexão dos enrolamentos de baixa tensão até a bucha de saída, embora o nível de tensão seja relativamente baixo, podem haver alguns pontos com pontos com ângulos reduzidos que aumentam a amplitude do campo elétrico. Então, devem ser evitadas condições críticas como, por exemplo, distâncias reduzidas e ou arestas com raio minimizados, conforme pontos indicados na Figura 50,

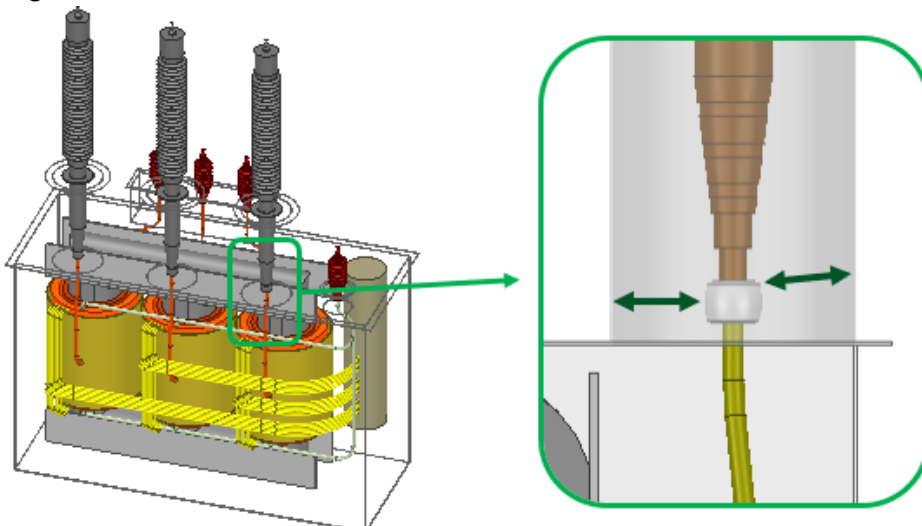
Figura 50 - Cabo de baixa tensão causando um estresse elétrico contra a entrada da caixa de bucha e a própria caixa de buchas de saída.



Fonte: Elaborado pelo autor.

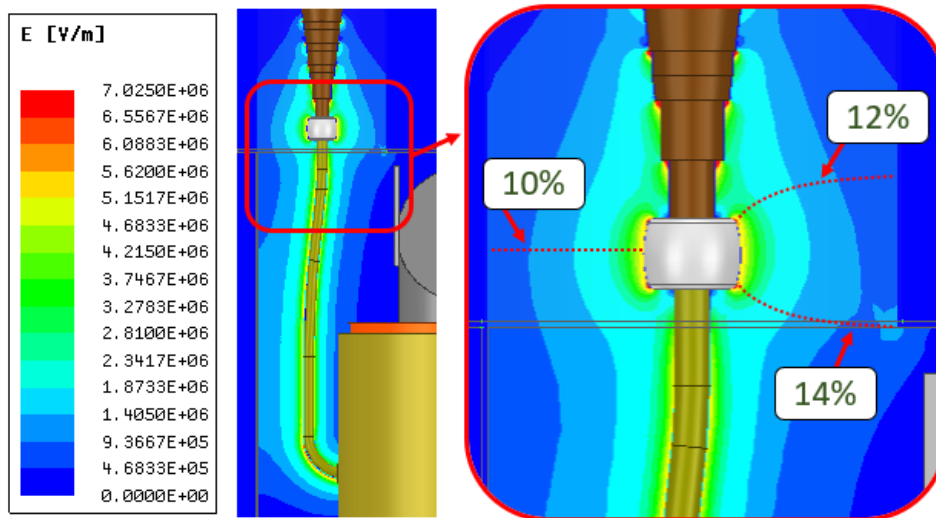
Em relação à saída de alta tensão, os esforços dielétricos resultantes são bastante maiores comparativamente à saída de baixa tensão. Os principais pontos de dimensionamento elétrico da saída de alta tensão são os cabos de ligação do enrolamento com a bucha contra o tanque/caneco e ferragens da parte ativa, conforme Figura 51. O resultado da distribuição do campo elétrico e a margem de segurança são mostrados na Figura 52.

Figura 51 - Parte inferior da bucha de alta tensão no interior do caneco de saída.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 52 - Resultado do comportamento do campo elétrico considerando o *shield*⁴ da bucha de alta tensão contra o caneco de saída.



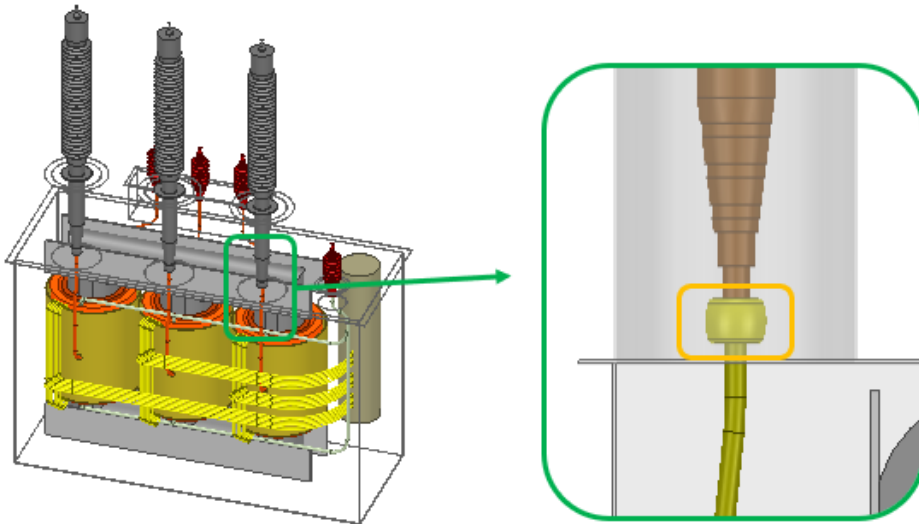
Fonte: Elaborado pelo autor.

Salienta-se que os pontos de campo elétrico elevado no corpo da bucha serão desconsiderados nesta análise porque o modelo da bucha foi simplificado para somente 5 camadas e, na prática, a mesma é montada com várias camadas de isolamentos. O projeto da suportabilidade dielétrica da bucha não sofre influência direta do fabricante de transformadores.

