

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

Daniela Maia Bueno

**METODOLOGIA DE ENSAIOS DIELÉTRICOS PARA
SISTEMAS DE ISOLAÇÃO SÓLIDO-LÍQUIDO APLICADOS
A TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA**

**Santa Maria, RS, Brasil
2021**

Daniela Maia Bueno

**METODOLOGIA DE ENSAIOS DIELÉTRICOS PARA SISTEMAS DE
ISOLAÇÃO SÓLIDO-LÍQUIDO APLICADOS A TRANSFORMADORES
DE POTÊNCIA**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Sistemas de Energia, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM-RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestra em Engenharia Elétrica**.

Orientador: Prof. Dr. Tiago Bandeira Marchesan

**Santa Maria, RS, Brasil
2021**

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Bueno, Daniela Maia

Metodologia de ensaios dielétricos para sistemas de isolamento sólido-líquido aplicados a transformadores de potência / Daniela Maia Bueno - 2021

106 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, 2021

1. Ensaio Dielétrico 2. Metodologia 3. Sistema de Isolamento 4. Sólido-líquido 5. Transformadores de Potência I. Marchesan, Tiago Bandeira.

© 2021

Todos os direitos autorais reservados a Daniela Maia Bueno. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita com autorização por escrito do autor.

Endereço: Av. Roraima, Nº 1000, Bairro Camobi, Santa Maria, RS, Brasil, CEP: 97105-900;

Fone: (55) 9-9184-6329;

Endereço Eletrônico: daanielambueno@gmail.com

Daniela Maia Bueno

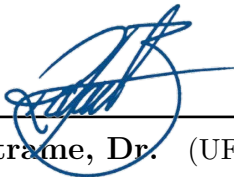
**METODOLOGIA DE ENSAIOS DIELÉTRICOS PARA SISTEMAS DE
ISOLAÇÃO SÓLIDO-LÍQUIDO APLICADOS A TRANSFORMADORES
DE POTÊNCIA**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Sistemas de Energia, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM-RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestra em Engenharia Elétrica**.

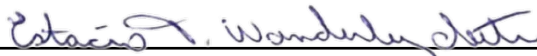
Aprovado em 30 de Novembro de 2021:



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



Rafael Concatto Beltrame, Dr. (UFSM) - Videoconferência



Estácio Tavares Wanderley Neto, Dr. (UNIFEI) - Videoconferência

**Santa Maria, RS, Brasil
2021**

DEDICATÓRIA

A todos aqueles que fazem de minhas conquistas sua felicidade.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao professor Tiago Bandeira Marchesan pela oportunidade e apoio neste trabalho. Ao professor Vitor Cristiano Bender pela sua dedicação, disponibilidade e suporte durante o desenvolvimento desta dissertação. Ao professor Rafael Concatto Beltrame pelo auxílio prestado e conhecimentos compartilhados.

Agradeço aos meus pais José e Lurdes, por todo o amor, incentivo e apoio. Sou imensamente grata por tudo que fizeram para que eu chegasse onde estou hoje, e por não medirem esforços para tornar tudo isso possível. À minha irmã Laiana e meu cunhado Rodrigo pela amizade e cumplicidade. Às minhas sobrinhas Anna Vitória e Rafaela, por serem luz nas nossas vidas.

Ao meu namorado Filipe Pinarello Scalcon por ter caminhado ao meu lado durante o desenvolvimento deste trabalho. Obrigada pela sua compreensão, companheirismo e ajuda, especialmente por tornar esta jornada mais leve e agradável.

Aos colegas de laboratório, pelos momentos de amizade e ajuda acadêmica, pelas trocas de conhecimentos e pela experiência adquirida. Em especial, um obrigada ao Rodolfo Londero, Leonardo Medeiros, Rodrigo Oliveira, Antônio Kaminski, Micael Oliveira, Matheus Stefanello, Gabriel Nogueira e Marcelo Weber.

À Universidade Federal de Santa Maria, ao Programa de Pós-Graduação de Engenharia Elétrica, professores e técnicos administrativos, pela oportunidade de acesso a um curso de pós-graduação de qualidade. Ao INRI por fornecer um ambiente de trabalho e recursos essenciais ao desenvolvimento desta dissertação. Ao apoio técnico e financeiro prestados pelo Programa de P&D ANEEL através do projeto PD-06491-0421/2016 em parceria com a COPEL - Companhia Paranaense de Energia.

A todas as demais pessoas que fizeram parte de minha vida ao longo destes dois anos, contribuindo de alguma forma com a realização deste trabalho e com a conclusão desta etapa da minha formação, muito obrigada!

“You can’t connect the dots looking forward; you can only connect them looking backwards.

Steve Jobs”

RESUMO

METODOLOGIA DE ENSAIOS DIELÉTRICOS PARA SISTEMAS DE ISOLAÇÃO SÓLIDO-LÍQUIDO APLICADOS A TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA

AUTORA: DANIELA MAIA BUENO
ORIENTADOR: TIAGO BANDEIRA MARCHESAN

Esta dissertação apresenta contribuições ao campo de ensaios dielétricos para sistemas de isolamento sólido-líquido aplicados a transformadores de potência. Tem-se como objetivo que esta metodologia sirva de guia de referência para a obtenção de resultados experimentais. Neste contexto, são apresentados o projeto e a fabricação da estrutura necessária para a realização dos ensaios em duas configurações, compostas por arranjos de eletrodos que apresentam geometrias que buscam replicar as condições reais do transformador. A fim de validar tais configurações, simulações computacionais baseadas na análise de elementos finitos são realizadas. Devido à necessidade de garantir uma caracterização estatística confiável do ensaio, também é proposta uma metodologia para definição do número mínimo de amostras a serem testadas nos ensaios de ruptura dielétrica. Além disso, são apresentados os procedimentos de preparação das amostras de papel e óleo isolante, bem como de aplicação de tensão suportável de impulso atmosférico padronizado e de tensão alternada em frequência comercial. A montagem das configurações de ensaio são efetuadas e um procedimento pré-testes é proposto. Por fim, a distribuição de Weibull é descrita com o propósito de realizar a análise dos dados de tensão de ruptura obtidos nos testes dielétricos. A partir da metodologia proposta, torna-se possível, futuramente, a realização de ensaios dielétricos e a definição das curvas de projeto, bem como das margens de segurança do projeto dielétrico empregando diferentes materiais isolantes sólidos e líquidos, além de fornecer resultados e conclusões que viabilizem o projeto e a fabricação de transformadores de potência.

Palavras-chave: Ensaio dielétrico, metodologia, sistemas de isolamento, sólido-líquido, transformadores de potência.

ABSTRACT

**DIELECTRIC TESTING METHODOLOGY FOR
SOLID-LIQUID INSULATION SYSTEMS
APPLIED TO POWER TRANSFORMERS**

AUTHOR: DANIELA MAIA BUENO
ADVISOR: TIAGO BANDEIRA MARCHESAN

This master thesis presents contributions to the field of dielectric tests for solid-liquid insulation systems applied to power transformers. It is intended that this methodology serves as a reference guide to obtain experimental results. In this context, it is necessary to design and build the structure necessary to carry out the tests in two configurations, consisting of electrode arrays that present geometries that seek to replicate real conditions of the transformer. In order to validate such configurations, computational simulations based on finite element analysis are performed. Due to the need to ensure a reliable statistical characterization of the test, a methodology for defining the minimum number of samples to be used in dielectric breakdown tests is also proposed. In addition, the procedures for sample preparation of paper and insulating oil are presented, as well as the application of withstand voltage of standardized lightning impulse and alternating voltage at commercial power frequency. The assembly of the test configurations is carried out and a pre-test procedure is proposed. Finally, the Weibull distribution is described with the purpose of analyzing the breakdown voltage data obtained in the dielectric tests. From the proposed methodology, it becomes possible, in the future, to carry out dielectric tests and the definition of design curves, as well as the safety margins for the dielectric design using different solid and liquid insulating materials, in addition to providing results and conclusions that enable the design and manufacture of power transformers.

Keywords: Dielectric tests, insulation systems, methodology, power transformers, solid-liquid.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	– Sistema de isolamento sólido de uma bobina.	26
Figura 1.2	– (a) Linhas de fluxo entre AT, BT, H1 e H2. (b) Planos equipotencias entre AT e BT.	30
Figura 1.3	– Isolação entre bobinas e cabeceiras das bobinas.	31
Figura 1.4	– Sistema de isolamento híbrido misto.	32
Figura 1.5	– Sistema de isolamento totalmente híbrido.	33
Figura 1.6	– Sistema de isolamento de alta temperatura.	33
Figura 1.7	– Pontos críticos de análise: 1 - Eletrodo isolado ou não isolado, 2 - Dutos Internos e 3 - Descarga Superficial.	36
Figura 1.8	– Curvas de projeto referentes aos três caminhos críticos.	37
Figura 2.1	– Câmara de vácuo cilíndrica: (a) Vista isométrica. (b) Fabricada. ...	44
Figura 2.2	– Projeto final da câmara de vácuo cilíndrica.	44
Figura 2.3	– Vista isométrica do eletrodo projetado para o modelo CB.	45
Figura 2.4	– Eletrodo projetado: (a) Vistas. (b) Cortes.	46
Figura 2.5	– Eletrodo fabricado: (a) Sem parafuso. (b) Com parafuso.	46
Figura 2.6	– Blindagem anticorona: (a) Aberta. (b) Fechada.	47
Figura 2.7	– Dimensões da amostra de isolante sólido.	47
Figura 2.8	– Estrutura de polietileno de alta densidade: (a) Projetada. (b) Fabricada.	48
Figura 2.9	– Estrutura de polietileno: (a) Vistas. (b) Cortes.	49
Figura 2.10	– Conjunto para ensaio do modelo CB: (a) Projetado. (b) Fabricado.	49
Figura 2.11	– Dimensões do condutor de cobre.	50
Figura 2.12	– Dimensões do eletrodo projetado para o modelo T2T.	51
Figura 2.13	– Camadas de papel: (a) Kraft termoestabilizado. (b) Nomex® 910. ...	51
Figura 2.14	– Eletrodo para o modelo T2T: (a) Vista isométrica projetada. (b) Fabricado revestido de Nomex® 910. (c) Fabricado revestido de TUK.	52
Figura 2.15	– Distribuição das linhas equipotenciais para o modelo CB.	53
Figura 2.16	– Distribuição do campo elétrico para o modelo CB.	54
Figura 2.17	– Distribuição do campo elétrico ampliada para o modelo CB.	54
Figura 2.18	– Caminhos críticos traçados para o modelo CB.	55
Figura 2.19	– Resultado para eletrodo não isolado no caminho A.	55
Figura 2.20	– Resultado para descarga superficial no caminho B.	56
Figura 2.21	– Resultado para descarga superficial no caminho C.	56
Figura 2.22	– Resultado para eletrodo não isolado no caminho D.	56
Figura 2.23	– Distribuição das linhas equipotenciais para o modelo T2T.	58
Figura 2.24	– Distribuição do campo elétrico para o modelo T2T.	58
Figura 2.25	– Distribuição do campo elétrico ampliada para o modelo T2T.	59
Figura 2.26	– Trechos analisados para o modelo T2T.	59
Figura 2.27	– Resultado de campo elétrico ao longo dos trechos analisados.	60
Figura 3.1	– Gráfico da função de distribuição cumulativa de Weibull.	63
Figura 3.2	– Gráfico da função de densidade de probabilidade de Weibull.	63
Figura 3.3	– Efeito da variação do parâmetro de escala α na função de densidade com $\beta = 4$	64
Figura 3.4	– Efeito da variação do parâmetro de forma β na função de densidade com $\alpha = 4$	65
Figura 3.5	– Função de distribuição cumulativa de Weibull.	69
Figura 4.1	– Amostras de papel impregnadas e seladas: (a) CB. (b) T2T.	74
Figura 4.2	– Diagrama da configuração de ensaio para o modelo CB.	75
Figura 4.3	– Montagem da configuração de ensaio para o modelo CB.	76

Figura 4.4	– Diagrama da configuração de ensaio para o modelo T2T.....	78
Figura 4.5	– Montagem da configuração de ensaio para o modelo T2T.....	78
Figura 4.6	– Dados do ensaio em degrau, medidos pelo divisor de tensão.	79
Figura 4.7	– Amostra de Nomex® 910: (a) Recém retirada da câmara de ensaio. (b) Sem as camadas de papel que une ambos os eletrodos. (c) Local onde ocorreu a ruptura dielétrica.	80
Figura 4.8	– Etapa 1: Tratamento do óleo na termo vácuo.	81
Figura 4.9	– Etapa 2: (a) Modelo T2T. (b) Modelo CB.....	82
Figura 4.10	– Etapa 3: (a) Modelo T2T. (b) Modelo CB.....	82
Figura 4.11	– Etapa 4: (a) Modelo T2T. (b) Modelo CB.....	83
Figura 4.12	– Etapa 5: (a) Modelo T2T. (b) Modelo CB.....	83
Figura 4.13	– Fluxograma da metodologia de ensaios dielétricos proposta.	84
Figura A.1	– Termo vácuo utilizada para o tratamento do óleo.	99
Figura A.2	– Óleo vegetal Biovolt MineralTec.	100
Figura A.3	– Fonte trifásica Supplier.	101
Figura A.4	– (a) Área de controle do laboratório. (b) <i>Software</i> do fabricante.	101
Figura A.5	– (a) Banco de resistores. (b) Indutor.	102
Figura A.6	– Transformador de potencial PFIFFNER.	102
Figura A.7	– (a) Divisor de tensão. (b) Aplicativo móvel.	103
Figura A.8	– Conjunto de blindagens.	103
Figura A.9	– Conjunto gerador de impulso.	104
Figura A.10	– Gerador de impulso e divisor de tensão.	105
Figura A.11	– Osciloscópio Rohde&Schwarz localizado na área de controle do labo- ratório.	106

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1	–	<i>DIL Factors</i> em referência ao teste de um minuto.	35
Tabela 3.1	–	Dados do ensaio dielétrico distribuídos de forma crescente e atribuídos a uma probabilidade de ruptura.	68
Tabela 3.2	–	Valores de α e β estimados e seus intervalos de confiança.	68
Tabela 3.3	–	Valores dos parâmetros calculados para o modelo CB.	71
Tabela 3.4	–	Valores dos parâmetros calculados para o modelo T2T.	72

LISTA DE APÊNDICES E ANEXOS

Apêndice A – Descrição dos equipamentos	99
---	----

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	23
1.1 MOTIVAÇÃO	23
1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
1.2.1 Composição do Sistema de Isolação de Transformadores	25
1.2.2 Materiais Isolantes	27
1.2.2.1 Isolante Sólido	27
1.2.2.2 Isolante Líquido	28
1.2.3 Critérios de Dimensionamento	30
1.2.4 Tipos de Sistemas de Isolação	31
1.2.5 Sobretensões do Sistema Elétrico	34
1.2.6 Ruptura da Rigidez Dielétrica	35
1.2.7 Curvas de Projeto	37
1.2.8 Método dos Elementos Finitos	38
1.2.9 Método do Estresse Elétrico Cumulativo e Margem de Segurança	39
1.2.10 Ensaios Dielétricos	39
1.3 OBJETIVOS DO TRABALHO	41
1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	42
2 ELEMENTOS DE ENSAIO E SIMULAÇÕES	43
2.1 INTRODUÇÃO	43
2.2 CÂMARA DE VÁCUO	43
2.3 ESTRUTURA PARA O ENSAIO NO MODELO <i>CREEP BREAKDOWN</i>	45
2.3.1 Eletrodos	45
2.3.2 Suporte em Polietileno	48
2.4 ESTRUTURA PARA O ENSAIO NO MODELO <i>TURN-TO-TURN</i>	50
2.4.1 Eletrodos	50
2.5 SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS	52
2.5.1 Modelo <i>Creep Breakdown</i>	53
2.5.2 Modelo <i>Turn-to-turn</i>	57
2.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	60
3 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS EXPERIMENTAIS	61
3.1 INTRODUÇÃO	61
3.1.1 Distribuição de Weibull	62
3.1.2 Técnica Computacional para a Estimação de Parâmetros de Weibull	65
3.1.3 Intervalos de Confiança para os Parâmetros de Weibull	67
3.1.4 Estudo de caso	67

3.2 DEFINIÇÃO DO TAMANHO DA AMOSTRA	70
3.2.0.1 Metodologia adotada	70
3.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS	72
4 METODOLOGIA DE ENSAIOS DIELÉTRICOS	73
4.1 INTRODUÇÃO	73
4.2 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS	73
4.3 MODELO CB	75
4.3.1 Aplicação de tensão suportável de impulso atmosférico padronizado	75
4.3.2 Configuração de ensaio	75
4.4 MODELO T2T	77
4.4.1 Aplicação de tensão alternada em frequência comercial	77
4.4.2 Configuração de ensaio	77
4.4.3 Resultados Preliminares	79
4.5 PROCEDIMENTO PRÉ-TESTES	80
4.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	85
5 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS	87
5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS	87
5.2 TRABALHOS FUTUROS	89
5.3 ARTIGOS PUBLICADOS	89
REFERÊNCIAS	91
APÊNDICES	97
A.1 TRATAMENTO DO ÓLEO	99
A.2 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NA CONFIGURAÇÃO DE ENSAIO T2T	100
A.3 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NA CONFIGURAÇÃO DE ENSAIO CB	104

1 INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO

A energia elétrica é fundamental para a manutenção do estilo de vida e economia nos dias atuais, onde quase todas as atividades cotidianas envolvem o uso de eletricidade. Regular e garantir o fluxo constante e seguro de energia é essencial, e isso não seria possível sem a existência dos transformadores. Esses dispositivos são responsáveis por modificar os níveis de tensão e corrente que flui através do sistema elétrico, sendo indispensáveis para o controle e entrega da energia elétrica desde a geração, nas usinas, até próximo ao consumidor final (MOSER, 1979).

Os transformadores de potência estão diretamente relacionados à continuidade do fornecimento de energia elétrica, que pode ser interrompido em caso de falhas ou defeitos no equipamento (RIBEIRO et al., 2009). A confiabilidade desses equipamentos depende sobretudo de seu sistema de isolamento que, por sua vez, deve suportar não somente as solicitações dielétricas provenientes de sua operação normal, mas também as originadas de sobretensões oriundas de descargas atmosféricas ou transitórias operacionais, aos quais são expostos durante os testes de fábrica e em operação (RIES, 2007a; WANG et al., 2015a).

Uma falha no sistema de isolamento pode causar prejuízos técnicos, com a interrupção do fornecimento de energia, e financeiros, com multas, reparo ou substituição do transformador. Por essa razão, o projeto dielétrico é extremamente criterioso, sendo considerado um ponto primordial no dimensionamento de um transformador. Ele deve atender às especificações de projeto e apresentar uma margem de segurança adequada para que a operação contínua do transformador seja garantida, sem comprometer o custo do equipamento (IARONKA, 2019; FEIL, 2019).

Por muitos anos, o projeto de transformadores imersos em líquido isolante baseou-se na combinação entre isolamento sólido de celulose e óleo mineral (DUART; BATES, 2010). Esta topologia mostra-se confiável e econômica, apesar de apresentar problemas relacionados às características térmicas, mecânicas e elétricas, que se devem principalmente aos limites de temperatura mais baixos da celulose (KANG et al., 2014). Diversos testes já foram realizados nesse sistema, a fim de investigar as propriedades dielétricas desses materiais. Dessa forma, uma significativa melhoria nas técnicas de projeto de sistemas de isolamento que empregam estes materiais foi observada, buscando sempre satisfazer os critérios de desempenho dielétrico definidos nos padrões de transformadores (PREVOST, 2009).

As limitações térmicas desses materiais impulsionaram a busca de novas soluções

que permitissem a operação de transformadores em temperaturas mais elevadas. Como alternativa, foram desenvolvidos os materiais sintéticos à base de aramida, com classe térmica superior aos isolantes celulósicos (KANG et al., 2014). Além disso, a substituição do óleo mineral por outras alternativas também é de interesse. Nesse cenário, a utilização de éster natural é atraente, dado que ele apresenta menor impacto ambiental, devido à sua biodegradabilidade, não toxicidade e origem de fonte renovável, bem como garante maior segurança contra incêndio, devido ao seu alto ponto de fulgor e combustão (MEHTA et al., 2016b).

De maneira geral, o conhecimento a respeito da compatibilidade e capacidade de isolamento elétrica de materiais sólidos à base de celulose imersos em óleo mineral é um aspecto já bastante difundido. No entanto, com a tendência da utilização de novos materiais isolantes, como o éster natural e os isolamentos sólidos à base de aramida, por exemplo, é necessário investigar e compreender o desempenho dielétrico dessas novas soluções, assim como de outros materiais que possam surgir futuramente, a fim de viabilizar a sua aplicação no projeto de sistemas de isolamento de transformadores de potência (HAEGELE et al., 2017).

A suportabilidade dielétrica dos materiais isolantes pode ser testada através de testes padronizados sob tensão alternada, que simulam as sobretensões dinâmicas do sistema, ou tensão impulsiva, que simulam as sobretensões devidas às descargas atmosféricas (RIES, 2007b). Para a realização destes testes, são comumente utilizados arranjos de eletrodos, que apresentam geometrias que buscam replicar as condições reais do transformador como papel-óleo, cartão prensado-óleo, enrolamentos e condutores (HAEGELE et al., 2017). Para a obtenção de resultados significativos nos testes dielétricos, é extremamente importante realizar o adequado tratamento das amostras de isolamento sólido e processamento dos fluidos (RAPP et al., 2009).

Durante a realização dos testes dielétricos, um número mínimo de amostras devem ser rompidas, a fim de obter-se dados suficientes para garantir uma caracterização estatística confiável do ensaio. Os dados resultantes destes ensaios, mesmo submetidos às mesmas condições de teste, muitas vezes, não apresentarão os mesmos resultados, o que implica na necessidade de tratamento estatístico adequado dos dados, tanto para assegurar a qualidade do dielétrico quanto para garantir a confiabilidade da isolamento (UEKI; ZANIN, 1997). A fim de analisar a dispersão dos dados de tensão de ruptura, técnicas estatísticas, como a distribuição de Weibull, podem ser utilizadas (ROZGA, 2016).

A partir da realização de ensaios dielétricos, torna-se possível a obtenção das curvas de projeto e a definição das margens de segurança do projeto dielétrico empregando diferentes materiais isolantes sólidos e líquidos. A partir desses resultados e conclusões, pode-se obter diretrizes que viabilizem o projeto e a fabricação de transformadores de potência.

1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção será apresentada uma revisão bibliográfica referente ao sistema de isolamento de transformadores. Serão abordados aspectos relacionados a sua composição, aos materiais isolantes utilizados, aos critérios de dimensionamento e aos diferentes tipos de sistemas. Além disso, serão apresentadas as solicitações dielétricas que o transformador está sujeito, os pontos críticos suscetíveis a descargas elétricas e as possíveis causas que levam a ruptura dielétrica do isolamento. Por fim, serão detalhados os conceitos e aplicações das curvas de projeto, do método de elementos finitos, do método do estresse elétrico cumulativo e serão descritos alguns dos ensaios dielétricos já realizados na literatura.

1.2.1 Composição do Sistema de Isolação de Transformadores

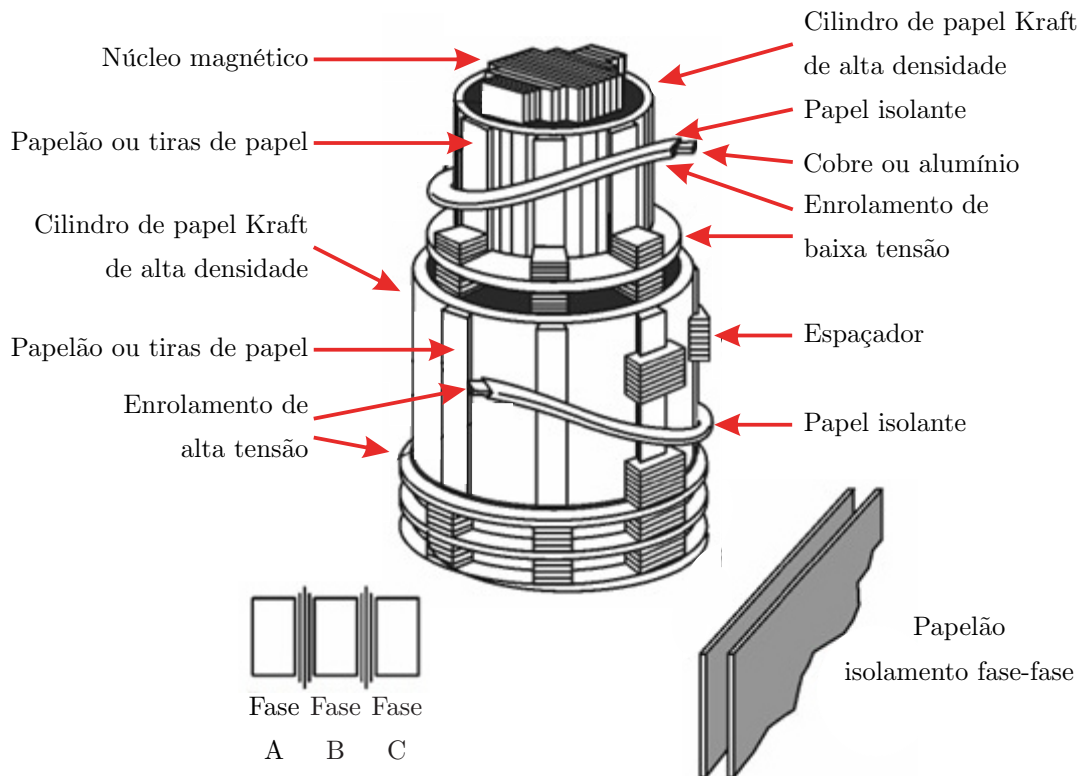
O sistema de isolamento de um transformador é complexo, tendo importância fundamental para garantir o bom funcionamento do equipamento. Por mais de um século, seu sistema convencional constituiu-se de óleo mineral, como isolamento líquido, e papel de celulose, como isolamento sólido (KASSI et al., 2015; KASSI et al., 2014). Os líquidos isolantes possuem a função principal de isolar eletricamente as partes do equipamento com diferentes níveis de tensão e transferir o calor gerado pela parte ativa para o sistema de resfriamento. Além disso, são responsáveis por atuar como meio de amortecimento acústico, pela extinção de descargas de arco e, de maneira mais importante ainda, fornecem um meio oportuno de avaliação das condições do equipamento ao longo de sua vida útil (JUNIOR, 2019). O isolante sólido, por sua vez, é utilizado principalmente para revestir os condutores, com a finalidade de evitar um curto-circuito proveniente do contato entre eles (MEDEIROS, 2017).

