

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Jair Henrique Junior

**OTIMIZAÇÃO DO PROJETO DIELÉTRICO DE TRANSFORMADORES
DE DISTRIBUIÇÃO POR MEIO DE SIMULAÇÕES EM ELEMENTOS
FINITOS**

Santa Maria, RS
2018

Jair Henrique Junior

**OTIMIZAÇÃO DO PROJETO DIELÉTRICO DE TRANSFORMADORES DE
DISTRIBUIÇÃO POR MEIO DE SIMULAÇÕES EM ELEMENTOS FINITOS**

Dissertação de mestrado apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE) da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do título de **Mestre em Engenharia Elétrica**.

Orientador: Prof. Dr. Tiago Bandeira Marchesan

Santa Maria, RS
2018

Henrique Júnior, Jair

OTIMIZAÇÃO DO PROJETO DIELÉTRICO DE TRANSFORMADORES DE
DISTRIBUIÇÃO POR MEIO DE SIMULAÇÕES EM ELEMENTOS FINITOS
/ Jair Henrique Júnior.- 2018.

72 p.; 30 cm

Orientador: Tiago Bandeira Marchesan

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica, RS, 2018

1. Elementos Finitos 2. Transformadores de
Distribuição 3. Otimização de Projeto I. Bandeira
Marchesan, Tiago II. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

©2018

Todos os direitos autorais reservados a Jair Henrique Junior. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

Endereço: Rua Fermino Barbosa, 188, Bairro Aurora, Londrina, PR. CEP: 86047-480.

Fone (0xx) 43 3067 5929; Email: jair.henrique.junior@gmail.com

Jair Henrique Junior

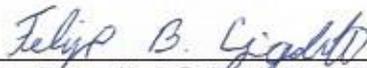
**OTIMIZAÇÃO DO PROJETO DIELÉTRICO DE TRANSFORMADORES DE
DISTRIBUIÇÃO POR MEIO DE SIMULAÇÕES EM ELEMENTOS FINITOS**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE) da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), como requisito parcial para a obtenção do título de **Mestre em Engenharia Elétrica**.

Aprovado em 26 de fevereiro de 2018:



Tiago Bandeira Marchesan, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)



Felipe Bovolini Grigoletto, Dr. (UNIPAMPA)



Rafael Concatto Beltrame, Dr. (UFSM)

Santa Maria, RS
2018

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha esposa Caroline, pois sem o seu incentivo não teria tido êxito nesta dissertação e à minha filha Elis, pois sua chegada foi uma das maiores motivações para que eu o concluísse.

AGRADECIMENTOS

À Deus, por ter me dado o dom da vida e por ser minha referência, a quem recorri em diversos momentos e que sempre me atendeu. À Maria, Mãe de Jesus, por ser o meu abrigo nos momentos difíceis, minha intercessora e educadora e por ter me acompanhado na execução deste trabalho como Rainha da Sabedoria.

À minha esposa Caroline, por toda motivação nos momentos de angústia, amor, companheirismo e auxílio prático e também por sua compreensão sobre minha “ausência” para que este trabalho pudesse ser concluído no final da gestação de nossa filha. *“Você é e sempre será o meu porto seguro, meu complemento, minha motivação. Obrigado por me fazer tão feliz, por não me deixar desistir e por me dar a honra de construirmos juntos uma família abençoada”*.

Agradeço também a uma pessoa que nem sabe o significado disso tudo, minha filha Elis. *“Você é a grande motivadora para que eu possa seguir em frente enfrentando todos os obstáculos da vida”*.

Aos meus pais, Jair e Elza, pelo exemplo de vida e de família, pelos ensinamentos e apoio sempre que precisei, por terem lutado para dar o maior bem que eu poderia receber, a educação. *“Nenhuma graduação, mestrado ou doutorado poderiam me ensinar algo que aprendi com vocês, o amor”*.

Aos meus irmãos, Eduardo e Edilaine, por serem meus exemplos nos estudos e por colaborarem e investirem em meu crescimento profissional e pessoal.

À minha cunhada, Esther, pela prontidão em ajudar na construção e formatação deste trabalho, e sobretudo pelo apoio nos dias próximos à entrega.

Ao meu orientador, professor Dr. Tiago Bandeira Marchesan, por sua orientação na realização deste trabalho, pelo esclarecimento de dúvidas e de indefinições e por todo apoio, que fez com que a distância não fosse um impeditivo para a conclusão da presente pesquisa.

Ao jovem Alexander pelo auxílio com as simulações computacionais e atenção que minimizaram a distância da Universidade e da *Work Station*.

Aos professores da Universidade Estadual de Londrina, onde pude fazer parte dos créditos desta pós-graduação e também aos professores e colaboradores do PPGE da Universidade Federal de Santa Maria por toda a ajuda neste período.

Aos amigos e companheiros de trabalho, Bruno, Daniel e Álvaro pela leveza do convívio diário, por me fazerem rir em momentos de desânimo e me incentivaram sempre que precisei.

Por fim, agradeço a todos que direta ou indiretamente contribuíram para que eu percorresse esse caminho de aprendizado que foi o mestrado, amigos, professores e familiares, meu *“muito obrigado!”*.

“A persistência é o caminho do êxito!”

(Charlie Chaplin)

RESUMO

OTIMIZAÇÃO DO PROJETO DIELÉTRICO DE TRANSFORMADORES DE DISTRIBUIÇÃO POR MEIO DE SIMULAÇÕES EM ELEMENTOS FINITOS

AUTOR: Jair Henrique Junior

ORIENTADOR: Prof. Dr. Tiago Bandeira Marchesan

Este trabalho apresenta uma metodologia de otimização do projeto dielétrico de transformadores de distribuição a partir da definição de três parâmetros construtivos do processo de fabricação das bobinas de baixa e alta tensão. Seu objetivo principal foi desenvolver uma metodologia que proporcionasse ganho de tempo na elaboração do projeto e redução dos custos de matéria prima, sem alterar a suportabilidade do equipamento aos ensaios de rotina e tipo. O método de desenvolvimento se baseou na simulação paramétrica de três variáveis físicas do processo de fabricação das bobinas do transformador que possuem grande relevância na suportabilidade dielétrica do equipamento, sendo elas o GAP AT/BT, a diferença da altura elétrica entre as bobinas de alta e baixa tensão e o incremento das cabeceiras das duas primeiras camadas de alta tensão. Após estas simulações os parâmetros foram analisados inicialmente em separado e, posteriormente, em uma análise conjunta, que resultou em um modelo final a ser aplicado. Com base no modelo final foram definidos outros três modelos com variações percentuais dos parâmetros que permitiram a análise final e a construção de uma proposta de otimização, representada em um fluxograma de otimização feito a partir de um projeto de transformador com potência de 75kVA e classe de tensão 15kV, modelo mais vendido no mercado de transformadores de distribuição. A utilização de simulações em elementos finitos realizadas pelo software Maxwell e análise dielétrica dos enrolamentos proporcionaram melhoras percentuais no custo de matéria prima e tempo de elaboração dos projetos deste tipo de transformadores.

Palavras-chave: Projeto Dielétrico, Transformadores de Potência, Redução de Custos e Elementos Finitos.

ABSTRACT

OPTIMIZATION OF THE DIELECTRIC PROJECT OF DISTRIBUTION TRANSFORMERS BY SIMULATIONS IN FINITE ELEMENTS

AUTHOR: Jair Henrique Junior
ADVISOR: Prof. Dr. Tiago Bandeira Marchesan

This work presents a methodology for optimization of the dielectric design of distribution transformers by defining three constructive parameters of the manufacturing process of the low and high voltage coils. Its main objective was to develop a methodology that would lead to time savings in project design and reduction of raw material costs, without changing the equipment's compatibility with routine and type tests. The development method was based on the parametric simulation of three physical variables of the manufacturing process of the transformer coils that have great relevance in the dielectric support of the equipment, being the GAP AT / BT, the difference of the electric height between the coils of high and low voltage and the increase of headwalls of the first two layers of high voltage. After these simulations the parameters were initially analyzed separately and, later, in a joint analysis, which resulted in a final model to be applied. Based on the final model, three other models were defined with percentage variations of the parameters that allowed the final analysis and the construction of an optimization proposal, represented in an optimization flowchart made from a transformer design with power of 75kVA and class of 15kV, the best-selling model in the distribution transformer market. The use of finite element simulations performed by the Maxwell software and dielectric analysis of the windings provided a percentage improvement in the raw material cost and time of elaboration of the projects of this type of transformers.

Keywords: Dielectric Design, Power Transformers, Cost Reduction and Finite Elements.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Partes de um Transformador de Distribuição	19
Figura 2 – Ilustração do detalhe do sistema de isolamento de um transformador	20
Figura 3 – Forma de onda característica do impulso atmosférico pleno e as definições para os tempos de frente e cauda.....	28
Figura 4 – Curvas Equipotenciais na borda do condutor.....	31
Figura 5 – Áreas de Polígonos gerados pelo Campo Elétrico com três diferentes potenciais	31
Figura 6 – Curvas Equipotenciais para o Modelo Base.....	32
Figura 7 – Pontos iniciais para obtenção do Cumulative Stress.....	34
Figura 8 – Etapas de Cálculo do <i>Cumulative Stress</i>	35
Figura 9 – Pontos com maior relevância para descargas	36
Figura 10 – Principais caminhos para descarga.....	36
Figura 11 – Modelo Base para Simulação.....	39
Figura 12 – Curvas Equipotenciais do Modelo Base e ponto crítico	40
Figura 13 – <i>Cumulative Stress</i> do Modelo Base obtido via software Maxwell.....	41
Figura 14 – Parâmetros a serem variados	42
Figura 15 – Variação do Campo elétrico de acordo com o GAP entre as bobinas de AT e BT.....	43
Figura 16 – Variação % do Estresse Elétrico entre os modelos simulados para Variação do GAP AT/BT	44
Figura 17 – Variação do Campo elétrico de acordo com a altura elétrica da bobina de AT.....	45
Figura 18 – Variação % do Estresse Elétrico entre os modelos simulados para Variação da Altura Elétrica da AT	45
Figura 19 – Variação do Campo elétrico de acordo com a cabeceira das duas primeiras camadas de AT.....	46
Figura 20 – Variação % do Estresse Elétrico entre os modelos simulados para Variação da Altura Elétrica das duas primeiras camadas de AT.....	47
Figura 21 – Variação do Campo elétrico para os parâmetros simulados plotados simultaneamente	48
Figura 22 – Simulação do Campo Elétrico considerando o acoplamento paramétricos do GAP AT/BT e Altura da AT	49

Figura 22 – Simulação do Campo Elétrico considerando o acoplamento paramétricos da Altura de BT e Altura da AT	50
Figura 22 – Simulação do Campo Elétrico considerando o acoplamento paramétricos do GAP AT/BT e Altura da BT	51
Figura 23 – Variações Percentuais do Campo Elétrico	54
Figura 24 – Campo Elétrico obtido na simulação em Elementos para o 1º Modelo Final	55
Figura 25 – <i>Design Curves</i> e <i>Cumulative Stress</i> para o modelo final 1	56
Figura 26 – Campo Elétrico obtido na simulação em Elementos para o 2º Modelo Final	58
Figura 27 – <i>Design Curves</i> e <i>Cumulative Stress</i> para o modelo final 2	58
Figura 28 – Campo Elétrico obtido na simulação em Elementos para o 3º Modelo Final	59
Figura 29 – <i>Design Curves</i> e <i>Cumulative Stress</i> para o modelo final 3	60
Figura 30 – Campo Elétrico obtido na simulação em Elementos para o 4º Modelo Final	61
Figura 31 – <i>Design Curves</i> e <i>Cumulative Stress</i> para o modelo final 4	62
Figura 32 – Fluxograma de otimização de projeto	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Custos básicos para um transformador de distribuição	22
Tabela 2 – <i>Weibull Distribution</i>	37
Tabela 3 – Design Insulation Factor	38
Tabela 4 – Variações paramétricas	42
Tabela 5 – Variações percentuais do Campo Elétrico para a Variação do GAP AT/BT	51
Tabela 6 – Variações percentuais do Campo Elétrico para a Variação da altura elétrica de AT	52
Tabela 7 – Variações percentuais do Campo Elétrico para a Variação da altura elétrica de AT	53
Tabela 8 – Projetos Finais	54
Tabela 9 – Variação de Custos Projeto Final 1	57
Tabela 10 – Variação de Custos Projeto Final 2	59
Tabela 11 – Variação de Custos Projeto Final 2	60
Tabela 12 – Resumo Projetos Finais Simulados	63

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
2	TRANSFORMADORES DE DISTRIBUIÇÃO	17
	2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	17
	2.2 ASPECTOS CONSTRUTIVOS E DE FÁBRICA.....	18
	2.2.1 Aspectos Fabris.....	21
	2.2.2 Custos de Produção.....	21
	2.3 ENROLAMENTO.....	22
	2.3.1 Condutores.....	22
	2.3.2 Verniz Isolante.....	23
	2.3.3 Papel Isolante.....	24
	2.4 ÓLEO ISOLANTE.....	25
	2.4.1 Óleo Mineral Isolante.....	26
	2.4.2 Óleo Vegetal Isolante	27
	2.5 ENSAIO DE IMPULSO.....	27
3	CÁLCULO DO CAMPO ELÉTRICO NO ENROLAMENTO DE TRANSFORMADORES	30
	3.1 MODELO MATEMÁTICO	30
	3.2 SIMULAÇÃO DO CAMPO ELÉTRICO POR MEIO DE ELEMENTOS FINITOS 33	
	3.2.1 Método do Cumulative Stress (Estresse Dielétrico Cumulativo) ..	34
	3.2.2 Simulação Base	39
	3.3 VARIAÇÕES PARAMÉTRICAS.....	41
	3.3.1 Variação do GAP AT/BT	43
	3.3.2 Variação da Altura Elétrica da Bobina de AT	44
	3.3.3 Variação da Altura Elétrica das duas primeiras camadas de AT...46	
	3.4 COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS SIMULADOS.....	47

4	RESULTADOS.....	49
4.1	Simulação em 3D com acoplament de parâmetros.....	49
4.2	DEFINIÇÃO DOS MODELOS FINAIS.....	51
4.3	ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS PARA OS MODELOS FINAIS	
	55	
4.3.1	Modelo 1.....	55
4.3.2	Modelo 2.....	57
4.3.3	Modelo 3.....	59
4.3.4	Modelo 4.....	61
4.4	MODELO DE OTIMIZAÇÃO DE PROJETO.....	62
5	CONCLUSÃO.....	66
	REFERÊNCIAS.....	68

1 INTRODUÇÃO

A energia elétrica teve um papel fundamental para o desenvolvimento tecnológico e social do momento presente. Sua utilização possibilitou a criação de dispositivos aplicados nas diversas áreas de conhecimento, desde a área da saúde até os mecanismos voltados ao lazer e à qualidade de vida da população. A consolidação da utilização da energia elétrica foi possível apenas após a invenção dos transformadores, que permitiram que as linhas de transmissão de energia elétrica se estendessem por longas distâncias.

Os transformadores de potência são equipamentos elétricos que visam o ajuste dos diferentes níveis de tensão de rede transformando-os em valores ideais para cada tipo de uso. Esses equipamentos proporcionam a elevação dos níveis de tensão, diminuindo os custos de infraestrutura das redes de transmissão e as perdas por queda de tensão, motivo pelo qual se tornaram imprescindíveis à transmissão da eletricidade.

Os transformadores são assim classificados em industriais ou de distribuição. Transformadores industriais correspondem aos equipamentos com classe de tensão superior a 69kV, construídos com foco principal na transmissão de energia, enquanto os transformadores de distribuição são equipamentos de classes de 15kV, 25kV e 36,2kV, geralmente utilizados nas redes de distribuição de energia elétrica. Atualmente, segundo informações das distribuidoras de energia elétrica, estima-se que a compra de Transformadores de Distribuição represente 30% dos investimentos anuais das distribuidoras de energia no Brasil. Esses equipamentos são utilizados massivamente, com a responsabilidade de adequar os níveis de tensão das redes primárias aos níveis de consumo dos clientes finais dessas distribuidoras.

Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2015) o Brasil possui hoje 63 concessionárias ou cooperativas de distribuição de energia, sendo que cada uma delas possui particularidades em relação às especificações dos transformadores de distribuição, o que exige do projetista que trabalha na indústria do transformador de potência conhecimento para desenvolver projetos distintos que atendam a necessidade de cada cliente. Segundo a Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica (ABINEE), por meio de ANEEL (2015), estima um crescimento médio de 10% na utilização de transformadores de distribuição para os próximos 5 anos,

informação que tem estimulado o mercado e trazido competidores estrangeiros para o comércio nacional.

Com o aumento do número de competidores nacionais e internacionais no mercado de transformadores de distribuição, a redução de custos e melhoria da qualidade de produtos elétricos têm se tornado uma preocupação frequente dos fabricantes. Neste contexto, parte significativa dos esforços de projetistas de transformadores desse tipo se concentra na otimização da relação “confiabilidade X custo” do projeto. Nessa relação um dos parâmetros é a otimização das distâncias dielétricas críticas de determinado projeto, de modo que seu desempenho não seja colocado em risco e seja garantida a suportabilidade aos ensaios da norma brasileira ABNT NBR 5356.

Por meio da utilização de materiais com maior suportabilidade dielétrica, uso de técnicas de projetos e ferramentas computacionais, tem sido possível diminuir os custos com matéria-prima na produção de transformadores de distribuição, sem impactar na qualidade de desempenho do equipamento. Assim, o estudo do custo/benefício em termos técnicos de desempenho e robustez deve ser considerado quando se deseja projetar transformadores mais compactos.

Além disso, a experiência do mercado vem demonstrando que danos em transformadores ocorrem principalmente em seus enrolamentos, quando expostos a altas intensidades de campo elétrico que rompem a rigidez dielétrica dos materiais isolantes utilizados. Por esse motivo, a citada otimização da distância dielétrica mantendo a suportabilidade do equipamento aos ensaios de rotina, tal como tensão aplicada e impulso atmosférico, coloca-se como um dos principais desafios dos projetistas de transformadores e exige técnicas e ferramentas que proporcionem ao projetista a utilização de materiais mais eficientes e diminuição da utilização de matéria-prima e do tempo de projeto e de produção desses equipamentos, partes constituintes de uma estratégia de eficiência do equipamento e dos processos produtivos.

Tendo em vista o impacto do uso de transformadores no sistema de distribuição de energia e o elevado valor investido pelas concessionárias na compra desses equipamentos, o presente trabalho desdobra-se sobre esse tema, objetivando analisar as variações de Estresse Dielétrico comumente encontradas nos projetos de transformadores de distribuição e, dessa maneira, facilitar a otimização das distâncias

dielétricas de projeto, reduzindo os custos de produção sem comprometer a performance e confiabilidade do equipamento.