Em relação ao *shield* da bucha, o mesmo é projetado para blindar eletricamente os raios minimizados dos elementos metálicos de fixação (parafusos) do cabo que liga o enrolamento com a bucha. Entretanto, como o *shield* da bucha diminui a distância livre entre o condutor e o caneco de alta tensão, o ponto de menor margem de segurança se dá na lateral do próprio *shield*. De um modo geral, as margens de segurança obtidas neste ponto da saída de alta tensão não apresentaram um valor satisfatório de projeto. Para melhorar tais valores, será inserida uma camada de papel isolante moldado diretamente sobre o *shield*, conforme Figura 53. Deste modo o campo elétrico máximo será suportado pelo papel e, conseqüentemente, o estresse elétrico no óleo terá sua amplitude diminuída, melhorando a margem de segurança. Com esta alteração de projeto, a distribuição de campo elétrico e as conseqüentes margens de segurança são mostradas na Figura 54.

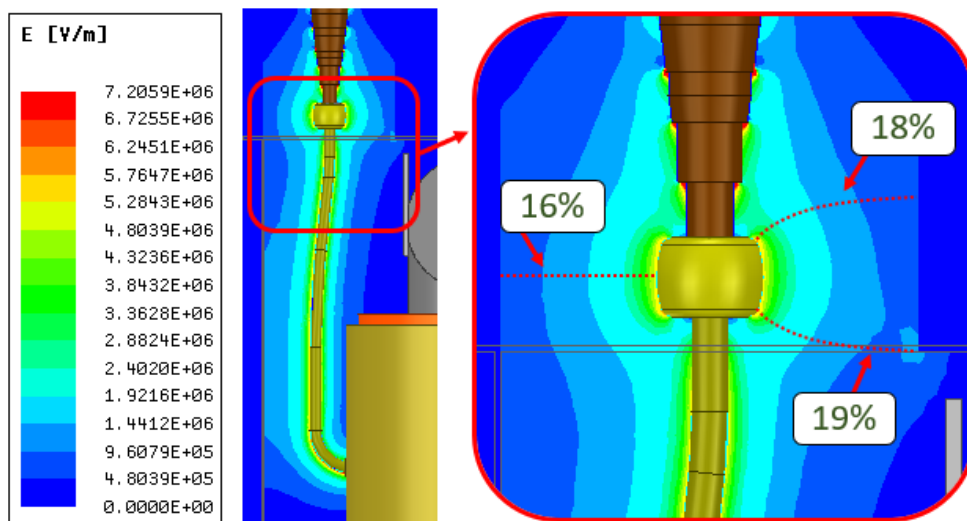
⁴ Escudo elétrico utilizado na bucha do transformador para diminuição do campo elétrico superficial nos elementos de conexão do cabo com a bucha.

Figura 53 - Papel isolante moldado inserido sobre o *shield* da bucha para diminuição do campo elétrico máximo em contato direto com o óleo isolante.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 54 - Resultado do comportamento do campo elétrico considerando o *shield* isolado da bucha de alta tensão contra o caneco de saída.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.3 DISPOSIÇÃO DE CABOS PARALELOS E PERPENDICULARES

Na ligação da parte ativa há a transposição de cabos paralelamente e transversalmente conforme mostrado na Figura 55 e Figura 56, respectivamente.

Figura 55 - Cabos potencializados próximos dispostos paralelamente.

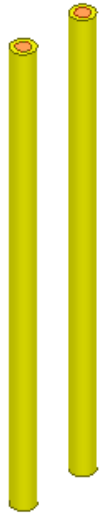
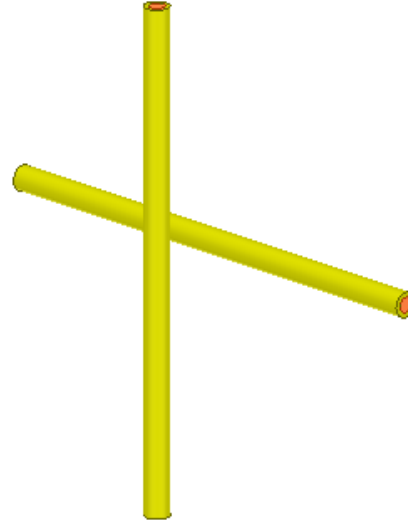


Figura 56 - Cabos potencializados próximos dispostos perpendicularmente.

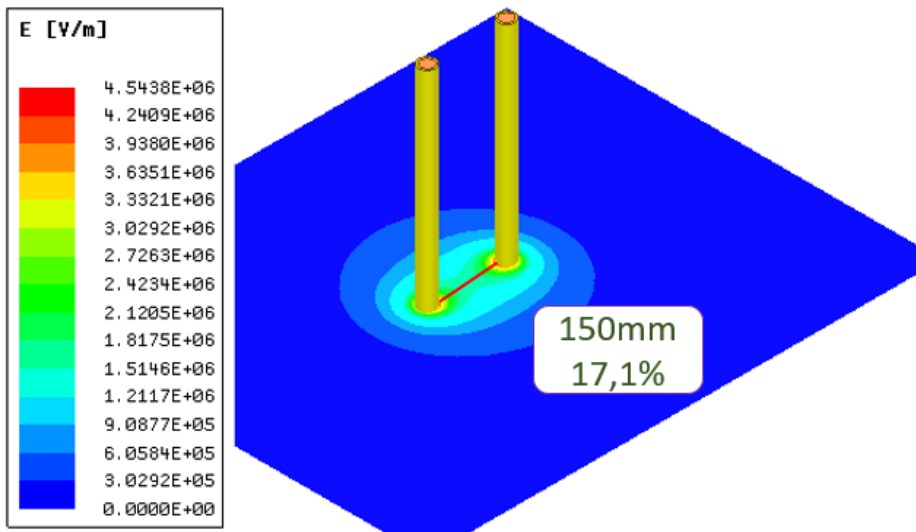


Fonte: Elaborado pelo autor.

Para avaliar o comportamento dielétrico geral dos cabos dispostos próximos, analisou-se uma configuração com os dois cabos de iguais características construtivas e aplicou-se uma diferença de potencial com um nível de 375 kV. Considerou-se condutores com raio de 30 mm e um isolamento de 5 mm de papel posicionados com uma distância mínima entre isolamentos de 150 mm.

A distribuição do campo elétrico e as linhas equipotenciais de tensão para a disposição paralela dos cabos se estabeleceu conforme mostrado na Figura 57. A linha de provável ruptura e a margem de segurança desta configuração é indicada na Figura 57.