Com relação ao tipo de isolamento utilizado, os transformadores podem ser à seco ou imersos em líquido isolante. Os transformadores do tipo seco são construídos para níveis de tensão de até 34,5 kV, utilizando como principais materiais isolantes as resinas naturais e sintéticas, fibras de vidro, mica, porcelana, resinas epoxídicas, o ar e determinados gases isolantes (RIES, 2007b). Já os transformadores imersos em líquido, comumente adotados para uso em alta tensão, utilizam óleo mineral, sintético e vegetal, como fluidos isolantes, e papel a base de celulose, aramida, esmalte e madeira densificada, como isolamento sólido (ZIOMEK et al., 2011).

O isolamento de um transformador de potência imerso em óleo é composto pelo isolamento principal e o isolamento dos enrolamentos. O isolamento principal consiste no próprio fluido isolante adotado e barreiras de isolamento sólido entre: os enrolamentos, os enrolamentos e o plano de terra, os condutores, e os condutores e o plano de terra. Já o isolamento dos enrolamentos, consiste no uso do papel entre as seções, entre as espiras, e

entre os condutores e enrolamentos (ZIOMEK et al., 2011). A Figura 1.1 ilustra o sistema de isolamento sólido de uma bobina envolvida ao núcleo de uma fase de um transformador. Como pode ser observado, a isolamento sólido está presente nos cilindros localizados entre o núcleo e os enrolamentos, em cilindros entre os enrolamentos de alta e de baixa tensão, nos enrolamentos de alta e de baixa tensão, nos espaçadores entre as bobinas e em barreiras entre fases do transformador.

Figura 1.1 – Sistema de isolamento sólido de uma bobina.



Fonte: Adaptado de Medeiros (2017).

Os cilindros isolantes constituem-se de papel e cartão prensado (*pressboard*), que podem ser moldados de forma a produzir diversos outros componentes utilizados no isolamento de transformadores, como por exemplo, anéis flangeados, espaçadores, longarinas e calços. Esses elementos, muitas vezes, além de exercerem a sua função de isolante elétrico, também proveem outras funções (RIES, 2007b). Os espaçadores e cilindros além de separarem o núcleo e os enrolamentos de alta e baixa tensão, tem a função de criar espaços para a circulação do líquido isolante, auxiliando na dissipação térmica do equipamento, e também servem para prover sustentação mecânica aos enrolamentos. Já as barreiras entre as fases, proveem o isolamento entre cada uma delas e evitam a formação de grandes lacunas preenchidas apenas com fluido isolante, diminuindo assim a possibilidade de haver descargas parciais (MEDEIROS, 2017).

1.2.2 Materiais Isolantes

Nesta subseção será detalhado o estado da arte referente a materiais usados no isolamento sólido e líquido, respectivamente.

1.2.2.1 Isolante Sólido

Antes da década de 1920, uma variedade de materiais fibrosos como algodão, seda, juta, asbestos e papelão eram utilizados como isolantes elétricos. As décadas de 1920 e 1930 foram períodos de muitos experimentos relacionados ao desempenho dielétrico do sistema papel-óleo, resultando em melhorias do isolamento devido a melhor compreensão das fibras e impurezas da celulose. Entre o final da década de 1920 e início da década de 1930, a isolação de papel kraft em combinação com o óleo isolante começou a ser utilizado em transformadores, demonstrando satisfazer os requisitos necessários para prover o isolamento em um sistema elétrico à medida que a tensão de operação aumentava. Na década de 1940, o papel kraft em combinação com o óleo passou a ser o material dielétrico utilizado em transformadores operando em sistemas elétricos de alta tensão (PREVOST; OOMMEN, 2006; MALAQUIAS, 2017).

O papel kraft, também conhecido como papel kraft neutro, possui uma classe térmica típica de 105°C, permitindo uma elevação média da temperatura do enrolamento de 55°C. Devido à necessidade de melhorar a capacidade de sobrecarga do transformador, permitindo a sua operação em temperaturas mais elevadas, iniciou-se a busca por novos materiais isolantes que apresentassem maior capacidade térmica (SILVA, 2013b; ZHANG et al., 2016). Sendo assim, no final dos anos 1950, foi introduzido no mercado o papel kraft termoestabilizado (*Thermally Upgraded Kraft* – TUK), o qual possui uma classe térmica típica de 120°C, permitindo um aumento médio da temperatura do enrolamento de 65°C. O TUK é obtido através de um tratamento especial da celulose, o que possibilita uma vantagem térmica em relação à celulose do papel kraft neutro, melhorando assim o seu desempenho em relação ao envelhecimento térmico e, conseqüentemente, aumentando a expectativa de vida do equipamento (SILVA, 2013a; ZHANG et al., 2016).

Os materiais isolantes a base de celulose, comumente chamados de papéis kraft, foram escolhidos para serem utilizados como isolante sólido em transformadores devido a sua abundante disponibilidade e baixo custo. Além disso, apresentam boas propriedades elétricas e mecânicas quando imersos em óleo isolante (SILVA, 2013a; PREVOST; OOMMEN, 2006). No entanto, esses materiais apresentam algumas limitações em relação à sua susceptibilidade à degradação térmica e vulnerabilidade ao ataque oxidativo e hidrolítico. Por essa razão, o equipamento isolado com papel kraft deve ser projetado e operado de forma que as temperaturas de isolamento permaneçam relativamente baixas, além de

exigir um esforço para que a entrada de umidade no interior do equipamento seja evitada ou retirada (FERRITO; STEGEHUIS, 2001; MALAQUIAS, 2017).

Diante da necessidade de um material que superasse as limitações térmicas do TUK, desde o início da década de 1960, papéis e cartões prensados sintéticos à base de aramida têm sido introduzidos para aplicações imersas em líquido de alta temperatura, como transformadores móveis e de tração (KANG et al., 2014). O material isolante Nomex[®], desenvolvido pela Dupont, consiste em um polímero de poliamida aromático com uma classe térmica de 220°C, baixo teor de água, termicamente estável e com propriedades físico-químicas que permitem sua utilização como material isolante em equipamentos elétricos de alta e extra-alta tensão (XU et al., 2018; QUADROS, 2006). Esse polímero apresenta alta resistência mecânica, baixo alongamento, alta resistência ao calor, além de ser compatível com líquidos alternativos, de menor impacto ambiental, como os ésteres naturais (KANG et al., 2014; SILVA, 2013a). No entanto, o custo desses materiais sintéticos de alta temperatura é 10 a 50 vezes maior do que o do papel kraft, limitando a sua adoção em transformadores imersos em líquido (FERRITO; STEGEHUIS, 2001).

Em 2014, a Dupont lançou um novo material alternativo chamado Nomex[®] 910, para uso em aplicações voltadas para o mercado de transformadores imersos em líquido. Em geral, este novo papel de isolamento tem boas propriedades mecânicas e elétricas, além de uma capacidade térmica superior aos papéis kraft normal e TUK, com um custo entre os papéis de celulose e de aramida sintética. O Nomex[®] 910 possui uma construção exclusiva de três camadas. As duas camadas na parte externa da folha são uma combinação de celulose e aramida sintética, para melhorar o desempenho térmico, enquanto a camada central é composta apenas por celulose (KANG et al., 2014; ZHANG et al., 2016). Segundo os resultados apresentados por Kang et al. (2014), o novo papel possui suportabilidade dielétrica, sob tensão CA, mais de 30% superior ao kraft, o que leva à possibilidade de uma vantagem no projeto de transformadores. Note que uma maior suportabilidade dielétrica pode levar a uma economia em situações que empregam materiais de isolamento de múltiplas camadas, além de fornecer uma ferramenta adicional para os projetistas de transformadores, ao permitir o uso de um novo material. Além disso, mostrou capacidade térmica pelo menos 10 °C maior do que o papel TUK, o que permite que o isolamento, em locais específicos de um transformador, possa ter durabilidade de duas a três vezes maior para determinadas temperaturas.

1.2.2.2 *Isolante Líquido*

O óleo mineral isolante (OMI), proveniente do refino do petróleo, tem sido o principal líquido isolante utilizado em sistemas industriais desde 1900. Sua popularidade se deve a sua ampla disponibilidade e baixo custo, além de sua boa durabilidade e baixa

viscosidade (FOFANA, 2013). No entanto, o risco de explosões e incêndios, devido a elevada inflamabilidade do OMI, tornam o material uma alternativa menos segura. O OMI é pouco biodegradável, podendo contaminar o solo e os sistemas hídricos, caso ocorram vazamentos não controlados. Além disso, a crescente demanda por derivados de petróleo, pode levar a uma eventual escassez (MEHTA et al., 2016b).

As crescentes demandas por maior segurança contra incêndio, materiais sustentáveis, respeito ao meio ambiente e vida útil prolongada dos transformadores, impulsionaram o desenvolvimento de líquidos isolantes alternativos (FOFANA, 2013). Os óleos a base de silicone são amplamente estáveis e resistentes ao fogo, além de terem uma excelente resistência à oxidação. No entanto, sua resistência à biodegradação restringe sua aplicação em áreas ambientais sensíveis, e sua alta viscosidade reduz a sua capacidade de transferência de calor. Já os ésteres sintéticos, produzidos a partir de ácidos orgânicos e álcoois, apresentam boa biodegradabilidade e resistência à oxidação, não geram produtos tóxicos na presença de fogo e tem capacidade de absorver umidade da celulose superior ao OMI. Ambos os líquidos são comumente usados em transformadores que operam com altas temperaturas, podendo ser combinados com isolamento sólido de alta temperatura (FOFANA, 2013; CIGRÉ, 2010).

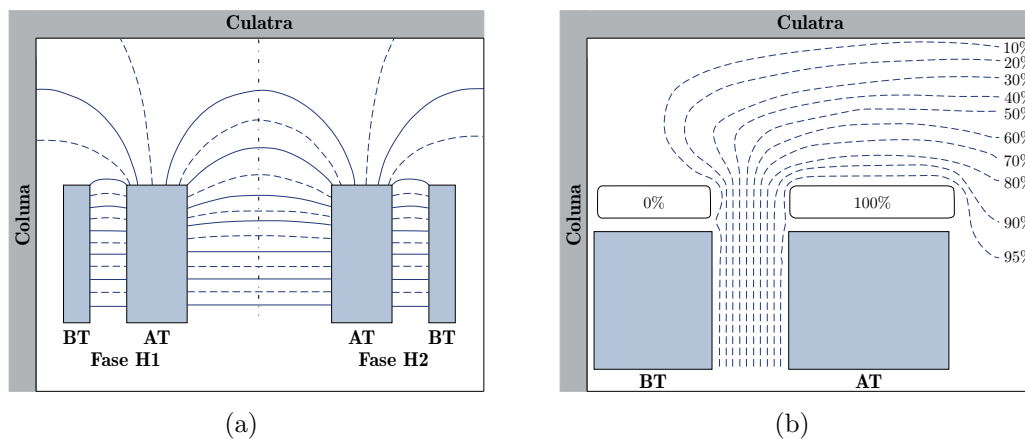
Os ésteres naturais (EN), também chamados de óleos vegetais, tem sido alvo de muito interesse das empresas desde o início da década de 1990, impulsionado principalmente pelas preocupações ambientais (MEHTA et al., 2016b; CIGRÉ, 2010). Consistem essencialmente em triglicerídeos, oriundos da combinação de glicerol com três ácidos graxos, extraídos de sementes de plantas originadas de culturas consideradas renováveis (JUNIOR, 2019). Os primeiros produtos lançados comercialmente no Brasil foram o BIOTEMP[®], importado da Suécia pela ABB Brasil, e o ENVIROTEMP[™] FR3[™], comercializado pela Cooper Power Systems e fabricado pela Cargill. Em 2007, a empresa brasileira Mineraltec lançou os óleos BIOVOLT, os quais são produzidos e comercializados a partir de uma tecnologia inteiramente nacional (WILHELM; TULIO; UHREN, 2009).

O EN apresenta como principais vantagens a sua total biodegradabilidade, não toxicidade, origem de fonte renovável e seu alto ponto de fulgor e combustão (reduzindo a possibilidade de incêndio). Além disso, suporta maiores temperaturas que o OMI e é muito mais higroscópico (favorecendo a secagem do isolamento sólido, o que reduz a velocidade de degradação do papel isolante e conseqüentemente, aumenta a vida útil do equipamento). No entanto, apresenta algumas desvantagens como a sua alta viscosidade (impactando na capacidade de refrigeração do transformador), seu alto ponto de fluidez (dificultando sua utilização em ambientes frios) e sua baixa estabilidade à oxidação (requiritando cuidados especiais e uma construção vedada do tanque) (MEHTA et al., 2016b; MEHTA et al., 2016a; JUNIOR, 2019).

1.2.3 Critérios de Dimensionamento

O dimensionamento do sistema de isolamento é realizado em conformidade com a intensidade do campo elétrico que ocorre entre espiras, entre bobinas, entre bobinas e colunas/culatras, entre bobinas e caixa, e entre ligações e massa em geral. Estes campos elétricos são relativamente uniformes em determinados locais, como entre bobinas e bobinas e núcleo, e não uniformes em outros, como ocorre nas cabeceiras das bobinas. Esses campos são significativamente afetados pela geometria dos eletrodos, as partes vivas do equipamento elétrico (RIES, 2007b; MOSER, 1979). As linhas de campo elétrico e superfícies equipotenciais entre bobinas e entre cabeceiras das bobinas e massa (colunas e culatras) podem ser visualizadas na Figura 1.2.

Figura 1.2 – (a) Linhas de fluxo entre AT, BT, H1 e H2. (b) Planos equipotencias entre AT e BT.



Fonte: Adaptado de Ries (2007b).

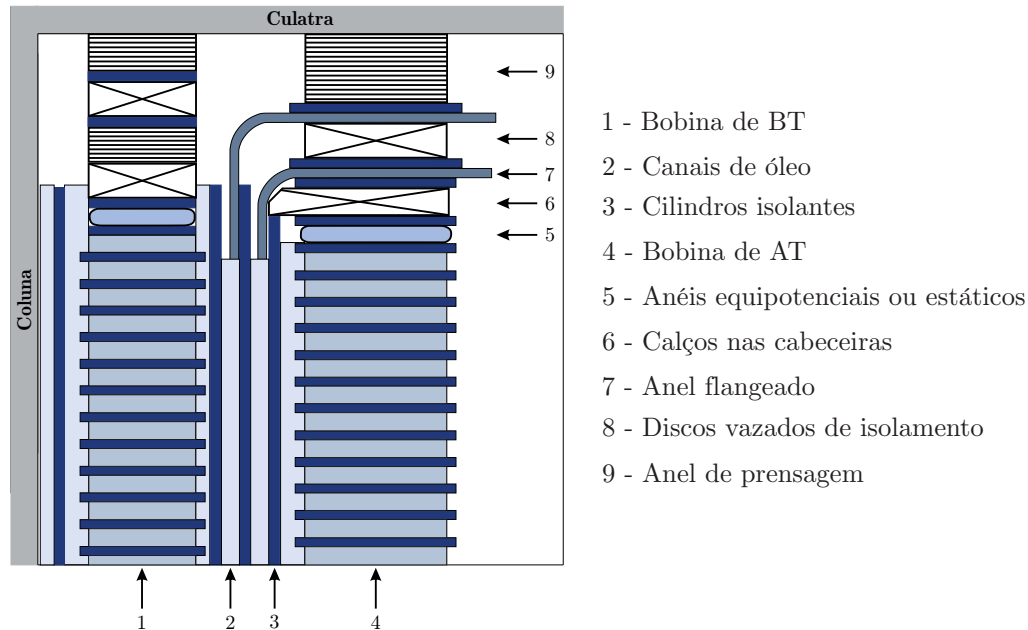
Na Figura 1.2 (a) são apresentadas as linhas de fluxo do campo elétrico entre as bobinas de alta e baixa tensão de uma fase, e entre as bobinas de alta tensão entre fases diferentes. É possível observar que as densidades de fluxo sempre são maiores nas cabeceiras das bobinas e, portanto, nestes pontos as intensidades de campo elétrico ou gradiente de potencial são maiores. Na Figura 1.2 (b), são apresentadas as linhas equipotenciais entre as bobinas de alta e baixa tensão. Observa-se que nos pontos onde a intensidade de campo elétrico é maior, as linhas equipotenciais estão mais próximas (RIES, 2007b).

Para reduzir a tensão nas extremidades dos enrolamentos, utilizam-se anéis de proteção moldados, denominados anéis flangeados. Apesar disso, o estresse ao longo da superfície do isolamento permanece. No ponto onde as linhas equipotenciais interceptam a superfície entre um determinado componente de isolamento sólido e o fluido isolante em um ângulo agudo, haverá uma diferença de potencial que resulta em um estresse elétrico tangencial à superfície do sólido. Isso é chamado de estresse interfacial ou de fluência

(PREVOST, 2006; PREVOST, 2009; MOSER, 1979).

A fim de facilitar a compreensão, a Figura 1.3 apresenta um corte transversal de uma fase de um transformador, onde é possível identificar as diversas partes e componentes de um sistema de isolamento entre bobinas e das cabeceiras das bobinas (RIES, 2007b).

Figura 1.3 – Isolação entre bobinas e cabeceiras das bobinas.



Fonte: Adaptado de Ries (2007b).

Nos canais de óleo encontram-se as longarinas, responsáveis por prover o distanciamento dos cilindros entre si ou das bobinas. Já os anéis flangeados, por sua vez, têm a função de evitar descargas superficiais nas cabeceiras, além de apresentarem calços (criando canais para a circulação do óleo) e discos vazados entre eles, com a função básica de distanciamento e isolamento. Por fim, têm-se os anéis equipotenciais, colocados nas cabeceiras das bobinas, com a função de conformar o campo elétrico nos cantos (RIES, 2007b).

1.2.4 Tipos de Sistemas de Isolação

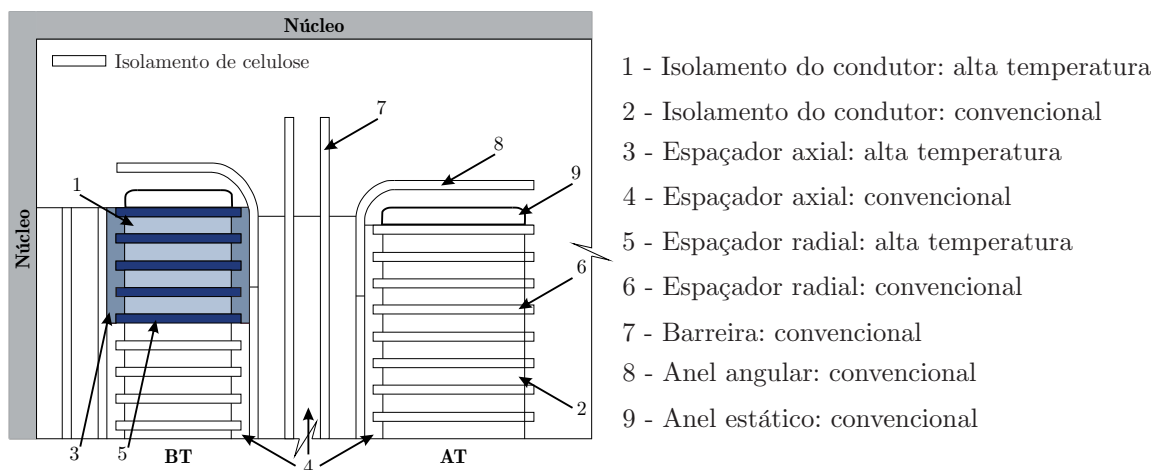
O transformador imerso em líquido, isolado com papel TUK, cartão prensado, madeira, óleo mineral e muitos outros materiais comumente usados, operando em limites de temperatura estabelecidos, é bem conhecido. Por outro lado, outros isolamentos sólidos e líquidos que têm uma capacidade térmica mais elevada são considerados de alta temperatura. Uma vez que o envelhecimento e a vida útil do sistema de isolação dependem fortemente da temperatura, combinações de materiais isolantes com diferentes classes térmicas são geralmente usados a fim de otimizar o projeto do transformador do ponto de

vista térmico e econômico. A norma IEEE Std C57.154-12 estabelece três sistemas de isolamento distintos, definidos com base no grau de conteúdo de isolante de alta temperatura. São eles: sistema de isolamento convencional, sistema de isolamento híbrido e sistema de isolamento de alta temperatura (IEEE, 2012).

O sistema de isolamento convencional consiste em materiais de isolamento sólido usados em todo o transformador e líquido isolante, operando em temperaturas dentro dos limites térmicos normais estabelecidos pela norma IEEE Std C57.154-12. Os limites térmicos para o enrolamento são definidos como aumento de temperatura média de 65 °C, aumento de temperatura do ponto mais quente de 80 °C e temperatura do ponto mais quente de 110 °C. Os limites térmicos para o líquido isolante são definidos como aumento de temperatura no topo de óleo de 65 °C (IEEE, 2012).

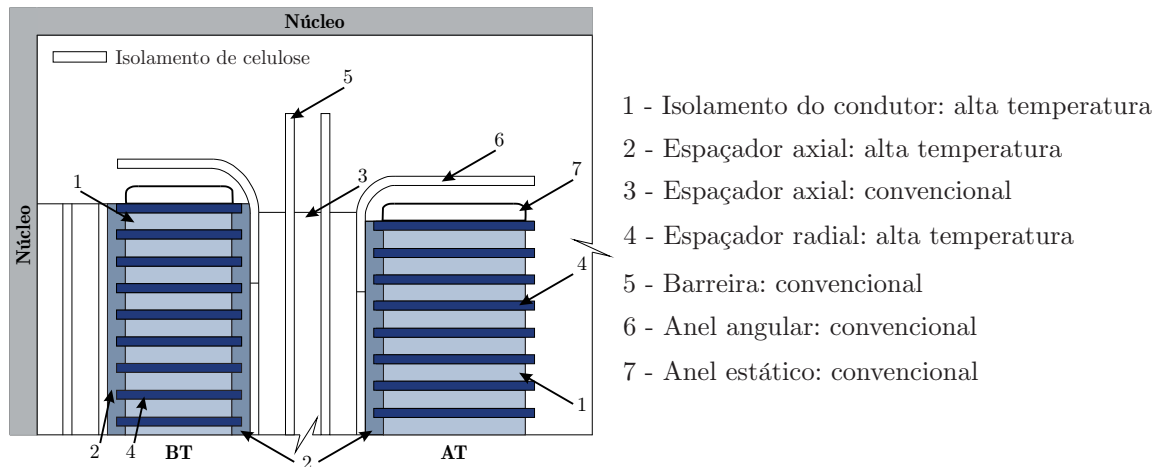
O sistema de isolamento híbrido utiliza isolamento sólido de alta temperatura operando acima das temperaturas convencionais, combinado com isolamento sólido convencional e um líquido isolante operando em temperaturas convencionais. Esse sistema pode ser do tipo híbrido misto ou totalmente híbrido (IEEE, 2012). O sistema de isolamento híbrido misto, apresentado na Figura 1.4, utiliza isolamento de alta temperatura em locais estratégicos, para proteger apenas uma parte do enrolamento de temperaturas que excedem o limite de temperatura do ponto mais quente convencional. No entanto, a maior parte do isolamento sólido deve ser convencional. A temperatura média do enrolamento permanece igual ou abaixo dos limites convencionais, enquanto uma parte do enrolamento excede as temperaturas convencionais de ponto mais quente (IEEE, 2012). Já o sistema de isolamento totalmente híbrido, ilustrado na Figura 1.5, utiliza material de alta temperatura em todo o enrolamento, que opera acima das temperaturas convencionais. O isolamento convencional deve ser usado nas demais áreas, como cilindros de barreira e anéis angulares que operam em temperaturas convencionais (IEEE, 2012).

Figura 1.4 – Sistema de isolamento híbrido misto.



Fonte: Adaptado de IEEE (2012).