Para isso, foi realizado levantamento bibliográfico acerca do tema em bases de dados nacionais e internacionais, seguido de simulação em elementos finitos do Campo Elétrico nos enrolamentos de Alta Tensão (AT) e Baixa Tensão (BT) e simulações paramétricas, todas desenvolvidas com o auxílio do software Maxweel, que resultaram na elaboração de um fluxograma de otimização de projeto com a finalidade de orientar os projetistas na redução proposta de distâncias dielétricas e custos de fabricação.

Destarte, o segundo capítulo desta pesquisa reuniu o aparato teórico necessário às discussões desenvolvidas, introduzindo os conceitos principais das partes constituintes de um transformador de distribuição e apresentando os materiais construtivos mais empregados, bem como o ensaio de impulso atmosférico utilizado para verificar a suportabilidade do projeto.

No capítulo seguinte foi exposto o modelo matemático utilizado, junto à simulação em Elementos Finitos e aos resultados das simulações paramétricas para determinação das equações de cada parâmetro empregado posteriormente.

O capítulo 4 apresentou o modelo de otimização de projeto proposto e os resultados obtidos com a utilização desta metodologia, englobando ganhos financeiros e de padronização de projetos. Por último, o capítulo 5 concluiu as análises desenvolvidas e discursou sobre trabalhos futuros que poderão ser realizados a partir desta implementação.

O estudo vem, assim, contribuir com o conhecimento científico acerca do processo de projeto e produção de transformadores de forma intrinsecamente vinculada à prática profissional, objetivando a formulação de modelos aplicáveis de otimização de projetos.

2 TRANSFORMADORES DE DISTRIBUIÇÃO

2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Os transformadores são máquinas elétricas estáticas com função de transmitir, mantendo sem alteração a capacidade e a frequência, a energia elétrica de um sistema com determinada tensão, para outro sistema com tensão diferente. Esse processo ocorre mediante um campo eletromagnético alternado (FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2006).

Uma das principais aplicações dos transformadores é a sua utilização nas redes aéreas de distribuição, que tem por finalidade principal rebaixar os níveis de tensão para níveis que serão entregues ao cliente final e, comumente são empregados na distribuição de energia elétrica urbana e rural, tendo grande relevância nos sistemas elétricos de distribuição. Esses equipamentos devem ser projetados e construídos de modo a respeitarem os limites estabelecidos em normas e atenderem às necessidades de sua utilização, sendo especificados conforme a norma ABNT NBR 5440 (2011). Tendo em vista que ocupam uma região intermediária entre os sistemas de potência e as cargas, é importante que eles sejam projetados de maneira a suportar os ensaios prescritos em norma e também as variações de carga e temperatura no decorrer de sua utilização, isso para que seja mantida a confiabilidade do sistema e não ocorra a perda de vida útil do equipamento (TARDIVO, 2012).

Considerando-se a necessidade de disponibilizar ao mercado equipamentos mais eficientes e com custos cada vez mais competitivos, faz-se necessário um profundo conhecimento, por parte do fabricante, dos parâmetros que compõem os custos e a otimização de seu projeto.

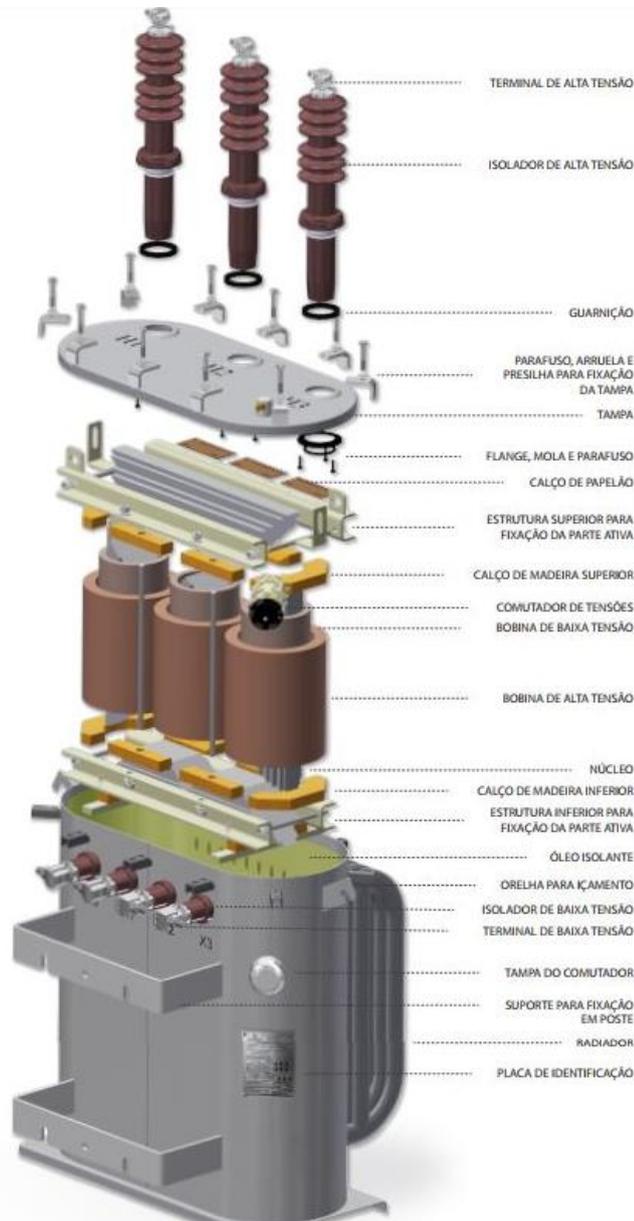
Quando são contabilizados os custos de um equipamento, além daqueles referentes à sua fabricação (material, mão de obra, maquinário, estrutura de comercialização, etc.), são considerados também os custos referentes à instalação, à manutenção, ao consumo de energia (rendimento) e ao tempo de vida útil do

equipamento. Neste capítulo serão apresentadas algumas características técnicas referentes aos materiais englobados na fabricação de transformadores, bem como um dos ensaios realizados em laboratório para comprovação da suportabilidade dielétrica do equipamento.

2.2 ASPECTOS CONSTRUTIVOS E DE FÁBRICA

Um transformador de distribuição é constituído pela junção de diversos materiais que compõem partes distintas, mas que em conjunto o levam a seu pleno funcionamento, entre elas o núcleo, os enrolamentos, o sistema de isolamento e a estrutura mecânica, como demonstrado na figura abaixo (ver Figura 1).

Figura 1 – Partes de um Transformador de Distribuição

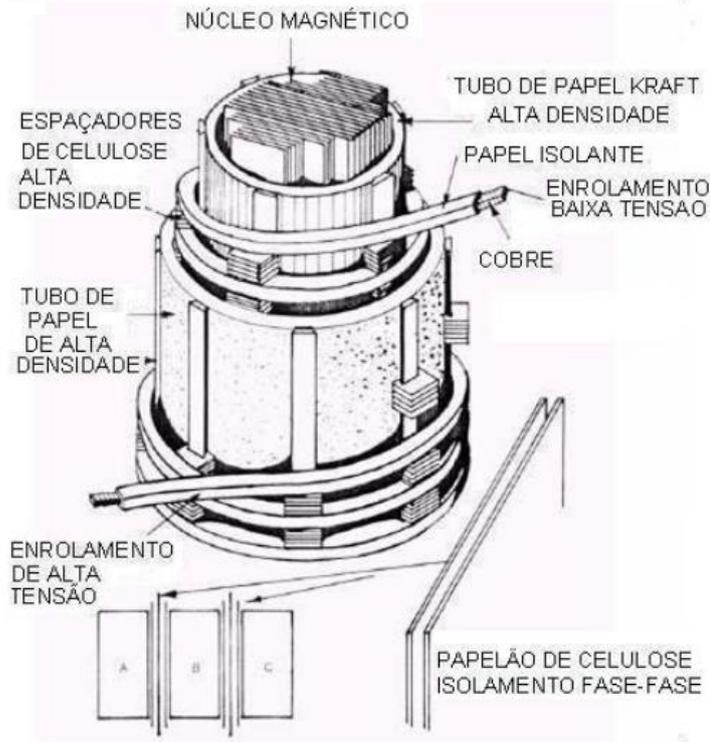


Fonte: Autor.

A Figura 1 ilustra as principais partes de um transformador de distribuição. Nela pode ser visualizada a parte mecânica (tanque, tampa, isoladores, estrutura de fixação) e a parte elétrica (enrolamentos de alta e baixa tensão, núcleo, sistemas de isolamento). Um aspecto principal do transformador, seja ele de distribuição ou industrial, é o seu sistema de isolamento, constituído basicamente por um líquido isolante e uma isolamento sólida feita por papel Kraft. O papel é o elemento responsável por definir a vida útil deste equipamento, uma vez que esse material não é regenerativo, diferente

do óleo em uso que pode ser tratado ou regenerado. A Figura 2 apresenta detalhes do sistema isolante em um transformador (MEYERS; KELLY; PARRISH, 1982).

Figura 2 – Ilustração do detalhe do sistema de isolamento de um transformador



Fonte: (MEYERS; KELLY; PARRISH, 1982).

Como pode ser visto, o sistema isolante de um transformador inclui os materiais presentes em seu núcleo que, além das partes acima apresentadas, é constituído por resinas e fibras, que fixam os componentes isolantes e magnéticos, além de materiais elastômeros e tintas compatíveis com óleo isolante para vedar e proteger o equipamento (MEYERS; KELLY; PARRISH, 1982). Conhecer os materiais utilizados na construção de um equipamento como o transformador de potência é importante pois seu desempenho e eficiência dependem diretamente deles. Com o avanço tecnológico e as descobertas recentes, passaram a ser utilizados novos materiais como metal amorfo, outros tipos de papel isolante e técnicas de fabricação aprimoradas, além de alterações em conceitos de concepção de projetos, o que têm permitido a construção de transformadores com um alto grau de desempenho (SILVA, 2015).

2.2.1 Aspectos Fabris

O processo fabril de um transformador de distribuição inicia-se com o corte e montagem do núcleo ferromagnético. As chapas de aço-silício são cortadas e empilhadas conforme descrição prévia de projeto, considerando as perdas em vazio especificadas em normas nacionais e internacionais.

Terminada a fabricação do núcleo inicia-se o processo produtivo das bobinas de Baixa Tensão (BT) e Alta Tensão (AT). A bobina de BT é a primeira a ser fabricada. Após sua conclusão são inseridos os canais responsáveis pela sua refrigeração e por garantir o GAP entre as bobinas de AT e BT. A bobina de AT é construída de forma sobreposta à bobina de BT (RIES, 2007). Essa etapa do processo produtivo tem grande influência na suportabilidade do equipamento aos ensaios de rotina e tipo, pois falhas operacionais nessa etapa podem diminuir as distâncias elétricas, levando o equipamento a falhas durante os ensaios ou durante a operação (RIES, 2007). De maneira comparável, tais falhas também podem levar ao crescimento físico da bobina, ocasionando, muitas vezes, a obtenção de valores superiores aos estabelecidos em norma para a impedância.

Após essa etapa, a bobina e o núcleo são montados no conjunto denominado parte ativa (PA) e levados para secagem, um momento muito importante no que diz respeito a suportabilidade dielétrica do equipamento, pois nele é retirado todo resquício de umidade. A parte ativa então é colocada no tanque metálico, onde é feito um processo de vácuo antes do preenchimento com óleo isolante. Esse processo visa retirar qualquer possível bolha de ar que possa existir no equipamento.

Terminada a montagem o transformador é submetido a todos os ensaios de rotina e, se necessário, a ensaios de tipo, para em seguida ser disponibilizado ao cliente.

2.2.2 Custos de Produção

Os custos de produção de um transformador de distribuição estão diretamente relacionados aos custos de matéria prima em seu processo produtivo. Pode-se afirmar que a principal parcela de custo se concentra em 4 materiais básicos para sua produção: aço silício, condutor elétrico (cobre ou alumínio), isolante sólido (papel, papelão, etc.) e óleo isolante (RAS OLIVA, 1975).

A Tabela 1 a seguir demonstra os percentuais dos principais materiais na previsão do custo de fabricação de um transformador de distribuição, com base na experiência e histórico de um grande fabricante nacional.

Tabela 1 – Custos básicos para um transformador de distribuição

Material	% Custo do Produto
Núcleo (Aço Silício)	20%
Condutores (Alumínio ou Cobre)	13%
Isolantes Sólidos	7%
Óleo Isolante	8%

Fonte: Autor.

2.3 ENROLAMENTO

O enrolamento tem grande relevância na construção de transformadores de distribuição devido à sua importância elétrica, rigidez mecânica e ao impacto que gera no custo desses equipamentos. Em relação às características elétricas do enrolamento, é necessário que garantam que o seu isolamento seja compatível com sua classe de tensão, enquanto sua temperatura de operação precisa ser compatível com sua classe de temperatura. Já quanto à rigidez mecânica, está sujeita a elevados esforços devido às forças eletromagnéticas que podem ocorrer em falhas nas redes de distribuição (RIES, 2007). Além disso, o enrolamento impacta diretamente no custo do transformador, de acordo com o material empregado, sendo possível a utilização de cobre ou alumínio na sua constituição (RIES, 2007).

A seguir serão apresentados os tipos de condutores que podem ser utilizados em enrolamentos de transformadores e os principais materiais utilizados para garantir a sua isolação elétrica.

2.3.1 Condutores

Em transformadores de distribuição, basicamente são utilizados três tipos de condutores, os retangulares, os chapas e os condutores cilíndricos. Entre eles, os condutores retangulares são utilizados em aplicações onde a corrente possui valores mais expressivos. Já as chapas metálicas são empregadas com o objetivo de diminuir

os espaços físicos requeridos e facilitar a dispersão de calor, sendo utilizadas com maior frequência em pequenos transformadores de potência (SANTOS, 2014). O condutor cilíndrico esmaltado, por sua vez, é formado por um condutor de cobre ou alumínio, que pode ser redondo ou retangular, isolado com a aplicação de uma película termorrígida de verniz. Os vernizes isolantes têm a função de promover o isolamento entre as espiras, substituindo o papel celulósico aplicado nos transformadores de potência (SCHOLZ, 2013).

O material com o qual o enrolamento é fabricado é especificado nas características de projeto de transformadores de distribuição e interfere em seu custo de produção e em sua eficiência. Usualmente são utilizados o cobre e o alumínio, com predominância da utilização do cobre. Contudo, recentemente esse cenário vem sendo alterado devido à atratividade do preço do alumínio, principalmente quando se trata de transformadores de distribuição, para os quais a necessidade de redução de custos tem se tornado um fator determinante em sua produção e comercialização (RIES, 2007).

Em relação à utilização desses materiais, sabe-se que o cobre apresenta melhores características na condução quando comparado ao alumínio como, por exemplo, menor resistividade, maior resistência à ruptura e melhor condução de calor. Por isso, na produção de transformadores de distribuição, são necessárias compensações nas dimensões do enrolamento para viabilizar a utilização do alumínio (SALUSTIANO, 2012). Segundo Salustiano (2012), para utilização de condutores de alumínio é preciso incrementar em 66% a área de secção transversal em comparação ao cobre, a fim de se manter o mesmo valor de resistência. O autor aponta ainda que, para se obter o mesmo comportamento que o do cobre frente ao curto-circuito, há a necessidade de utilizar o condutor de alumínio com área de secção transversal 80% maior, dificultando consideravelmente sua aplicação em transformadores de alta potência.

2.3.2 Verniz Isolante

Em transformadores de distribuição, a principal característica do fio de cobre esmaltado com verniz isolante deve ser a resistência às perdas dielétricas. A camada de verniz nos fios esmaltados se desgasta após um determinado tempo de trabalho,

causando problemas no equipamento, desde pequenas descargas até curtos-circuitos entre espiras em casos extremos (RAVAGLIO; SCHAEFER; TEIXEIRA, 1998).

Ravaglio, Schaefer e Teixeira (1998), apresentam a elevada rigidez dielétrica como principal característica da película de verniz em condutores de transformadores. Os autores destacam que, para obter uma superfície lisa e uniforme, o fio precisa receber diversas passagens sucessivas de verniz isolante. Contudo, o excesso da camada de verniz isolante no fio pode causar uma má acomodação entre as espiras e um aumento no tamanho da bobina, levando a problemas de dimensionamento e projeto, enquanto a redução da camada de verniz isolante pode acarretar em má isolamento nos fios. Daí a importância de um dimensionamento correto desse material na construção do transformador.

2.3.3 Papel Isolante

Os papéis utilizados para isolar as partes dos transformadores usualmente têm base celulósica. O papel kraft, principal papel isolante empregado, é normalmente utilizado para efetuar a isolação entre as camadas dos enrolamentos, os espaçadores, as varetas para canais de circulação de óleo, entre outros. A celulose, sob a forma de papel ou papelão isolante elétrico (papel Kraft, papelão Kraft, papel manilha e papelão com fibra de algodão), tem sido largamente utilizada nos transformadores como isolante sólido. A sua escolha foi estabelecida universalmente em função de alguns parâmetros, como por exemplo, o seu baixo custo e fácil obtenção, além de suas boas propriedades elétricas e mecânicas quando imersa no óleo isolante (MORAIS, 1990; MILASCH, 1984).

A deterioração do papel isolante está relacionada ao envelhecimento de suas características físico-químicas, e ocorre principalmente em função da variação de temperatura e pontos de umidade que passam a existir no decorrer do tempo de utilização do equipamento (IEEE C57.91, 2012). O papel mais comumente utilizado na isolação entre camadas dos transformadores de distribuição é do tipo diamantado, e possui espessuras de 0,13 mm e 0,2 mm, as quais são dimensionadas com base no projeto do equipamento, considerando as suas forças eletromecânicas. O cálculo para a utilização do papel é feito com base na diferença de potencial entre cada camada do transformador. As espessuras citadas acima têm se mostrado suficientes na experiência de fabricantes de transformadores de distribuição e por meio de

ensaios realizados ao longo dos anos. Diante disso, atualmente, existe uma padronização para dimensionar a quantidade de papel a ser utilizada nos transformadores de acordo com a sua potência e classe de tensão (D'ALMEIDA E SILVA; MORAIS, 1994).

Além do papel diamantado, as empresas fabricantes de papel têm avançado nos estudos para viabilizar a utilização de materiais alternativos que possam substituí-los na isolação sólida. Um desses materiais é o papel NOMEX, fabricado a base de aramida e que possui características térmicas melhores do que os papeis a base de celulose (QUADROS, 2006).

2.4 ÓLEO ISOLANTE

O óleo isolante possui duas funções principais na constituição do transformador, a de contribuir no isolamento entre os componentes desse equipamento e a de auxiliar na transferência do calor gerado pelo efeito joule nos enrolamentos e no núcleo para o seu exterior. Estas funções dependem principalmente da rigidez dielétrica e da viscosidade do óleo, respectivamente.