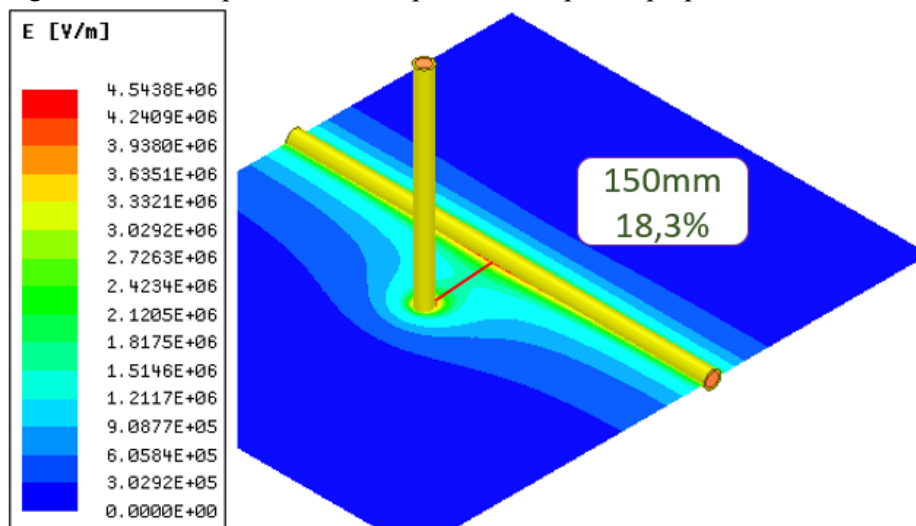
Figura 57 - Distribuição do campo elétrico e margem de segurança dos cabos potencializados dispostos paralelamente.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para determinar o máximo estresse elétrico entre os condutores, no caso da disposição perpendicular, há somente um ponto de maior proximidade entre eles, onde há o maior estresse elétrico. Aplicando as mesmas condições do caso anterior, o campo elétrico e as linhas equipotenciais de tensão se estabeleceram conforme indicado na Figura 58. A linha de provável ruptura e a margem de segurança calculada com a metodologia proposta está indicada na Figura 58.

Figura 58 - Cabos potencializados próximos dispostos perpendicularmente.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Considerando as mesmas características construtivas e as mesmas condições de contorno, a margem de segurança aumentou de 17,1 %, no caso de condutores paralelos, para 18,3 % com os cabos perpendiculares. Os condutores dispostos perpendicularmente apresentam um campo elétrico menos elevado e conseqüentemente uma maior margem de segurança. Este resultado se observa porque os cabos perpendiculares têm uma única distância elétrica mínima onde, conseqüentemente, há o maior campo elétrico, ao percorrer o comprimento do cabo para ambos os lados o estresse elétrico diminui. Tal comportamento não ocorre com os cabos paralelos porque a distância elétrica não diminui e, com isso, há uma maior exigência dielétrica e uma menor margem de segurança. Essa variação da margem de segurança entre os arranjos de condutores paralelos e perpendiculares depende de fatores como distância de isolamento e características geométricas construtivas dos cabos.

3.4 POSICIONAMENTO DAS BARREIRAS ISOLANTES

As alterações realizadas no projeto, visando aumentar a margem de segurança, consistem em inserir barreiras de material isolante para subdividir o tamanho dos dutos de óleo. O posicionamento correto destas barreiras define diretamente a margem da configuração, dada a característica exponencial decrescente da curva que define a suportabilidade dielétrica relativa em [kV/mm] em função do tamanho do duto de óleo (Marković, 2014).

A cada barreira que é inserida em uma configuração, o duto de óleo é subdividido e, com isso, são gerados dois novos dutos de óleo. A suportabilidade dielétrica da nova configuração é definida com cálculo da margem de segurança em cada duto separadamente. Por isso, para elevados níveis de tensão, a tendência é que seja utilizado um grande número de barreiras isolantes para dividir um duto de óleo em vários canais menores. No entanto, esta prática exige uma reestruturação do projeto mecânico dos elementos da parte ativa para que seja possível o posicionamento e a fixação destas barreiras adequadamente.

Para contornar esta situação, este trabalho propõe otimizar a metodologia de distribuição e posicionamento das barreiras entre eletrodos visando diminuir o número de barreiras isolantes necessárias para obter uma adequada margem de segurança para o projeto. É necessário recalcular a margem de segurança de todos os dutos de óleo na inserção de uma nova barreira isolante e, com base nos resultados obtidos, mover esta barreira na direção de um ou outro eletrodo, sempre buscando o equilíbrio entre os valores de margem de segurança dos

duto de óleo. É necessário observar o valor mínimo da margem de segurança obtido em todos os dutos de óleo da configuração para garantir que o projeto tenha um funcionamento adequado.

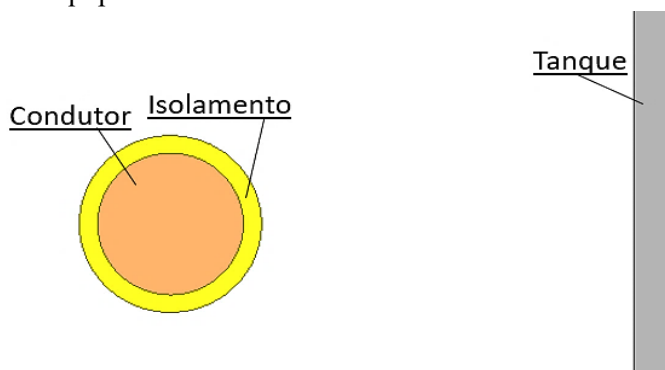
3.4.1 Avaliação para inserção de uma barreira

Para um entendimento prático desta metodologia será utilizado um exemplo de um cabo potencializado contra o tanque que, embora seja uma configuração relativamente simples, é de fundamental importância no dimensionamento final do transformador. Busca-se uma otimização de matéria prima na fabricação do transformador, como por exemplo, aço e óleo isolante.

O modelo com geometria bidimensional típica de um condutor de ligação potencializado contra o tanque é mostrado na

Figura 59. O condutor, neste caso com raio de 20mm e com um isolamento com 5mm de papel, será potencializado com uma tensão eficaz de 375 kV e será posicionado para que se forme um canal de óleo de 100 mm entre a tangente do papel isolante do condutor até o eletrodo plano com potencial nulo.