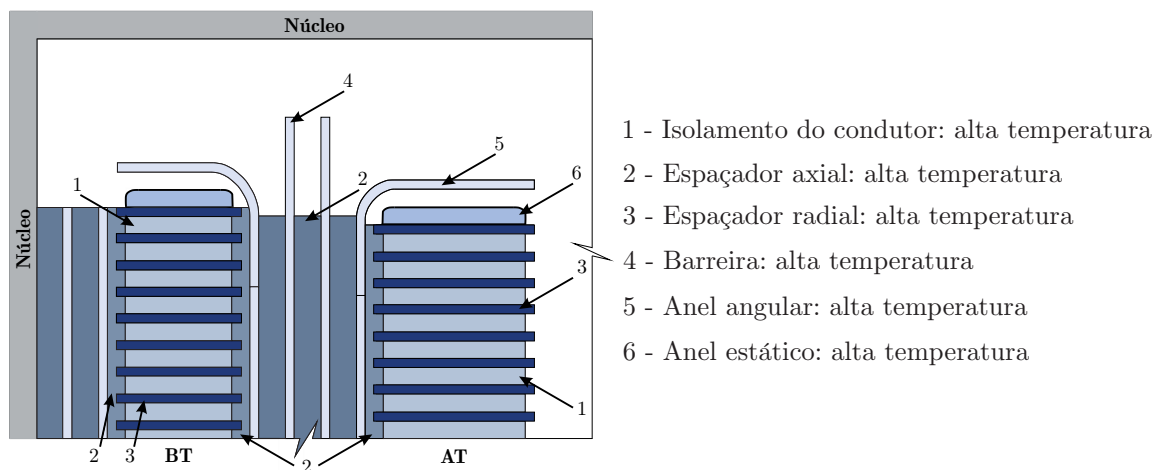
Figura 1.5 – Sistema de isolamento totalmente híbrido.



Fonte: Adaptado de IEEE (2012).

Por fim, a Figura 1.6 mostra o sistema de isolamento de alta temperatura, o qual utiliza material de alta temperatura em todo o transformador, exceto para alguns componentes de isolamento menores em áreas de temperatura mais baixa, junto com líquido isolante de alta temperatura operando em temperaturas maiores que a convencional do topo do líquido, enrolamento médio e aumento de temperatura de ponto mais quente (IEEE, 2012).

Figura 1.6 – Sistema de isolamento de alta temperatura.



Fonte: Adaptado de (IEEE, 2012).

Algumas limitações como espaço, peso e altas temperaturas ambientes fazem com que os projetistas de transformadores busquem novas soluções com aumentos de temperatura mais significativos, utilizando materiais de alta temperatura. Os sistemas de isolamento que utilizam materiais de alta temperatura permitem a realização de projetos significativamente mais compactos, em comparação com os projetos convencionais baseados em

isolamento de celulose e óleo mineral. Transformadores de tração, para trens de alta velocidade, e transformadores móveis são algumas das aplicações que fazem o uso desses sistemas de isolamento avançados, visando reduzir o tamanho e o peso do equipamento, enquanto permite temperaturas de enrolamento mais elevadas. Além disso, são importantes no projeto de transformadores de implantação rápida, para atender a situações emergenciais no caso de interrupções não planejadas (DUART; BATES, 2010; MAREK; PREVOST; DUART, 2018).

1.2.5 Sobretensões do Sistema Elétrico

O transformador de potência está sujeito não só às solicitações dielétricas provenientes de sua operação normal, mas, sobretudo, às originadas de diferentes sobretensões durante os testes de fábrica e em operação. Em operação, o transformador está suscetível às sobretensões transitórias de manobras do sistema, e de descargas atmosféricas, e às sobretensões dinâmicas do sistema, como curtos-circuitos, perdas de carga e entre outras. Os ensaios laboratoriais simulam as principais possíveis ocorrências em operação, através dos seguintes ensaios nos transformadores: ensaio de impulso de onda longa (que simula as sobretensões de manobra do sistema); ensaio de impulso normal de onda plena e de onda cortada (que simula as sobretensões devidas às descargas atmosféricas); e ensaios de tensão induzida e tensão aplicada (que simulam as sobretensões dinâmicas do sistema) (RIES, 2007b; ABNT, 2007).

Os sinais de tensão aplicados nesses ensaios de transformadores apresentam variações bastante peculiares com relação à frequência e amplitude. Por essa razão, estabeleceu-se um fator para relacionar um sinal senoidal de frequência comercial com os sinais de tensão de diferentes frequências, de forma a obter uma tensão elétrica CA equivalente. Este fator é denominado fator de nível de isolação (do inglês, *Design Insulation Level – DIL Factor*). O ensaio de tensão aplicada com frequência de 50 ou 60 Hz, comumente chamado de teste de um minuto em frequência comercial, é considerado o ensaio padrão ($DIL = 1$) usado como referência para a determinação dos demais fatores (KULKARNI; KHAPARDE, 2004; IARONKA, 2019; MEDEIROS, 2017). A relação entre as diferentes tensões transientes e a tensão CA equivalente são apresentadas na Tabela 1.1. Essas relações foram desenvolvidas ao longo de anos, por meio de testes de laboratório de alta tensão.

Tabela 1.1 – *DIL Factors* em referência ao teste de um minuto.

Tipo de Ensaio	<i>DIL Factor</i>
Teste de um minuto	1,0
Impulso atmosférico	2,3 - 2,7
Impulso de manobra	1,8 - 2,1
Teste de uma hora	0,8
Tensão de operação	0,55 - 0,59

Fonte: Adaptado de Medeiros (2017).

1.2.6 Ruptura da Rigidez Dielétrica

Um dielétrico, termo usado quando um material isolante é utilizado para separar dois condutores entre os quais existe uma diferença de potencial, é um meio no qual se pode manter um campo eletrostático constante sem dispêndio significativo de energia elétrica. Se um campo elétrico muito intenso for aplicado ao material isolante, pode ocorrer a ruptura da rigidez dielétrica do mesmo, ou seja, o material dielétrico perde a sua capacidade isolante, tornando-se um condutor de eletricidade (RIES, 2007b).

A rigidez dielétrica do sistema de isolamento papel-óleo depende principalmente da duração, do tipo (forma de onda) e da polaridade da tensão aplicada, do fator de intensificação de campo, da geometria dos eletrodos (distância, área e forma), e do tipo e grau de contaminação do óleo, bem como de sua temperatura, velocidade e pressão (ZIOMEK et al., 2011). A ruptura dielétrica do isolante líquido é um fenômeno muito complexo, ainda em estudo. Até o presente momento, uma teoria única, capaz de descrever todos os mecanismos que levam a ruptura do óleo, não é conhecida. Pesquisas teóricas, no entanto, estabeleceram algumas hipóteses para a sua ocorrência (ZIOMEK et al., 2011; NELSON, 1989; MEDEIROS, 2017):

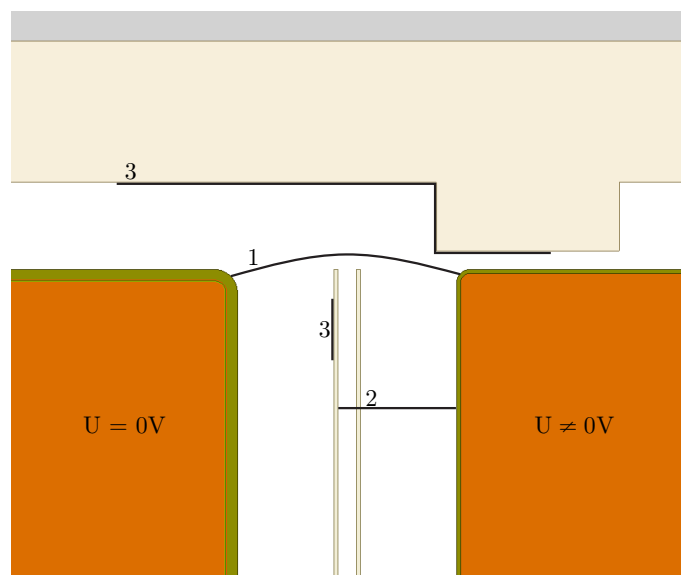
1. Origem elétrica: com o desenvolvimento de avalanche de elétrons, *leaders* (canais de eletricidade) e *streamers* (faíscas);
2. Origem iônica: através da condução iônica em líquido contaminado;
3. Origem por partículas suspensas: que são polarizadas no campo e se concentram, resultando em ruptura;
4. Origem gasosa: onde a presença de bolhas de gás diminui a rigidez dielétrica local;
5. Origem por eletro-convecção: envolvendo dinâmica de carga espacial em líquido e depósito de cargas no isolamento de celulose.

Apesar de existirem muitas incertezas em relação aos processos que levam à ruptura dielétrica em líquido, sabe-se que as descargas elétricas ocorrem em lacunas entre

eletrodos, superfície dos eletrodos e volumes de óleo contido entre eletrodos. Sendo assim, existem três análises dielétricas que representam a maioria dos pontos críticos, suscetíveis a descargas elétricas, a serem analisados internamente no transformador, conforme mostra a Figura 1.7. São elas (ZIOMEK et al., 2011; MEDEIROS, 2017):

1. Eletrodo isolado ou não isolado: entre um eletrodo com potencial elétrico diferente de zero e um plano de terra com potencial igual a zero;
2. Lacunas de óleo ou dutos internos: formadas entre duas estruturas de isolamento sólida;
3. Descarga superficial: ao longo de superfícies de barreiras sólidas próximas à pontos de elevado campo elétrico.

Figura 1.7 – Pontos críticos de análise: 1 - Eletrodo isolado ou não isolado, 2 - Dutos Internos e 3 - Descarga Superficial.



Fonte: Adaptado de Medeiros (2017).

O projeto do sistema de isolamento do transformador deve ser realizado em função da intensidade de campo elétrico que se verifica em cada um dos três caminhos críticos. No caso de eletrodo isolado, além da distribuição da tensão elétrica, é preciso analisar o gradiente pontual na extremidade da bobina. Tal gradiente é alto e bastante relevante, dependendo não somente da tensão aplicada mas também da geometria do eletrodo (ZIOMEK et al., 2011; MEDEIROS, 2017).

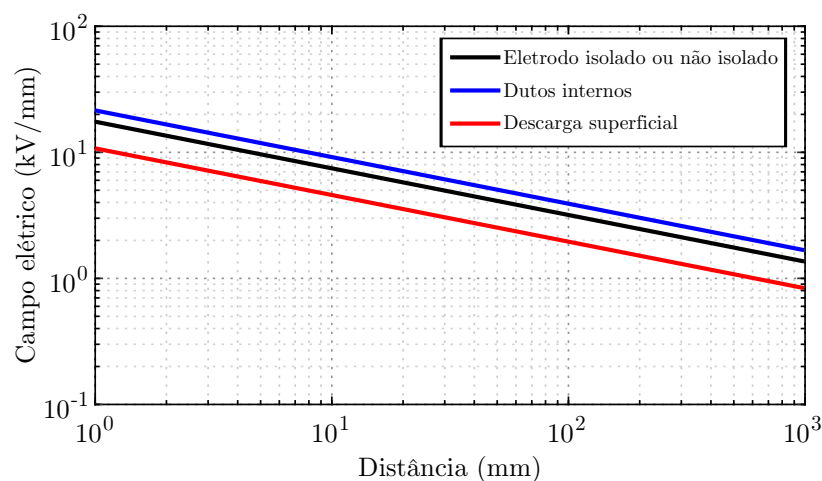
1.2.7 Curvas de Projeto

A partir de diversos testes nas estruturas de isolamento e dados de campo elétrico, para cada um dos três caminhos críticos, foram obtidas curvas de maneira estatística, que representam o limite da suportabilidade dielétrica do óleo. Estas curvas indicam o máximo campo elétrico que o óleo isolante dos transformadores deve suportar sem que haja ruptura da sua isolamento elétrica. Tais curvas, promulgadas por Moser (MOSER, 1979), são denominadas curvas de projeto (do inglês, *design curves*) e baseiam-se na probabilidade de descarga de 1% para aplicação de tensão alternada em frequência comercial pelo tempo de um minuto. Foram desenvolvidas entre os anos de 1950 e 1980, e são utilizadas atualmente por muitos fabricantes em projetos dielétricos (MOSER, 1979; MARCHESAN; HARMEL, 2013).

Tais curvas foram obtidas para o óleo mineral isolante, no entanto, alguns estudos indicam que o comportamento para o óleo vegetal isolante é semelhante (PREVOST, 2006; PREVOST, 2009; RAPP et al., 2009; HAEGELE et al., 2017). Como baseiam-se no ensaio padrão de um minuto, quando se faz uma análise sobre um ensaio diferente do padrão, é preciso realizar as correções das características das curvas resultantes para que possam ser comparadas com as curvas de projeto. Essas correções são feitas por meio do uso do *DIL Factor*, abordado na Subseção 1.2.5.

As curvas de projeto referentes a cada um dos três caminhos críticos são apresentadas na Figura 1.8 e suas respectivas equações dadas por (1.1), (1.2) e (1.3) (ZIOMEK et al., 2011; MEDEIROS, 2017).

Figura 1.8 – Curvas de projeto referentes aos três caminhos críticos.



Fonte: Adaptado de Medeiros (2017).

$$E_I = 17,5(d)^{-0,37} \quad (1.1)$$

$$E_D = 21,5(d)^{-0,37} \quad (1.2)$$

$$E_S = 10,75(d)^{-0,37} \quad (1.3)$$

onde d corresponde à distância percorrida e E_I , E_D e E_S ao campo elétrico para as análises de eletrodo isolado ou não isolado, dutos internos e descarga superficial, respectivamente.

1.2.8 Método dos Elementos Finitos

A grande variabilidade de geometrias de eletrodos e configurações de isolamento de um transformador faz com que o equacionamento analítico do campo elétrico seja extremamente complexo e pouco viável. Por conta disso, faz-se necessário uma ferramenta capaz de realizar o mapeamento de tensão e campo elétrico, de maneira eficaz, para qualquer formato geométrico de eletrodos e de isolamento de transformadores. Para esta finalidade, existem ferramentas numéricas capazes de realizar a simulação e descrição do campo elétrico em geometrias de transformadores através do cálculo da distribuição de tensão, baseado em métodos numéricos e simulações computacionais (IARONKA, 2019).

O Método dos Elementos Finitos – MEF (do inglês, *Finite Element Method* – FEM) consiste em uma poderosa técnica computacional de soluções aproximadas para uma variedade de problemas de engenharia com domínios complexos, descritos através de equações diferenciais parciais com determinadas condições de contorno (MADENCI; GUVEN, 2015). A ideia básica do MEF é encontrar a solução de um problema complicado, substituindo-o por um mais simples. Para isto, discretiza-se o domínio do problema (um meio contínuo) em sub-regiões interconectadas, chamadas de elementos finitos. As sub-regiões compõem-se de geometrias simples com formatos triangulares, quadrilaterais, cúbicos e entre outros, em função do tipo e da dimensão do problema (RAO, 2011).

Os elementos finitos utilizados na discretização do domínio do problema são conectados entre si através de pontos, denominados de nós. O conjunto de nós e elementos finitos denomina-se comumente de malha de elementos finitos e o processo de construção da malha é chamado de geração de malha. Quanto maior o número de nós e elementos, mais preciso é o resultado da solução (FISH; BELYTSCHKO, 2007). A convergência do problema para uma solução exata, um dos fatores mais importantes do MEF, é alcançada a medida que o tamanho dos elementos finitos tende a zero e o número de nós tende ao infinito (SOUZA, 2003).

Dessa maneira, o MEF fornece uma modelagem precisa dos modelos reais, permitindo uma análise detalhada da distribuição do campo elétrico. Além disso, permite a variação dos parâmetros construtivos do modelo e níveis de tensões, possibilitando a

análise de configurações diferentes das montadas na prática, sem a necessidade de custos adicionais de fabricação.

1.2.9 Método do Estresse Elétrico Cumulativo e Margem de Segurança

A partir dos dados da distribuição de tensão e campo elétrico mapeados via MEF, utiliza-se uma metodologia matemática, chamada de método do Estresse Elétrico Cumulativo (do inglês, *Cumulative Stress Method*). O método consiste em calcular o gradiente de tensão elétrica (campo elétrico) acumulado ao longo de um caminho crítico pré-definido, sujeito a descargas elétricas no interior de um transformador, a partir da distribuição de tensão elétrica, à qual ele está sujeito (JUNIOR, 2018; MEDEIROS, 2017; NELSON; SHAW, 2006).

Como resultado, obtém-se um perfil resultante de estresse cumulativo em função da posição no caminho, que pode ser comparado com as curvas de projeto, abordadas na Subseção 1.2.7. Através da comparação entre as curvas, é possível constatar se o projeto dielétrico do transformador encontra-se dentro dos padrões. Se o perfil resultante estiver totalmente abaixo da respectiva curva de projeto, então o projeto é considerado satisfatório. Caso contrário, se alguma parte do perfil resultante estiver acima da curva de projeto, para aquele caminho, o projeto é considerado inseguro. A margem de segurança pode ser avaliada a partir das posições relativas das curvas (NELSON; SHAW, 2006).

1.2.10 Ensaios Dielétricos

O sistema de isolamento elétrica empregando o papel TUK impregnado com óleo mineral tem sido utilizado por transformadores de potência ao longo de vários anos. Testes extensivos foram feitos no isolamento Kraft em óleo mineral. Esses testes, bem como a experiência da indústria, levaram a práticas de projeto de sistemas de isolamento que satisfazem aos critérios de desempenho dielétrico definidos nos padrões de transformadores (PREVOST, 2006; PREVOST, 2009).

Já o uso de éster natural como fluido isolante é relativamente novo. As interações químicas e elétricas entre o fluido vegetal e os isolamentos sólidos ainda são objetos de pesquisa. Para que os fabricantes de transformadores usem as mesmas regras de projeto de óleo mineral para novos transformadores que usam o fluido de éster natural, o desempenho do fluido de éster natural testado deve ter características de suportabilidade dielétrica semelhantes ao do óleo mineral, fornecendo assim as margens de segurança necessárias para o projeto dielétrico comum (RAPP et al., 2009).

Diversos trabalhos contribuíram para o entendimento das propriedades dielétricas

de fluidos de éster e óleo mineral para o projeto de sistemas de isolamento de transformadores de potência de médio e grande porte. Em Prevost (2006), Prevost (2009) e Haegele et al. (2017), formas de onda de impulso atmosférico padronizadas (do inglês, *Standard Lightning Impulse Waveform – SLIW*) e tensão CA foram aplicadas em configurações de eletrodos de teste, a fim de investigar a rigidez dielétrica superficial para cartão prensado imerso em éster natural e óleo mineral. Os primeiros trabalhos verificaram valores de tensões de ruptura muito próximos entre os óleos isolantes, enquanto o último apresentou uma pequena discrepância.

Já no estudo realizado em Tenbohlen et al. (2008), foram obtidas tensões suportáveis significativamente reduzidas para ésteres naturais em comparação com o óleo mineral para uma determinada configuração de eletrodos. Após revisar os procedimentos de ensaio, essa diferença foi atribuída à necessidade de manuseio das amostras durante os testes e à falta de tratamento a vácuo e manutenção do óleo. Isto pode ter levado a um maior aprisionamento de bolhas de ar no fluido de óleo vegetal, devido a sua maior viscosidade e menor tensão superficial, em comparação ao óleo mineral.

Diante disso, revela-se importante a existência de procedimentos adequados de preparação das amostras para a obtenção de resultados de teste confiáveis, principalmente ao comparar fluidos com viscosidades mais altas do que os óleos minerais. Esta hipótese foi confirmada na pesquisa de Rapp et al. (2009), a qual realizou testes de impulso em uma mesma configuração de eletrodos, aderindo aos devidos cuidados de manipulação das amostras durante o processamento e teste. Os resultados obtidos apoiam a afirmação de que a tensão de ruptura do fluido de éster natural é comparável à do óleo mineral.

Além da tensão de ruptura, Liu et al. (2009) também investiga o efeito da polaridade, a velocidade de propagação e as tensões de aceleração em testes de impulso em uma geometria agulha-plano. Diferentemente das outras pesquisas, os resultados mostram que, especialmente na polaridade positiva, foram observados valores de tensão de ruptura significativamente mais baixos em fluidos de éster do que em óleo mineral em longas distâncias de lacuna de eletrodo. Além disso, obtiveram-se tensões de aceleração em fluidos de éster muito mais baixas do que aquelas em óleo mineral, e a velocidade de propagação em fluidos de éster aumentou muito mais abruptamente durante sobretensões do que em óleo mineral.

Além dos testes de isolamento envolvendo o fluido de óleo vegetal, diferentes materiais de isolamento sólido tem sido testados, a fim de se obter as características de suas propriedades dielétricas. Em Prevost e Franchek (1989), a rigidez dielétrica entre espiras e entre discos de um enrolamento de um sistema de isolamento de aramida-óleo em comparação com o kraft-óleo foi investigado. Os resultados mostram que, entre espiras, o papel de aramida é mais forte do que o papel kraft, do ponto de vista dielétrico, para tensões de impulso. Para tensão CA, não verificou-se diferenças significativas. Já entre discos, constatou-se pouca ou nenhuma diferença entre os dois papéis para todas as tensões de

testes realizadas.

Nas pesquisas apresentadas anteriormente, é possível perceber que uma série de testes sob ondas de impulso padronizadas são realizados para avaliar a suportabilidade dos materiais isolantes utilizados no transformador. No entanto, os surtos de descargas atmosféricas aos quais transformadores são expostos em campo são variados, com tempo de frente variável e sobrepostos por oscilações de alta amplitude. Nesse sentido, Wang et al. (2015b) investiga a influência do tempo frontal e da frequência de oscilação das formas de onda de impulso não padronizadas (do inglês, *Non-standard Lightning Impulse Waveform* – N-SLIW) nas características de ruptura, em comparação com o SLIW.

Com base na revisão apresentada a respeito dos ensaios dielétricos, os materiais isolantes líquidos e sólidos utilizados em transformadores de potência precisam ser investigados detalhadamente em termos de suas propriedades físicas, químicas e elétricas, bem como o impacto dessas propriedades no projeto e operação desses equipamentos. A tendência de aplicação de novos materiais isolantes exige uma compreensão profunda do desempenho dielétrico de cada material envolvido, para viabilizar a sua aplicação no projeto de sistemas de isolamento de transformadores de potência.

1.3 OBJETIVOS DO TRABALHO

Esta dissertação tem como objetivo propor uma metodologia de ensaios dielétricos para sistemas de isolamento sólido-líquido. A proposta pode ser utilizada para analisar a suportabilidade dielétrica de diferentes materiais isolantes sólidos e líquidos, tanto para materiais já bastante difundidos quanto para novas soluções. O método deve permitir a definição das curvas de projeto e das margens de segurança do projeto dielétrico, além de fornecer resultados e conclusões que viabilizem o projeto e fabricação de transformadores de potência.

De forma específica, os objetivos dessa dissertação são:

- Realizar o projeto e a fabricação de duas configurações de ensaio, denominadas *Creep Breakdown* e *Turn-to-turn*;
- Realizar a modelagem e simulação computacional das configurações de ensaio;
- Descrever e aplicar uma metodologia de análise estatística dos dados de tensão de ruptura obtidos em testes dielétricos, através da distribuição de Weibull;
- Propor uma metodologia para definição do número mínimo de amostras a serem rompidas nos ensaios dielétricos;
- Apresentar os procedimentos de preparação das amostras de papel e óleo isolante, bem como de aplicação de tensão suportável de impulso atmosférico padronizado e

de tensão alternada em frequência comercial;

- Realizar a montagem da configuração de ensaio para o modelo *Creep Breakdown* e *Turn-to-turn*;
- Propor um procedimento pré-testes para a realização dos ensaios.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O presente trabalho está organizado em cinco capítulos. O Capítulo 1 apresentou a motivação para a metodologia de ensaios dielétricos proposta, apresentando uma revisão bibliográfica a respeito do tema e os objetivos do trabalho.

No Capítulo 2 apresenta-se o projeto e fabricação de toda a estrutura necessária para a realização de testes dielétricos nas configurações de eletrodos *Creep Breakdown* e *Turn-to-turn*. Além disso, as modelagens e simulações computacionais de ambas as configurações são realizadas, a fim de validar os modelos de ensaio.

O Capítulo 3 trata a respeito da distribuição de Weibull. São descritos uma técnica computacional para a estimação dos parâmetros, a determinação dos intervalos de confiança, bem como os principais conceitos e funções referentes à distribuição. Também é apresentado um estudo de caso, exemplificando a aplicação da técnica estatística, com o propósito de realizar a análise de dados de tensão de ruptura obtidos em testes dielétricos. Além disso, uma metodologia para definição do número mínimo de amostras a serem rompidas é proposta.

O Capítulo 4 apresenta os procedimentos de preparação das amostras de papel e óleo isolante, bem como de aplicação de tensão suportável de impulso atmosférico padronizado e de tensão alternada em frequência comercial. Além disso, a montagem das configurações de ensaio são efetuadas e um procedimento pré-testes é proposto. Alguns resultados preliminares também são apresentados.

O Capítulo 5 contém a conclusão do trabalho, possíveis trabalhos futuros e os trabalhos publicados referentes a esta dissertação. Por fim, no Apêndice A são apresentados, com mais detalhes, os equipamentos e elementos que compõem as configurações de ensaio para o modelo *Creep Breakdown* e *Turn-to-turn*.