Rigidez dielétrica refere-se ao valor de campo elétrico necessário para que ocorra descarga disruptiva na camada de óleo situada entre dois eletrodos em determinadas condições. O óleo seco e limpo apresenta rigidez dielétrica elevada, tendo como principais responsáveis pela sua redução a presença de água livre e partículas sólidas. Por esse motivo, a rigidez dielétrica pode ser utilizada como indicador de contaminação do óleo quando apresenta baixos valores (ABNT NBR 10576, 2012).

Já a viscosidade é uma propriedade que representa a resistência interna do líquido ao movimento ou à deformação e traduz a capacidade de circulação do óleo. A capacidade de transferência de calor é fortemente influenciada pela temperatura. Observa-se que essa propriedade não é afetada de maneira significativa pela oxidação e envelhecimento natural do óleo (TAMURA, 2009).

Ainda assim, o óleo isolante está sujeito à oxidação sob ação do calor, oxigênio e metais presentes no transformador. Como produtos finais desse processo há a produção de água, ácidos 56 carboxílicos e um composto decorrente de polimerização conhecido popularmente como borra. De acordo com Reino (2012), a adição de inibidores da oxidação é desejável como forma de atrasar o processo de oxidação,

sendo que o tipo mais comum de inibidor utilizado é o di-terc-butil-paracresol (REINO, 2012).

O óleo isolante pode conter partículas de água na forma solúvel (dissolvida) e dentre as formas em que podem ser encontradas moléculas de água no óleo, a que possui o maior impacto na redução da rigidez dielétrica é a água no formato livre (WILHELM et al., 2006).

Outro fator importante é o índice de neutralização, que é um indicador da acidez do óleo e da quantidade de componentes ácidos presentes nele. O aumento do índice de neutralização está relacionado à oxidação do óleo e ao surgimento de produtos ácidos, fenômenos estes que aceleram a degradação do papel isolante e podem resultar na corrosão de peças metálicas.

Como já citado, a degradação do óleo e do papel isolante podem levar a formação de um produto polimerizado, conhecido como borra. Dependendo das características do óleo, após o limite de solubilidade ser atingido, a borra se deposita na parede do tanque e demais partes do transformador, incluindo enrolamentos e núcleo. O depósito deste composto prejudica a dissipação de calor e resulta em aumento da temperatura de operação do transformador (SCHOLZ, 2013).

Mais de um tipo de óleo podem ser utilizados como isolantes na construção de transformadores. Entre eles se destacam o mineral e o vegetal, melhor descritos abaixo.

2.4.1 Óleo Mineral Isolante

O óleo mineral isolante (OMI) é uma mistura de compostos na qual a maioria das moléculas é constituída por carbono e hidrogênio (hidrocarbonetos) e, em pequenas quantidades, por compostos que apresentam nitrogênio, enxofre e oxigênio em sua estrutura (WILSON, 1980).

O OMI é obtido a partir da destilação do petróleo a uma temperatura entre 300 e 400°C e suas características dependem da natureza do petróleo e do processo de obtenção (SILVA, 2015). A grande utilização desse tipo de óleo como líquido isolante em transformadores ocorre por sua fácil disponibilidade, baixo custo e reconhecida eficácia no sistema de isolamento e de refrigeração de equipamentos elétricos. O OMI é o fluido dielétrico mundialmente mais utilizado no setor elétrico (SILVA, 2015).

2.4.2 Óleo Vegetal Isolante

O óleo vegetal isolante (OVI) é manufaturado a partir dos grãos de plantas oleaginosas. Seu processo de produção ocorre pelo refinamento dessas sementes e inclusão de aditivos antioxidantes e depressores do ponto de fluidez, para que possua características que o tornem um dielétrico. O óleo vegetal mais utilizado em transformadores é oriundo da soja, porém já são apontados em estudos os beneficiamentos de milho, girassol, babaçu, entre outros.

O OVI constitui um novo conceito para transformadores, posto que, além do fator ambiental, possui todos os quesitos de um fluido isolante de alta temperatura, proporcionando segurança e a operação do transformador em temperaturas mais elevadas, sem o comprometimento da vida útil do equipamento (WILHELM et al., 2006). Quimicamente, o OVI é constituído de moléculas de acilgliceróis, como mostrado na Figura 5, que são originárias da condensação entre ácidos graxos e glicerol (tri-álcool), formando ésteres de ácidos graxos. Esses compostos são classificados em mono, di ou triacilgliceróis, dependendo de se uma, duas ou três moléculas de ácido graxo se associa(m) covalentemente ao glicerol, respectivamente. É importante salientar que os triacilgliceróis podem ser formados por ácidos graxos iguais ou diferentes entre si e, dependendo da origem da matéria prima, podem ser saturados ou insaturados (UHREN, 2007).

2.5 ENSAIO DE IMPULSO

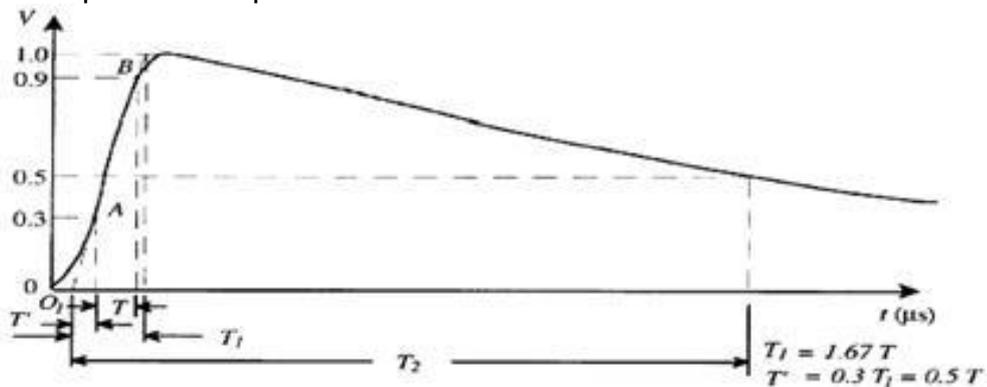
O ensaio de impulso tem como função aplicar esforços ao material dielétrico que correspondam, mesmo que de maneira aproximada, aos esforços a que esses equipamentos são submetidos em descargas atmosféricas ou manobras nos sistemas elétricos (ROMANO, 2014). Esse processo pode prever a existência de defeitos em maior ou em menor escala no isolamento de transformadores de potência.

Pela ABNT NBR 5356, durante a realização do ensaio de tensão suportável de impulso atmosférico, o transformador deve ser submetido a uma série de aplicações de impulsos, conforme sequência descrita a seguir: aplicação de um impulso com forma plena reduzida, com valor de crista entre 50% e 75% do valor da forma plena normalizada; e aplicação de três impulsos com forma plena normalizada, com valor de crista igual ao da tensão suportável nominal, definida em função da classe de

tensão do transformador sob ensaio. A forma de onda plena reduzida é aplicada com o propósito de não danificar totalmente o transformador em caso da existência de defeitos bastante grosseiros. Essa aplicação não solicita tanto o transformador sob ensaio, embora defeitos acentuados no isolamento possam ser evidenciados. Os valores de crista de tensão a serem aplicados nos ensaios são definidos pela ABNT NBR 5356 e têm por base a classe de tensão do equipamento sob análise (ROMANO, 2014).

A forma típica de onda, bem como o modo de se estimar os tempos característicos e as tolerâncias admissíveis nos ensaios podem ser vistos na Figura 6. De acordo com a ABNT NBR 5356, para transformadores imersos em óleo isolante, a tensão de ensaio tem normalmente polaridade negativa, de modo a reduzir o risco de descargas externas no circuito de ensaio. Esses valores geralmente estão na faixa de 20% a 40% acima das tensões transitórias que podem realmente atingir os transformadores, considerando a existência de dispositivos de proteção contra sobretensões. Desta forma, o ensaio de impulso considera uma margem de segurança acima dos esforços esperados para um transformador em serviço.

Figura 3 – Forma de onda característica do impulso atmosférico pleno e as definições para os tempos de frente e cauda



Fonte: (ROMANO, 2014, p. 19).

A norma também prevê a aplicação de impulsos com forma cortada. Tal forma de onda tem por objetivo avaliar o comportamento da isolação do transformador quando submetido às variações bruscas na tensão, como por exemplo, ocorrência de descarga atmosférica próxima ao transformador de distribuição, da atuação de centelhadores isolados a ar, atuação de para-raios com centelhadores, ou mesmo descarga nos isoladores ou em buchas do transformador.

De modo geral, o ensaio de impulso atmosférico deve ser realizado em todos os enrolamentos de um transformador. Ao se aplicar um impulso a um dos terminais recomenda-se que os demais sejam aterrados diretamente ou através de uma resistência. O aterramento tem o intuito de protegê-los contra sobretensões que podem ser induzidas nos enrolamentos durante o ensaio de impulso. O enrolamento sob ensaio também deverá ter um dos seus terminais aterrado, estando o outro conectado ao circuito de geração do impulso.

Segundo a ABNT NBR 5356, a sequência de impulsos deve ser aplicada sucessivamente a cada um dos terminais de linha do enrolamento sob ensaio. No caso de transformadores trifásicos, os outros terminais de linha do enrolamento devem ser aterrados diretamente ou através de impedância de baixo valor, inferior ao valor da impedância da linha. Se o enrolamento tiver um terminal de neutro, esse terminal deve ser aterrado diretamente ou por meio de impedância de baixo valor, como um derivador (shunt) para medição da corrente. O tanque do transformador sob ensaio também precisa ser aterrado.

Os requisitos desse ensaio são satisfeitos se não for obtida durante a aplicação dos impulsos plenos nenhuma indicação de falha ou deformação de onda aplicada.

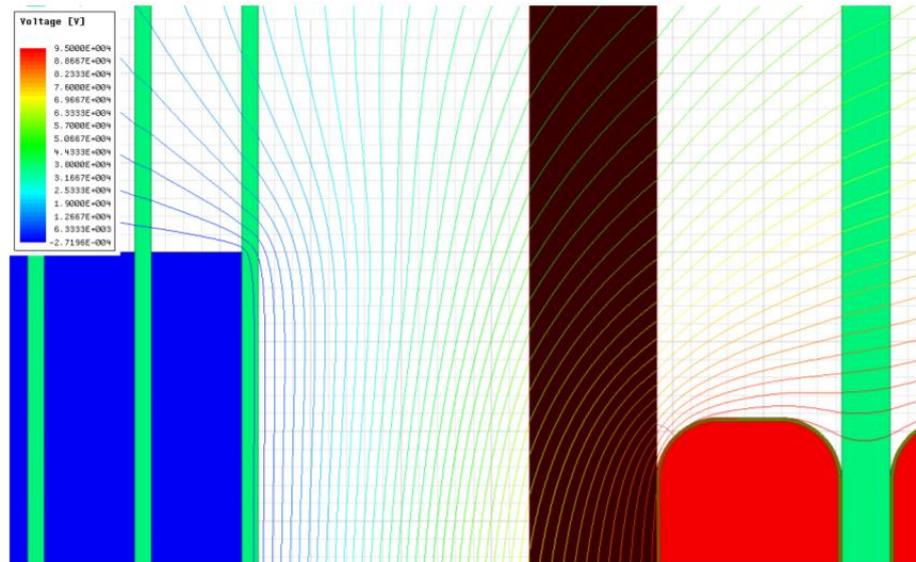
3 CÁLCULO DO CAMPO ELÉTRICO NO ENROLAMENTO DE TRANSFORMADORES

O cálculo matemático para determinação do Campo Elétrico ao redor das bordas dos enrolamentos de transformadores é complexo e sua modelagem serve como uma etapa inicial para o conjunto de iterações a serem realizadas computacionalmente. Neste capítulo são apresentados os conceitos centrais envolvidos no cálculo do Campo Elétrico e sua simulação em Elementos Finitos.

3.1 MODELO MATEMÁTICO

O modelo matemático para determinação do Campo Elétrico no enrolamento de transformadores tem por objetivo orientar o estudo que permite identificar o ponto crítico para a otimização do projeto de transformadores de distribuição. Neste sentido, Fogaras e Lampe (1968) evidenciaram que o ponto crítico para o Estresse Dielétrico dos enrolamentos se encontra no raio de contorno de seu condutor, considerando uma aplicação de 95kV no enrolamento de AT, valor este utilizado no ensaio de impulso atmosférico. A Figura 4 ilustra as curvas equipotenciais do modelo base simulado em Elementos Finitos, onde o material de cor azul é o enrolamento de BT e o material de cor vermelha é o enrolamento de AT. Nela é possível observar o maior Estresse Dielétrico no raio do condutor de alta tensão (AT).

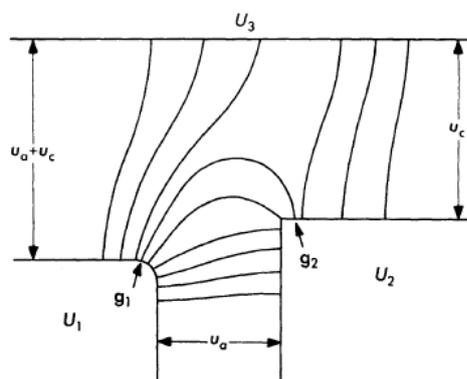
Figura 4 – Curvas Equipotenciais na borda do condutor



Fonte: Autor.

Para se obter o Campo Elétrico nas bordas de condutores circulares é utilizada a Solução da Transformação de Schwarz-Chrostoffel, que, pela aplicação de polígonos fechados, analisa o Campo Elétrico entre potenciais elétricos distintos (TAKAHASHI; SHIRASAKA; OKUYAMA, 1994). Essa transformação visa aproximar o cálculo do Campo Elétrico de uma equação linear, facilitando a sua solução. As áreas dos polígonos fechados, gerados pelas curvas equipotenciais do Campo Elétrico em um sistema com três potenciais distintos (U_1, U_2 e U_3) podem ser observadas na Figura 5.

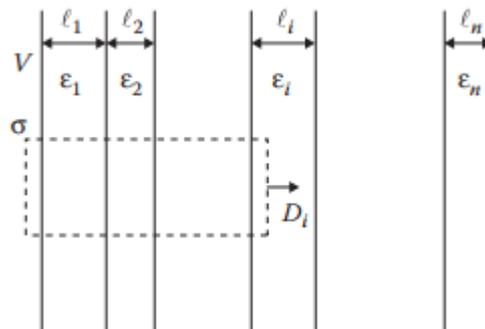
Figura 5 – Áreas de Polígonos gerados pelo Campo Elétrico com três diferentes potenciais



Fonte: (FOGARAS; LAMPE, 1968, p. 401)

Para calcular as curvas equipotenciais de maneira simplificada, é necessário efetuar a planificação dessa área de polígonos gerada pelo Campo Elétrico, como proposto por Fogaras e Lampe (1968). Nesse cálculo considera-se que o eletrodo carregado possui um potencial elétrico uniforme denominado V , como é demonstrado na Figura 6, e assume-se que a densidade de carga superficial nesse eletrodo é designada como σ . Uma carga de superfície oposta de $-\sigma$ existe no eletrodo de terra. Ambos os potenciais de eletrodo podem ser aumentados em uma quantidade igual sem alterar os resultados, deste modo, somente a diferença de potencial é considerada no cálculo. Também é considerado que os materiais possuem características elétricas lineares, sendo assim mantidas as características de cada material, de maneira que apenas a permissividade ϵ pode variar nas diversas camadas devido à distância entre elas, conforme ilustrado abaixo.

Figura 6 – Curvas Equipotenciais para o Modelo Base



Fonte: (FOGARAS; LAMPE, 1968, p. 402).

Ao aplicar a transformação chega-se à equação na qual é identificado que o Campo Elétrico nesse condutor tem por variável a distância entre as camadas energizadas e isolantes. A equação é descrita a seguir.

$$V = E_1 l_1 + E_2 l_2 + \dots = \sum_{j=1}^n E_j l_j = E_1 l' \quad V = E_1 l_1 + E_2 l_2 + \dots = \sum_{j=1}^n E_j l_j = E_1 l' \quad (1)$$

Onde: V - Potencial elétrico no eletrodo carregado;

E_1 - Intensidade do Campo Elétrico no material 1;

E_2 - Intensidade do Campo Elétrico no material 2;

l_1 - Espessura da Camada 1;

l_2 - Espessura da Camada 2;

l' - Espessura equivalente total;

Para determinação da distância equivalente, ou espessura equivalente total (l') em um sistema de multicamadas utiliza-se a equação abaixo, na qual o Campo Elétrico é inversamente proporcional ao valor da permissividade do meio isolante.

$$l' = (l_1 + \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} l_2 + \dots + \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_n} l_n) \quad (2)$$

Onde: ε_1 - Permissividade do meio isolante na camada 1;

ε_2 - Permissividade do meio isolante na camada 2;

ε_n - Permissividade do meio isolante na camada n;

A equação 2 permite a redução da geometria real do transformador para a área do polígono. Se a distância equivalente está relacionada à constante dielétrica da cobertura do papel ou do óleo, a força de Campo calculada na borda entre papel e óleo é muito baixa ou muito alta, respectivamente. Para fins práticos, ambas as aproximações são suficientemente precisas, por isso foram utilizadas. Contudo, a aproximação apresentada na equação 2 não considera a refração das linhas de Campo na transição entre meios com diferentes constantes dielétricas. Assim, o componente tangencial do Campo elétrico no limite entre dois isolamentos torna-se pequeno em comparação ao componente perpendicular. Neste caso, observa-se que a refração é insignificante para a força de Campo total (FOGARAS; LAMPE, 1968).

3.2 SIMULAÇÃO DO CAMPO ELÉTRICO POR MEIO DE ELEMENTOS FINITOS

O desenvolvimento deste trabalho baseou-se na modelagem dos enrolamentos, isolações e núcleo de um transformador de distribuição e simulação pelo Método de Elementos Finitos (MEF). O MEF é um método numérico para determinar soluções aproximadas de problemas de valores sobre o contorno de equações diferenciais que subdivide o domínio de um problema em partes menores, partes essas chamadas de malha de simulação ou de elementos finitos (BASTOS, 2003).

A partir da simulação foi aplicado o conceito de *Cumulative Stress*, conforme descrito a seguir. Esse método é utilizado para a determinação do Campo Elétrico entre pontos com potenciais distintos. Também será apresentado o modelo base utilizado para elaboração deste trabalho.