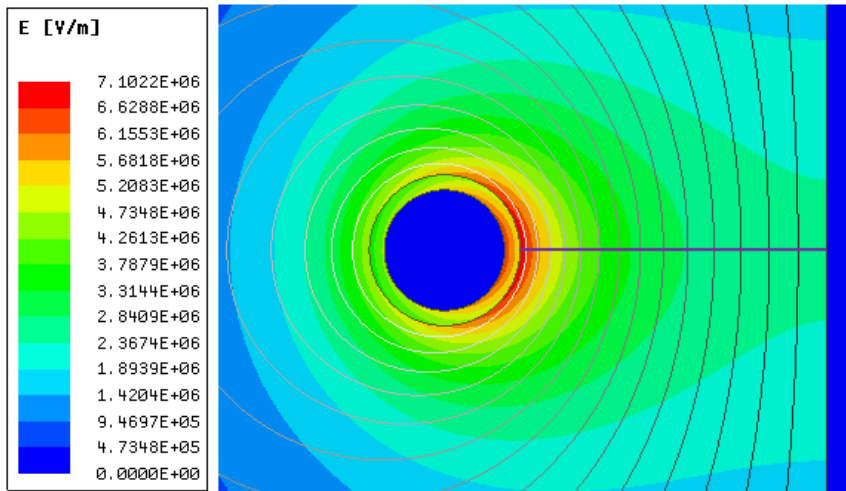
Figura 59 - Modelo bidimensional de um cabo potencializado com 375kV contra o tanque retilíneo de um equipamento.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Inicialmente, é feita a simulação sem considerar nenhuma barreira isolante entre o condutor e o tanque. A curva de campo elétrico limite utilizada para avaliar o duto de óleo é a curva que considera um campo elétrico não uniforme da Equação (22). A distribuição das linhas equipotenciais de tensão e conseqüente campo elétrico e, também, a linha de provável ruptura é mostrada na Figura 60.

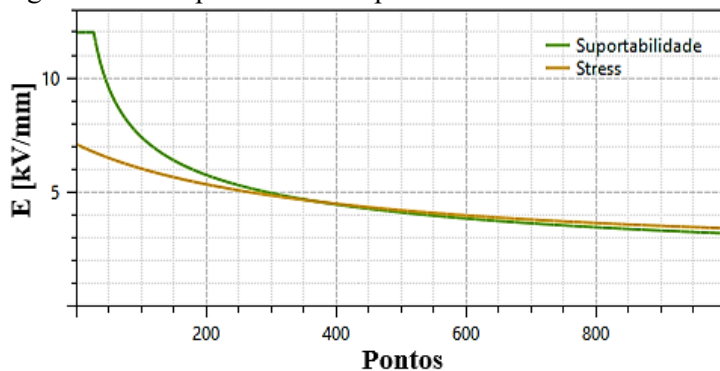
Figura 60 - Distribuição das linhas equipotenciais de tensão (*streamlines*), campo elétrico resultante e linha de provável ruptura.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com os dados de tensão e distância da linha de provável ruptura mostrada na Figura 60, é elaborado o gráfico da Figura 61 com o valor de campo elétrico obtido na configuração (*stress*) e a curva limite de estresse elétrico (suportabilidade). Avaliando as curvas é possível verificar que há um valor de campo elétrico mais elevado em relação ao valor limite, resultando em uma margem de segurança dielétrica de -7 %. Este valor negativo significa que há uma probabilidade de apresentar falha dielétrica maior que 1 % nos ensaios de liberação bem como em operação.

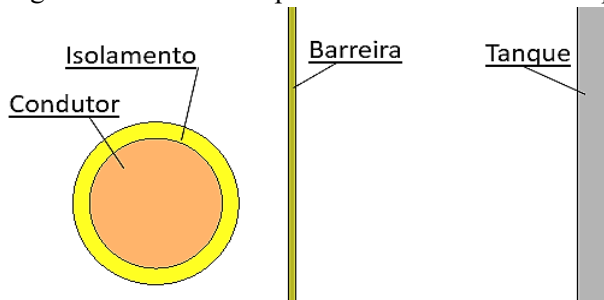
Figura 61 - Campo elétrico e suportabilidade elétrica da configuração.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para melhorar a margem de segurança, de acordo com a metodologia deste trabalho, será inserida uma barreira de papel isolante com espessura de 2mm para diminuir o tamanho dos dutos de óleo, conforme mostrado na Figura 62. Inicialmente será considerado a barreira posicionada próxima ao isolamento do condutor potencializado.

Figura 62 - Geometria para avaliar a influência do posicionamento da barreira no duto.

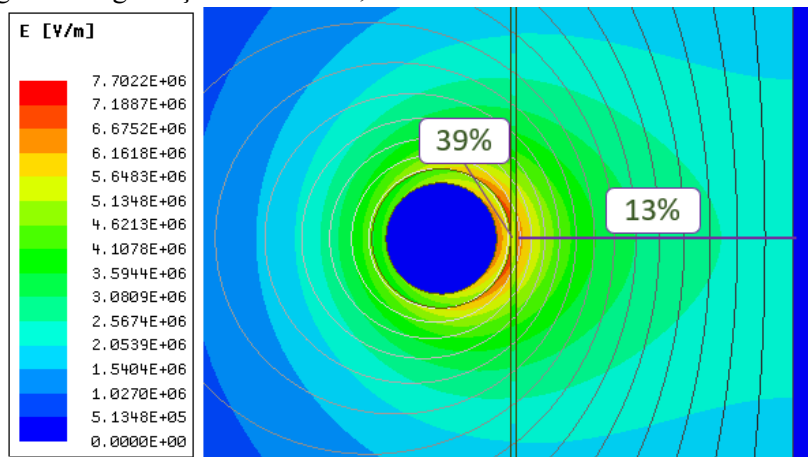


Fonte: Elaborado pelo autor.

a) Barreira posicionada a 0,1 mm do condutor potencializado

Considerou-se a barreira praticamente justaposta ao condutor potencializado (0,1 mm entre o condutor e a barreira) para que haja um duto de óleo mínimo inicial. Os resultados são mostrados na Figura 63, evidenciando que a margem de segurança de 39 % do ínfimo duto entre o eletrodo e a barreira é bastante elevada. Entretanto, no duto de óleo maior entre a barreira e o tanque, a margem de segurança apresentou um valor de 13 %.

Figura 63 - Margem de segurança do duto de 0,1 mm entre o condutor e a barreira isolante.



Fonte: Elaborado pelo autor

b) Aumentando a distância da barreira do condutor potencializado

Afastando gradativa e linearmente, em passos de 5 mm, a barreira isolante do condutor potencializado em direção ao tanque, os resultados das margens de segurança dos dutos demonstram uma tendência de equilíbrio, conforme Figura 64 e Figura 65. Com o duto de 10 mm entre o condutor e a barreira os valores da margem de segurança já apresentam uma inversão nas grandezas, ou seja, a maior margem de segurança se mostra no duto de óleo entre a barreira isolante e o tanque, conforme Figura 65. Este comportamento ocorre devido a característica de não-uniformidade do campo elétrico próximo ao condutor potencializado com raio minimizado.