2 ELEMENTOS DE ENSAIO E SIMULAÇÕES

2.1 INTRODUÇÃO

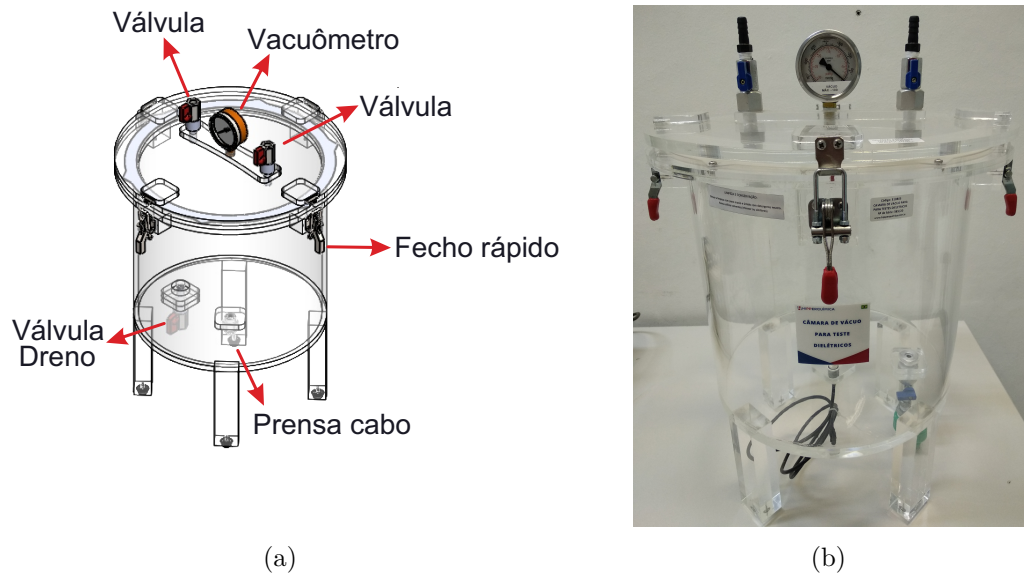
A tensão de ruptura dielétrica pode ser obtida através de testes realizados em arranjos de eletrodos com geometrias que se aproximam dos reais arranjos de isolamento do transformador. Neste capítulo, será apresentado o projeto e a fabricação de toda a estrutura necessária para a realização de testes dielétricos em duas configurações de eletrodos. A primeira, denominada *Creep Breakdown* (CB), é capaz de representar as descargas superficiais que podem ocorrer nos cilindros isolantes, nas saídas de isolação ou nos suportes presentes no sistema de isolamento de um transformador. Já a segunda, chamada *Turn-to-turn* (T2T), representa o estresse elétrico entre espiras adjacentes.

A partir da construção de tais estruturas, torna-se possível a realização de ensaios dielétricos comparativos entre diferentes materiais isolantes sólidos e líquidos, sob aplicação de tensão alternada em frequência comercial e tensão suportável de impulso atmosférico padronizado. Neste trabalho, adotou-se como isolamento sólido o Nomex® 994 PSB e o Pressboard celulose T4, para o modelo CB, e o papel híbrido isolante Nomex® 910 e o Papel Kraft Termoestabilizado, para o modelo T2T. Como isolamento líquido, adotou-se o óleo vegetal Biovolt. Além disso, simulações computacionais serão realizadas para validar as configurações de ensaio.

2.2 CÂMARA DE VÁCUO

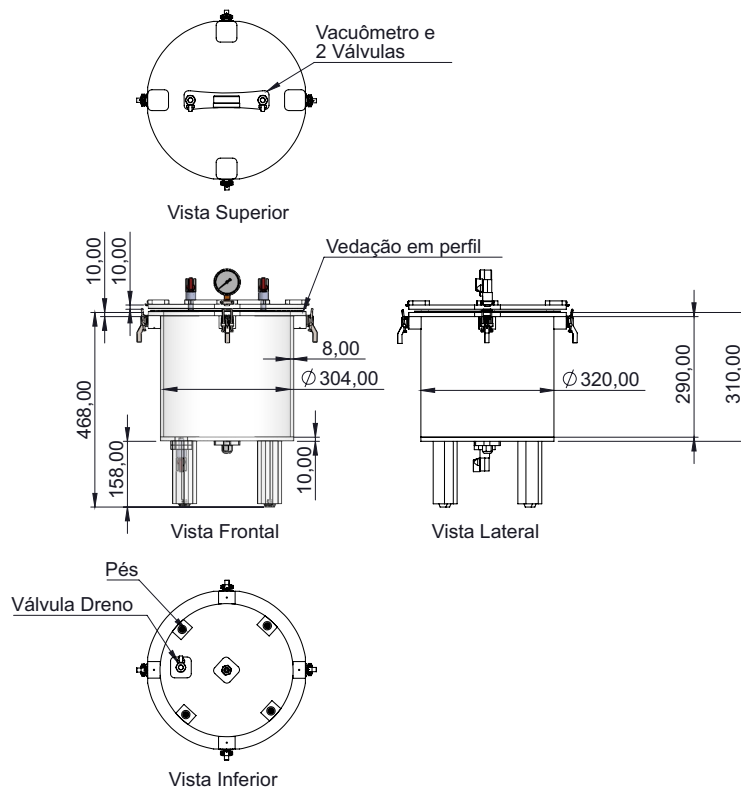
Os modelos de ensaio precisam ser imersos em óleo dentro de um local adequado para a realização dos testes. Para isso, câmaras de vácuo cilíndricas foram projetadas e constituídas de acrílico com o intuito de facilitar a visualização dos testes. O projeto final foi desenvolvido pela Hipperquímica, empresa que realizou o projeto personalizado das câmaras, de maneira que atendesse às necessidades dos ensaios. As câmaras possuem uma tampa removível na parte superior, com duas válvulas e um vacuômetro, além de 4 fechos rápidos para abertura e fechamento. Na parte inferior, apresentam uma válvula dreno e um prensa cabo de 6 mm conectado a um cabo de 1,5 m. As câmaras também dispõem de quatro pés para sustentação. Elas foram projetadas de forma a suportar um vácuo máximo de 100 mmHg. O projeto final da câmara e o produto final fabricado podem ser visualizados na Figura 2.1. Seus respectivos componentes e dimensões são apresentados na Figura 2.2. Foram fabricadas quatro câmaras de vácuo a fim de agilizar a realização dos testes.

Figura 2.1 – Câmara de vácuo cilíndrica: (a) Vista isométrica. (b) Fabricada.



Fonte: Autor.

Figura 2.2 – Projeto final da câmara de vácuo cilíndrica.



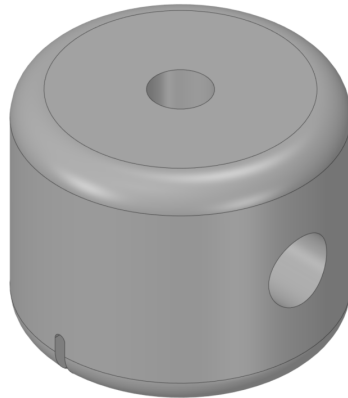
Fonte: Autor.

2.3 ESTRUTURA PARA O ENSAIO NO MODELO *CREEP BREAKDOWN*

2.3.1 Eletrodos

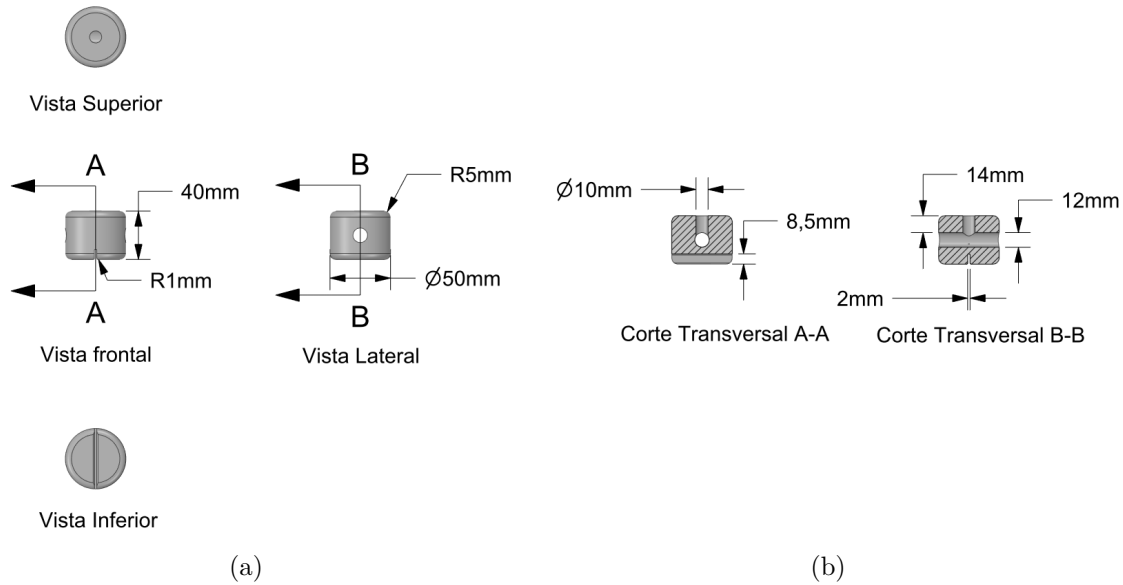
A configuração de ensaio CB, baseada no modelo apresentado em Haegele et al. (2017), consiste em dois eletrodos de aço, com 50 mm de diâmetro e 40 mm de altura, utilizados como eletrodo de alta tensão e eletrodo de aterramento. Os eletrodos apresentam uma pequena abertura, que permite a inserção da amostra de isolante sólido de 2 mm de espessura. Todas as arestas dos eletrodos foram arredondadas com um raio de 5 mm para as arestas externas e 1 mm para as arestas internas. Dessa maneira, busca-se evitar a ocorrência de descargas nas extremidades. Adotou-se um espaçamento de 35 mm entre eletrodos, permitindo comparação de resultados com pesquisas reportadas na literatura. A Figura 2.3 apresenta a vista isométrica do eletrodo projetado. As demais vistas e cortes, bem como suas respectivas dimensões, são apresentadas na Figura 2.4.

Figura 2.3 – Vista isométrica do eletrodo projetado para o modelo CB.



Fonte: Autor.

Figura 2.4 – Eletrodo projetado: (a) Vistas. (b) Cortes.



Fonte: Autor.

O furo superior permite a inserção de um parafuso do tipo M10 por 14 mm. Internamente, existe um furo de 12 mm de diâmetro para passagem da haste de polietileno, que irá fornecer apoio ao eletrodo. A abertura para o isolante sólido possui 8,5 mm de profundidade no eletrodo. A fabricação do eletrodo descrito foi realizada pela empresa Metal RI, e o resultado é apresentado na Figura 2.5. Foram fabricados 71 pares de eletrodos, visando a substituição após cada teste. Além disso, os parafusos contarão com blindagens anticorona, fornecidas pela empresa Euromar, conforme mostra-se na Figura 2.6.

Figura 2.5 – Eletrodo fabricado: (a) Sem parafuso. (b) Com parafuso.



Fonte: Autor.

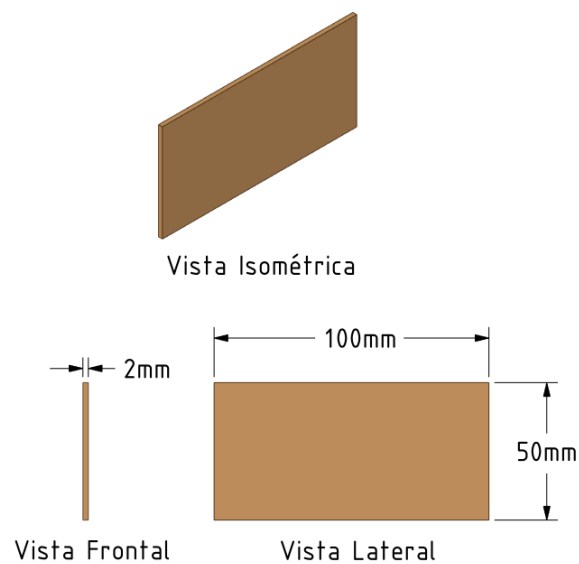
Figura 2.6 – Blindagem anticorona: (a) Aberta. (b) Fechada.



Fonte: Autor.

As amostras de isolante sólido Nomex[®] 994 PSB e *Pressboard* de celulose T4 foram adquiridas através de processo de doação da empresa RVB Embalagens. Foram fornecidas 50 amostras de cada material. Suas dimensões são apresentadas na Figura 2.7.

Figura 2.7 – Dimensões da amostra de isolante sólido.

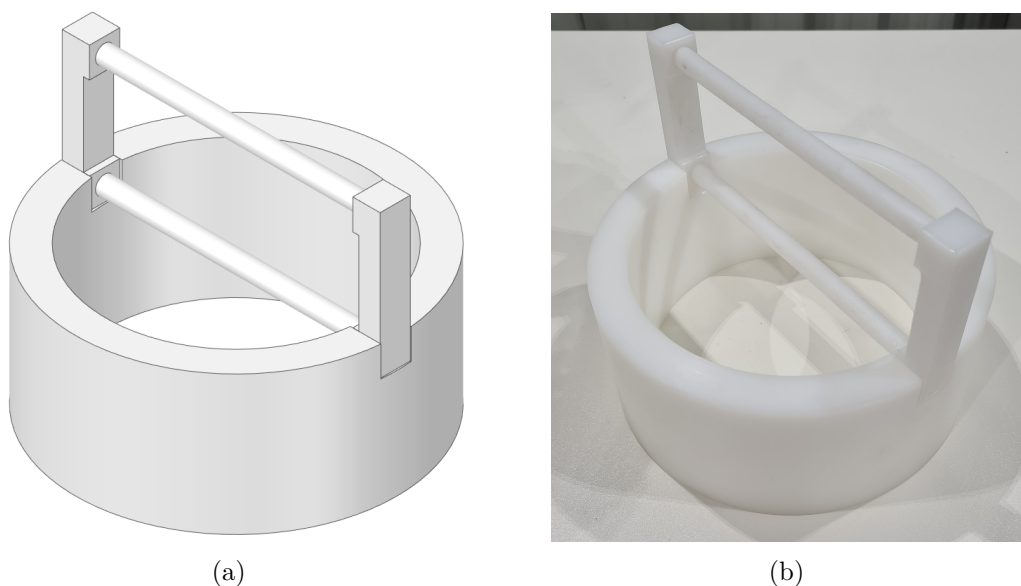


Fonte: Autor.

2.3.2 Suporte em Polietileno

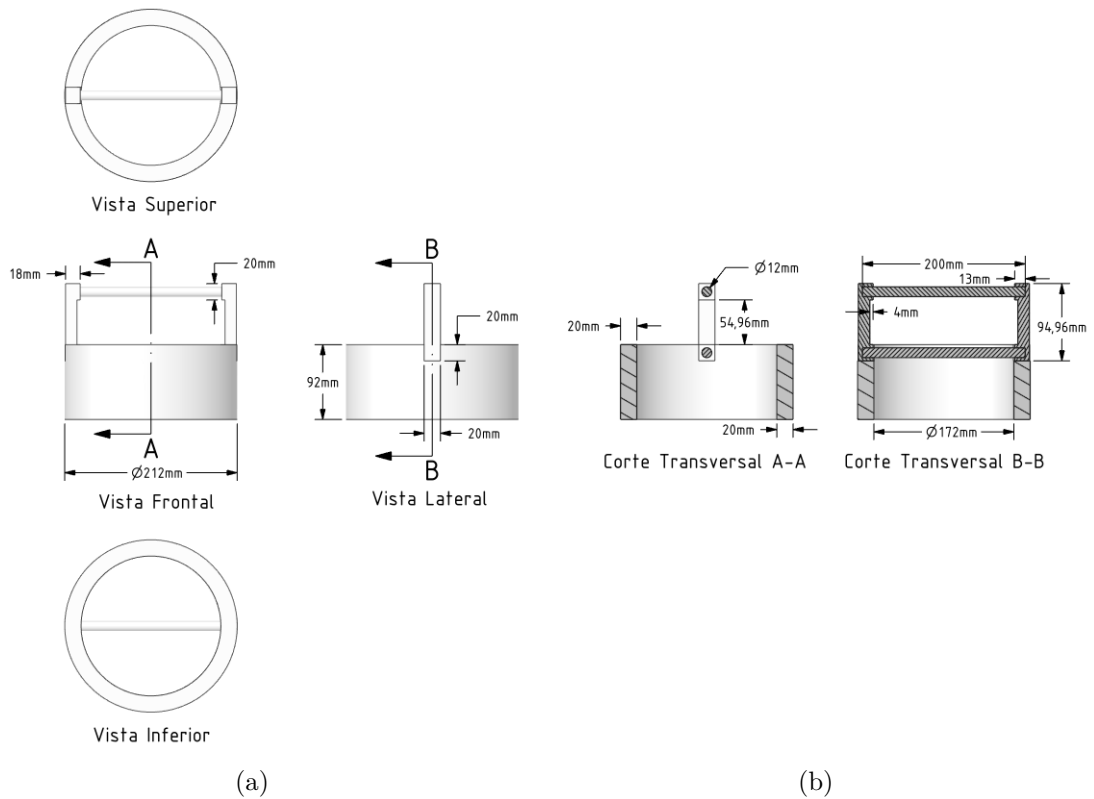
Para fornecer suporte aos eletrodos, projetou-se uma estrutura de polietileno de alta densidade, fabricada pela empresa Plastireal. O projeto da estrutura e o resultado final podem ser visualizados na Figura 2.8. O material foi escolhido de maneira que oferecesse a sustentação necessária sem interferir no ensaio dielétrico. A estrutura é composta por uma base cilíndrica oca com espessura de 20 mm, diâmetro externo de 212 mm, e diâmetro interno de 172 mm. O cilindro também apresenta dois encaixes para os braços de fixação da haste do eletrodo. Os braços de fixação, por sua vez, possuem uma altura total de 94,96 mm, uma altura entre os encaixes das hastes de 54,96 mm, uma espessura do braço de 20 mm, um diâmetro de encaixe das hastes de 12 mm e uma altura do encaixe de 20 mm. Além disso, a estrutura dispõe de uma haste de sustentação para o eletrodo, formada por um bastão cilíndrico de 200 mm de comprimento e 12 mm de diâmetro. As dimensões e detalhes da estrutura de polietileno podem ser visualizadas na Figura 2.9. O projeto e a montagem contendo todos os elementos que compõem o conjunto para o ensaio CB é apresentado na Figura 2.10.

Figura 2.8 – Estrutura de polietileno de alta densidade: (a) Projetada. (b) Fabricada.



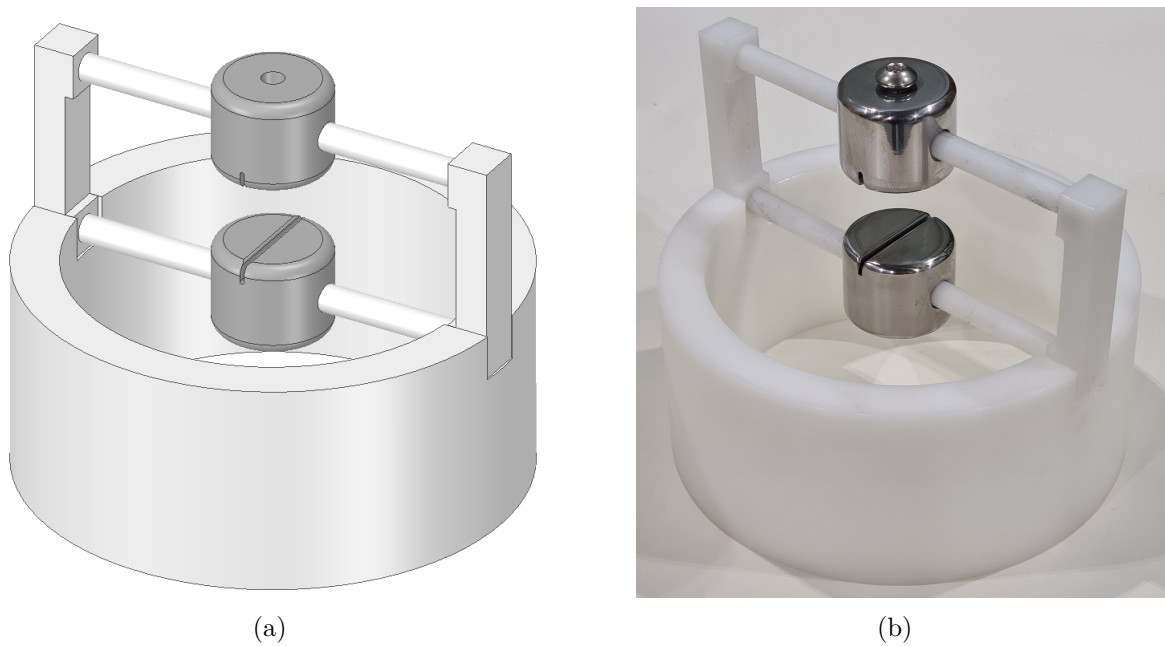
Fonte: Autor.

Figura 2.9 – Estrutura de polietileno: (a) Vistas. (b) Cortes.



Fonte: Autor.

Figura 2.10 – Conjunto para ensaio do modelo CB: (a) Projetado. (b) Fabricado.



Fonte: Autor.

2.4 ESTRUTURA PARA O ENSAIO NO MODELO *TURN-TO-TURN*

2.4.1 Eletrodos

A configuração de ensaio T2T, baseada no modelo apresentado em Wang et al. (2015a), consiste em camadas de isolante sólido sobrepostas em condutores de cobre com uma dimensão de 8,9 x 2 mm e um raio de 0,65 mm, conforme pode ser observado na Figura 2.11. Esses condutores são fixados aos pares, possuindo uma superfície de contato de 120 mm, com uma derivação de 45° ao fim dessa superfície e por mais 65 mm de cada lado, conforme ilustra a Figura 2.12.

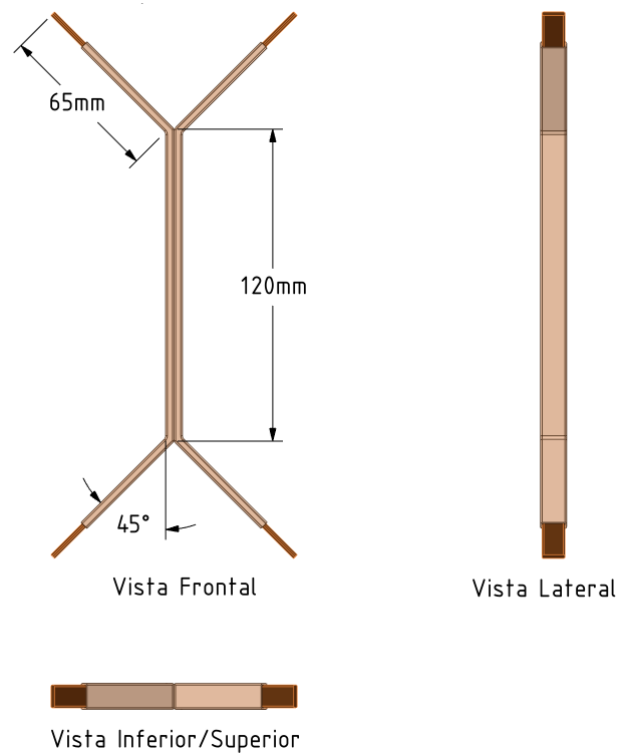
A quantidade e a espessura das camadas baseou-se no estudo realizado em Kang et al. (2014). Para que houvesse a equivalência entre os dois tipos de materiais de isolamento sólido adotado, foi realizado um estudo pela PPE fios, a qual definiu 7 camadas de 0,085 mm de papel TUK e 7 camadas de 0,082 mm de Nomex® 910, conforme ilustra a Figura 2.13. As amostras foram adquiridas através de processo de doação da empresa PPE Fios. Foram fornecidas 40 amostras de cada material. A vista isométrica do eletrodo projetado e os eletrodos fabricados, revestidos com os dois tipos de papel, podem ser visualizados na Figura 2.14.

Figura 2.11 – Dimensões do condutor de cobre.



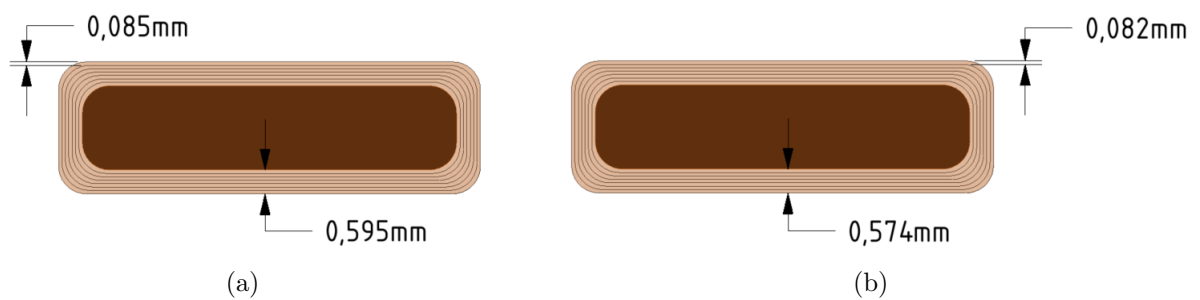
Fonte: Autor.

Figura 2.12 – Dimensões do eletrodo projetado para o modelo T2T.



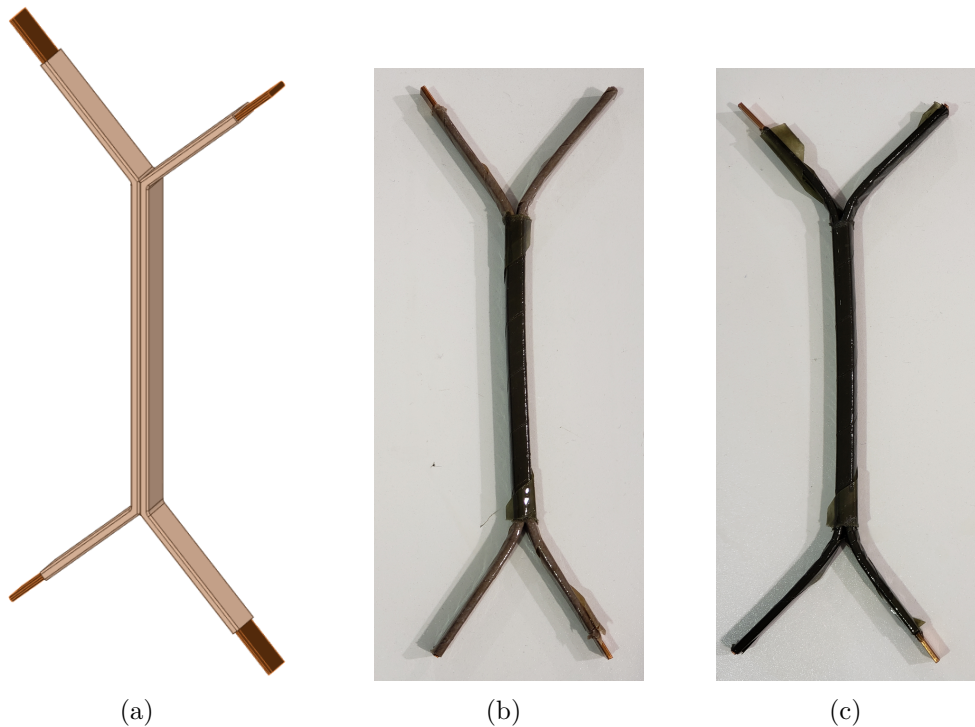
Fonte: Autor.