3.2.1 Método do Cumulative Stress (Estresse Dielétrico Cumulativo)

O método do *Cumulative Stress* consiste em quantificar os valores de Campo Elétrico cumulativo ao longo de um caminho pré-definido, com o propósito de evidenciar o possível caminho de descargas elétricas que podem ocorrer em dutos entre os enrolamentos, nas superfícies dos cilindros ou anéis isolantes e nos condutores isolados com papel, com maior probabilidade de surgimento nas regiões de maior concentração de Campo Elétrico pontual (NUNES; HARMEL, 2013). O *Cumulative Stress* é baseado na distribuição do potencial elétrico e do Campo Elétrico obtidos numericamente ao longo do domínio em estudo. Com essa distribuição, a primeira etapa do estudo consiste em definir o caminho a ser analisado. A Figura 7 apresenta a tabela inicial de Nunes e Harmel (2003), onde são definidos os pontos do caminho a ser analisado e o potencial elétrico em cada ponto deste caminho.

Figura 7 – Pontos iniciais para obtenção do Cumulative Stress

Ponto	1	2	3	4	5
Caminho					
Tensão [kV]	64	58	50	38	35
Distância [mm]	2	4	6	8	10

Fonte: (NUNES; HARMEL, 2003, p. 2)

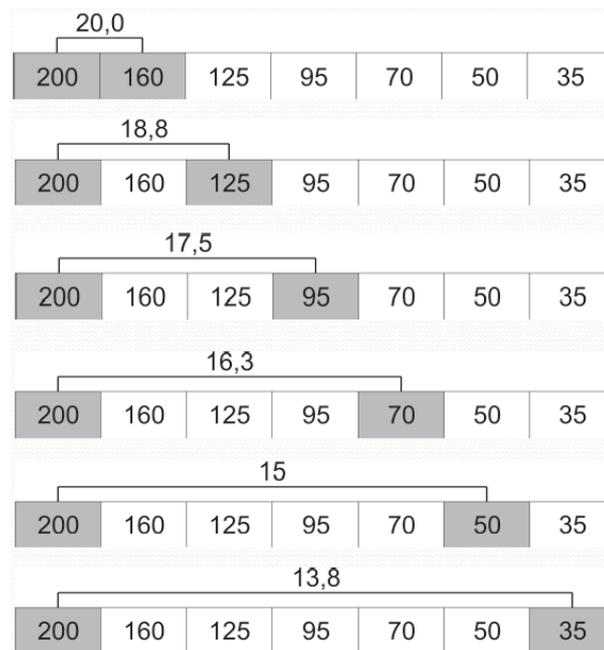
Definidos esses pontos inicia-se o cálculo de todos os valores do Campo Elétrico e o método do *Cumulative Stress* é inicialmente aplicado no ponto com maior Campo. No caso de enrolamento de transformadores o maior Campo Elétrico é obtido na borda do condutor energizado.

Na Figura 8 pode-se observar o passo a passo realizado para o cálculo do Campo Elétrico cumulativo, onde, após a definição do maior gradiente de tensão, valores nos eixos horizontais expressos em kV, verifica-se o maior gradiente lateral ao ponto identificado. Após a comparação entre os dois gradientes pontuais obtidos

definidos anteriormente, guarda-se o valor maior e a análise deve ser estendida na direção em que se é produzido maior gradiente de tensão cumulativo.

Esta ação se repete até finalizar o vetor analisado ao final, se obtém tal grandeza considerando o caminho de descarga como um todo. Neste cálculo leva-se em consideração as diferenças de potencial e a quantidade de pontos existentes entre elas.

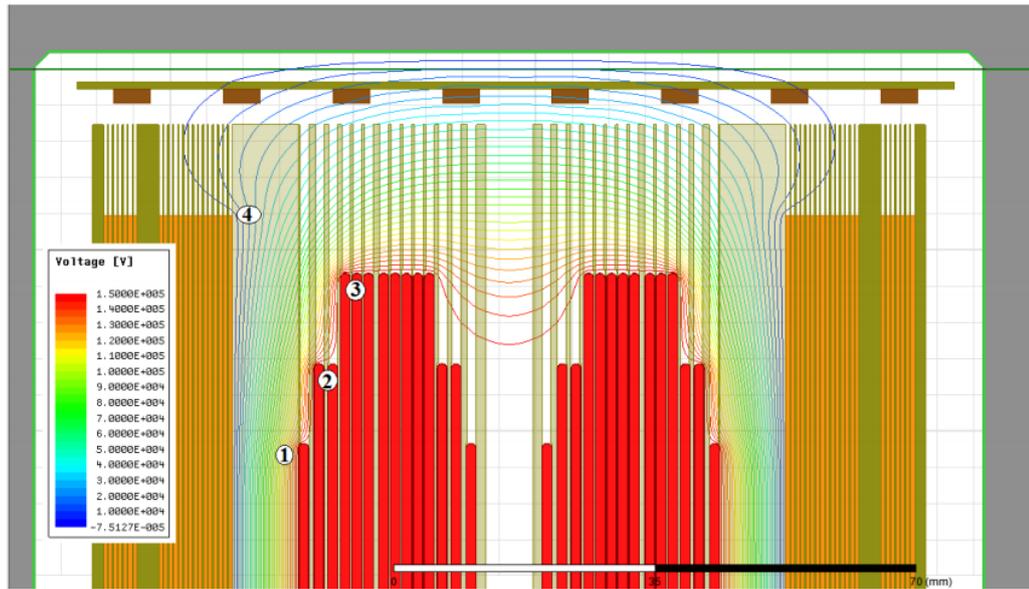
Figura 8 – Etapas de Cálculo do *Cumulative Stress*



Fonte: (NELSON, 1994)

Os possíveis pontos de descarga citados são demonstrados na Figura 9 pelas curvas 1, 2, 3 e 4, na qual visualiza-se os caminhos de descargas mais relevantes definidos pela intensidade do campo elétrico no modelo base simulado, e, portanto, considerados nos estudos apresentados a seguir.

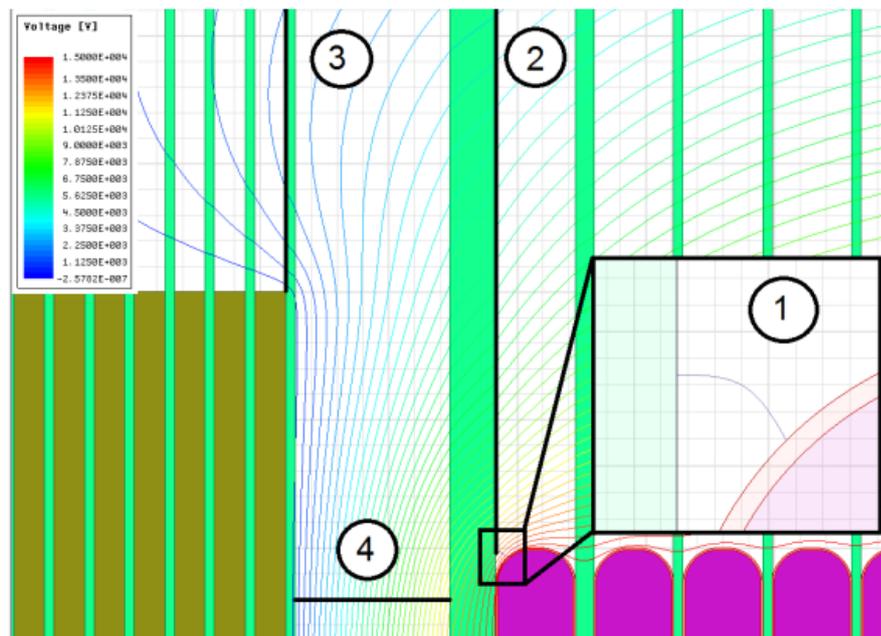
Figura 9 – Pontos com maior relevância para descargas



Fonte: Autor.

A figura 10 especifica que os principais caminhos se encontram nas bordas de contorno do condutor de AT (1), no decorrer da isolamento inicial da AT (2), no decorrer da isolamento final de BT (3) e horizontalmente entre as bobinas de AT e BT (4), como podem ser vistos em maior detalhe na figura a seguir (ver Figura 10).

Figura 10 – Principais caminhos para descarga



Fonte: Autor.

Além do método *Cumulative Stress*, utilizou-se também o modelo de *design curves* apresentado por Moser (1979) que se baseia no método *One Minute Test*, no qual são empregadas condições similares às encontradas em um transformador para aplicação de tensão e a ruptura do dielétrico, que resulta em uma estimativa de distribuição estatística de ocorrência. Essa distribuição estatística, também nominada Distribuição de Weibull, utiliza em sua aplicação dois parâmetros: o fator de escala (α) e o fator de forma (β). Na Tabela 2 a seguir são apresentados valores para os fatores citados acima considerando como opções de GAP 10mm, 20mm e 35mm.

Tabela 2 – *Weibull Distribution*

Descarga Superficial (eletrodo isolado)		
GAP	α	β
10 mm	173,75	7,052
20mm	241,80	9,517
35mm	326,34	7,178

Fonte: (KORZHOVA E KORZHOV, 2017)

A distribuição de Weibull pode ser calculada por meio da equação abaixo apresentada por Korzhova e Korzhov (2017).

$$P = 1 - \exp\left(-\left(\frac{T}{\alpha}\right)^\beta\right) \quad (3)$$

Onde: P – Distribuição de Weibull;

α - Fator de escala;

β – Fator de forma;

T – Função base;

Por meio da distribuição de Weibull, Moser (1979) define uma probabilidade de descarga de 1%, e utiliza esta curva de probabilidade para simulações considerando um eletrodo isolado.

Além disso, a literatura traz que os valores de Campo elétrico cumulativo definem a condição dielétrica de determinada estrutura, porém a probabilidade de falha é definida pela margem de segurança (MS), dada pela mínima relação entre os

valores de Campo elétrico cumulativo e os valores suportáveis definidos pelo *design curves* (MOSER, 1979), como pode ser visto na equação a seguir.

$$MS(\%) = \left(\frac{E_{Design Curve} - V_{Cumulative}}{E_{Design Curve}} \right) \cdot 100 \quad (4)$$

Onde: *MS* – Margem de Segurança;

$E_{Design Curve}$ – Valor de Campo suportáveis definido pelo *design curves*;

$V_{Cumulative}$ – Valor de Campo cumulativo;

Entre os fatores que influenciam os valores de margem de segurança destacam-se a qualidade do óleo isolante, a qualidade do material isolante, o processo de secagem do isolante sólido, o processo de impregnação e as variações do processo fabril. Segundo Vailles et al. (1995) as margens de segurança são adequadas quando estão entre 25 e 35%.

Outra maneira de analisar a suportabilidade dielétrica é pela verificação do gradiente de tensão pontual. Para determinação do gradiente é necessário utilizar um fator de conversão denominado *Design Insulation Factor* (DIL), que considera a forma da onda elétrica presente no tipo de ensaio aplicado. O gradiente de tensão pontual é obtido por meio da divisão do Campo Elétrico resultante da simulação pelo DIL. A tabela a seguir apresentada por Ziomek et al. (2011) mostra o DIL utilizado para cada forma de onda (ver Tabela 3).

Tabela 3 – Design Insulation Factor

Forma de Onda	DIL Factor
One minute test (AC)	1
Impulso Atmosférico	2,3 a 2,7
Impulso de Manobra	1,8 a 2,1
One hour test (AC)	0,8
Tensão de Operação	0,55 a 0,59

Fonte: Adaptado de (ZIOMEK, et al, 2011)

Este trabalho utilizou a forma de onda do ensaio de impulso atmosférico para verificação das margens de segurança e em todas as simulações foi estimado um DIL

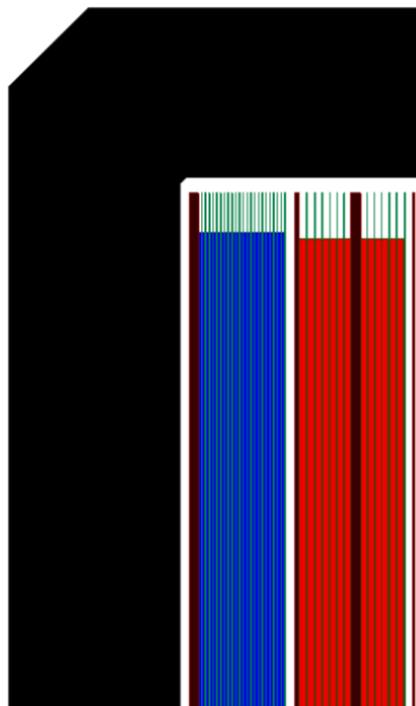
de 2,4 fator este definido através de estudos realizados por fabricantes de transformadores.

3.2.2 Simulação Base

Para efetivação da presente pesquisa foi utilizado como modelo base um projeto padrão de transformador trifásico de 15kV, com potência nominal de 75kVA, potência muito comum nas redes de distribuição de energia elétrica brasileiras. O modelo selecionado utilizava núcleo magnético de Aço-Silício (FeSi), papel Kraft para isolações entre camadas e condutores de BT, condutores de alumínio em chapa para as bobinas de BT e condutores de alumínio achatados mecanicamente com isolamento a verniz para as bobinas de AT.

A Figura 11 demonstra o modelo base utilizado. Nela é possível observar os enrolamentos de BT em azul e AT em vermelho, o núcleo e as isolações efetuadas por papel kraft pelos materiais de cor preta e verde.

Figura 11 – Modelo Base para Simulação

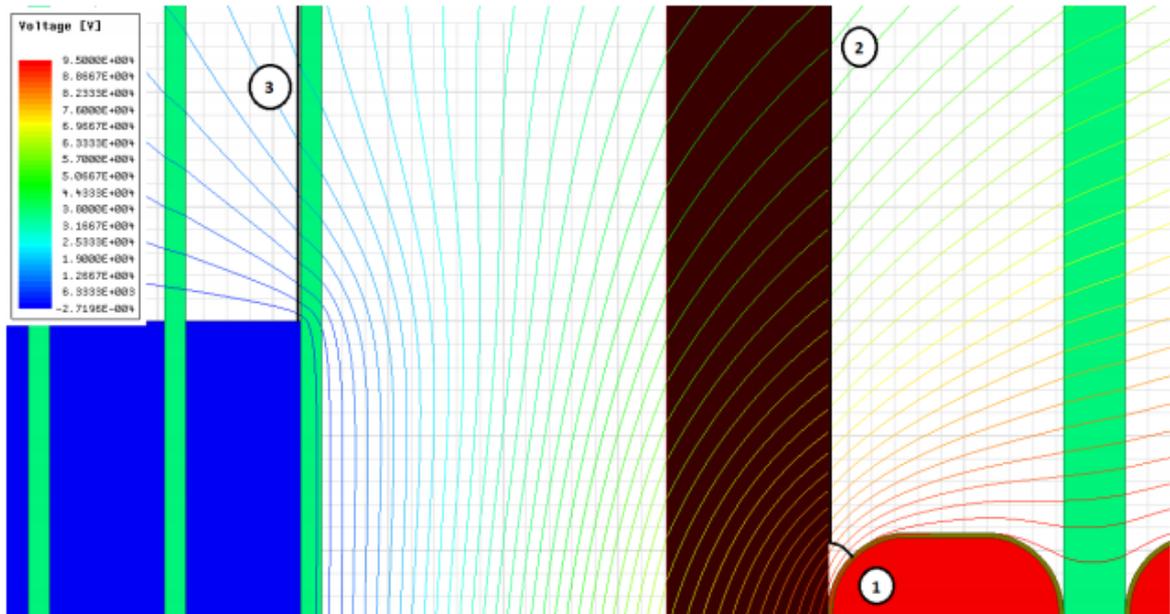


Fonte: Autor.

Após a primeira simulação realizada no software Maxwell com a utilização dos parâmetros já descritos, foram obtidas as curvas equipotenciais do modelo e definiu-

se que o ponto mais crítico a ser analisado era o ponto 1, borda do condutor de AT na primeira camada do enrolamento, conforme pode ser observado na Figura 12 que demonstra as curvas equipotenciais e o ponto mais crítico a ser estudado.

Figura 12 – Curvas Equipotenciais do Modelo Base e ponto crítico

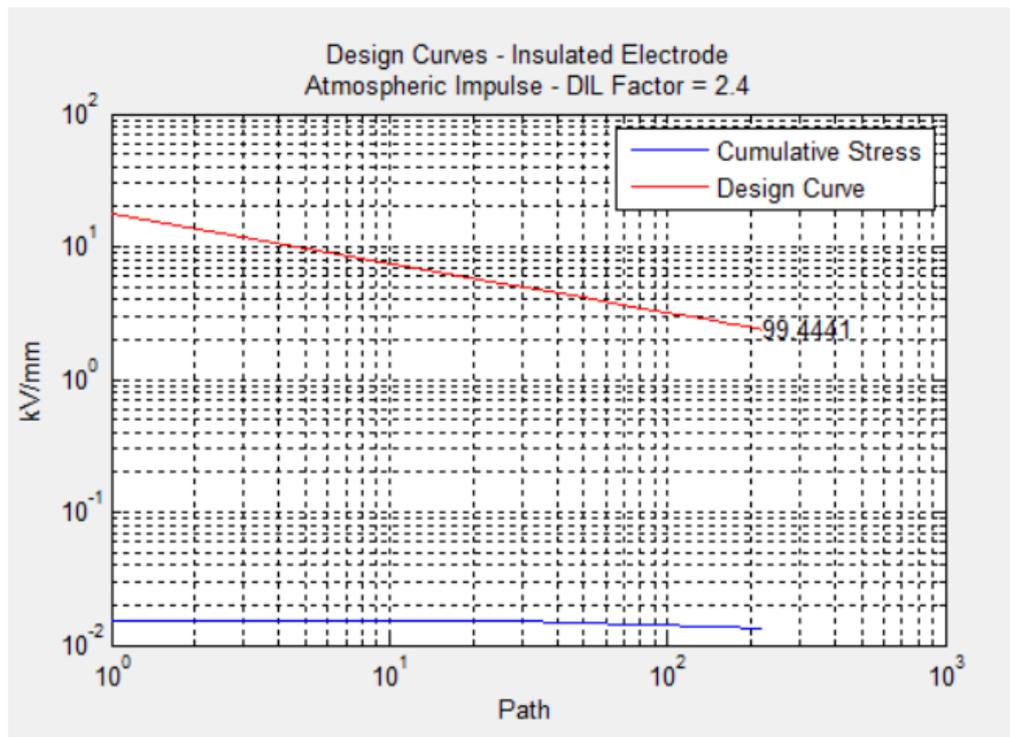


Fonte: Autor.

Definido o ponto 1 como sendo o mais crítico foi determinada a curva de tensão no trecho entre a borda do condutor de AT e a borda do condutor de BT, devidamente aterrada.

Com base nestes resultados foi gerado, com o auxílio do software Maxwell (ANSYS INC, 2010), o *design curves*, que pode ser visualizado na Figura 19. No *design curves* obtido verificou-se que o modelo base possuía um gradiente de tensão pontual de 15,145kV/mm. Estudos efetuados por um dos maiores fabricantes de transformadores brasileiro apontam que o gradiente de tensão pontual deve possuir valores inferiores a 12kV/mm sendo o valor obtido elevado em relação ao limite proposto.