Figura 64 - Margens de segurança com duto de 5 mm entre condutor e barreira isolante.

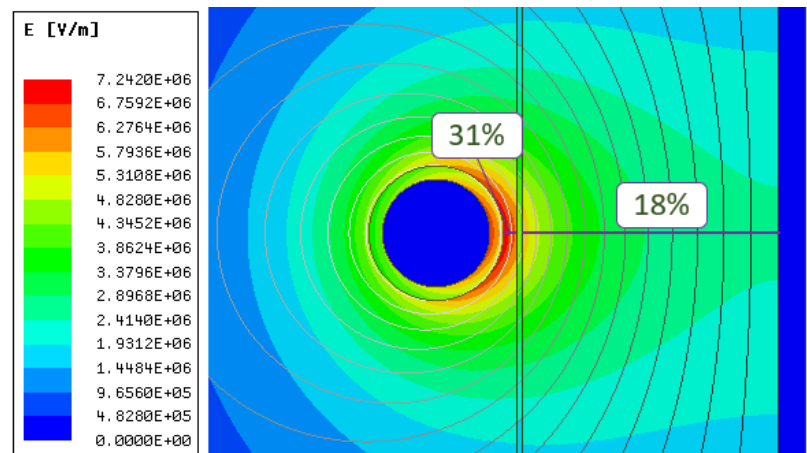
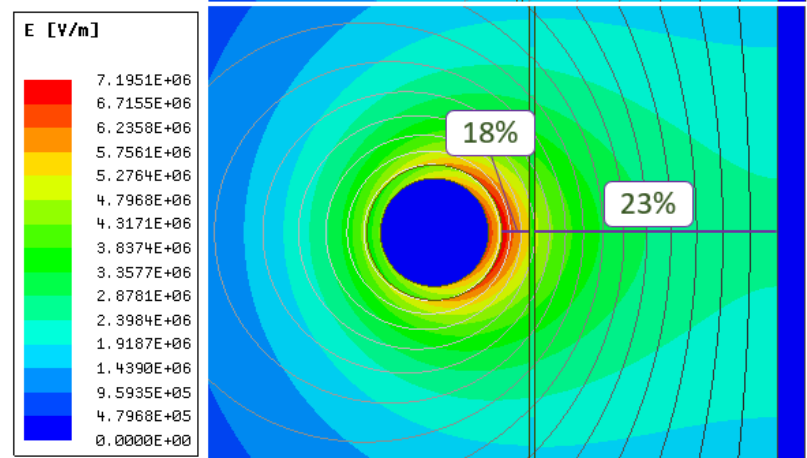


Figura 65 - Margens de segurança com duto de 10 mm entre condutor e barreira isolante.



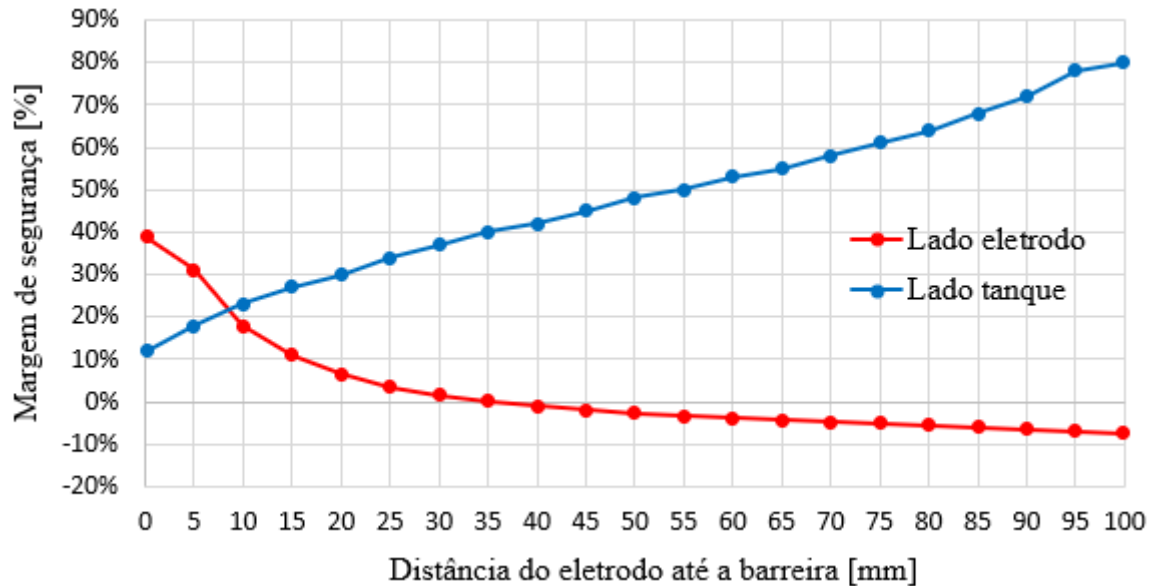
Fonte: Elaborado pelo autor.

Com o objetivo de analisar o comportamento do campo elétrico e a respectiva margem de segurança, variou-se, ainda em passo de 5 mm, a distância entre o condutor potencializado e a barreira isolante até a outra extremidade. Os resultados das margens de segurança para todas as configurações de tamanho de dutos são mostrados no gráfico resumo da Figura 66. Com os resultados dos estudos é possível concluir que nos casos em que a barreira isolante está bastante próxima ao tanque do transformador, a margem de segurança do duto de óleo entre o condutor e a barreira é praticamente a mesma que sem barreira alguma.