Figura 2.13 – Camadas de papel: (a) Kraft termoestabilizado. (b) Nomex® 910.



Fonte: Autor.

Figura 2.14 – Eletrodo para o modelo T2T: (a) Vista isométrica projetada. (b) Fabricado revestido de Nomex® 910. (c) Fabricado revestido de TUK.



Fonte: Autor.

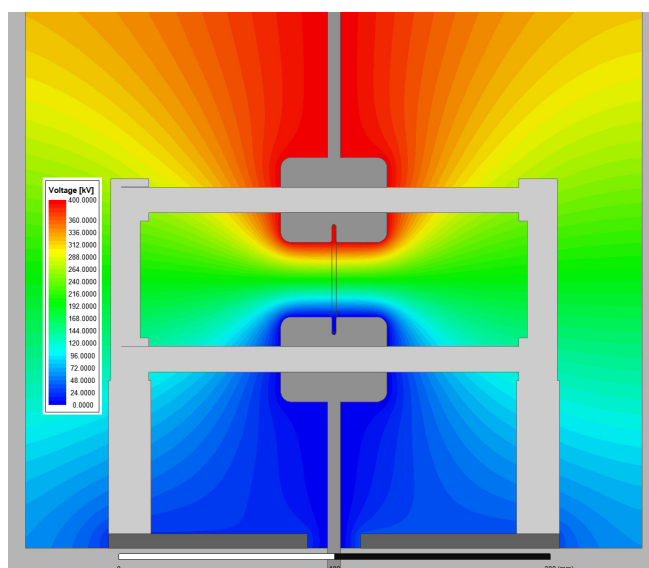
2.5 SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

As configurações de eletrodos foram modeladas e simuladas empregando engenharia auxiliada por computador (do inglês, *Computer Aided Engineering CAE*), baseada na análise de elementos finitos (do inglês, *Finite Element Analysis – FEA*), no *software* Ansys Electronics®, o qual emprega o MEF. Esse estudo permite avaliar e definir as regiões de provável ruptura dielétrica, validando as configurações propostas para uso em testes dielétricos experimentais. As simulações são realizadas em um corte 2D da geometria em que é feita a análise eletrostática, o que representa os mesmos resultados da configuração 3D original (MEDEIROS, 2017). Para ambas simulações, consideraram-se os modelos imersos em óleo vegetal isolante Biovolt.

2.5.1 Modelo *Creep Breakdown*

Para essa configuração, uma tensão impulsiva de $1,2/50 \mu\text{s}$ foi aplicada no eletrodo de alta tensão, de acordo com a norma ASTM D3426 (ASTM, 2019). A tensão de ruptura esperada é de aproximadamente 336 kV. Esse valor foi calculado com base nos resultados de ensaio de tensão alternada realizado em Haegele et al. (2017), transformando o valor da tensão de ruptura de 1% em níveis de tensão de impulso. Para fazer isso, multiplica-se o valor de tensão de ruptura em frequência comercial, neste caso 140 kV, pelo fator DIL de impulso atmosférico, 2,4. As permissividades relativas utilizadas nas simulações foram de 3,3 para o isolamento sólido e 3,2 para o isolamento líquido. Os demais materiais que compõem a estrutura já constam na biblioteca do *software*. Os níveis de tensão foram variados de 50 a 500 kV, com passo de 50 kV, totalizando 10 diferentes níveis de tensão. Deste modo, para cada nível de tensão, obteve-se a distribuição das linhas equipotenciais e do campo elétrico ao longo da estrutura analisada. As Figuras 2.15 e 2.16 apresentam as distribuições obtidas para um nível de tensão de 400 kV. A distribuição do campo elétrico pode ser melhor visualizada na Figura 2.17.

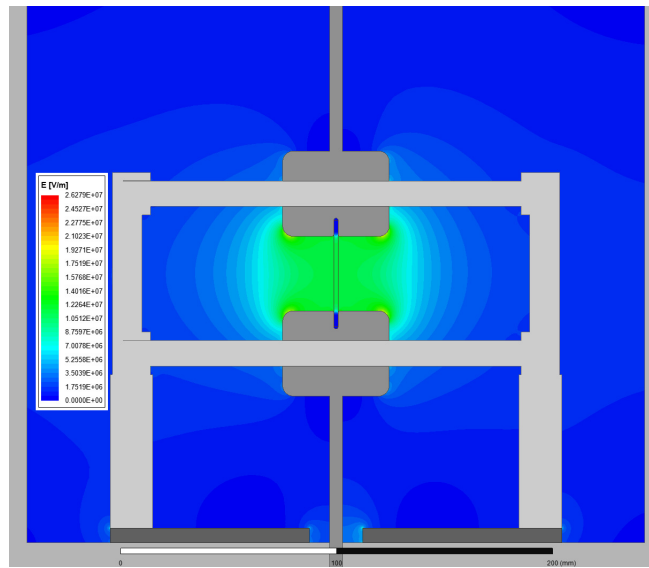
Figura 2.15 – Distribuição das linhas equipotenciais para o modelo CB.



Fonte: Autor.

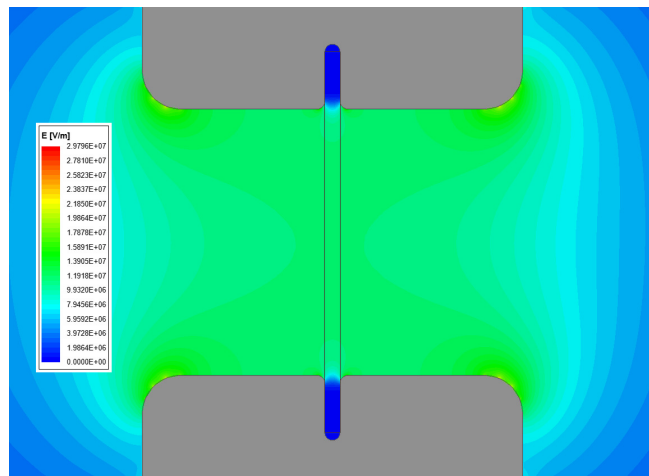
Ao se analisar a Figura 2.15, observa-se a distribuição das linhas equipotenciais partindo do eletrodo superior (eletrodo de alta tensão) em direção ao eletrodo inferior (eletrodo de aterramento). Já ao se observar a Figura 2.16, percebe-se os locais onde há a maior concentração de campo elétrico como sendo nas arestas internas e externas dos eletrodos. Para os demais níveis de tensão simulados, o comportamento das distribuições de tensão e campo elétrico é análogo, apresentando apenas magnitudes diferentes.

Figura 2.16 – Distribuição do campo elétrico para o modelo CB.



Fonte: Autor.

Figura 2.17 – Distribuição do campo elétrico ampliada para o modelo CB.

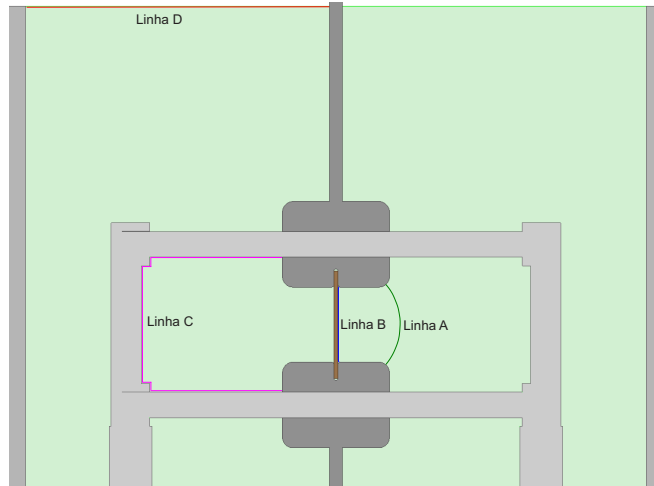


Fonte: Autor.

A partir dos resultados obtidos nas simulações, é possível analisar os caminhos críticos da configuração e obter os perfis resultantes referentes ao método do estresse elétrico cumulativo, abordado na Subseção 1.2.9. Para isso, são traçadas linhas nos trechos em que se deseja explorar o comportamento dielétrico, conforme pode ser visto na Figura 2.18. A Linha A, refere-se a um caminho crítico de eletrodo não isolado, no caminho de óleo entre as bordas externas dos eletrodos. A Linha B, refere-se a um caminho de descarga superficial, que se inicia nas bordas internas dos eletrodos e percorre a superfície do isolamento sólido. A Linha C também refere-se a um caminho de descarga superficial, ao longo da superfície da estrutura de polietileno. Por fim, a Linha D refere-se a um

caminho de eletrodo não isolado, no topo da câmara de vácuo, entre o condutor de AT até a parede da câmara de vácuo.

Figura 2.18 – Caminhos críticos traçados para o modelo CB.

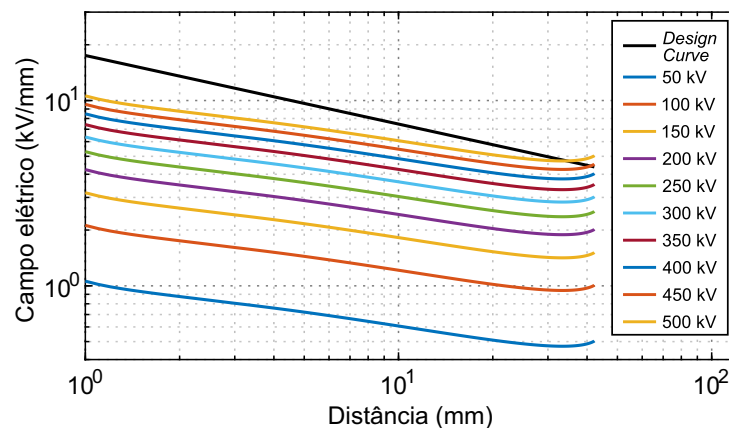


Fonte: Autor.

Com as linhas traçadas para os quatro tipos de análise, obtêm-se os dados de tensão ao longo de todo o trecho analisado. Em seguida, exportam-se os dados de cada simulação para que sejam avaliados. Por fim, utiliza-se o *software* MATLAB® para realizar a aplicação do método do Estresse Elétrico Cumulativo.

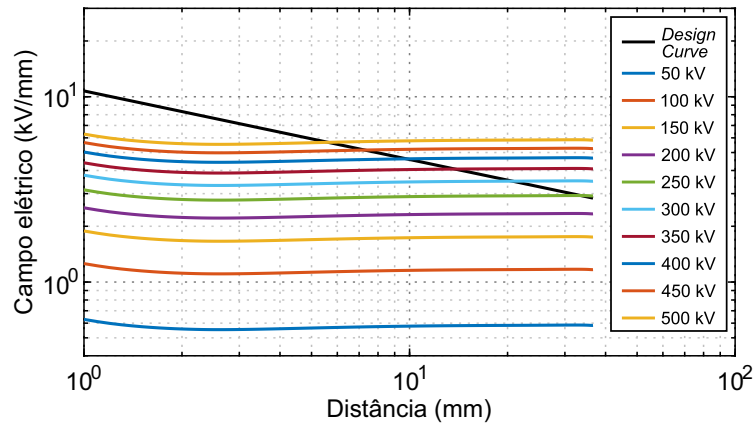
Após aplicado o método, obtêm-se os gráficos contendo a curva de projeto, referente ao tipo de análise realizada, sendo comparada com as curvas geradas pelo método do Estresse Elétrico Cumulativo para os diferentes níveis de tensão, conforme mostram as Figuras 2.19, 2.20, 2.21 e 2.22.

Figura 2.19 – Resultado para eletrodo não isolado no caminho A.



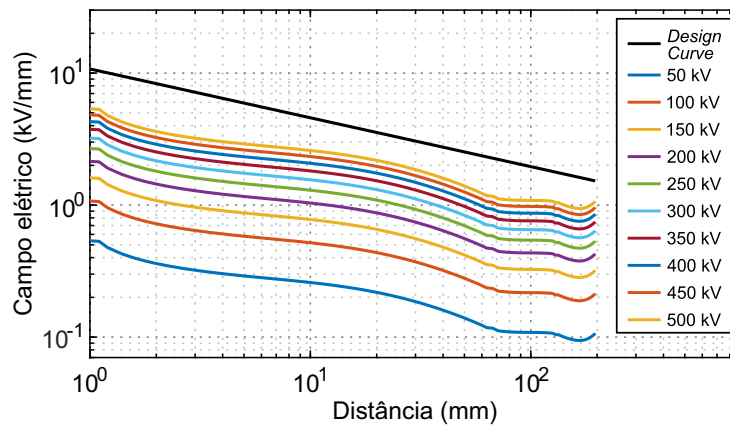
Fonte: Autor.

Figura 2.20 – Resultado para descarga superficial no caminho B



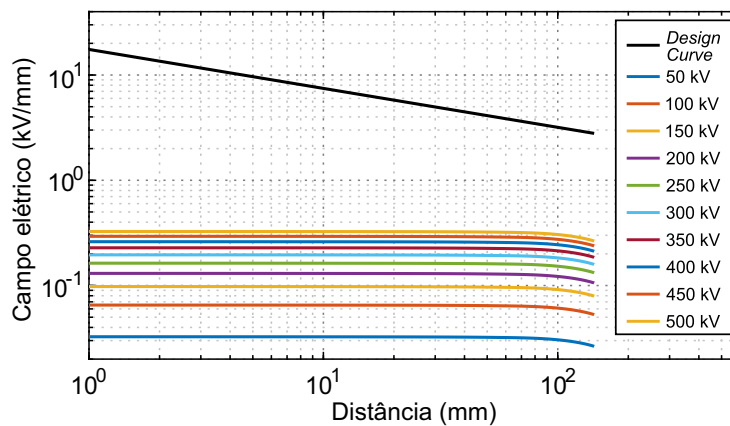
Fonte: Autor.

Figura 2.21 – Resultado para descarga superficial no caminho C.



Fonte: Autor.

Figura 2.22 – Resultado para eletrodo não isolado no caminho D.



Fonte: Autor.

Ao analisar a Figura 2.19, referente à linha A, observa-se que a probabilidade de 1% de ocorrer a ruptura dielétrica nessa região acontece para um nível de tensão de 450 kV, pois a curva gerada pelo método do estresse elétrico cumulativo correspondente a esse nível de tensão foi a primeira curva a interceptar a curva de projeto. De forma análoga, na Figura 2.20, a qual se refere a linha B, a probabilidade de 1% de ruptura ocorre para um nível de tensão de 250 kV.

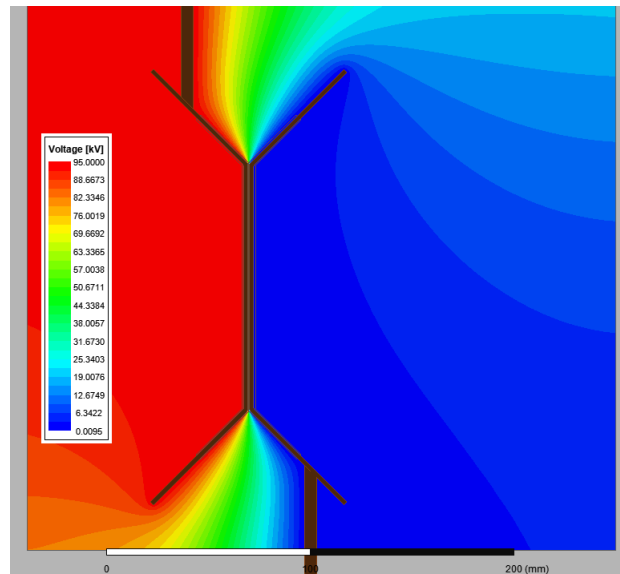
Isso significa que para um nível de tensão de 250 kV existe 1% de chance de ocorrer a ruptura dielétrica no caminho representado pela linha B, enquanto para o caminho representado pela linha A, o mesmo só acontecerá para um nível de tensão de 450 kV. Portanto, garante-se que para um nível de tensão de até 450 kV, o caminho de descarga superficial representado pela linha B será o local crítico, ou seja, a ruptura dielétrica poderá ocorrer na superfície do isolamento sólido e não no caminho de óleo entre os eletrodos.

Já ao observar as Figuras 2.21 e 2.22, percebe-se que para todos os níveis de tensão aplicados, as curvas obtidas a partir do método do estresse cumulativo ficaram abaixo da sua respectiva curva de projeto. Dessa forma, garante-se que não há probabilidade de descargas elétricas nas regiões críticas representadas pelas linhas C e D para os níveis de tensão aplicados.

2.5.2 Modelo *Turn-to-turn*

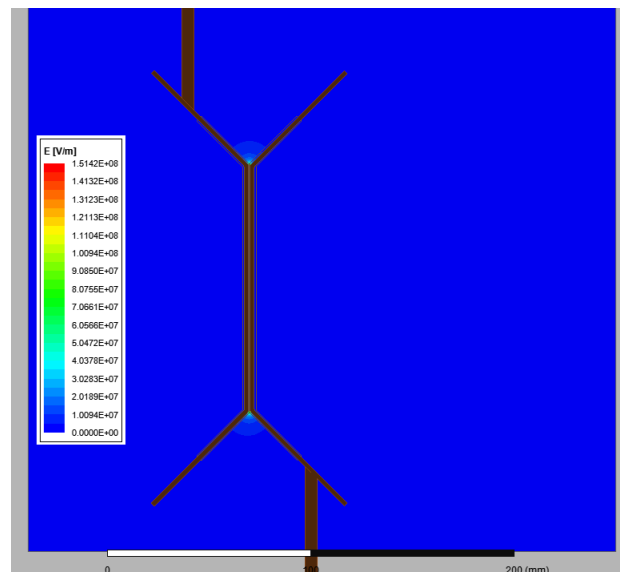
Para esse modelo, uma tensão alternada de 60 Hz foi aplicada no eletrodo de alta tensão, de acordo com a norma ASTM D149 (ASTM, 2020). A tensão de ruptura esperada é de aproximadamente 80 kV para o Nomex[®] 910 e 60 kV para o TUK. Esses valores foram calculados com base nos resultados de ensaio de tensão alternada realizados em Kang et al. (2014). As permissividades relativas utilizadas nas simulações foram de 4,2 para o isolamento sólido e 3,2 para o isolamento líquido. Os demais materiais que compõem a estrutura já constam na biblioteca do *software*. Dessa maneira, a distribuição das linhas equipotenciais e do campo elétrico ao longo da estrutura analisada para um nível de tensão de 95 kV foi obtida, conforme pode ser visto nas Figuras 2.23 e 2.24. Ao se analisar a Figura 2.23, observa-se a distribuição das linhas equipotenciais partindo do eletrodo da esquerda (eletrodo de alta tensão) em direção ao eletrodo da direita (eletrodo de aterramento). Já na Figura 2.24, percebe-se que o campo elétrico se concentra na superfície de contato entre os eletrodos e na derivação de 45°. Isto pode ser visto melhor na Figura 2.25.

Figura 2.23 – Distribuição das linhas equipotenciais para o modelo T2T.



Fonte: Autor.

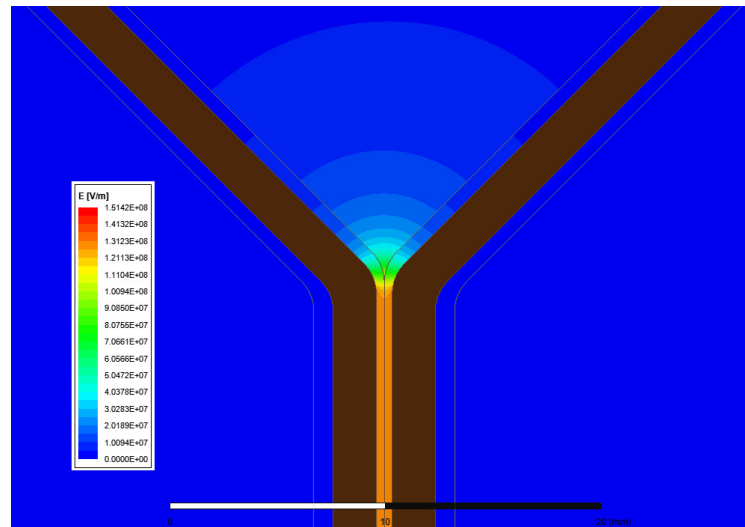
Figura 2.24 – Distribuição do campo elétrico para o modelo T2T.



Fonte: Autor.

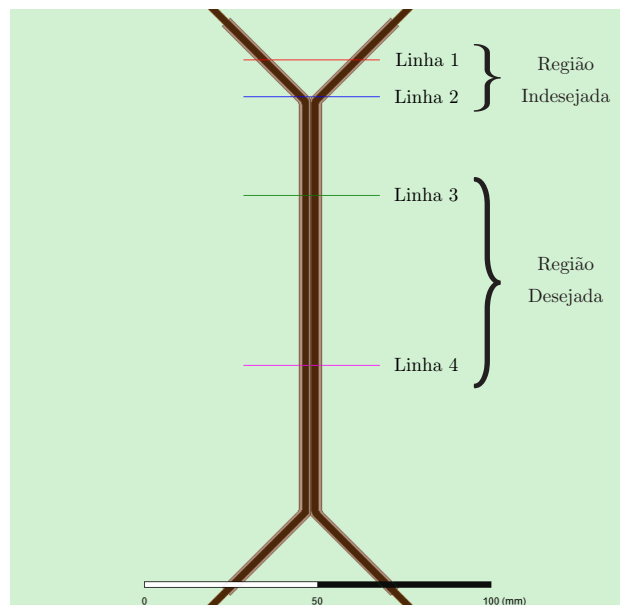
Após o final da simulação, são traçadas linhas nos trechos em que se deseja explorar o comportamento dielétrico. Foram traçadas quatro linhas horizontais ao longo do corpo de prova, conforme pode ser visto na Figura 2.26. A Linha 1 e a Linha 2 foram traçadas na derivação de 45° ao fim da superfície de contato dos eletrodos, regiões onde a ocorrência de uma descarga elétrica é indesejável. Já a Linha 3 e a Linha 4 foram traçadas ao longo da superfície de contato entre os eletrodos, local onde se espera que a ruptura dielétrica ocorra.

Figura 2.25 – Distribuição do campo elétrico ampliada para o modelo T2T.



Fonte: Autor.

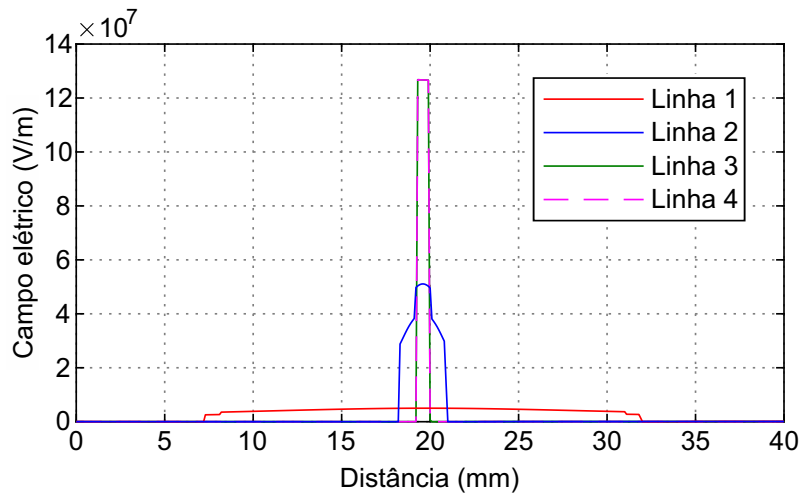
Figura 2.26 – Trechos analisados para o modelo T2T.



Fonte: Autor.

Com as linhas traçadas, obtém-se o gráfico de campo elétrico ao longo dos trechos analisados, mostrado na Figura 2.27. Ao se analisar a Figura é possível perceber que o campo elétrico obtido para as Linhas 3 e 4 (regiões desejadas) é superior ao obtido para as Linhas 1 e 2 (regiões indesejadas). Por essa razão, espera-se que, para esta configuração de eletrodos, a ruptura dielétrica ocorra ao longo da superfície de contato entre os eletrodos, que é a região de interesse.

Figura 2.27 – Resultado de campo elétrico ao longo dos trechos analisados.



Fonte: Autor.

2.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo, o projeto das estruturas de ensaio no modelo CB, representando as descargas superficiais, e T2T, representando o estresse elétrico entre espiras, bem como o produto final fabricado, foram apresentados. Cada detalhe presente nos elementos de ensaio, como material, dimensão, formato e técnica de fabricação, por exemplo, foi planejado cuidadosamente a fim de garantir a qualidade e a confiabilidade dos testes dielétricos. Além disso, a modelagem e a simulação computacional de ambas as configurações foram realizadas. Dessa maneira, foi possível validar os modelos, garantindo que a ruptura dielétrica irá ocorrer na região de interesse: a superfície do papel, para o modelo CB, e ao longo da superfície de contato entre os eletrodos, para o modelo T2T.