Figura 13 – *Cumulative Stress* do Modelo Base obtido via software Maxwell



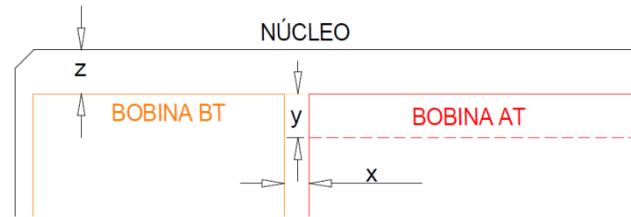
Fonte: Autor.

3.3 VARIAÇÕES PARAMÉTRICAS

Com base no modelo exposto acima foram definidos três parâmetros para avaliação do Estresse Dielétrico que impactam diretamente no custo dos transformadores e em sua suportabilidade aos ensaios de rotina: (1) a diferença de altura entre as bobinas de baixa tensão e alta tensão, (2) a diferença da distância horizontal entre as bobinas de alta tensão e de baixa tensão e (3) a diferença da altura das cabeceiras das duas primeiras camadas nas bobinas de alta tensão. A partir destes parâmetros foram deliberadas variações aproximadas aos valores comumente utilizados em projetos de transformadores de distribuição.

A Figura 14 apresenta os eixos onde foram efetuadas as variações paramétricas, a variação do GAP AT/BT ocorreu conforme demonstrado em x, a variação da altura elétrica da AT e das duas primeiras camadas de AT ocorreram conforme demonstrado em y e a variação da altura elétrica da AT e BT simultaneamente ocorreu conforme demonstrado em z.

Figura 14 – Parâmetros a serem variados



Fonte: Autor.

A Tabela 4 demonstra as variações paramétricas e os 11 valores determinados que foram simulados. Para a variável GAP AT/BT foram utilizados apenas 5 modelos de variação, devido ao fato de uma distância superior a 20mm inviabilizar o projeto do equipamento.

Tabela 4 – Variações paramétricas

Modelo	Parâmetros		
	GAP AT/BT (mm)	Altura AT(mm)	Dif. Cabec. AT/BT
1	0	0	0
2	5	5	5
3	10	10	10
4	15	15	15
5	20	20	20
6	-	25	25
7	-	30	30
8	-	35	35
9	-	40	40
10	-	45	45
11	-	50	50

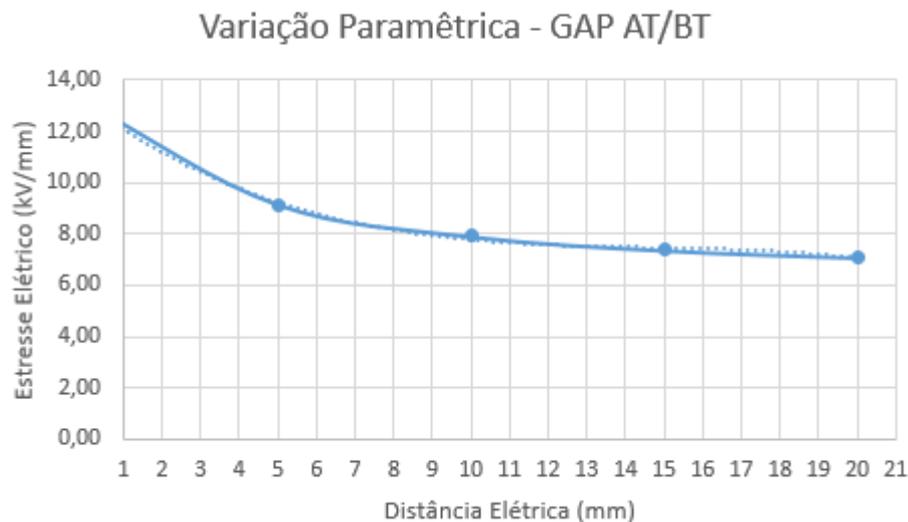
Fonte: Autor.

Cada variação paramétrica apontada acima foi simulada individualmente. Após a simulação foram traçadas as respectivas curvas do comportamento de cada parâmetro.

3.3.1 Variação do GAP AT/BT

Com base na tabela acima, os valores do GAP (Distância) AT/BT variaram entre 0 mm e 20 mm, em intervalos múltiplos de 5. Foi verificado que o comportamento do Campo Elétrico neste parâmetro tendeu a se estabilizar conforme a distância entre bobinas aumentou. Este comportamento é demonstrado na Figura 15.

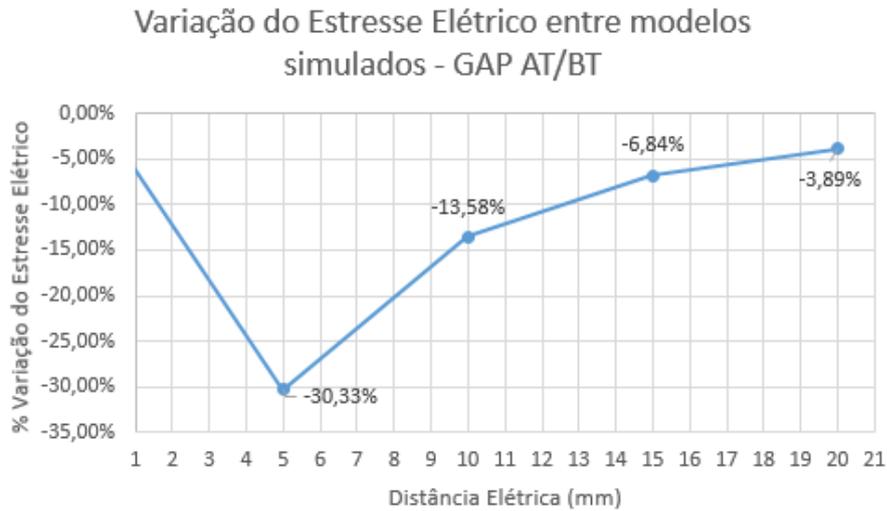
Figura 15 – Variação do Campo elétrico de acordo com o GAP entre as bobinas de AT e BT



Fonte: Autor.

Na simulação realizada, vista na figura acima e detalhada na Figura 16, observou-se que, no início, o Estresse Dielétrico teve um decréscimo de 30,33% por modelo simulado, enquanto no modelo 5 tal variação caiu a 3,89% por modelo, como demonstrado a seguir, na Figura 16.

Figura 16 – Variação % do Estresse Elétrico entre os modelos simulados para Variação do GAP AT/BT

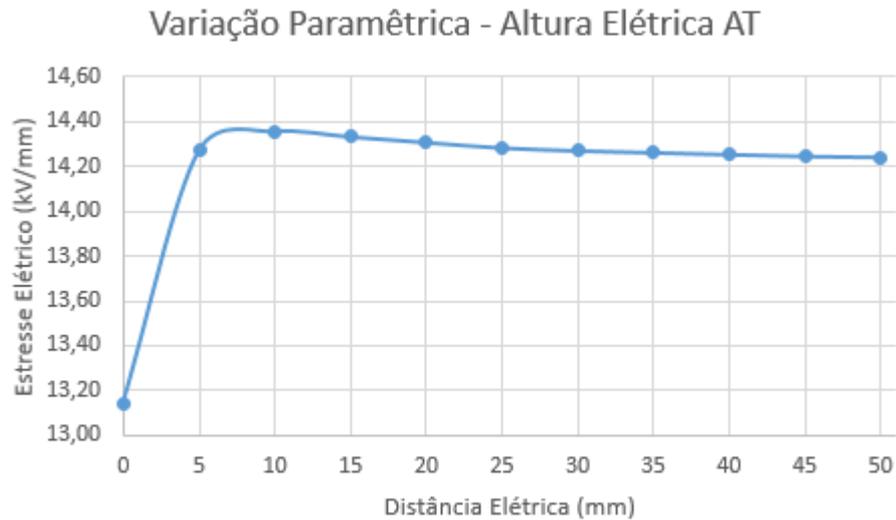


Fonte: Autor.

3.3.2 Variação da Altura Elétrica da Bobina de AT

A partir do modelo base selecionado, a altura elétrica da bobina de AT foi reduzida gradativamente em valores múltiplos de 5mm, gerando assim 11 modelos de simulação, com diferença de altura elétrica em relação a bobina de BT variando de 0 a 50mm. Neste modelo foi considerado que todas as camadas de AT possuíam a mesma altura elétrica. A Figura 17 mostra que a variação da altura elétrica da bobina de AT gerou um aumento do Estresse Elétrico nos primeiros 10mm variados, com um leve decréscimo após esta marca. Porém, o melhor ponto ocorreu no momento em que as duas bobinas possuíam alturas elétricas iguais.

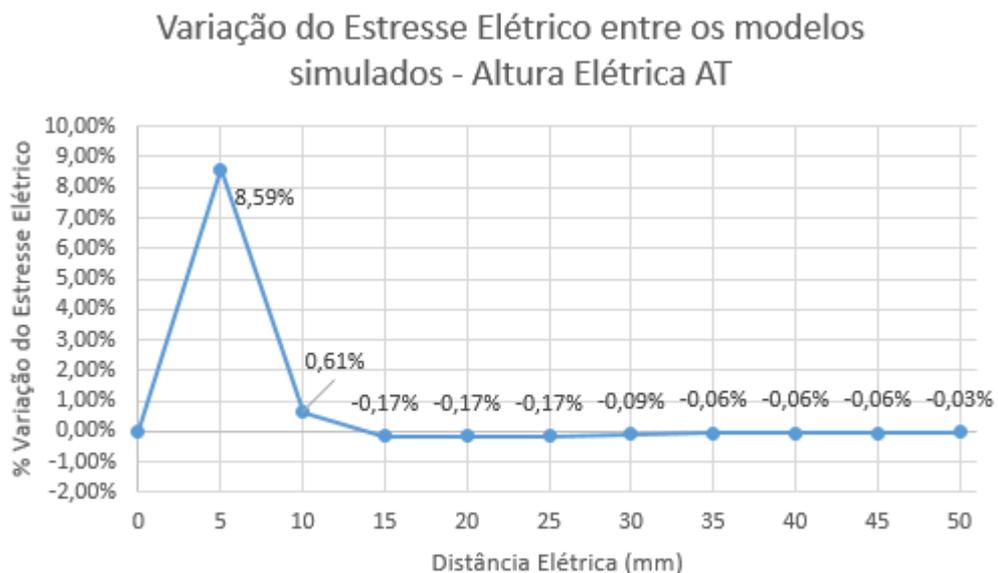
Figura 17 – Variação do Campo elétrico de acordo com a altura elétrica da bobina de AT



Fonte: Autor.

Como pode ser visto na Figura 18, nos primeiros 5mm distanciados, o Estresse Elétrico sofreu um acréscimo de 8,59%, seguido de mais um acréscimo de 0,61% entre o 2º e 3º modelo. Após este ponto ocorreu um decréscimo médio de 0,1%. Ao final das simulações verificou-se que o Estresse Elétrico com a diminuição da altura elétrica de AT teve um acréscimo de 8,37% em relação ao valor do Estresse Elétrico quando as bobinas de AT e BT possuíam a mesma altura elétrica.

Figura 18 – Variação % do Estresse Elétrico entre os modelos simulados para Variação da Altura Elétrica da AT

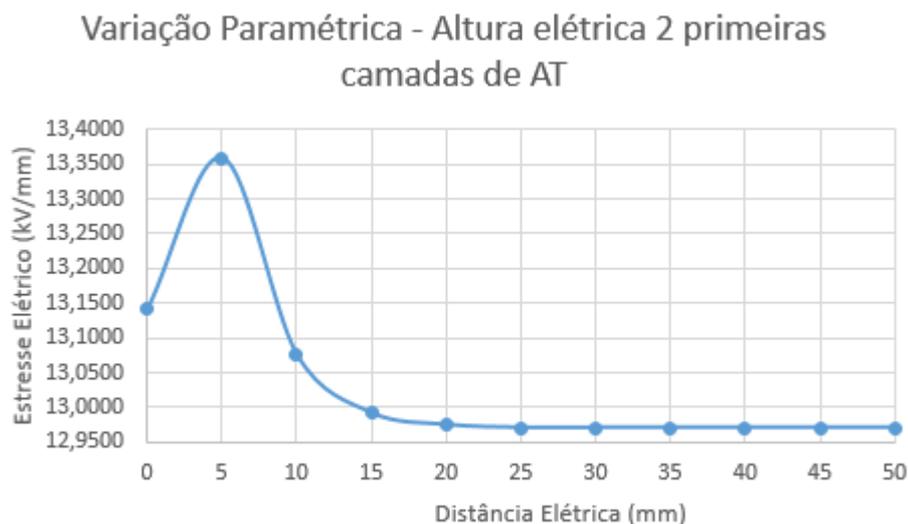


Fonte: Autor.

3.3.3 Variação da Altura Elétrica das duas primeiras camadas de AT

Para a variação da altura elétrica das duas primeiras camadas de AT, as bobinas de AT e BT possuíam a mesma altura elétrica inicial. A variação utilizada, neste caso, foi entre 0 e 50mm de incremento para as cabeceiras das duas primeiras camadas de AT. As camadas restantes não foram alteradas durante as simulações. O resultado obtido é demonstrado na figura abaixo.

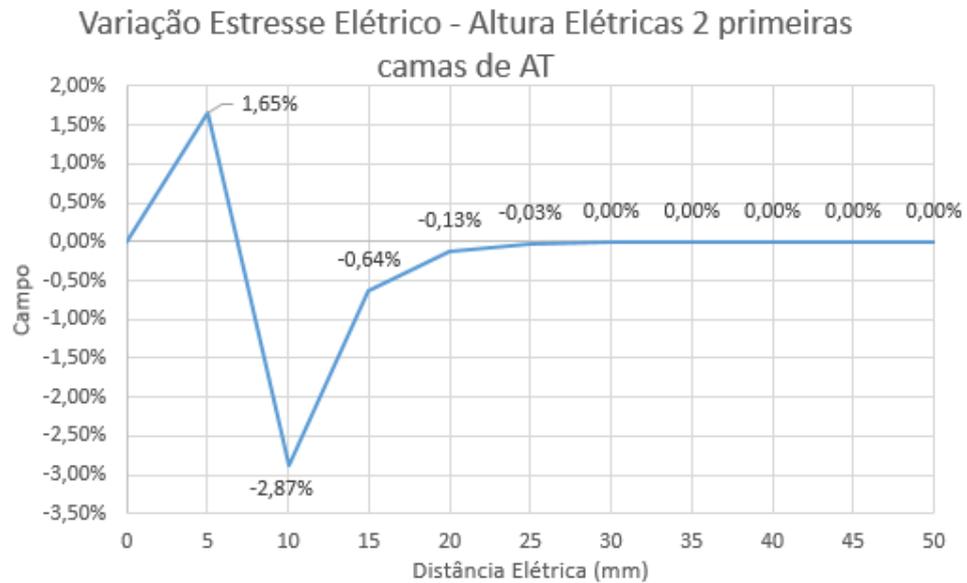
Figura 19 – Variação do Campo elétrico de acordo com a cabeceira das duas primeiras camadas de AT



Fonte: Autor.

A Figura 20 apresenta o comportamento do Estresse Dielétrico para a variação das alturas elétricas das duas primeiras camadas de AT. Como pode ser visto, verificou-se um aumento de aproximadamente 1,65% do Estresse Elétrico nos primeiros 5mm variados. A partir deste ponto houve um decréscimo de 2,87% nos dois modelos seguintes. A partir do 3º modelo simulado o Estresse Elétrico voltou a ter um pequeno aumento e se estabilizou em 12,97kV/mm a partir do 6º modelo simulado. Esses resultados podem ser melhor observados na Figura 26.

Figura 20 – Variação % do Estresse Elétrico entre os modelos simulados para Variação da Altura Elétrica das duas primeiras camadas de AT

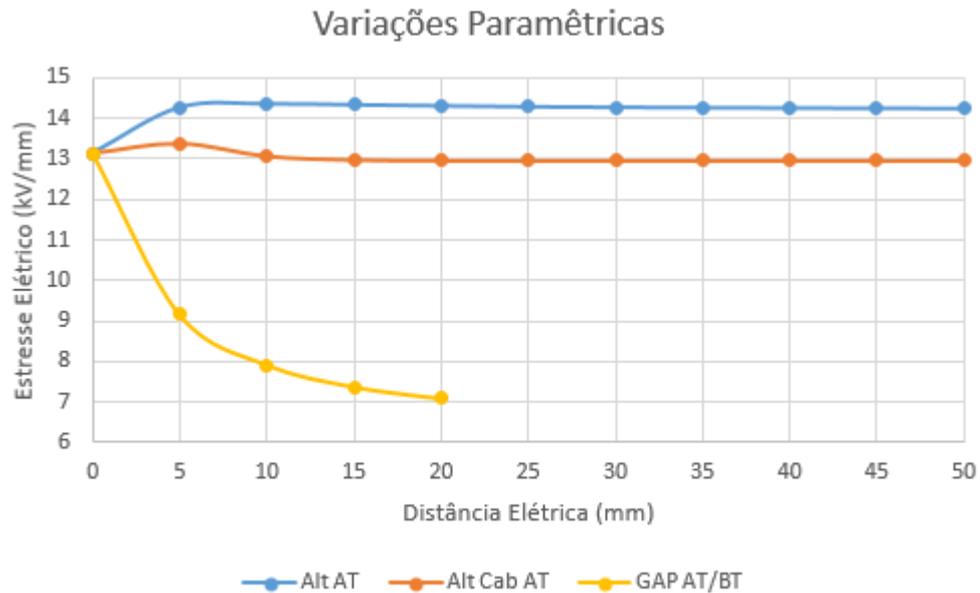


Fonte: Autor.

3.4 COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS SIMULADOS

Com base nos dados apresentados foi efetuada uma comparação das características de variação de cada parâmetro, visualizando seu comportamento individual e identificando quais parâmetros mais influenciavam no comportamento do Estresse Dielétrico dos transformadores de distribuição.

Figura 21 – Variação do Campo elétrico para os parâmetros simulados plotados simultaneamente



Fonte: Autor.

A Figura acima demonstra as curvas dos três parâmetros simulados plotados simultaneamente (ver Figura 21). Nela é possível observar que os parâmetros influenciaram na diminuição do Estresse Dielétrico de maneiras distintas. Desta forma, será apresentada a seguir a metodologia de otimização proposta, considerando o comportamento de cada parâmetro analisado de forma global no projeto de transformadores de distribuição.