Avaliando o gráfico da Figura 66 é possível encontrar um ponto ótimo para o posicionamento da barreira onde a margem de segurança é igual nos dois dutos de óleo, neste caso, com o duto do lado do eletrodo potencializado no tamanho aproximado de 8,3 mm. Utilizou-se este valor para validação e o resultado da margem de segurança se deu conforme mostrado na Figura 67. Ressalta-se que para manter um valor mínimo de 20 % de margem de segurança nesta configuração, a faixa disponível para inserção de barreiras é de um duto do

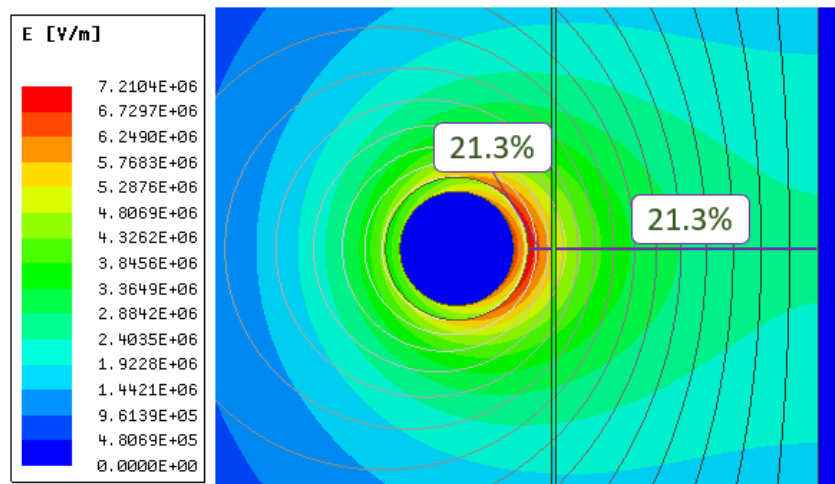
condutor até a barreira de tamanho entre 7 mm e 9 mm. Esta tolerância de 2 mm deve ser obedecida para viabilizar o processo de fabricação do equipamento.

Figura 66 - Margem de segurança em função do posicionamento da barreira isolante entre o eletrodo potencializado e o tanque.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 67 - Margem de segurança da configuração com o duto entre o eletrodo e a barreira de 8,3 mm.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Esta relação de tamanho de dutos para posicionamento ótimo da barreira isolante depende das geometrias dos eletrodos, sendo que, de um modo geral, quanto menor o raio de um eletrodo, mas próximo deste eletrodo a barreira deve ser localizada. Se a configuração contar com dois eletrodos iguais, a barreira deve ser localizada equidistante no duto de óleo formado entre eles.

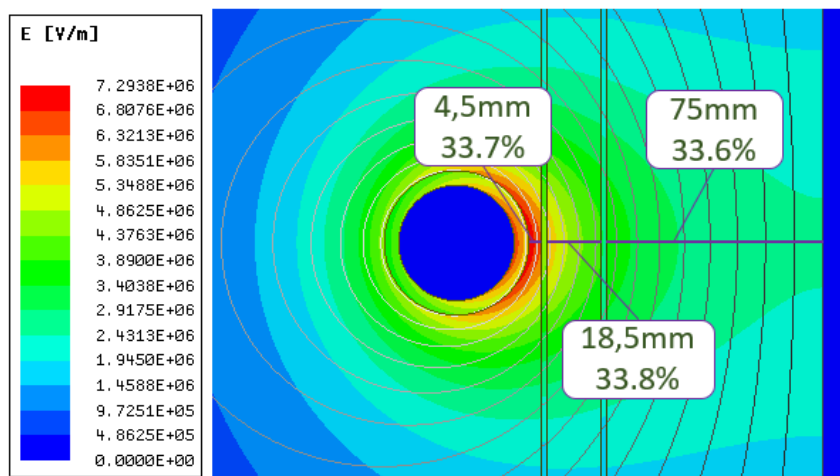
3.4.2 Avaliação para inserção de múltiplas barreiras

Os resultados do item 3.4.1 mostram que, mesmo posicionando a barreira na melhor posição possível, a margem de segurança de projeto obtida para este elemento de ligação foi um pouco maior que 20 %. Então, para obter um projeto com uma maior margem de segurança, pode ser inserida mais de uma barreira isolante para diminuir ainda mais o tamanho dos dutos de óleo.

3.4.2.1 Duas barreiras

Com a inserção de duas barreiras, faz-se o estudo variando iterativamente o tamanho do duto, buscando sempre o equilíbrio numérico dos valores das margens de segurança para cada um dos três dutos de óleo. Para esta análise, a melhor distribuição dos dutos de óleo para maximizar a margem de segurança da configuração é mostrada na Figura 68. O resultado da distribuição do campo elétrico, as linhas equipotenciais de tensão com as respectivas margens de segurança obtidas para os dutos obtidos também são mostradas na Figura 68.

Figura 68 - Distribuição ótima das duas barreiras isolantes com a distribuição equilibrada das margens de segurança calculadas com a metodologia proposta.



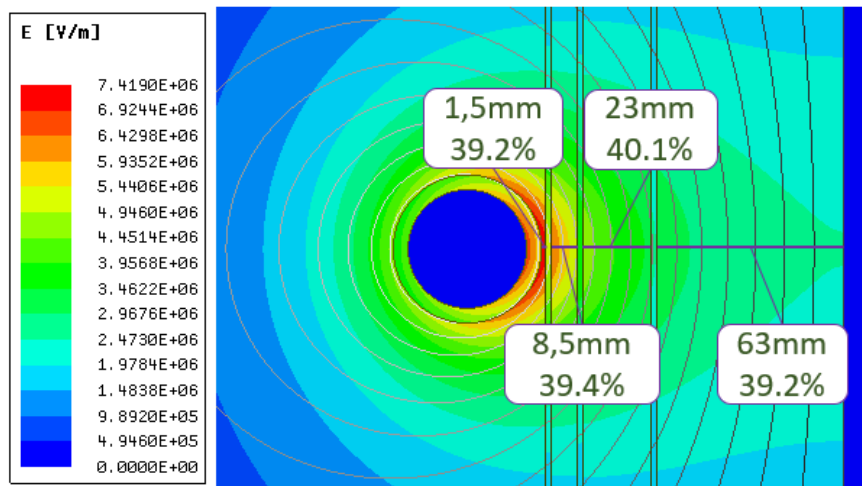
Fonte: Elaborado pelo autor.

Avaliando o resultado da inserção de mais uma barreira na configuração, é possível afirmar que a margem de segurança aumentou do valor de 21,3 % para aproximadamente 33,7 %.

3.4.2.2 Três barreiras

Para ilustrar a capacidade de aumento da margem de segurança com a inserção de barreiras, será inserida mais uma barreira na configuração, seguindo a mesma premissa de diminuição do tamanho dos dutos de óleo. Neste caso, com 3 barreiras isolantes dividindo o duto de óleo, a distribuição do tamanho dos dutos para uma margem de segurança equilibrada entre eles se deu conforme Figura 69. A margem de segurança, a distribuição do campo elétrico e as linhas equipotenciais de tensão são mostradas na Figura 69. O valor médio para a margem de segurança para esta configuração foi de aproximadamente 39,5 %.