3 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS EXPERIMENTAIS

3.1 INTRODUÇÃO

A suportabilidade dos sistemas de isolamento e materiais sujeitos a estresse elétrico pode ser analisada através de testes de estresse progressivo, nos quais as tensões de ruptura podem ser medidas. Nestes ensaios, várias amostras idênticas são submetidas a procedimentos de teste iguais, com o objetivo de causar a ruptura dielétrica. A tensão aplicada pode ser aumentada continuamente com o tempo, em pequenos degraus, ou por meio de testes de impulso (IEEE, 2007). Os dados resultantes destes ensaios, mesmo sob rigoroso controle sobre as variáveis que os afetam, apresentam dispersão. Sendo assim, será verificado que, para cada amostra, um resultado diferente será obtido, o que implica na necessidade de tratamento estatístico adequado dos dados, tanto para assegurar a qualidade do dielétrico quanto para garantir a confiabilidade da isolamento (UEKI; ZANIN, 1997).

Devido a essa natureza estatística das tensões de ruptura dielétrica, o projeto do sistema de isolamento de transformadores é definido em função de uma tensão suportável de isolamento, com um fator de segurança adicional. Essa tensão suportável não é determinada como um valor fixo, mas como uma variável estatística correspondente a uma baixa probabilidade de ruptura. Para que a tensão de ruptura mais baixa provável seja estimada, técnicas estatísticas podem ser utilizadas, a fim de analisar a dispersão dos dados de tensão de ruptura (MARTIN; WANG, 2008; MORCOS; CHERUKUPALLI, 1989; VECCIO, 2001).

Existem diversos modelos estatísticos que podem ser utilizados para se determinar o comportamento de um fenômeno sob investigação. Esses modelos podem ser classificados quanto à natureza da variável em: distribuições discretas, onde a variável pode assumir apenas valores discretos, para os quais a frequência relativa é definida, e distribuições contínuas, onde a variável pode assumir quaisquer valores, cuja frequência relativa é definida por uma função de densidade. As distribuições uniformes, binomiais e de Poisson são exemplos típicos de distribuições discretas. Já no caso de distribuições contínuas, Maxwell, normal, valores extremos e Weibull são as mais comuns (RIZK; TRINH, 2014).

A distribuição de Weibull é uma ferramenta muito utilizada na engenharia de alta tensão, permitindo avaliar os resultados de estudos experimentais onde o tempo de ruptura, tensão inicial ou tensão de ruptura são estimados, bem como para analisar os dados reais de falha de equipamentos de alta tensão (ROZGA, 2016). Essa distribuição é capaz de melhor representar os dados de rigidez dielétrica, pois tende a ajustar-se melhor aos dados do que as outras distribuições (ROZGA; STANEK, 2016; PREVOST, 2009;

RAPP et al., 2009; NELSON, 1989; SHAW; NELSON; PREVOST, 2005).

Neste capítulo, os principais conceitos e funções referentes à distribuição de Weibull de dois parâmetros serão descritos. Além disso, será apresentada uma técnica computacional para a estimação dos parâmetros de Weibull, bem como a determinação de seus intervalos de confiança. Também será realizado um estudo de caso, para exemplificar como deve ser realizada a análise estatística dos dados de tensão de ruptura obtidos em testes dielétricos, através da distribuição de Weibull. Por fim, será proposta uma metodologia estatística para definição do número mínimo de amostras que devem ser rompidas para garantir uma caracterização estatística confiável do ensaio.

3.1.1 Distribuição de Weibull

A distribuição de Weibull foi inicialmente desenvolvida para modelar a distribuição da resistência à ruptura de materiais (WEIBULL, 1939a; WEIBULL, 1939b), pelo físico sueco Waloddi Weibull. Alguns anos depois, demonstrou-se que a distribuição também seria um bom modelo para descrever os dados de diversas outras aplicações (WEIBULL, 1951). O uso desta distribuição fundamenta-se na teoria de que a ruptura é causada por um elo fraco, como no caso de uma corrente que irá romper se algum de seus elos falhar (MARTIN; WANG, 2008).

A distribuição de Weibull pode ser aplicada na forma de dois ou três parâmetros, sendo a primeira a versão mais comum (ROSS, 1996). A função de distribuição cumulativa, que descreve a probabilidade de falha P , para um dado nível de tensão aplicada V , com parâmetro de escala α e parâmetro de forma β , é descrita por (3.1). A partir dela, é possível obter a função densidade de probabilidade F , definida em (3.2) (WEIBULL, 1951; IEEE, 2007; UEKI; ZANIN, 1997).

$$P = 1 - e \left[- \left(\frac{V}{\alpha} \right)^\beta \right] \quad (3.1)$$

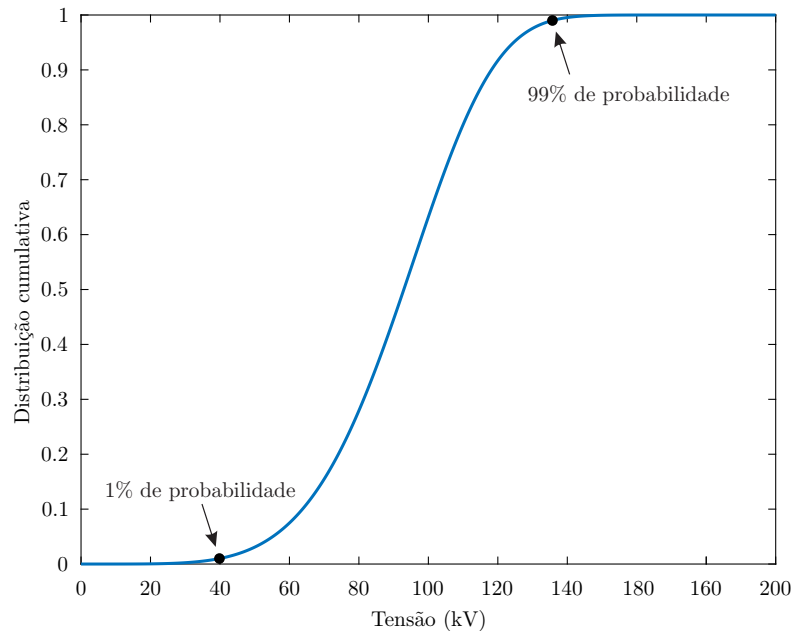
$$F = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{V}{\alpha} \right)^{\beta-1} e \left[- \left(\frac{V}{\alpha} \right)^\beta \right] \quad (3.2)$$

O parâmetro de escala α corresponde ao nível de tensão V no qual a probabilidade de falha é 63,2%, ou seja, $P = (1 - 1/e)100$ sendo e a constante exponencial (2,7183). Já o parâmetro de forma β , também conhecido como inclinação de Weibull, é uma medida da faixa de valores das tensões de ruptura que permite avaliar a dispersão dos resultados. Quanto maior o valor de β , menor a faixa de valores das tensões de ruptura observadas e menor a dispersão dos resultados (IEEE, 2007; UEKI; ZANIN, 1997).

Exemplos de funções de distribuição cumulativa e de densidade de probabilidade de Weibull considerando os parâmetros $\alpha = 100$ e $\beta = 5$, para dados aleatórios de tensão

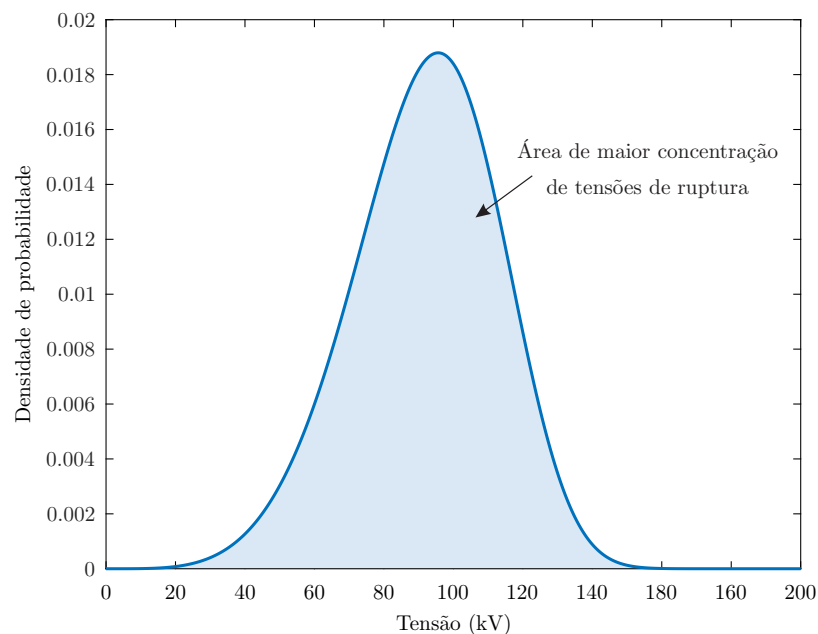
de ruptura, são apresentadas nas Figuras 3.1 e 3.2. Na Figura 3.1, é possível observar as probabilidades de ruptura para determinados níveis de tensão. Já na Figura 3.2, é possível observar a área onde ocorre a maior concentração das tensões de ruptura.

Figura 3.1 – Gráfico da função de distribuição cumulativa de Weibull.



Fonte: Autor.

Figura 3.2 – Gráfico da função de densidade de probabilidade de Weibull.

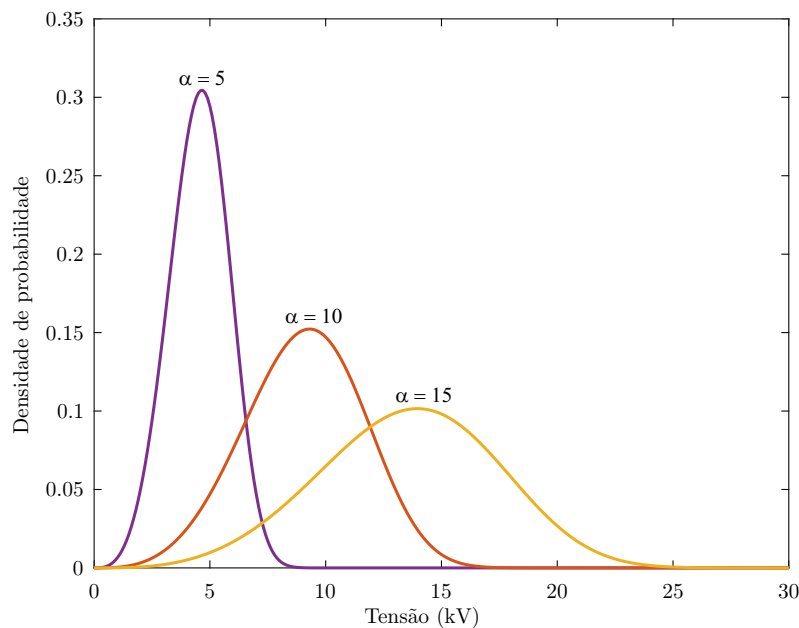


Fonte: Autor.

A característica da função de densidade apresenta relação direta com os valores

dos parâmetros α e β . Com a elevação do parâmetro α , para um mesmo valor de β , verifica-se uma diminuição dos valores de densidade de probabilidade e uma distribuição ao longo de uma faixa mais ampla. Isso pode ser observado na Figura 3.3: se o valor de α é aumentado, a distribuição é expandida para a direita e seu valor de densidade de probabilidade é reduzido; se o valor de α é diminuído, a distribuição é retraída para a esquerda e seu valor de densidade de probabilidade é ampliado. A variação do parâmetro β , considerando o parâmetro α fixo, por sua vez, altera a forma da função densidade, conforme pode ser observado na Figura 3.4 (WEIBULL, 2021).

Figura 3.3 – Efeito da variação do parâmetro de escala α na função de densidade com $\beta = 4$.



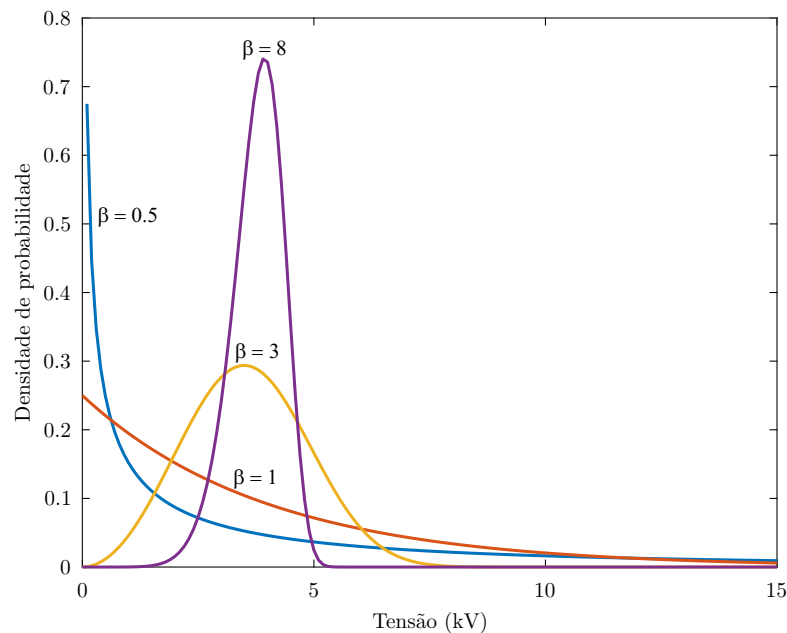
Fonte: Autor.

Isolando-se o termo V da equação (3.1) é possível definir o valor de estresse elétrico que pode ser aplicado à configuração para determinada probabilidade de falha. Dessa forma obtém-se a equação (3.3) (PREVOST, 2009; SHAW; NELSON; PREVOST, 2005).

$$V = \alpha[-\ln(1 - P)]^{\frac{1}{\beta}} \quad (3.3)$$

A partir da equação (3.3), torna-se possível definir o valor de tensão que estabelece 0% de probabilidade de ocorrer ruptura dielétrica. No entanto, em função do comportamento exponencial apresentado pela equação, pode-se resultar em um valor muito baixo, tornando-se inviável sob a perspectiva de custo de fabricação. Por conta disso, o valor de probabilidade de falha de 1% ($P = 0,01$) é comumente adotado como parâmetro de referência em projetos dielétricos (IARONKA, 2019).

Figura 3.4 – Efeito da variação do parâmetro de forma β na função de densidade com $\alpha = 4$.



Fonte: Autor.

3.1.2 Técnica Computacional para a Estimação de Parâmetros de Weibull

Ao se escolher uma distribuição para representar um conjunto de dados de ruptura, é necessário verificar se a distribuição é adequada para esta aplicação. Os dados distribuídos de acordo com a função de Weibull de dois parâmetros devem formar uma linha razoavelmente reta quando representados no plano cartesiano. Alguns desvios eventuais de uma linha reta podem ser esperados, no entanto, se os dados não resultam em uma linha razoavelmente reta, conclui-se que a aplicação da distribuição de Weibull de dois parâmetros não é adequada para esse conjunto de dados. Dados que formam curvaturas ou cúspides podem se ajustar melhor a outras distribuições, como é o caso da distribuição de Weibull de três parâmetros (IEEE, 2007).

Uma vez que uma distribuição é especificada e os dados são coletados, é possível avaliar sua qualidade de ajuste, isto é, o quão bem ela se encaixa nos dados observados. A qualidade do ajuste é avaliada encontrando os valores dos parâmetros da distribuição, um procedimento denominado estimativa de parâmetros (MYUNG, 2003). Várias técnicas computacionais estão disponíveis para estimar os parâmetros α e β da distribuição de Weibull. Para grandes conjuntos de dados, normalmente maiores que vinte rupturas, são consideradas técnicas adequadas: estimativa de mínimos quadrados (do inglês, *Least-Squares Estimation* – LSE) e estimativa de máxima verossimilhança (do inglês, *Maximum Likelihood Estimation* – MLE) (IEEE, 2007).

O LSE é apropriado para se obter uma medida descritiva com o propósito de resumir os dados observados, mas não tem base para testar hipóteses ou construir intervalos de confiança. Por outro lado, o MLE apresenta ótimas propriedades como: suficiência (informações completas sobre o parâmetro de interesse contido no estimador do MLE), consistência (valor do parâmetro verdadeiro que gerou os dados recuperados assintoticamente, ou seja, para dados de amostras suficientemente grandes), eficiência (variação mais baixa possível de estimativas de parâmetros alcançadas assintoticamente) e invariância da parametrização (mesma solução MLE obtida independente da parametrização utilizada) (MYUNG, 2003).

Dadas suas boas propriedades, o método de estimativa de máxima verossimilhança é bastante utilizado e considerado um importante estimador de parâmetros. O procedimento MLE visa selecionar como estimativa de um parâmetro, o valor para o qual a amostra observada teria sido mais provável de ocorrer. O logaritmo da função de verossimilhança gerado para a distribuição de Weibull é dado por (3.4) (BAIN; ENGLEHARDT, 1991; ROSS, 1996):

$$\begin{aligned} \ln L(a, b; V_i) &= \sum_{i=1}^n \ln f(V_i; a, b) \\ &= n \ln b - n \ln a + (b-1) \sum_{i=1}^n \ln \frac{V_i}{a} - \sum_{i=1}^n \left(\frac{V_i}{a}\right)^b \end{aligned} \quad (3.4)$$

onde V_i de $i = 1, \dots, n$, corresponde aos dados de uma amostragem de n resultados e a e b são os estimadores de α e β , respectivamente. Os estimadores a e b são obtidos pela maximização do logaritmo de L , ou seja, resolvendo

$$\frac{\partial \ln L}{\partial a} = \frac{\partial \ln L}{\partial b} = 0. \quad (3.5)$$

Com a maximização da equação (3.4), obtém-se duas relações dadas por (3.6) e (3.7). O valor de b é obtido através da equação (3.6). Substituindo-se o valor de b em (3.7), calcula-se a .

$$\frac{\sum_{i=1}^n V_i^b \ln V_i}{\sum_{i=1}^n V_i^b} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln V_i - \frac{1}{b} = 0 \quad (3.6)$$

$$a = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (V_i)^b \right]^{\frac{1}{b}} \quad (3.7)$$

3.1.3 Intervalos de Confiança para os Parâmetros de Weibull

Devido à natureza estatística da ruptura dielétrica, mesmo com a realização de testes envolvendo um grande número de amostras, espera-se que os valores dos estimadores a e b obtidos sejam diferentes. Dessa forma, é improvável que os valores de α e β estimados sejam iguais aos valores verdadeiros. Portanto, além de calcular os estimadores a e b para α e β , é comum determinar um intervalo de confiança que circunda cada parâmetro estimado, de forma a garantir que os valores verdadeiros estejam dentro dos intervalos dados para uma predeterminada porcentagem de testes repetidos igualmente (STONE; HEESWIJK, 1977).

Dessa maneira, o intervalo de confiança inferior (β_I) e superior (β_S) para o parâmetro β , e o intervalo de confiança inferior (α_I) e superior (α_S) para o estimador α , podem ser determinados por (3.8)–(3.11), respectivamente (BAIN; ENGLEHARDT, 1991).

$$\beta_I = \frac{b}{1 + \frac{c_{1-\theta}}{\sqrt{n}}} \quad (3.8)$$

$$\beta_S = \frac{b}{1 + \frac{c_\theta}{\sqrt{n}}} \quad (3.9)$$

$$\alpha_I = ae \left(\frac{-u_{1-\frac{\theta}{2}}}{b\sqrt{n}} \right) \quad (3.10)$$

$$\alpha_S = ae \left(\frac{-u_{\frac{\theta}{2}}}{b\sqrt{n}} \right) \quad (3.11)$$

onde o valor de θ é obtido a partir do intervalo de confiança desejado, I_C , dado por $I_C = 1 - \theta$. Assim, se um intervalo de confiança de 95% for desejado, logo, $\theta = 0,05$. Os valores de $c_{1-\theta}$, c_θ , $u_{1-\frac{\theta}{2}}$ e $u_{\frac{\theta}{2}}$ podem ser obtidos em (BAIN; ENGLEHARDT, 1991). Dessa forma, tem-se 95% de confiança de que o verdadeiro valor dos parâmetros α e β encontra-se entre os intervalos de confiança inferior e superior determinados.

3.1.4 Estudo de caso

Nesta seção será apresentado um exemplo de análise estatística dos dados obtidos em testes dielétricos, utilizando a distribuição de Weibull. Para a aplicação da metodologia utilizou-se o *software* MATLAB®. Além disso, utilizou-se os dados de tensão de ruptura dielétrica obtidos em Prevost (2009), referentes ao ensaio de tensão alternada em frequência comercial, aplicado ao isolamento kraft imerso em éster natural para uma distância de 35 mm. Os dados foram extraídos utilizando a ferramenta SheetScan do

software Ansys Electronics®. Os n dados de tensão V_i devem ser classificados de forma crescente de $i = 1$ até $i = n$ e deve-se atribuí-los uma probabilidade de ruptura, dada por (3.12) (JACQUELIN, 1993; CACCIARI; MONTANARI, 1991), conforme é apresentado na Tabela 3.1.

$$F(i, n) = \frac{i - 0,5}{n} \quad (3.12)$$

Tabela 3.1 – Dados do ensaio dielétrico distribuídos de forma crescente e atribuídos a uma probabilidade de ruptura.

i	Vi (kV)	F(i,n)	i	Vi (kV)	F(i,n)
1	226	0,0208	13	285	0,5208
2	232	0,0625	14	290	0,5625
3	233	0,1042	15	292	0,6042
4	247	0,1458	16	294	0,6458
5	248	0,1875	17	301	0,6875
6	250	0,2292	18	309	0,7292
7	264	0,2708	19	313	0,7708
8	266	0,3125	20	315	0,8125
9	278	0,3542	21	317	0,8542
10	279	0,3958	22	318	0,8958
11	281	0,4375	23	320	0,9375
12	283	0,4792	24	328	0,9792

Fonte: Autor.

A partir dos dados é possível realizar a estimação dos parâmetros α e β através do método MLE, dado por (3.6) e (3.7). Em seguida, calcula-se os intervalos de confiança de 95% através das equações (3.8)–(3.11). A Tabela 3.2 apresenta os valores estimados de α e β e seus respectivos intervalos de confiança.

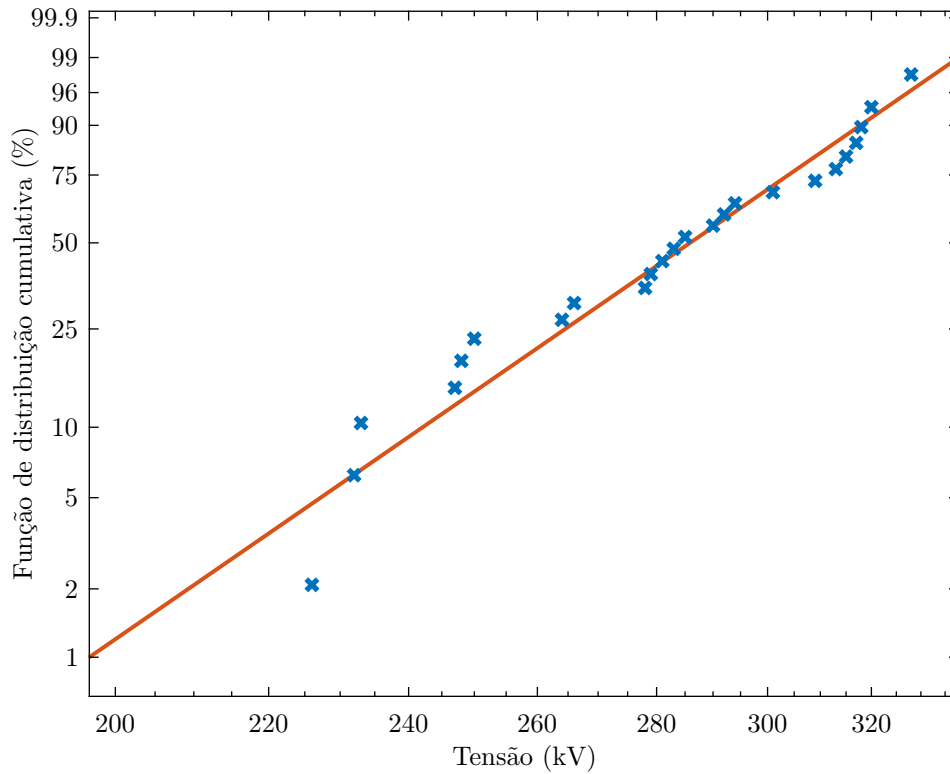
Tabela 3.2 – Valores de α e β estimados e seus intervalos de confiança.

α_I	α	α_S	β_I	β	β_S
284,4903	295,2718	306,4619	8,2157	11,3369	15,6438

Fonte: Autor.

Na Figura 3.5 é apresentado o gráfico da função de distribuição cumulativa de Weibull. Observa-se os dados V_i e $F(i, n)$ apresentados na Tabela 3.1, bem como a reta obtida através da linearização da equação (3.1), função dos parâmetros α e β . Note que para a obtenção do gráfico é utilizada a escala de Weibull para o eixo Y, enquanto o eixo X é dado pela escalada logarítmica (ROSS, 1994; ZHANG; XIE; TANG, 2007).

Figura 3.5 – Função de distribuição cumulativa de Weibull.



Fonte: Autor.

Uma vez obtidos os valores dos parâmetros α e β é possível calcular o valor da tensão que estabelece 1% de probabilidade de ocorrer a ruptura dielétrica. Substituindo os valores em (3.3) obtém-se,

$$V = 295,2718[-\ln(1 - 0,01)]^{\frac{1}{11,3369}} = 196,788 \text{ kV}. \quad (3.13)$$

Veja que o valor da tensão obtido é muito próximo do obtido em (PREVOST, 2009), sendo a pequena diferença justificada pela maneira como os dados foram extraídos. Note que por meio da equação (3.3), pode-se determinar o valor de tensão para qualquer valor de probabilidade. Além disso, perceba que esses valores também podem ser obtidos por meio de inspeção visual da reta na Figura 3.5.