4 RESULTADOS

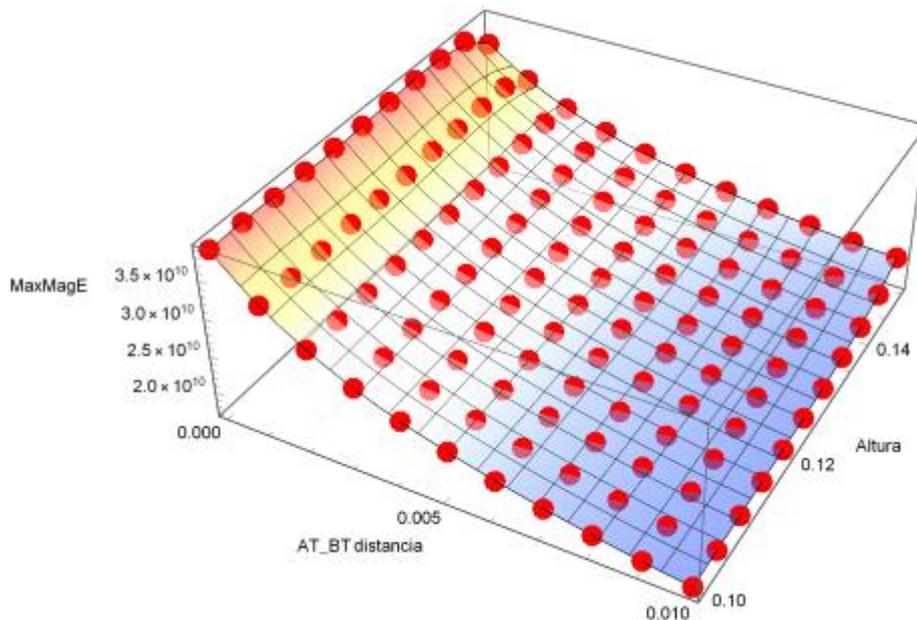
Com base nos resultados apresentados no capítulo anterior para as variações paramétricas, este capítulo exhibe os projetos finais originados e descreve o retorno financeiro de sua aplicação.

4.1 SIMULAÇÃO EM 3D COM ACOPLAMENTO DE PARÂMETROS

Com base nos resultados apresentados individualmente foram realizadas simulações por meio do software *mathematica*® em que eram acoplados dois parâmetros e examinava-se o comportamento da intensidade do Campo Elétrico.

Inicialmente verificou-se o comportamento do Campo Elétrico considerando as variações do GAP AT/BT e da Altura Elétrica de AT. A Figura 22 demonstra o plano traçado onde é possível observar que o aumento do GAP AT/BT possuía maior importância para redução do Campo Elétrico, aqui denominado MaxMagE.

Figura 22 – Simulação do Campo Elétrico considerando o acoplamento paramétrico do GAP AT/BT e Altura da AT

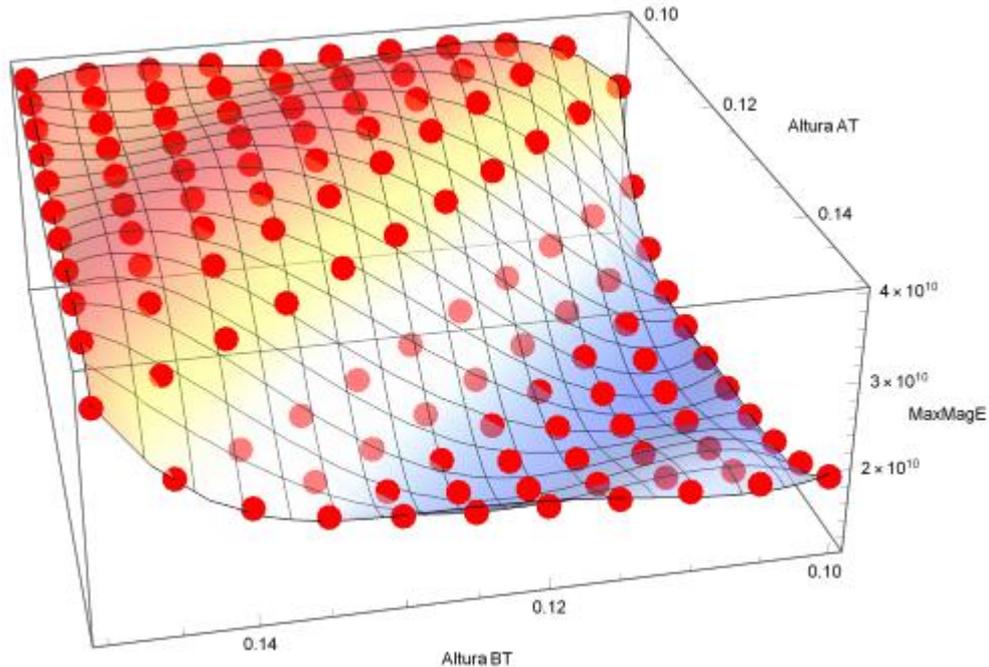


Fonte: Autor.

Na sequência foi analisado o acoplamento das variações das alturas de AT e BT. O que se obteve foi que a menor intensidade do Campo Elétrico ocorria quando a

altura da bobina de AT era levemente inferior à altura da bobina de BT, como pode ser observado na Figura 23.

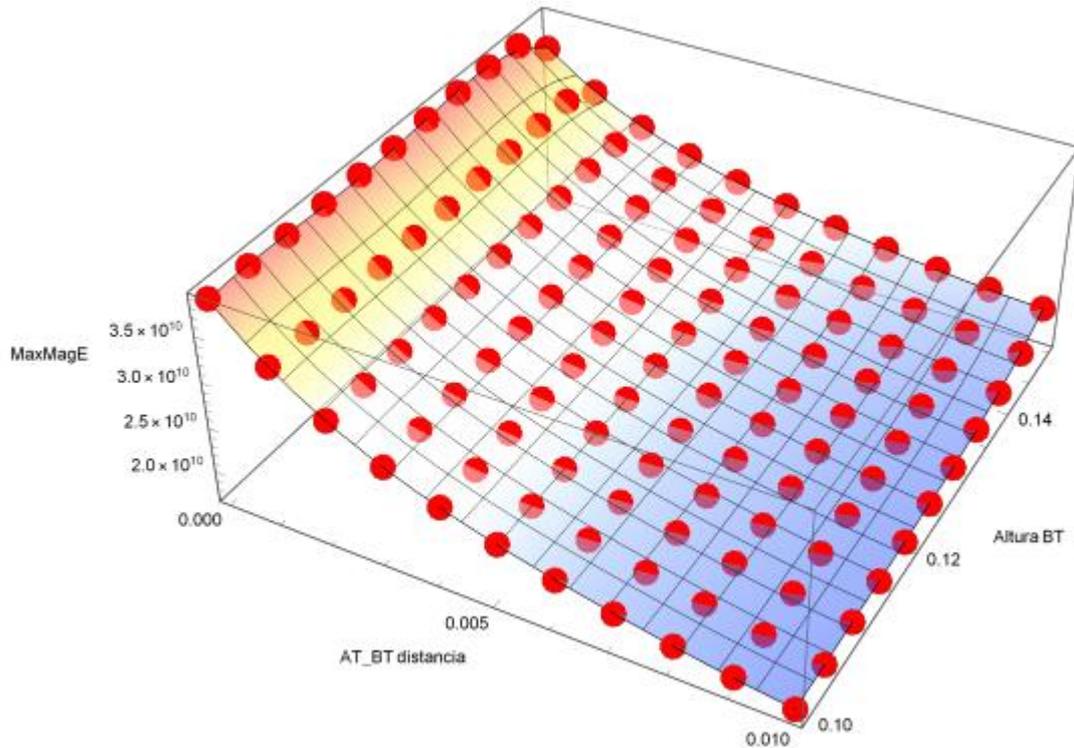
Figura 23 – Simulação do Campo Elétrico considerando o acoplamento paramétricos da Altura de BT e Altura da AT



Fonte: Autor.

Por fim foi realizada a simulação com o acoplamento do GAP AT/BT e a Altura de BT, na qual, de maneira similar ao primeiro modelo apresentado, verificou-se que o GAP AT/BT possuía maior relevância na definição da intensidade do Campo Elétrico, como pode ser visualizado na Figura 24.

Figura 24 – Simulação do Campo Elétrico considerando o acoplamento paramétricos do GAP AT/BT e Altura da BT



Fonte: Autor.

4.2 DEFINIÇÃO DOS MODELOS FINAIS

Uma vez simulados, foram identificados os modelos de projetos com as maiores variações do Campo Elétrico, na mesma ordem dos parâmetros adotados. Com base nestas variações foram obtidos os modelos finais utilizados conforme descrito a seguir.

A Tabela 5 demonstra os percentuais de redução ou aumento do Campo Elétrico a partir dos modelos simulados para variação do GAP AT/BT. Nesta tabela, construída com os dados resultantes das simulações verificou-se que o Campo Elétrico sofreu um maior decréscimo no segundo modelo simulado.

Tabela 5 – Variações percentuais do Campo Elétrico para a Variação do GAP AT/BT

Modelo	Parâmetros	Variação do Campo Elétrico (%)
	GAP AT/BT (mm)	
1	0	0%

2	5	-30,33%
3	10	-13,58%
4	15	-6,84%
5	20	-3,89%

Fonte: Autor.

Ao analisar o segundo parâmetro adotado para a realização da simulação, que foi a variação da altura elétrica da bobina de AT, pôde-se constatar que a maior redução do Campo Elétrico ocorreu no quarto modelo simulado, como demonstrado na Tabela 6.

Tabela 6 – Variações percentuais do Campo Elétrico para a Variação da altura elétrica de AT

Modelo	Parâmetros	
	GAP AT/BT (mm)	Variação do Campo Elétrico (%)
1	0	0%
2	5	8,59%
3	10	0,61%
4	15	-0,17%
5	20	-0,16%
6	25	-0,16%
7	30	-0,09%
8	35	-0,06%
9	40	-0,06%
10	45	-0,06%
11	50	-0,03%

Fonte: Autor.

Na avaliação do último parâmetro, a variação da cabeceira das duas primeiras camadas de AT, foi possível verificar um comportamento similar para a intensidade do Campo Elétrico ao observado na simulação com variação da altura elétrica como um todo, em que a maior redução do campo ocorreu no modelo 3 conforme apresentado

na Tabela 7. A tabela mostra os percentuais de redução ou aumento do Campo Elétrico para cada modelo nos quais foram realizadas as simulações.

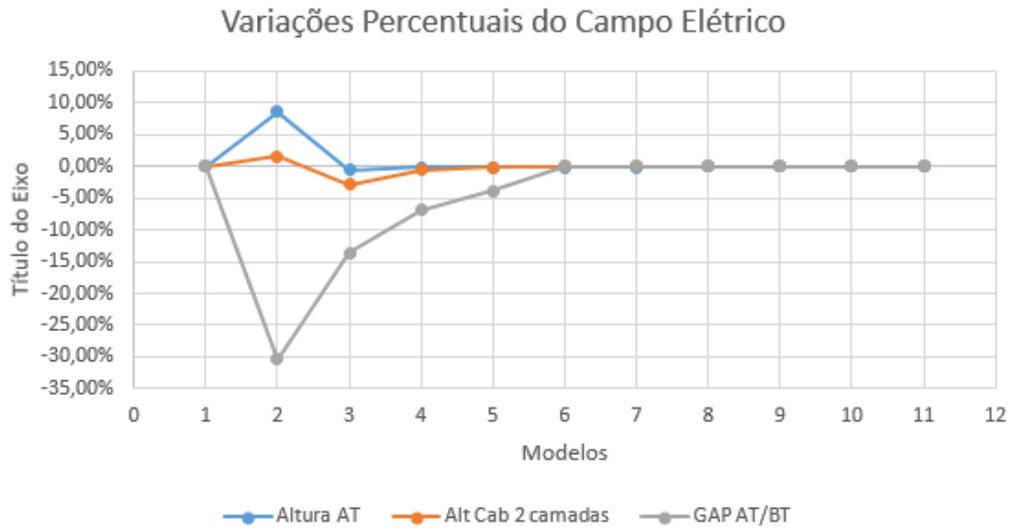
Tabela 7 – Variações percentuais do Campo Elétrico para a Variação da altura elétrica de AT

Modelo	Parâmetros	
	GAP AT/BT (mm)	Variação do Campo Elétrico (%)
1	0	0%
2	5	1,65%
3	10	-2,87%
4	15	-0,64%
5	20	-0,13%
6	25	-0,03%
7	30	-0,00%
8	35	-0,00%
9	40	-0,00%
10	45	-0,00%
11	50	-0,00%

Fonte: Autor.

A partir dos dados apresentados foram identificados os pontos ideais que, unificados, gerariam o projeto piloto final. A Figura 25 demonstra o comportamento do Campo Elétrico para os três parâmetros plotados simultaneamente. Pela ilustração é possível reconhecer que o projeto mais eficiente em termos de suportabilidade do Estresse Elétrico teria um GAP AT/BT de 5mm, altura elétrica de AT 15mm, inferior a altura elétrica da BT, e as cabeceiras das duas primeiras camadas de AT inferiores em 10mm em relação as demais camadas.

Figura 25 – Variações Percentuais do Campo Elétrico



Fonte: Autor.

Após a definição do projeto piloto foram estipuladas algumas variações para a realização das simulações com o objetivo de manter uma análise eficiente. Assim, foi feita a opção por uma variação de 10% de cada parâmetro, para mais e para menos. Para complementar a análise dos resultados foi ainda utilizado um projeto com as menores distâncias elétricas já praticadas por um dos maiores fabricantes de transformadores de distribuição brasileiro, empresa cujos dados foram disponibilizados para esta pesquisa.

Na Tabela 8 verificam-se os 4 projetos finais utilizados para as simulações descritas a seguir. O projeto 1 constante na mesma se trata do projeto obtido por meio das variações paramétricas, o projeto 2 considera uma variação de 10% na diminuição das distâncias elétricas dos parâmetros, o projeto 3 utiliza um incremento de 10% nas distâncias elétricas do modelo inicial e o projeto 4 pondera as menores distâncias praticadas pelo fabricante supracitado, sem sucesso nos ensaios de fábrica.

Tabela 8 – Projetos Finais

Projeto	Parâmetros		
	GAP AT/BT (mm)	Diferença altura elétrica AT e BT (mm)	Incremento da cabeceira das duas primeiras camadas de AT (mm)
1	5	15	10
2	4,5	13,5	9

3	5,5	16,5	11
4	4	12	10

Fonte: Autor.

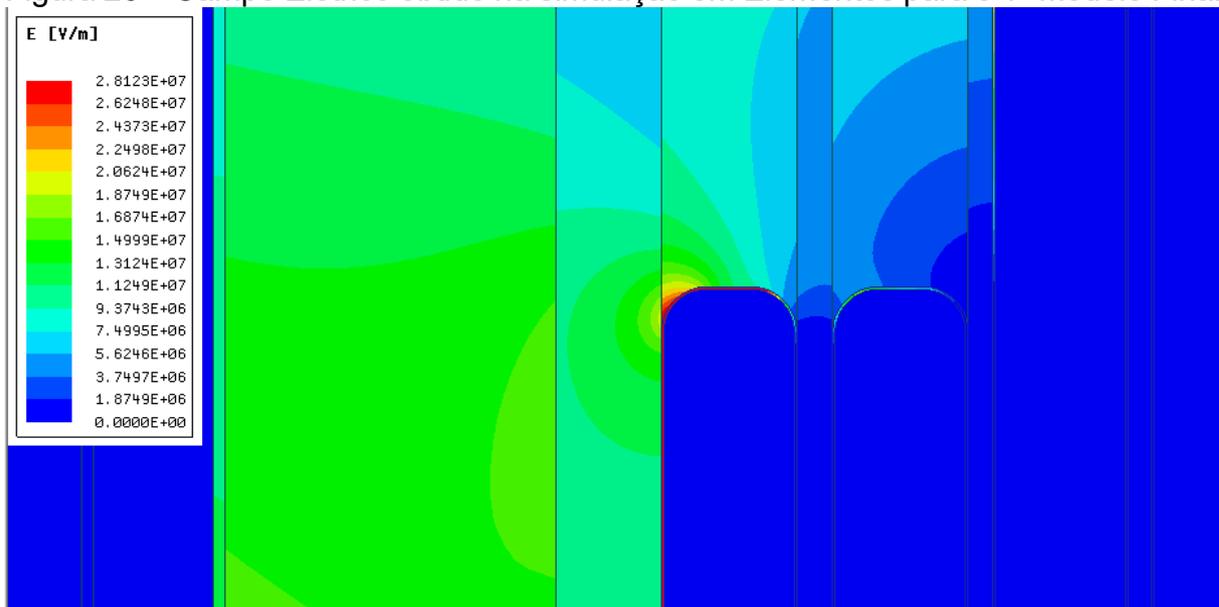
Os 4 projetos definidos foram utilizados em simulações individuais no software Maxwell, onde foi examinado o ponto mais crítico do Estresse Elétrico, seu gradiente pontual de tensão e seus custos em relação ao modelo base adotado no início do trabalho. Os resultados obtidos serão apresentados no próximo item desse capítulo. É válido explicitar que as simulações realizadas consideraram uma aplicação de 95kV, equivalente ao valor estabelecido em norma para o ensaio de impulso de um transformador de distribuição de classe de tensão de 15kV.

4.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS PARA OS MODELOS FINAIS

4.3.1 Modelo 1

A Figura 26 demonstra os resultados da simulação em elementos finitos para o 1º modelo final simulado, que considerou as variações paramétricas. Pode-se observar que a maior intensidade do Campo Elétrico se encontra no contorno do condutor da primeira camada de AT, onde sua maior intensidade chega a $2,8123E+07$ V/m, que equivale a 11,72 kV/mm.