Figura 69 - Distribuição das três barreiras isolantes com a distribuição equilibrada das margens de segurança calculadas com a metodologia proposta



Fonte: Elaborado pelo autor

O número de barreiras utilizado em uma configuração de isolamento de um ponto específico do transformador depende de alguns fatores, principalmente relacionados à estrutura de fixação destas na parte ativa do transformador. Muitas vezes a inserção de um número elevado de barreiras com uma distribuição ótima se torna inviável e até mesmo ineficaz, tornando o projeto dielétrico da configuração extremamente complexo. Nestes casos, onde não é possível inserir as barreiras isolantes no posicionamento mais adequado, a solução é aumentar a distância entre eletrodos para diminuir a magnitude do campo elétrico total e, com isso, atingir a margem de segurança adequada para a configuração.

4 CONCLUSÃO

Com o crescimento constante da demanda energética e a ampliação do Sistema Interligado Nacional é necessário transmitir grandes quantidades de energia por grandes distâncias. Para isso, é fundamental o desenvolvimento de sistemas com tensões elétricas de operação cada vez mais elevadas que viabilizam economicamente tais condições de operação. Entretanto, o aumento da tensão de operação do sistema elétrico eleva também a complexidade do projeto dielétrico dos equipamentos a ele conectados, como transformadores, reatores, disjuntores, chave seccionadoras entre outros. Neste sentido, este trabalho foi desenvolvido com o objetivo de gerar uma metodologia de projeto dielétrico de transformadores isolados a óleo. Aplicando a metodologia proposta neste trabalho é possível obter projetos de isolamento de transformadores com adequada margem de segurança dielétrica para qualquer nível de tensão e potência de operação. Também, é possível melhorar a relação peso/potência dos transformadores isolados à óleo sem perder a confiabilidade de operação. Esta é uma necessidade fundamental quando são desenvolvidos equipamentos que exigem uma complexa logística de movimentação desde a fabricação até o local de operação no cliente final.

Historicamente, o dimensionamento dos elementos de ligação dos transformadores à óleo foi realizado com base na experiência dos projetistas. A aplicação de determinadas equações analíticas e a adoção de coeficientes de segurança para a definição das distâncias elétricas criaram tabelas e curvas com os valores utilizados e validados empiricamente. Entretanto, estas tabelas e curvas foram levantadas há muito tempo e, mesmo com o melhoramento tecnológico expressivo das matérias primas, métodos e ferramentas de fabricação dos equipamentos, as tabelas continuaram sendo utilizadas pela carência de metodologias de projeto validadas e acessíveis para implementação. Na literatura, os desenvolvimentos de ferramentas de projeto dielétrico de transformadores abrangeram, principalmente, os enrolamentos da parte ativa. Ao longo dos anos, a necessidade de concepção de uma metodologia de projeto dielétrico eficaz e confiável também para os elementos de ligação internos aos transformadores isolados à óleo foi se consolidando pela disponibilidade de ferramentas de simulação a um custo viável de implementação.

A metodologia do trabalho utilizou simulações numéricas computacionais baseadas no método de elementos finitos para descrever a distribuição de tensão e conseqüentemente campo elétrico nos principais modelos de elementos potencializados da parte ativa do transformador. Com este mapeamento foi possível determinar o ponto de máximo campo elétrico e, com isso, determinar a linha de provável ruptura dielétrica do isolamento. Com os dados obtidos na simulação do comportamento do campo elétrico dos elementos de ligação do transformador, são extraídos os dados de tensão e posição dos pontos desta linha de provável ruptura. Estes dados de campo elétrico obtidos nesta linha são comparados com a curva de estresse elétrico limite, a qual foi definida empiricamente aplicando a distribuição de *Weibull* para uma probabilidade de ruptura dielétrica de 1 %. A relação dos valores de campo elétrico máximo da linha de provável ruptura e o valor do campo elétrico limite definido pela curva específica define a margem de segurança do projeto.

Esta metodologia de projeto dielétrico de elementos da parte ativa foi aplicada no projeto de elementos de ligação de transformadores de potência de todas as faixas de tensão e potência da fabricante de equipamentos elétricos WEG Transmissão e Distribuição. A implementação desta metodologia em tempo de projeto possibilitou uma reestruturação do dimensionamento elétrico, gerando projetos com adequada margem de segurança e utilização otimizada de recursos de fabricação. Os projetos dimensionados eletricamente com esta metodologia apresentaram adequado comportamento com aprovação nos ensaios finais de validação do produto. Esta validação nos ensaios ratifica a confiabilidade deste método e sua utilização para o dimensionamento de elementos potencializados da parte ativa de transformadores.

Como continuidade deste trabalho, pode-se destacar os trabalhos referentes ao modelamento de um transformador através de parâmetros elétricos circuitais. Busca-se com isso aumentar a precisão do cálculo do valor do estresse elétrico dielétrico interno aos enrolamentos e, por conseqüência, refletido aos elementos de ligação da parte ativa do transformador. Com este desenvolvimento será possível produzir modelos de transformadores que resultem em respostas para a aplicação dos sinais de tensão com amplitude e frequências distintas dos normalizados e conhecidos atualmente, como é o caso dos sinais transientes eletromagnéticos presentes no sistema elétrico de potência.

Alguns trabalhos podem ser desenvolvidos no sentido de caracterização de sinais transientes de tensão do sistema elétrico através de um fator de correlação com um sinal de tensão senoidal. Com a definição deste fator, a metodologia desenvolvida neste trabalho poderá ser aplicada também para determinação da margem de segurança da isolamento de transformadores frente aos fenômenos transientes de tensão de elevada frequência.

Ainda, para aumentar a abrangência das análises possíveis com a metodologia proposta neste trabalho, trabalhos futuros podem ser desenvolvidos no sentido de caracterização do comportamento dielétrico de eletrodos isolados com diferentes fluidos isolantes. A metodologia proposta pode ser aplicada para equipamentos projetados com qualquer fluido de isolamento, desde que estejam disponíveis os coeficientes das curvas exponenciais com o campo elétrico máximo suportável para tais configurações.

5 PUBLICAÇÕES

O desenvolvimento parcial da metodologia desenvolvida neste trabalho foi publicado no IX WORKSPOT - Workshop Internacional sobre Transformadores de Potência, Equipamentos, Subestações e Materiais em 28/11/2018 em Foz do Iguaçu - PR com o título “Metodologia de dimensionamento dielétrico de transformadores de potência especiais de extra alta tensão com o método *cumulative stress*”, tendo como autor principal Odirlan Iaronka e focada no dimensionamento de transformadores de potência de extra alta tensão e transformadores especiais para operação em subestações móveis.