3.2 DEFINIÇÃO DO TAMANHO DA AMOSTRA

Escolher de um tamanho de amostra estatisticamente adequado é extremamente importante para que as conclusões apropriadas a respeito dos dados de tensão de ruptura sejam alcançadas. Caso o tamanho da amostra adotado seja insuficiente, ou seja, pequeno, pode resultar em estimativas de parâmetros instáveis e inadequados para o projeto. Em específico, ao utilizar-se o método MLE pode-se obter estimativas tendenciosas, acarretando em conclusões e decisões equivocadas (BARMOAV, 2010).

Na literatura, diferentes tamanhos de amostras são utilizados. As normas ASTM D149 e ASTM D3426 indicam que sejam realizados 5 testes válidos (ASTM, 2020; ASTM, 2019). O guia referente à análise estatística dos dados de ruptura dielétrica, recomenda que os dados de ruptura devem ser obtidos em pelo menos 10 amostras e que erros graves podem ocorrer utilizando-se menos de 5 amostras (IEEE, 2007). Artigos da literatura que realizaram ensaios dielétricos semelhantes aos deste trabalho, por sua vez, adotaram 24, 25 e 31 amostras para ensaios na configuração CB (RAPP; VANDERMAAR; FRANCKEK, 2012; PREVOST, 2009; HAEGELE et al., 2017), e 9, 16 e 18 amostras para ensaios no modelo T2T (PREVOST; FRANCKEK, 1989; WANG et al., 2015b).

Diante da grande divergência encontrada na literatura em relação ao número de amostras a serem testadas nos ensaios de ruptura dielétrica, e devido à necessidade de garantir uma caracterização estatística confiável do ensaio, adotou-se uma metodologia para a definição do número mínimo de amostras a serem rompidas, a qual será explicada com mais detalhes a seguir.

3.2.0.1 Metodologia adotada

Para a definição do tamanho da amostra, adotou-se a metodologia estatística proposta por Yang et al. (2019). Tal trabalho calcula o tamanho da amostra de compósitos de polímero reforçado com fibra, usados em testes de tração, com base em uma distribuição de Weibull de dois parâmetros e uma distribuição normal. Visto que muitos estudos revelam que a distribuição de Weibull é a mais apropriada como modelo descritivo, o conservadorismo de ambas foi comparado. Ao se comparar os resultados de cada distribuição, verifica-se que o tamanho das amostras com base na distribuição Weibull e na distribuição normal são muito similares, sendo os valores baseados na distribuição normal ligeiramente maiores. Assim, verifica-se que a distribuição de Weibull não leva a uma estimativa mais conservadora do tamanho da amostra, e que o tamanho da amostra com base em uma distribuição normal é aplicável (YANG et al., 2019).

Diante disso, o método baseado na distribuição normal será adotado. Para a aplicação da metodologia, é necessário ter-se um conjunto de dados experimentais. Para

isso, utilizaram-se os dados de tensão de ruptura obtidos em Prevost (2006) e Rapp et al. (2009), para a definição do tamanho da amostra do modelo CB e do modelo T2T, respectivamente. Os dados retirados de Prevost (2006), correspondem ao ensaio de tensão CA, em éster natural, para uma lacuna de 35 mm. Já para Rapp et al. (2009), esses dados correspondem ao ensaio de tensão impulsiva de polaridade negativa, para o eletrodo do tipo 3, em éster natural, para um espaçamento de 3 mm. Esses trabalhos foram escolhidos devido as semelhanças quanto ao tipo de tensão aplicada e as configurações de eletrodos utilizadas, com as adotadas no presente trabalho.

Para a definição do tamanho da amostra, a equação (3.14) é utilizada, derivada de uma estatística $T = \frac{(\bar{X} - \mu)}{S/\sqrt{n}}$ que segue a distribuição *t-Student* com $n - 1$ graus de liberdade, onde \bar{X} é a média da amostra, μ é a média da distribuição normal, S é o desvio padrão da amostra e n é o tamanho da amostra (YANG et al., 2019).

$$n = \left(\frac{t_{1-\alpha/2}(n-1) \times COV}{e} \right)^2 \quad (3.14)$$

onde $COV = S/\bar{X}$ representa o coeficiente de variação da amostra, $e = |\bar{X} - \mu|/\bar{X}$ denota o erro relativo ou precisão e $t_{1-\alpha/2}(n-1)$ é o valor do limite de confiança de T , obtido através da tabela *t-Student*, a qual pode ser encontrada em Swinscow (2002).

Aplicou-se a metodologia assumindo um nível de confiança de 95% e um limite de erro relativo de 5%. As Tabelas 3.3 e 3.4 apresentam, respectivamente, os valores dos parâmetros calculados para o modelo CB e T2T, utilizando os dados de Prevost (2006) e Rapp et al. (2009). O tamanho da amostra, representado por N nas Tabelas, pode ser determinado pelo método de tentativa e erro. Para garantir a precisão e a confiabilidade, N deve ser maior ou igual ao valor calculado em (3.14). Ou seja, deve-se supor o tamanho da amostra N até que o resultado da equação (3.14) corresponda a um valor igual ou inferior a N .

Tabela 3.3 – Valores dos parâmetros calculados para o modelo CB.

Média da amostra (\bar{X})	283
Desvio padrão (S)	34,880
COV	0,123
N	26
Graus de liberdade ($N-1$)	25
Tabela <i>t-Student</i> ($t_{1-\alpha/2}(n-1)$)	2,060
n (equação (3.14))	25,785

Fonte: Autor.

Sendo assim, para a realização dos ensaios dielétricos considerando esses parâmetros, deve-se adotar no mínimo um tamanho de amostra de 26, para o modelo CB, e 30, para o modelo T2T.

Tabela 3.4 – Valores dos parâmetros calculados para o modelo T2T.

Média da amostra (\bar{X})	139
Desvio padrão (S)	18,5
COV	0,133
N	30
Graus de liberdade ($N-1$)	29
Tabela t-Student ($t_{1-\alpha/2}(n-1)$)	2,045
n (equação (3.14))	29,632

Fonte: Autor.

3.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo, os principais conceitos e funções referentes à distribuição de Weibull de dois parâmetros foram descritos. Além disso, os procedimentos para a estimação dos parâmetros α e β , através do método de estimativa de máxima verossimilhança, e para a determinação dos intervalos de confiança de cada parâmetro estimado, foram apresentados. A partir disso, foi possível realizar um estudo de caso, mostrando como deve ser realizada a análise estatística dos dados de tensão de ruptura obtidos em testes dielétricos, através da distribuição de Weibull. Este estudo pode ser utilizado como um guia de referência para ser aplicado a qualquer outro conjunto de dados de tensão de ruptura obtido em ensaios dielétricos. Por fim, foi adotada uma metodologia estatística para definição do número mínimo de amostras a serem rompidas, devido a necessidade de garantir uma caracterização estatística confiável do ensaio. Uma desvantagem da técnica é a necessidade de dados experimentais prévios para que o número de amostras possa ser definido.

4 METODOLOGIA DE ENSAIOS DIELÉTRICOS

4.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo, serão apresentados os procedimentos de preparação das amostras de papel e óleo isolante, bem como as precauções que devem ser tomadas. Serão descritos os procedimentos de aplicação de tensão, estabelecidos em norma, e também serão mostradas as configurações de ensaio construídas para a realização dos ensaios dielétricos no modelo CB e T2T. Além disso, será detalhado um procedimento pré-testes para a realização dos ensaios, bem como alguns resultados preliminares.

4.2 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

O procedimento de preparação das amostras de papel e fluido isolante são muito importantes para a obtenção de resultados precisos nos testes dielétricos. As diferentes propriedades inerentes de cada tipo de fluido, como viscosidade, tensão superficial e grau de saturação de água, influenciam no manuseio das amostras, processamento e procedimentos de teste. O uso de fluidos com viscosidades mais altas que o óleo mineral, como o éster natural, requer cuidados adicionais. A viscosidade e a tensão superficial dos fluidos de éster natural dificultam a liberação de bolhas de ar, causando uma perda de desempenho dielétrico. A viscosidade mais alta também exige tempo de impregnação mais longo e/ou temperatura mais alta, das amostras de papel, quando comparado ao óleo mineral (RAPP et al., 2009).

São importantes para manter a integridade do fluido e das amostras de papel e para a obtenção de resultados confiáveis, realizar: o tratamento a vácuo, contribuindo para a eliminação de bolhas de ar retidas no fluido e nas interfaces de isolamento, a secagem adequada das amostras, utilizando calor e vácuo, seguida de impregnação com óleo a vácuo, bem como uma configuração aprimorada do teste e o adequado processamento dos fluidos, através de aquecimento e remoção de partículas e gás dissolvido (RAPP et al., 2009).

Na literatura, alguns autores detalham os procedimentos de preparação das amostras de papel e óleo realizados em seus testes dielétricos. De maneira geral, as amostras de isolante sólido são secas em estufas de circulação de ar e, posteriormente, de vácuo durante determinado tempo e sob determinada temperatura e, em seguida, impregnadas sob vácuo. Busca-se ter, nas amostras, um teor de umidade inferior a 0,5%. O fluido isolante, por sua vez, é tratado com degaseificação, secagem, filtragem e vácuo, além de ser

mantido em repouso por tempo determinado, permitindo o desaparecimento de qualquer ar retido. Além disso, após cada teste, o fluido é processado a vácuo e filtrado. Busca-se ter, no fluido de éster natural, um teor de umidade inferior a 100 ppm (HAEGELE et al., 2017; WANG et al., 2015b; PREVOST, 2009; RAPP et al., 2009; LIU et al., 2009).

Neste trabalho, a preparação das amostras de papel foi realizada em laboratório externo, pela empresa Vegoor Tecnologia Aplicada, utilizando como referência a norma ASTM D2413 (ASTM, 1999). A Figura 4.1 apresenta os recipientes selados, fornecidos pela Vegoor, contendo as amostras de papel impregnadas e imersas em óleo vegetal, de forma a evitar a entrada de ar e umidade, prontas para serem utilizadas nos testes dielétricos.

Figura 4.1 – Amostras de papel impregnadas e seladas: (a) CB. (b) T2T.



Fonte: Autor.

O tratamento do óleo, por sua vez, é realizado através da máquina termo vácuo. Esse tratamento consiste na retirada de umidade e desgaseificação do fluido isolante. Primeiramente, filtra-se o óleo a fim de que fique limpo e isento de sólidos. Em seguida, o óleo passa por um sistema de aquecimento controlado para a retirada de umidade e desgaseificação. Por fim, o óleo é redirecionado para uma câmara que, sob vácuo, remove os gases dissolvidos e os vapores de água contidos no óleo para a atmosfera. As especificações da termo vácuo utilizada são descritas com mais detalhes no Apêndice A desde trabalho.

4.3 MODELO CB

4.3.1 Aplicação de tensão suportável de impulso atmosférico padronizado

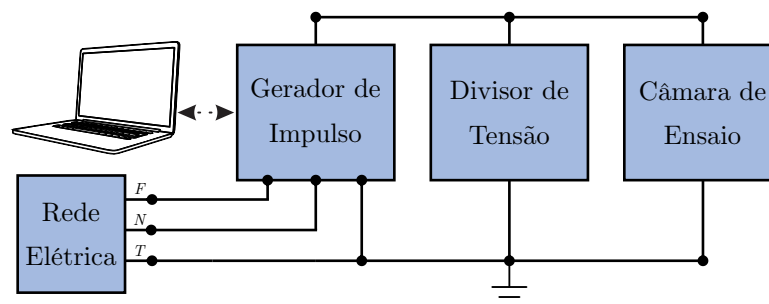
Para a determinação da tensão de ruptura dielétrica e suportabilidade dielétrica de materiais isolantes elétricos sólidos usando ondas de impulso, adota-se a norma ASTM D3426 (RAPP; VANDERMAAR; FRANCKEK, 2012; PREVOST; FRANCKEK, 1989). Esta norma aplica-se a testes que utilizam formas de onda que representam descargas atmosféricas, chamadas de impulsos atmosféricos, com tempo de frente de $1,2 \mu s$ e tempo de cauda de $50 \mu s$. O tempo de frente corresponde ao tempo necessário para que a onda atinja o seu valor máximo. O tempo de cauda, por sua vez, representa o tempo necessário para que a onda atinja, na descida, o valor correspondente a 50% do valor de pico, contando desde o seu início (ASTM, 2019).

Primeiramente, define-se a tensão inicial de disparo como sendo aproximadamente 70% da tensão de ruptura esperada. Em seguida, aplica-se as ondas de impulso, de polaridade positiva ou negativa, em conjuntos de três ondas por nível de tensão. Cada nível de tensão deve ser maior do que o nível anterior em incrementos de 5 a 10% da tensão inicial. O procedimento é realizado até a ocorrência da ruptura dielétrica. São considerados testes válidos aqueles em que são aplicadas ondas de impulso por pelo menos dois níveis de tensão antes da ruptura (ASTM, 2019).

4.3.2 Configuração de ensaio

A configuração de ensaio para o modelo CB consiste no conjunto gerador de impulso (GI), um divisor de tensão e a câmara de ensaio contendo o corpo de prova, conforme pode ser visto no diagrama apresentado na Figura 4.2.

Figura 4.2 – Diagrama da configuração de ensaio para o modelo CB.

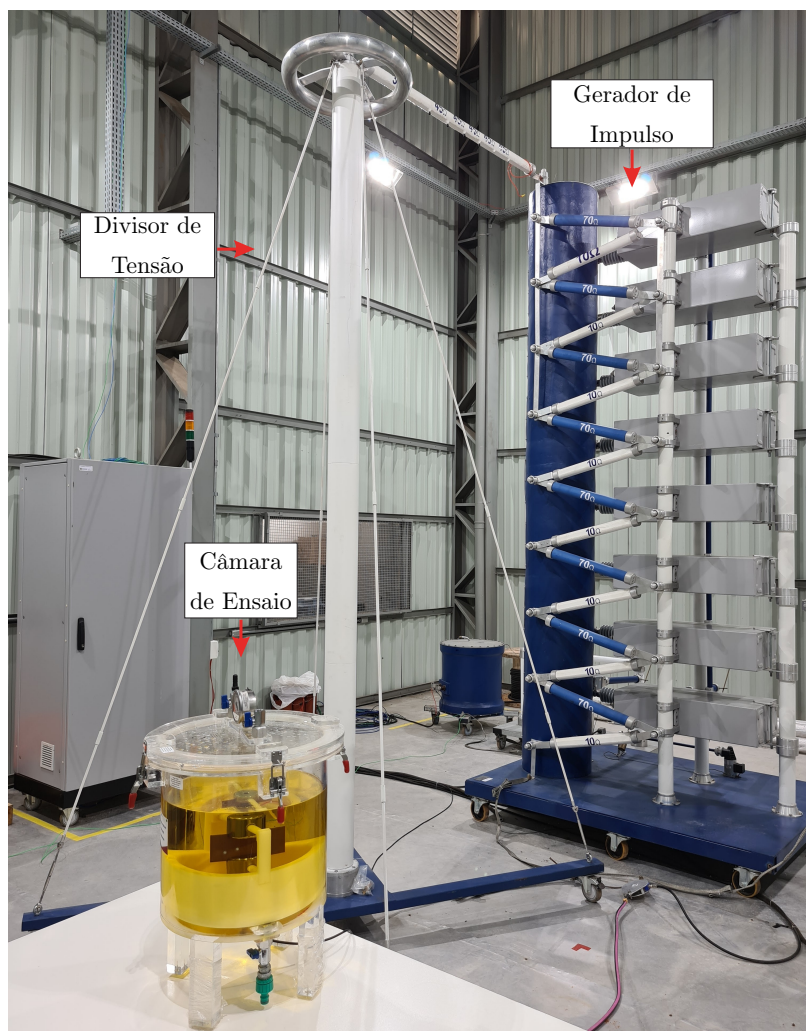


Fonte: Autor.

O gerador de impulso tem por finalidade reproduzir as formas de onda associadas a descargas atmosféricas, através de sistemas capacitivos nos quais a energia armazenada é subitamente liberada através de resistores, gerando uma onda rápida de frente íngreme e cauda mais suave. O divisor de tensão, por sua vez, é utilizado para realizar a medição das tensões impulsivas. Para fazer a aquisição de dados, faz-se uso de um osciloscópio. Além disso, o GI é operado através de um *software* de forma remota. As especificações de cada equipamento podem ser encontradas com mais detalhes no Apêndice A deste trabalho.

A montagem da configuração de ensaio para o modelo CB, contendo os equipamentos utilizados e suas respectivas conexões elétricas, é apresentada na Figura 4.3.

Figura 4.3 – Montagem da configuração de ensaio para o modelo CB.



Fonte: Autor.

4.4 MODELO T2T

4.4.1 Aplicação de tensão alternada em frequência comercial

Para a determinação da tensão de ruptura dielétrica e suportabilidade dielétrica de materiais isolantes elétricos sólidos em frequência comercial, adota-se a norma ASTM D149 (KANG et al., 2014; RAPP; VANDERMAAR; FRANCKEK, 2012; PREVOST; FRANCKEK, 1989; HAEGELE et al., 2017). De forma geral, uma tensão alternada em frequência comercial é aplicada na amostra de teste. A tensão é aumentada de zero ou de um nível significativamente abaixo da tensão de ruptura, em um dos três métodos de aplicação de tensão, até que a falha dielétrica da amostra de teste ocorra. O método A, denominado teste de curta duração, é o mais comumente utilizado para testes de controle de qualidade. Os métodos B e C, denominados testes de degrau e de taxa de aumento lenta, respectivamente, fornecem resultados mais precisos quando diferentes materiais estão sendo comparados entre si (ASTM, 2020).

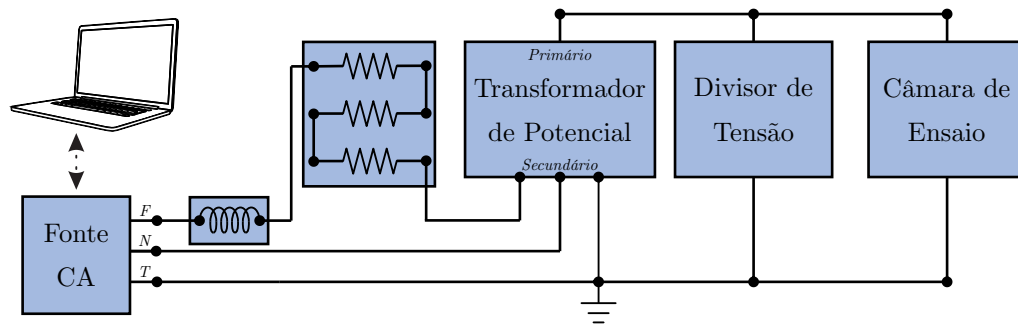
Para a determinação da tensão de ruptura esperada utiliza-se o método A. Neste método, inicia-se a tensão de zero até a ruptura à uma determinada taxa de aumento dada em V/s, de forma que o tempo médio até a ruptura esteja entre 10 e 20 segundos. Em seguida, define-se a tensão inicial a ser utilizada no método B, como sendo aproximadamente 50% da tensão de ruptura determinada pelo método A. Aplica-se o método B elevando-se a tensão em degraus com incrementos de 10% da tensão inicial, até a ocorrência da ruptura dielétrica. Em cada degrau mantêm-se a tensão fixa durante 1 minuto. É indicado que a ruptura ocorra entre 4 e 10 degraus. Se a ruptura ocorrer na troca de degraus ou antes do final do período de espera em qualquer etapa, a tensão dielétrica suportável deve ser considerada a tensão da última etapa concluída (ASTM, 2020).

4.4.2 Configuração de ensaio

A configuração de ensaio para o modelo T2T consiste em uma fonte de alimentação, um indutor, um banco de resistores, um transformador de potencial indutivo (TP), um divisor de tensão e a câmara de ensaio contendo o corpo de prova, conforme pode ser visto no diagrama apresentado na Figura 4.4.

A fonte é conectada aos terminais de baixa tensão do TP, o qual eleva a tensão da fonte aos níveis de tensão exigidos durante os testes. O indutor e o banco de resistores são conectados em série entre a fonte de tensão e o TP, com a finalidade de limitar a corrente no dispositivo. O lado de alta tensão do TP é conectado na parte superior do divisor de tensão e ao corpo de prova. O divisor de tensão possui um módulo de medição

Figura 4.4 – Diagrama da configuração de ensaio para o modelo T2T.

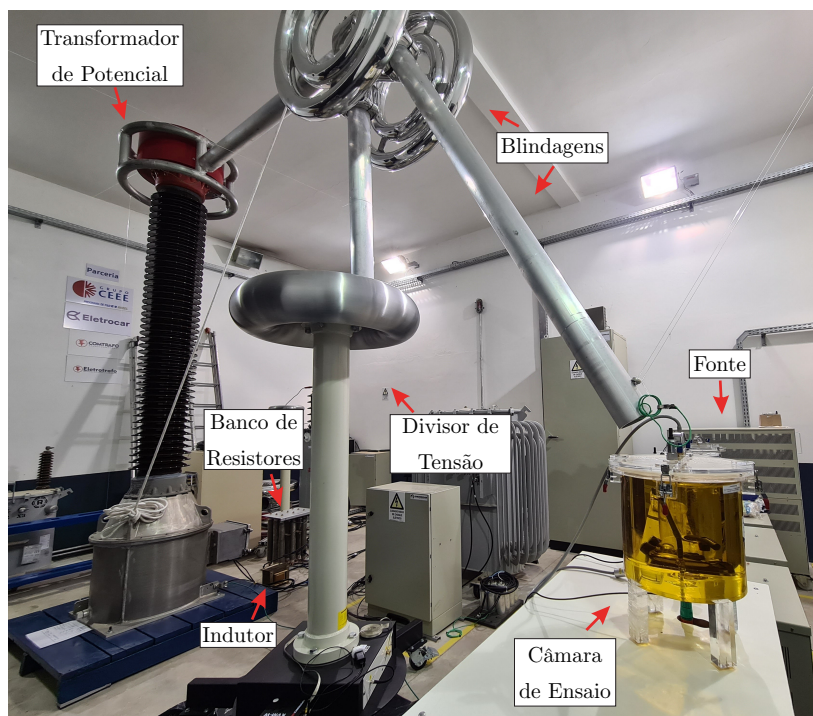


Fonte: Autor.

sem fio e um aplicativo móvel, permitindo realizar as medições de tensão aplicadas ao corpo de prova. O controle da fonte é realizado através de um *software* de forma remota. As especificações de cada equipamento podem ser encontradas com mais detalhes no Apêndice A deste trabalho.

A montagem da configuração de ensaio para o modelo T2T é apresentada na Figura 4.5. Nesta figura, observa-se todos os equipamentos utilizados e suas respectivas conexões elétricas, além de um conjunto de blindagens envolvendo as conexões de alta tensão entre o TP, divisor e corpo de prova. A função dessas blindagens é explicada no Apêndice A deste trabalho.

Figura 4.5 – Montagem da configuração de ensaio para o modelo T2T.



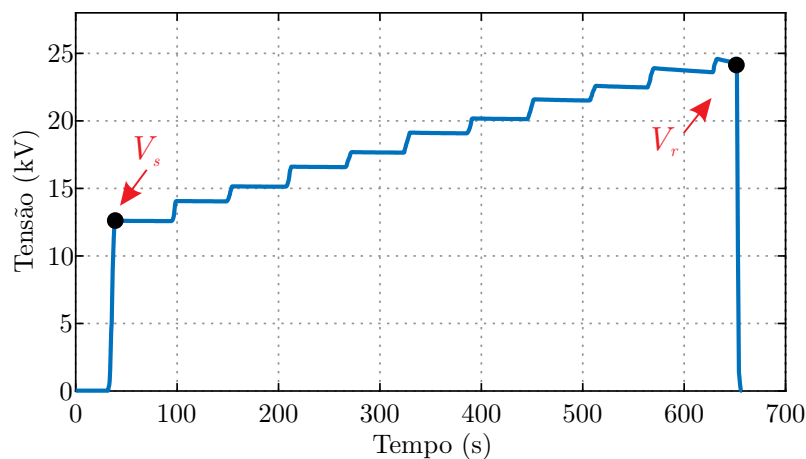
Fonte: Autor.

4.4.3 Resultados Preliminares

Nesta subsecção será apresentado, como exemplo, o resultado de um ensaio de tensão alternada em frequência comercial em amostras de Nomex® 910 aplicando os métodos A e B, descritos anteriormente. Com isso, é possível verificar o local onde ocorre a ruptura dielétrica na amostra de papel, como é realizado o monitoramento da tensão que está sendo aplicada e como é feita a constatação da ruptura.

Primeiramente, realizou-se um ensaio utilizando o método A e obteve-se uma tensão de ruptura de 31 kV. Na sequência foi realizado um segundo teste para a aplicação do método B. Iniciou-se a tensão em aproximadamente 12 kV (V_s) e aumentou-se em degraus com amplitude de aproximadamente 1,2 kV. A Figura 4.6 apresenta os dados medidos pelo divisor de tensão, durante a realização deste ensaio.

Figura 4.6 – Dados do ensaio em degrau, medidos pelo divisor de tensão.