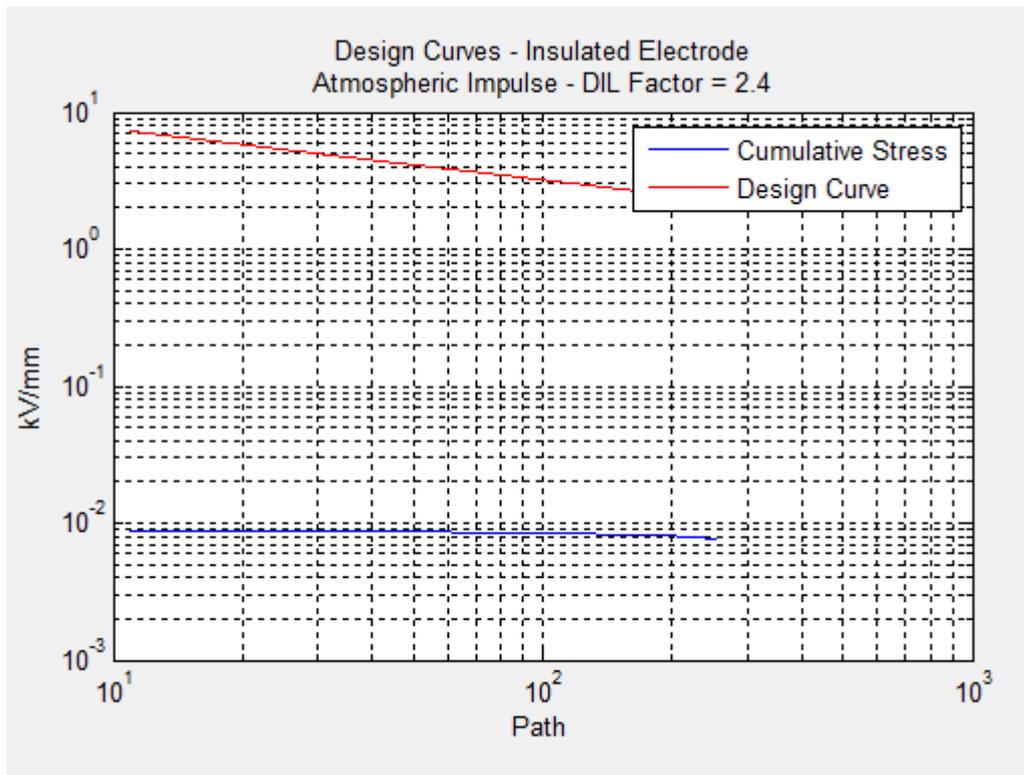
Figura 26 – Campo Elétrico obtido na simulação em Elementos para o 1º Modelo Final



Fonte: Autor.

Com base na simulação apresentada foram obtidos o *Design Curves* e o *Cumulative Stress* para o ponto mais crítico, que foi o contorno da primeira camada do enrolamento de AT, considerando um eletrodo isolado. O resultado pode ser observado na figura abaixo (ver Figura 27). Para todas as simulações finais foi utilizado um fator de conversão de 2.4 para obtenção do *Design Curves*.

Figura 27 – *Design Curves* e *Cumulative Stress* para o modelo final 1



Fonte: Autor.

Nas simulações realizadas para a obtenção desses dados verificou-se que o gradiente pontual de tensão para o modelo final 1 foi de 10,6179 kV/mm, um pouco abaixo do limite máximo recomentado que varia entre a faixa de 11-12 kV/mm. A partir desses dados levantou-se a variação de custos do projeto final em relação ao projeto base inicial. Essa variação em relação aos principais materiais utilizados pode ser visualizada na tabela a seguir (ver Tabela 9).

Tabela 9 – Variação de Custos Projeto Final 1

Material	Variação de Custos (%)
Condutor	-0,43%
Aço-Silício	-0,22%
Papel Isolante	-0.15%
Óleo	-0,05%

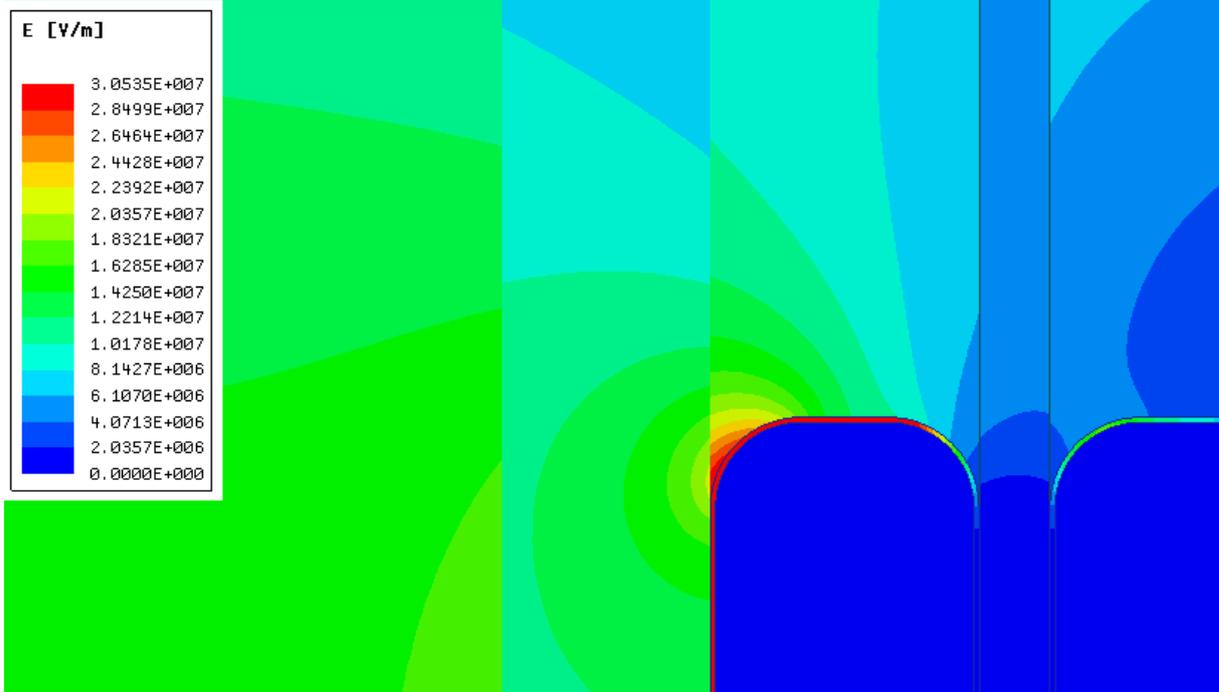
Fonte: Autor.

A tabela revela que houve redução de custos em todos os materiais mais utilizados na produção do transformador de distribuição. A partir destes dados estimou-se uma redução de custo global que girou em torno de 0,33% no projeto do transformador base.

4.3.2 Modelo 2

O resultado da simulação em elementos finitos para o modelo final 2, que considerou uma variação de 10% na diminuição das distâncias elétricas dos parâmetros, pode ser observado na Figura 28. Nela observa-se que houve um aumento de 8,53% na intensidade do Campo Elétrico nas bordas do condutor da primeira camada de AT e no GAP AT/BT em relação ao modelo 1, apresentado anteriormente. Neste modelo verificou-se que o valor máximo do Campo Elétrico é de 3,0525E+07 V/m, que equivale a 12,72 kV/mm.

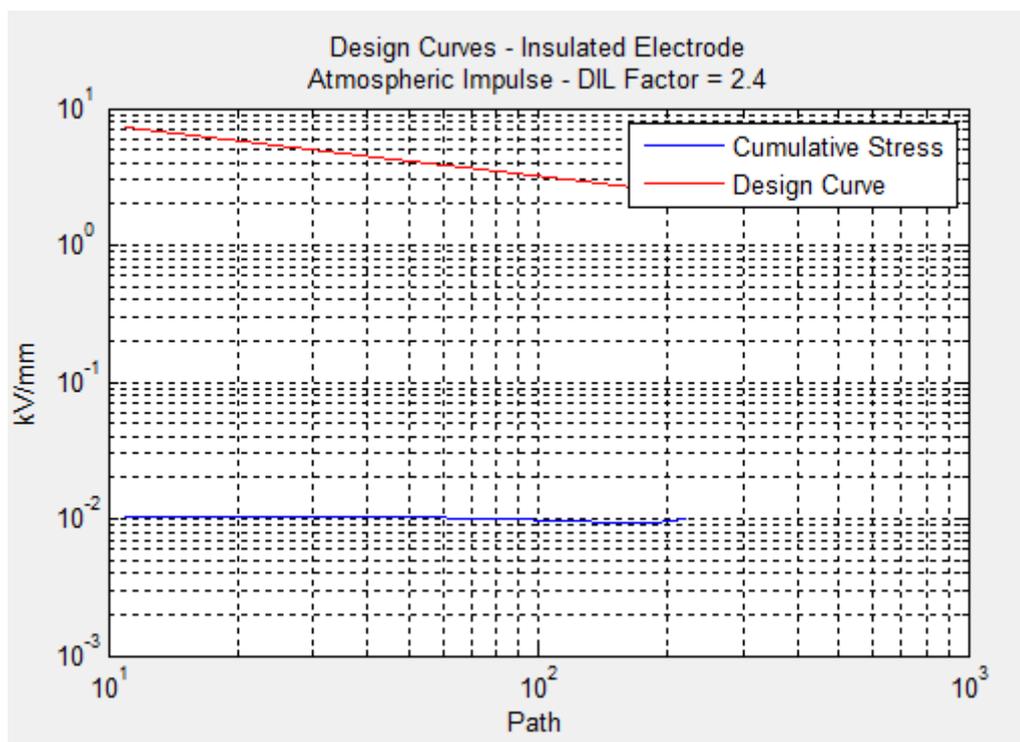
Figura 28 – Campo Elétrico obtido na simulação em Elementos para o 2º Modelo Final



Fonte: Autor.

Ao serem simulados o *Design Curves* e o *Cumulative Stress*, conforme a figura abaixo, identificou-se que o gradiente pontual de tensão para o projeto final 2 foi de 11,3343 kV/mm, muito próximo ao limite estabelecido pela literatura (ver Figura 29).

Figura 29 – *Design Curves* e *Cumulative Stress* para o modelo final 2



Fonte: Autor.

Como no modelo 1, após a obtenção destes dados foram levantados os custos do projeto. No referido levantamento observou-se uma redução global de aproximadamente 1,7% no custo do produto, conforme variação dos principais materiais, demonstrada na tabela a seguir (ver Tabela 10).

Tabela 10 – Variação de Custos Projeto Final 2

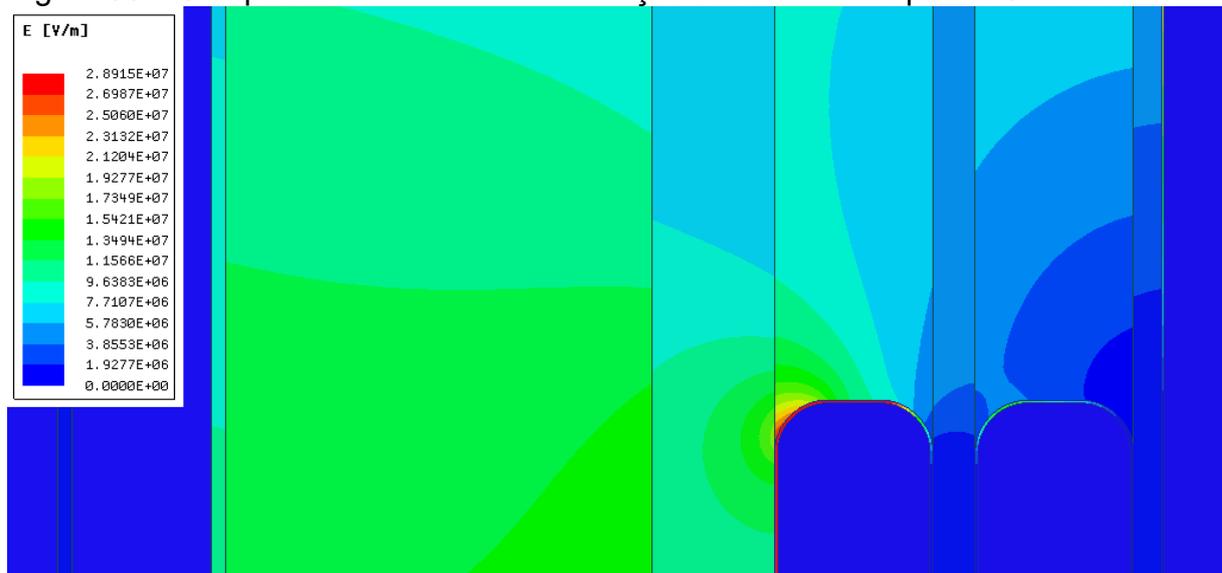
Material	Variação de Custos (%)
Condutor	-2,52%
Aço-Silício	-1,35%
Papel Isolante	-1,13%
Óleo	-1,02%

Fonte: Autor.

4.3.3 Modelo 3

Na simulação realizada com o modelo 3, que possuía as maiores distâncias para os parâmetros estabelecidos, identificou-se que o Campo Elétrico máximo nos contornos do condutor de AT, na primeira camada, foi de $2,8915E+07$ V/m, equivalente a 12,05 kV/mm, como pode ser visto na figura abaixo (ver Figura 30).

Figura 30 – Campo Elétrico obtido na simulação em Elementos para o 3º Modelo Final

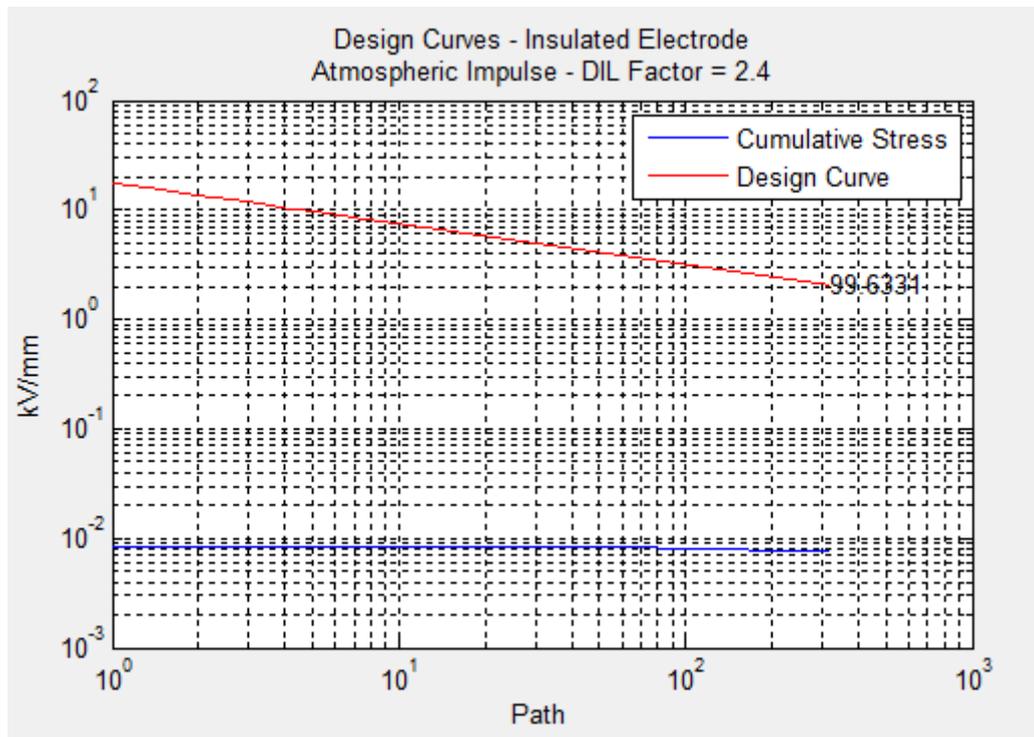


Fonte: Autor.

Nesta simulação, o *Design Curves* e o *Cumulative Stress* demonstraram um gradiente pontual de tensão de 9,70625 kV/mm, uma redução de 8,58% em relação ao modelo 1, inicialmente simulado e descrito anteriormente. Tal gradiente pontual de tensão pode ser considerado bem inferior ao limite explicitado de variação entre 11-12 kV/mm, aceito pela literatura.

Embora esse modelo tenha evidenciado um bom gradiente pontual de tensão, ao efetuar a estimativa de custo deste projeto, observou-se um acréscimo de aproximadamente 1,12% se comparado ao preço final do equipamento base. A Tabela 11 demonstra a variação dos principais materiais para este modelo proposto e a figura 31 exibe o *Design Curves* e o *Cumulative Stress* obtidos.

Figura 31 – *Design Curves* e *Cumulative Stress* para o modelo final 3



Fonte: Autor.

Tabela 11 – Variação de Custos Projeto Final 2

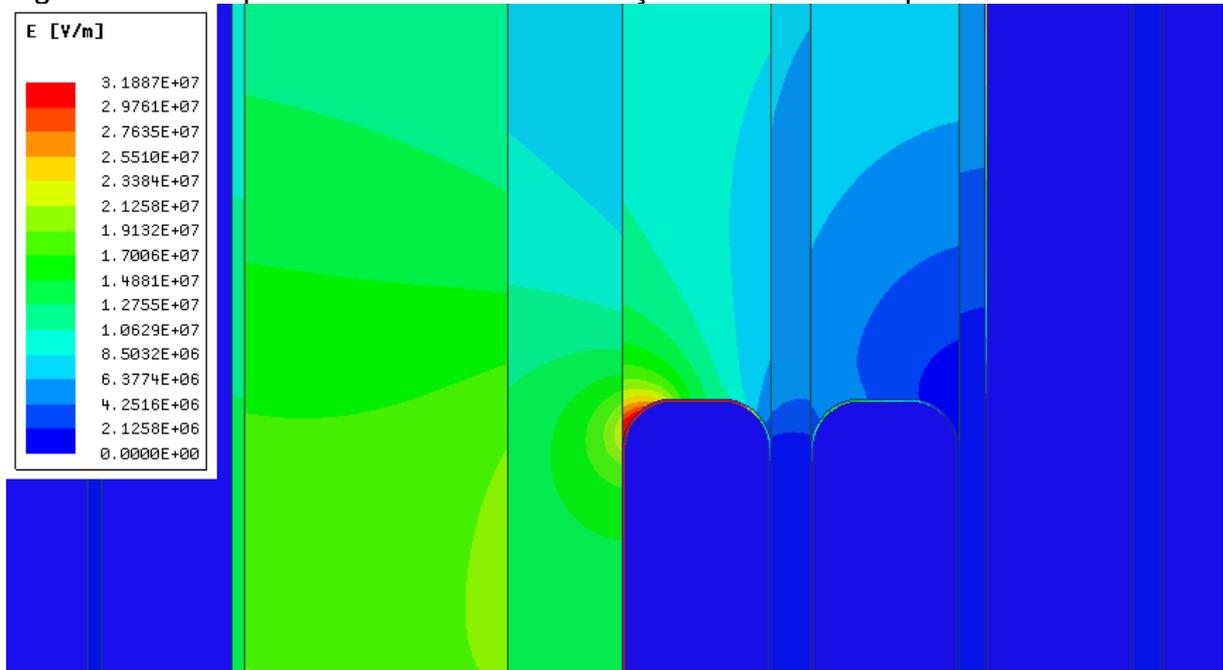
Material	Variação de Custos (%)
Condutor	+1,56%
Aço-Silício	+1,34%
Papel Isolante	+0,47%
Óleo	+0,14%

Fonte: Autor.

4.3.4 Modelo 4

O modelo 4, implementado a partir das menores distâncias elétricas praticadas pelo citado fabricante de transformadores de distribuição, como já descrito, em ensaio realizado em laboratório do protótipo, apresentou resultados que comprovaram sua não suportabilidade ao ensaio de impulso. Na Figura 32 observa-se que a intensidade do Campo Elétrico máxima no contorno do condutor de AT da primeira camada foi de aproximadamente $3,1887E+07$ V/m, ou 13,28 kV/mm que foi o valor mais elevado identificado nos projetos simulados.