REFERÊNCIAS

- A2/C4-03_JWG. 2011.** Interação entre Transformadores e o Sistema Elétrico com Foco nos Transitórios Eletromagnéticos de Alta Frequência. *Grupo de Trabalho Conjunto JWG A2/C4-03*. 2011.
- ABNT_NBR_5356-3. 2007.** Níveis de isolamento, ensaios dielétricos e espaçamentos externos em ar. *ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas*. 2007.
- Andersen, O.W. 1973.** Laplacian electrostatic field calculations by finite elements with automatic grid generation. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. September/October de 1973, Vols. PAS-92, pp. 1485 - 1492.
- ANSYS. 2019.** ANSYS. *ANSYS Electronics Desktop*. [Online] 2019. [Citado em: 13 de Aug de 2019.] <https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-electronics-desktop>.
- B. Gustavsen, Á. Portillo. 2018.** A Damping Factor-Based White-Box Transformer Model for Network Studies. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 06, Dec de 2018, Vol. 33, pp. 2956 - 2964.
- . **2014.** Interfacing K-Factor Based White-Box Transformer Models With Electromagnetic Transients Programs. *IEEE Transactions on Power Delivery*. Dec de 2014, Vol. 29, 06, pp. 2534 - 2542.
- Bastos, João Pedro Assumpção. 2012.** *Eletromagnetismo para Engenharia: Estática e Quase-estática*. 3. Florianópolis : UFSC, 2012.
- Bechara, R. 2010.** Análise de falhas em transformadores de potência. São Paulo : s.n., 2010.
- CIGRE. 2014.** JWG A2/C4.39. *Electrical transient interaction between transformers and the power system Part 1 – Expertise*. Apr de 2014.
- D. Tschudi, V. Dahinden, F. Derler. 1995.** Dielectric strength assessment of power transformer insulation. *Ninth International Symposium on High Voltage Engineering*. August de 1995.
- Freire, A. R. F. 2007.** Interação Transitória entre Transformadores e o Sistema Elétrico: Novos Requisitos para a Especificação. *JWG A2/C4-03 - GSE-20*. XIX SNPTEE, Outubro de 2007.

H. Goshima, N. Hayakawa, M. Hikita, H. Okubo, K. Uchida. 1995. Weibull statistical analysis of area and volume effects on the breakdown strength in liquid nitrogen. *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* 3, 1995, Vol. 2.

Hutton, J. G. 1947. Determination of corona starting voltages for non-uniform fields in air. *TAIEE.* 1947, Vol. 66, pp. 1674 - 1680.

IEEE_Guide. 2013. IEEE Guide for the Application of Metal-Oxide Surge Arresters for Alternating-Current Systems Amendment. *Supplement to Consider Energy Handling Capabilities.* 2013.

K. J. Rapp, C. P. McShane, J. Luksich. 2005. Interaction Mechanisms of Natural Ester Dielectric Fluid and Kraft Paper. *IEEE 15th International Conference on Dielectric Liquids (ICDL).* 2005.

K. J. Rapp; J. Luksich. 2011. Review of Kraft paper/natural ester fluid insulation system aging. *2011 IEEE International Conference on Dielectric Liquids.* 2011, pp. 1 - 4.

Kulkarni, S. V.; Khaparde, S. A. 2004. *Transformer Engineering Design and Practice.* New York : Marcel Dekker, 2004.

L. Cheim, D. Platts, T. Prevost, S. Xu. 2012. Furan analysis for liquid power transformers. *IEEE Electrical Insulation Magazine.* March - April de 2012, Vol. 28, pp. 8 - 21.

L. R. Hill, P. L. Schmidt. 1948. Insulation Breakdown as a Function of Area. *Trans. Amer. Inst. Electr. Eng.* 1948, Vol. 67, pp. 442 - 446.

Marković, Mladen. 2014. Insulation optimization of power transformer leads. *Journal of Energy.* 2014, Vol. 63, pp. 227-234.

Nelson, J. K. 1994. Some steps toward the automation of the design of composite dielectric structures. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation.* Aug. de 1994, Vol. 1, pp. 663 - 671.

Nelson, J. Keith. 1994. Some Steps toward the Automation of the Design of Composite Dielectric Structures. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation.* 663, 1994.

Nelson, J.K. 1989. An assessment of the physical basis for the application of design criteria for dielectric structures. *IEEE Transactions on Electrical Insulation.* October de 1989, Vol. 24, pp. 835 - 847.

ONS. 2011. *Requisitos mínimos para transformadores e para subestações e seus equipamentos.* 11 de 11 de 2011.

Pedersen, A. 1970. Criteria for spark breakdown in sulfur hexafluoride. *IEEE*. 1970, Vol. TP, p. 115 PWR.

Planck, D. W. Ver. 1941. Calculation of initial breakdown in air. *TAIEE*. 1941, Vol. 60, pp. 99 - 104.

Prevost. 2006. Dielectric Properties of Natural Esters and their Influence on Transformer Insulation System Design and Performance. *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition*. 2006, pp. 30 - 34.

Prevost, T. A. 2009. Dielectric properties of natural esters and their influence on transformer insulation system design and performance — An update. *2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting*. 2009, pp. 1 - 9.

S. Palmer, W. A. Shorpley. 1969. Electric strength of transformer insulation. *PIEE*. Dec. de 1969, Vol. 116, pp. 2029 - 2037.

Taylor, R. J. 1977. Effect of permittivity matching on the flashover of solid/liquid interfaces. *Proceedings IEE*. October de 1977, Vol. 124, pp. 899 - 904.

Tschudi D., Heinzig zig P. 2009. State of the art solid insulation after 125 years of transformer practice. *International Colloquium Transformer Research and Asset Management*. 2009.

Wilson, W. R. 1953. A fundamental factor controlling the unit dielectric strength of oil. *TAIEE*. Feb. de 1953, Vol. 72, Pt. III, pp. 68 - 73.

X. Wang, Z. Wang. 2012. Study of dielectric behavior of ester transformer liquids under ac voltage. *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* 2012, Vol. 19, pp. 1916 - 1925.

Yu Chao, Wang Xiangzhong, Xie Dexin. 2001. Positive- and contrary-direction transposition of double helical winding in power transformer. *ICEMS'2001. Proceedings of the Fifth International Conference on Electrical Machines and Systems (IEEE Cat. No.01EX501)*. 2001, Vol. 01, pp. 198 - 200.