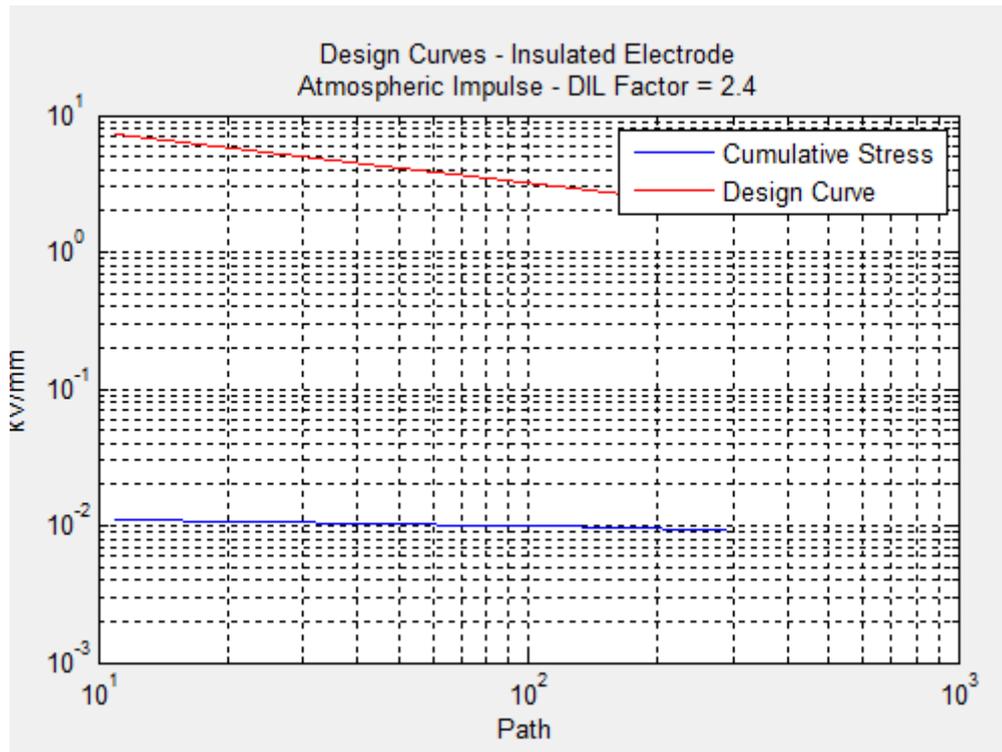
Figura 32 – Campo Elétrico obtido na simulação em Elementos para o 4º Modelo Final



Fonte: Autor.

A simulação do *Design Curves* e do *Cumulative Stress*, conforme figura abaixo, demonstrou a inaplicabilidade do projeto, pois seu gradiente pontual de tensão foi estimada em 12,6286 kV/mm, superior ao limite praticado (ver Figura 33).

Figura 33 – *Design Curves* e *Cumulative Stress* para o modelo final 4



Fonte: Autor.

Embora em termos de custo este projeto possua os melhores resultados, com redução de 4% no custo do produto em relação ao projeto base, sua utilização não é aplicável, pois o elevado gradiente pontual de tensão poderia ocasionar sérios problemas durante o uso e posterior prejuízo ao fabricante.

4.4 MODELO DE OTIMIZAÇÃO DE PROJETO

Com base nos resultados descritos acima propôs-se um fluxograma de projeto que direciona o projetista na busca do melhor custo benefício de produção. A Tabela 12 sintetiza os dados apresentados e demonstra os resultados para o gradiente pontual de tensão e os ganhos financeiros para cada projeto simulado.

Tabela 12 – Resumo Projetos Finais Simulados

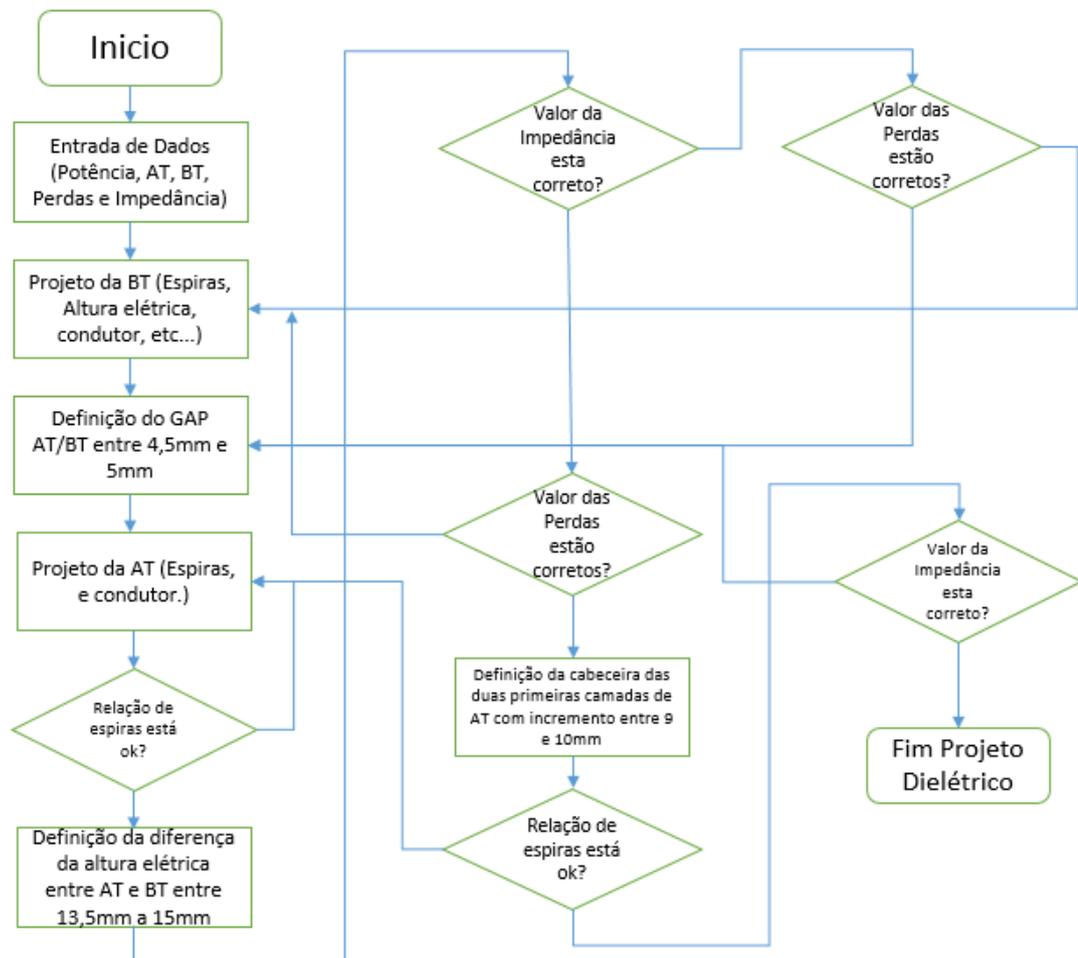
Projeto	Gradiente pontual de tensão (kV/mm)	Variação de custo em relação ao projeto base (%)
1	10,6179	-0,33%
2	11,3343	-1,7%
3	9,7062	+1,12%
4	12,6286	-4%

Fonte: Autor.

A apresentação dos dados na tabela 12 permite visualizar que o melhor custo benefício para as distâncias elétricas ocorre quando elas se encontram entre os valores praticados nos modelos 1 e 2.

Outro dado relevante é que dois dos três parâmetros simulados, o GAP AT/BT e a diferença da altura elétrica entre AT e BT têm influência direta em um importante elemento do projeto de transformadores, a impedância. Esta é definida por norma e o projetista necessita ajustar as distâncias elétricas do transformador para, além de garantir a suportabilidade do equipamento aos ensaios de rotina e tipo, garantir também que possuirá o valor da especificação técnica. O fluxograma abaixo demonstra a metodologia proposta para a otimização do projeto por parte do projetista (ver Figura 34).

Figura 34 – Fluxograma de otimização de projeto



Fonte: Autor.

O fluxograma elaborado foi testado entre os projetistas do fabricante nacional supracitado e resultou em uma economia de tempo de aproximadamente 5% na concepção do projeto elétrico de um transformador de distribuição. Essa metodologia foi aplicada em cinco projetos de um processo licitatório.

A utilização do fluxograma resultou na redução média de 1,54% no custo do produto, número este que, para transformadores de distribuição, pode significar o sucesso ou não em um processo licitatório, tendo em vista que há grande competitividade entre os fabricantes do setor.

Estima-se ainda que, com a melhoria dos equipamentos empregados no processo fabril e a diminuição das diferenças entre o projeto teórico e o projeto real,

as distâncias elétricas podem ser ainda menores, chegando a reduções médias de cerca de 5% no custo do produto.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou uma proposta de otimização para os projetos dielétricos de transformadores de potência, amplamente aplicados nas redes de distribuição. Esta proposta teve por objetivo proporcionar ao projetista, e, conseqüentemente ao fabricante, uma maior assertividade na definição das distâncias elétricas de três componentes fundamentais de um projeto, (1) o GAP AT/BT, (2) a diferença da altura elétrica das bobinas de AT e BT e (3) o incremento de cabeceira nas primeiras camadas de AT. Definir as distâncias com precisão proporciona ganhos financeiros e de tempo de elaboração dos projetos dielétricos ao fabricante desses equipamentos, como demonstrado nos resultados.

O projeto base utilizado, de um transformador de 75kVA, classe de tensão de 15kV, é um dos modelos mais comercializados no mercado nacional, por isso impacta diretamente na rentabilidade dos fabricantes. Os resultados obtidos e descritos no capítulo quatro permitiram a concretização de uma proposta de metodologia e a construção do fluxograma de projeto, a partir dos quais o projetista pode utilizar um *range* de possibilidades para essas distâncias elétricas e tem um direcionamento que facilita a realização de possíveis ajustes no decorrer da elaboração de projetos. A otimização da utilização de matéria prima e do tempo de mão de obra na elaboração de um projeto traz diversos benefícios tanto ao projetista como ao fabricante, resultando em uma melhora na competitividade do produto e da colocação do fabricante no mercado.

Além disso, a aplicação das simulações em Elementos Finitos, não comumente utilizada em transformadores de distribuição, proporcionou a visualização do comportamento dielétrico em bobinas de pequenas dimensões, mostrando-se uma maneira inovadora de aprimorar o processo de elaboração de projetos e também o processo produtivo desses equipamentos, pois, com a implementação de novas tecnologias validadas através da ferramenta proposta, os produtos tendem a ficar mais compactos e, conseqüentemente, terem os seus custos reduzidos. O estudo de viabilidade apresentado comprovou que esta metodologia proporciona ganhos significativos não apenas na competitividade, mas também na qualidade do produto final apresentado.

Como perspectiva de trabalhos futuros, podem ser realizados estudos complementares com os parâmetros simulados e analisados simultaneamente. A partir desses estudos também é possível a elaboração de um sistema computacional com o objetivo de reduzir ainda mais o tempo de elaboração de projetos de transformadores de distribuição.

Dessa forma, tendo como objeto a análise de parâmetros pouco enfocados para transformadores de distribuição, como a redução de custo e tempo de elaboração de projetos dielétricos de transformadores, e tendo atingido, através de uma metodologia também pouco utilizada, o objetivo proposto, essa pesquisa vem contribuir para a academia nas discussões do tema e possibilita ao mercado de fabricação de transformadores a redução do número de reprovações nos ensaios aos quais esses equipamentos são aplicados, além da otimização de tempo e custo de seu projeto e produção.

5.1 PUBLICAÇÕES

JAIR HENRIQUE JUNIOR; TIAGO B. MARCHESAN; ALEXANDER DO CANTO DUTRA. Uma Análise visando a Otimização do Projeto Dielétrico de Transformadores de Distribuição através de Simulação em Elementos Finitos. SBSE'2018 – VII Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos. Data/Local: 12 a 16 de Maio de 2018. Niterói– Rio de Janeiro.

REFERÊNCIAS

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2011) **NBR 5440**: Transformadores Para Redes Aéreas de Distribuição - Requisitos. Rio de Janeiro.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2012) **NBR 10576**: Óleo mineral isolante de equipamentos elétricos: Diretrizes para supervisão e manutenção. Rio de Janeiro.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2007) **NBR 5356**: Transformadores de Potência. Rio de Janeiro.
- ANEEL – AGENCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (2015). **Plano Decenal de Expansão de Energia 2014**. Brasília
- BASTOS, J. P. A; SADOWSKI, N. **Electromagnetic Modeling by Finite Element Methods**. New York: Marcel Deeker, 2003. 512p.
- D'ALMEIDA E SILVA, V. L.; MORAIS, R. M. Evolução de produtos de degradação do papel em óleo mineral isolante durante o envelhecimento térmico. In: SEMINÁRIO DE MATERIAIS NO SETOR ELÉTRICO, IV. **Anais...** Curitiba: Copel/LAC, 1994, p. 117-126.
- FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY JR., C.; UMANS, S. D. **Máquinas Elétricas**: com introdução a Eletrônica de Potência. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006. 648 p.
- FOGARAS, L; LAMPE, W. Calculation of Electrical Field Strenght around transformer winding corners. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, v. 87, n. 2, fev. 1968.
- INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE C57.91TM-2011**: IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers and Step-Voltage Regulators. New York, mar. 2012.
- KORZHOVA, M. E.; KORZHOV, A. V. Weibull Distribution's Parameters in Electrical Insulation Reliability Assessment. In.: URALCON (International Ural Conference on Measurements), II. **IEEE Transactions on Power Delivery**, p.409-414, 2017.
- MEYERS, S. D.; KELLY, J.J.; PARRISH, R.H. **A guide to transformer maintenance**. Ohio: Transformer Maintenance Institute, 1982. 830 p.
- MILASCH, M. **Manutenção de Transformadores em Líquidos Isolantes**. SP: Ed. Edgard Blücher, 1984.
- MORAIS, R. M. N. de. **Estudo do envelhecimento térmico do papel isolante elétrico**. 1990. 152 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Polímeros) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1990.

MORAIS, S. A. L.; NASCIMENTO, E. A.; MELO, D. C. Análise da madeira de Pinus oocarpa parte I – estudo dos constituintes macromoleculares e extrativos voláteis. **Revista Árvore**. Viçosa, v. 29, n. 3, p. 461-470, maio/jun. 2005.

MOSER, H. P. Transformerboard. **Scientia Electrica/H. Weidmann AG**. Rapperswil, 1979.

NELSON, J. K. **Some steps toward the automation of the design of composite dielectric structures**. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, v. 1, n. 4, p. 663-671, 1994. ISSN 1070-9878.

NUNES, A.; HARMEL, D. F. Modelagem Numérica de Campo Elétrico em Transformador de 550kV através dos métodos de Elementos Finitos 3D e do “Cumulative Stress”. In: SNPTEE, XXII (Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica). **Anais...** Brasília, out. 2013. 8 p.

QUADROS, A. M. **Papel Nomex utilizado em transformadores: avaliação das características e degradação térmica**. 2006. 59 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

RAS OLIVA, E. **Transformadores de potencia, de medida, y de protección**. 3. ed. Barcelona: Marcombo, 1975.

RAVAGLIO, M. A. ; SCHAEFER, J. C. ; TEIXEIRA Jr, J. A. Redução de Perdas em Transformadores de Distribuição. In: VI SEMINÁRIO DE MATERIAIS DO SETOR ELÉTRICO, VI. **Anais do VI SEMEL**. Curitiba: LACTEC, 1998. p. 4915-4929.

REINO, L. A. T. **Fluídos magnéticos de maghemita em óleo isolante visando a utilização em transformadores imersos em líquido isolante**: Obtenção e avaliação de suas características químicas, físicas, reológicas, magnéticas e elétricas. 2012. 321 p. Tese (Doutorado em Química Multiinstitucional) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2012.

RIES, W. **Transformadores**: Fundamentos para o Projeto e Cálculo. 1. ed. Porto Alegre: Edipucrs, 2007.

ROMANO, M. A. de A.. **Software e Hardware para Análise de Ensaios de Impulsos Atmosféricos em Equipamentos para Média Tensão**. 2014. 87 p. Dissertação de (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2014.

SALUSTIANO, R. **Análise Técnica de Transformadores para Redes de Média Tensão**. 2012. 101 p. Dissertação (Mestrado em Ciência em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2012.

SANTOS, A. M. dos. **Estimação Relativa de Tempo de Vida de Transformadores de Distribuição, Considerando Cargas Não Lineares**. 2014. 185 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica e Computação) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2014.

SCHOLZ, R. C. **Avaliação do Comportamento Dielétrico dos Materiais Isolantes Utilizados em Transformadores de Distribuição por meio de Espectroscopia Dielétrica**. 2013. 104 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

SILVA, P. R. da. **Otimização do Projeto de Transformadores de Distribuição que Empregam Núcleo Amorfo e Óleo Vegetal Isolante**. 2015. 82 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.

TAKAHASHI, E; SHIRASAKA, Y; OKUYAMA, K. Analysys of na anisotropic nonlinear electric field with a discussion of dielectric tests for converter transformers and smoothing reactors. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 9, n 3, p. 1480-1486, jul. 1994.

TAMURA, L. F. **Determinação de parâmetros do circuito equivalente térmico de transformadores de potência por meio de técnicas de otimização**. 2009. 115 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

TARDIVO, Marcio Aparecido. **Uma Aplicação de Redes Neurais Artificiais para Estimação da Elevação de Temperatura de Transformadores Monofásicos de Distribuição Imersos em Líquido Isolante**. 2012. 88 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2012.

UHREN, W. **Aplicação de óleo vegetal como meio isolante em equipamentos elétricos, em substituição ao óleo mineral isolante**. 2007. 123 p. Dissertação (Mestrado Profissionalizante – PRODETEC) – Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento e Instituto de Engenharia do Paraná, Curitiba, 2007.

VAILLES, C; MALEWSKI, R; DAI-DO, X; AUBIN, J. **Measurements of Dielectris Stress in EHV Power Transformer Insulation**. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 10, n. 4, p. 1757-1763, oct. 1995.

WILHELM, H. M.; GRANATO, R. C.; TULIO, L.; STOCCO, G. B.; RAVAGLIO M. A.; BATISTA, D. A.; MATTOSO, M.; TRINDADE, E. M.; UHREN, W.; JÚNIOR, S. B. G.; ADONIS, N. G. **Aspectos relacionados com a utilização de óleo vegetal isolante no Brasil**. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON POWER TRANSFORMER, IV (IV WORKSPOT). Recife, 2006. 9 p.

ZIOMEK, W; VIJAYAN, K; BOYD, D; KUBY, K; FRANCHEK, M. **High Voltage Power Transformer Insulation Design**. *IEEE Electrical Insulation Conference. Record*, Annapolis, Maryland, USA, p. 211-215, jun. 2011.