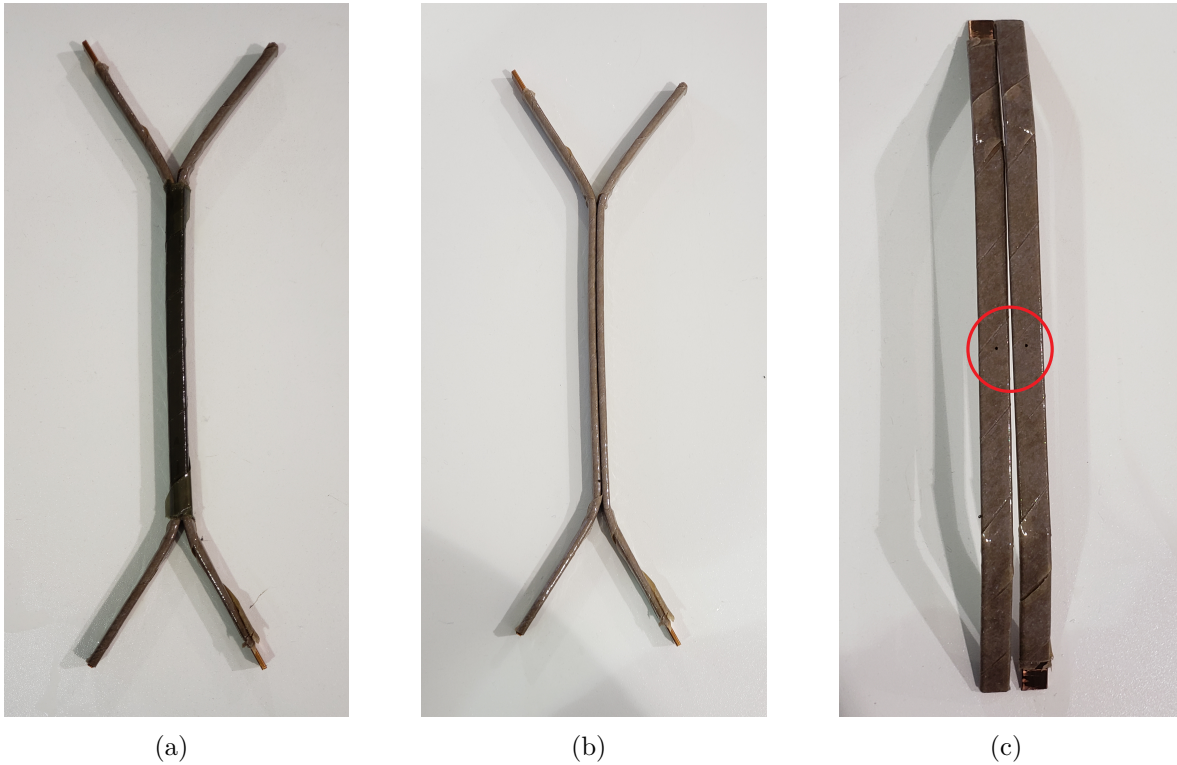


Fonte: Autor.

Observa-se que a amostra suportou a aplicação de 9 degraus, rompendo em uma tensão de aproximadamente 24 kV (V_r). O ponto de ruptura pode ser identificado no gráfico no momento em que a tensão reduz de maneira abrupta para zero.

Após o ensaio, é possível analisar a amostra de papel e visualizar o exato local onde ocorreu a ruptura dielétrica, indicado pelos pontos de cor escura, conforme pode ser observado na Figura 4.7. Note que a ruptura dielétrica ocorreu na região desejada, conforme havia sido previsto nas simulações computacionais apresentadas na Subsecção 2.5.2, Figura 2.26.

Figura 4.7 – Amostra de Nomex® 910: (a) Recém retirada da câmara de ensaio. (b) Sem as camadas de papel que une ambos os eletrodos. (c) Local onde ocorreu a ruptura dielétrica.



Fonte: Autor.

4.5 PROCEDIMENTO PRÉ-TESTES

Antes da realização dos testes dielétricos nas configurações CB e T2T, realiza-se o seguinte procedimento:

1. Trata-se o óleo na termo vácuo a uma temperatura de 65°C durante o tempo necessário para que o teor de umidade do fluido alcance os níveis desejados, inferiores a 100 ppm para o óleo vegetal. Um sensor de umidade pode ser utilizado para verificar o teor de umidade do fluido;
2. Conecta-se o terminal de aterramento do corpo de prova ao respectivo terminal dentro da câmara. A amostra de papel, retirada do frasco selado, deve ficar exposta a atmosfera o menor tempo possível para que o mínimo de umidade seja absorvido, e o seu teor de umidade deve ser inferior a 0,5%;
3. Fecha-se a tampa da câmara de ensaio e envasa-se óleo com a termo vácuo, através da mangueira conectada à válvula inferior, até que o corpo de prova fique totalmente imerso;

4. O fluido é deixado em repouso, durante um tempo mínimo de 24 horas, para que quaisquer bolhas de ar confinadas sejam eliminadas;
5. Retira-se a tampa da câmara e conecta-se o terminal de AT do corpo de prova ao respectivo terminal do TP (para o modelo T2T) e do divisor de tensão (para o modelo CB).

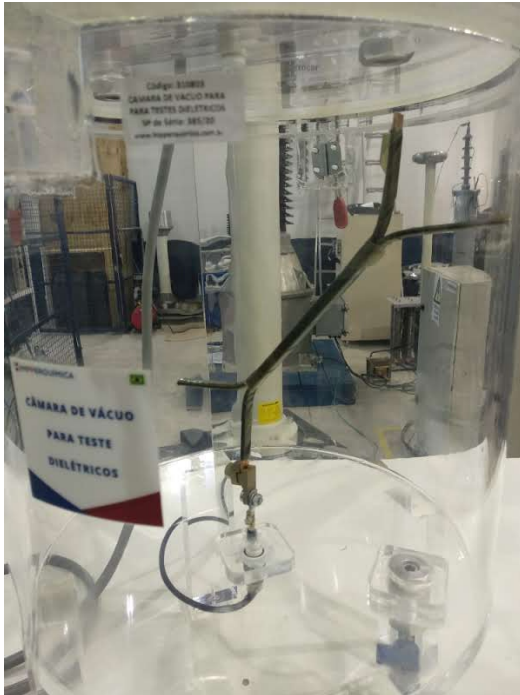
As cinco etapas descritas podem ser visualizadas nas Figuras 4.8, 4.9, 4.10, 4.11 e 4.12, respectivamente. Após realizadas, inicia-se os procedimentos de aplicação de tensão apresentados anteriormente nas seções 4.3.1. e 4.4.1. Note que é muito importante que os materiais isolantes sólidos e líquidos utilizados sejam devidamente tratados e testados sob as mesmas condições, com o mesmo tempo de repouso e teores de umidade. Assim, garante-se que resultados precisos possam ser obtidos, bem como consegue-se garantir uma comparação justa entre diferentes tipos de materiais.

Figura 4.8 – Etapa 1: Tratamento do óleo na termo vácuo.

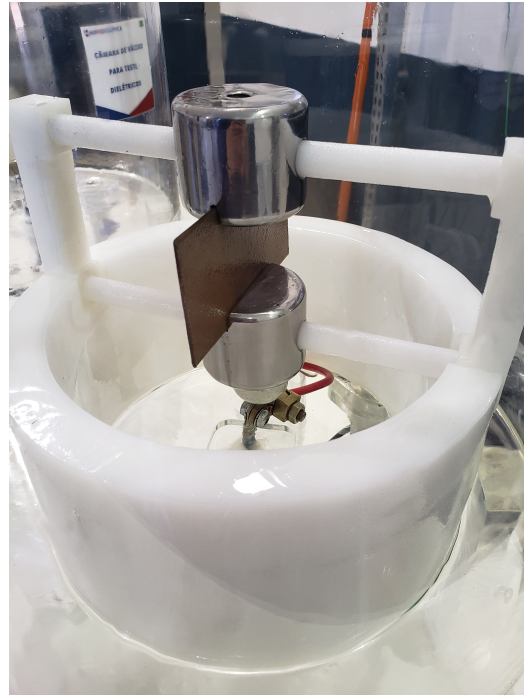


Fonte: Autor.

Figura 4.9 – Etapa 2: (a) Modelo T2T. (b) Modelo CB.



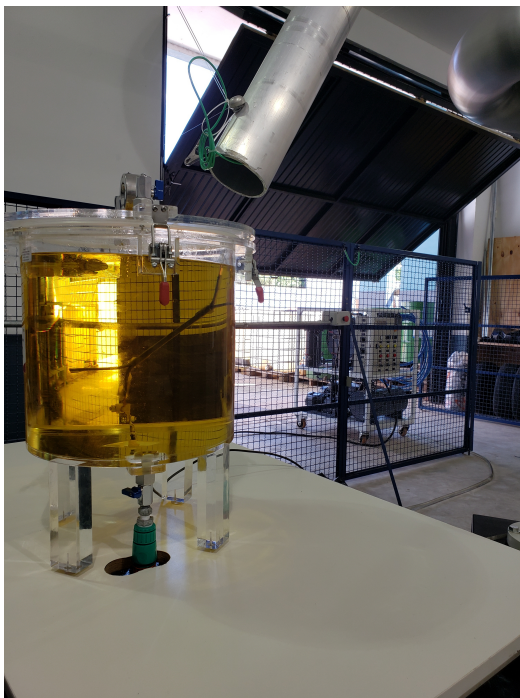
(a)



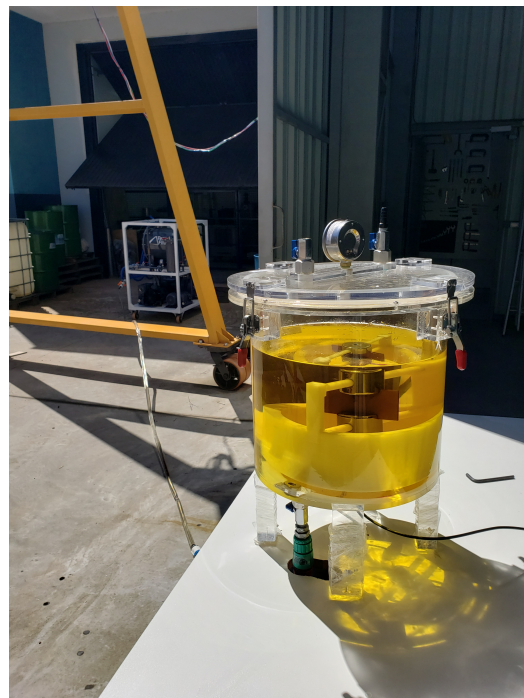
(b)

Fonte: Autor.

Figura 4.10 – Etapa 3: (a) Modelo T2T. (b) Modelo CB.



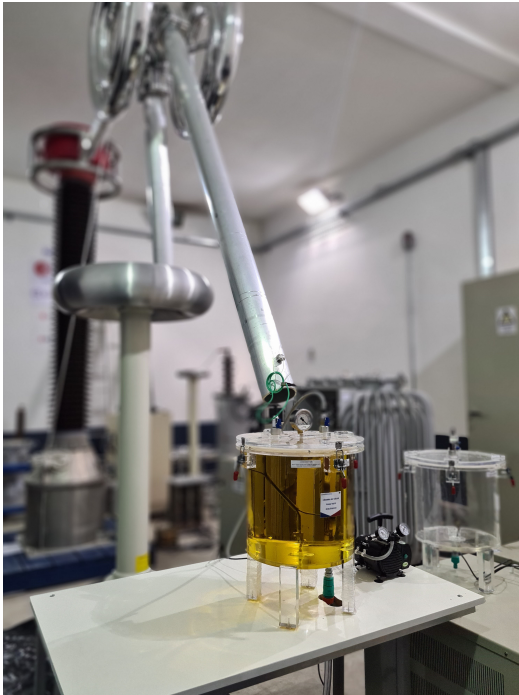
(a)



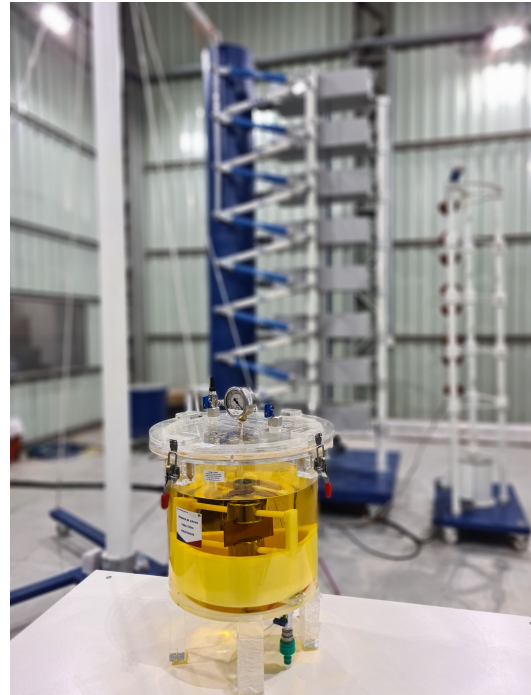
(b)

Fonte: Autor.

Figura 4.11 – Etapa 4: (a) Modelo T2T. (b) Modelo CB.



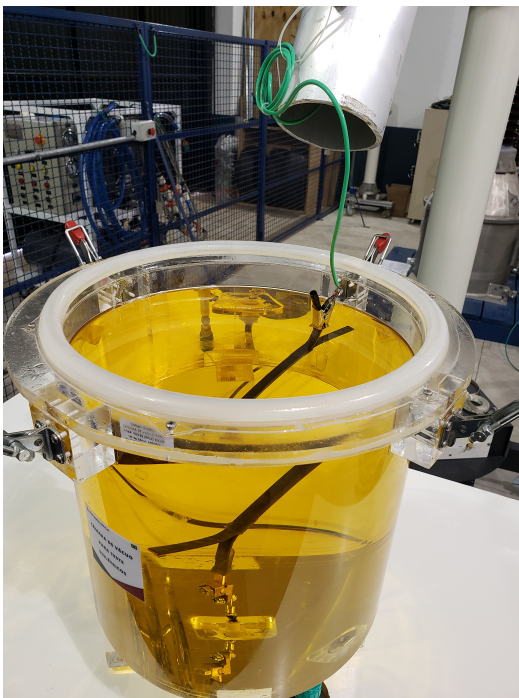
(a)



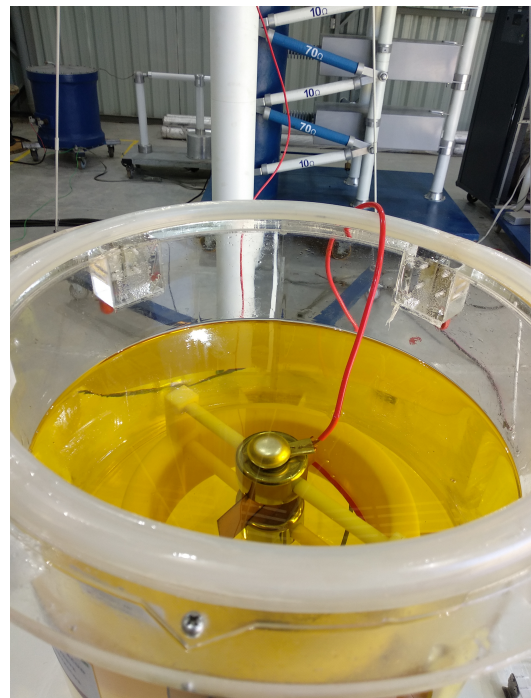
(b)

Fonte: Autor.

Figura 4.12 – Etapa 5: (a) Modelo T2T. (b) Modelo CB.



(a)

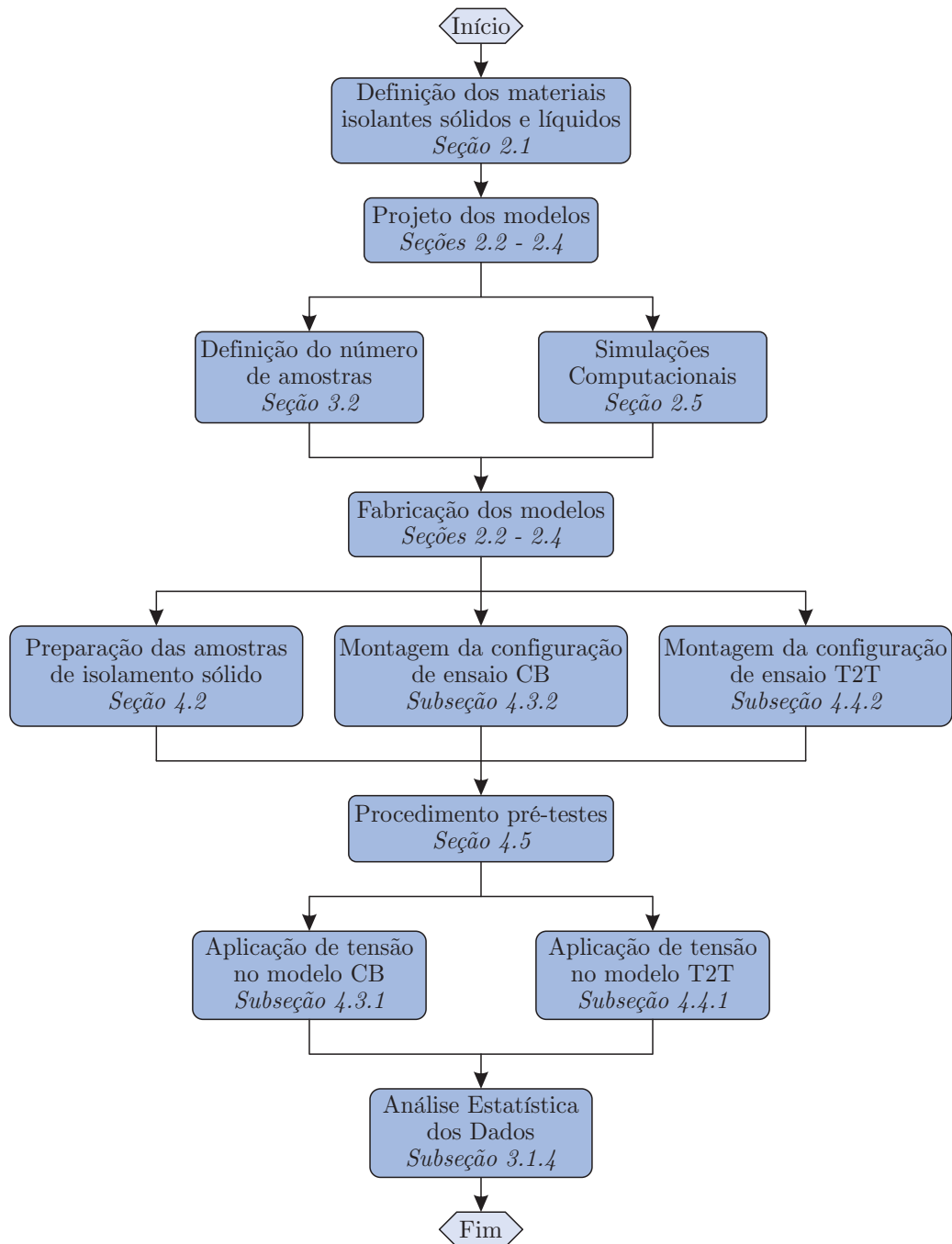


(b)

Fonte: Autor.

Por fim, um fluxograma é apresentado na Figura 4.13, com a finalidade de sintetizar todas as etapas referentes à metodologia de ensaios dielétricos para sistemas de isolamento sólido-líquido, proposta nesta dissertação.

Figura 4.13 – Fluxograma da metodologia de ensaios dielétricos proposta.



Fonte: Autor.

4.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo, os procedimentos de preparação das amostras de papel e óleo isolante foram apresentados. Verificou-se que o tratamento adequado das amostras de isolamento sólido e o adequado processamento dos fluidos são muito importantes para a obtenção de resultados significativos nos testes dielétricos. Também foram apresentados os procedimentos de aplicação de tensão suportável de impulso atmosférico padronizado, para ser utilizado no modelo CB, e de tensão alternada em frequência comercial, para ser utilizado no modelo T2T, conforme estabelecido em norma. Além disso, a montagem da configuração de ensaio de ambas configurações foi apresentada, indicando todos os equipamentos e elementos utilizados, bem como a função de cada um. Também foram apresentados resultados de ensaios realizados em amostras de Nomex® 910. Desse modo, foi possível visualizar o vestígio deixado na amostra de papel oriundo da ruptura dielétrica, localizado na região desejada, conforme havia sido previsto em simulações. Além disso, foi possível mostrar como o aplicativo móvel vinculado ao divisor de tensão faz o monitoramento da tensão que está sendo aplicada à configuração durante os testes. Por fim, foi realizado um procedimento pré-testes, onde foram detalhadas todas as etapas que devem ser seguidas para poder iniciar a aplicação da tensão de ensaio, e foi apresentado um fluxograma referente à metodologia de ensaios dielétricos proposta.

5 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta dissertação apresentou uma metodologia de ensaios dielétricos para sistemas de isolamento sólido-líquido aplicados a transformadores de potência. Para isso, o Capítulo 1 apresentou a motivação a respeito do tema e realizou uma revisão bibliográfica referente ao sistema de isolamento de transformadores, as solicitações dielétricas que o transformador está sujeito, os pontos críticos suscetíveis a descargas elétricas e as possíveis causas que levam à ruptura do dielétrico. Além disso, foram detalhados os conceitos e aplicações das curvas de projeto, do método de elementos finitos, do método do estresse elétrico cumulativo e foram descritos alguns dos ensaios dielétricos já realizados na literatura, visando informar o leitor a respeito do estado da arte.

No Capítulo 2, o projeto e o produto final fabricado das estruturas de ensaio nos modelos *Creep Breakdown* e *Turn-to-turn* foram apresentados. O primeiro modelo representa as descargas superficiais que podem ocorrer nos cilindros isolantes, nas saídas de isolamento ou nos suportes presentes no sistema de isolamento de um transformador. Já o segundo, representa o estresse elétrico entre espiras adjacentes. Os materiais e formatos escolhidos, bem como as dimensões e técnicas de fabricação adotadas para cada um dos elementos que compõem as estruturas de ensaio, foram planejados cuidadosamente a fim de garantir a qualidade e a confiabilidade dos testes dielétricos. Além disso, as modelagens e simulações computacionais de ambas as configurações foram realizadas. A partir dos resultados obtidos, validaram-se os modelos, garantindo que a ruptura dielétrica ocorreria na região de interesse: a superfície do papel, para o modelo CB, e ao longo da superfície de contato entre os eletrodos, para o modelo T2T.

Os principais conceitos e funções referentes à distribuição de Weibull de dois parâmetros foram descritos no Capítulo 3. Uma técnica computacional para a estimação dos parâmetros α e β , através do método de estimativa de máxima verossimilhança, e a determinação dos intervalos de confiança dos estimadores, foram apresentados. Baseado nisso, realizou-se um estudo de caso, utilizando os dados de ensaio de um trabalho prévio, para mostrar como a análise estatística dos dados é realizada utilizando a distribuição de Weibull. Foram obtidos os valores dos parâmetros estimados e os seus respectivos intervalos de confiança de 95%. A partir disso, calculou-se o valor da tensão que estabelece 1% de probabilidade de ocorrer a ruptura dielétrica e apresentou-se o gráfico da função de distribuição cumulativa de Weibull. Note que este procedimento pode ser utilizado como um guia de referência para ser aplicado a qualquer outro conjunto de dados de tensão de ruptura, obtido em ensaios dielétricos. Além disso, pode-se determinar o valor de tensão

para qualquer valor de probabilidade desejado. Por fim, foi proposta uma metodologia estatística para definição do número mínimo de amostras a serem rompidas, devido à necessidade de garantir uma caracterização estatística confiável do ensaio. Caso o tamanho da amostra adotado seja insuficiente, pode resultar em estimativas de parâmetros instáveis e inadequados para o projeto. Uma desvantagem da técnica adotada é a necessidade de dados experimentais prévios para que o número de amostras possa ser definido.

No Capítulo 4, foram apresentados os procedimentos de preparação das amostras de papel e óleo isolante. Verificou-se que o tratamento a vácuo e a secagem adequada das amostras seguida de impregnação com óleo a vácuo, uma configuração aprimorada de teste e o adequado processamento dos fluidos são essenciais para manter a integridade do fluido e das amostras de papel. Além disso, são importantes para garantir a obtenção de resultados significativos nos testes dielétricos, principalmente ao utilizar o óleo vegetal que, devido à viscosidade mais alta que do óleo mineral, requer cuidados adicionais. Além disso, foram descritos os procedimentos de aplicação de tensão suportável de impulso atmosférico padronizado, para ser utilizado no modelo CB, e de tensão alternada em frequência comercial, para ser utilizado no modelo T2T, conforme estabelecem as normas ATSM D3426 e ASTM D149, respectivamente. Tais procedimentos devem ser igualmente repetidos para cada conjunto de amostras de cada modelo de ensaio, para que resultados válidos de ensaio sejam obtidos e para que diferentes materiais possam ser comparados de forma justa.

Neste capítulo também foi apresentada a montagem da configuração de ensaio de ambos os modelos, indicando todos os equipamentos e elementos utilizados, bem como a função de cada um. Na sequência, foram apresentados resultados de ensaios realizados em amostras de Nomex® 910. Desse modo, foi possível visualizar o vestígio deixado na amostra de papel oriundo da ruptura dielétrica, localizado na região desejada, conforme havia sido previsto nas simulações realizadas. Além disso, pôde-se observar como o aplicativo móvel vinculado ao divisor de tensão realiza o monitoramento da tensão que está sendo aplicada à configuração durante os testes. Neste aplicativo é possível visualizar os dados de tensão e tempo, referentes ao início e fim do teste, com a ruptura, bem como os degraus aplicados. Também é realizado um procedimento pré-testes, detalhando as etapas que devem ser realizados antes da aplicação da tensão de ensaio. Por fim, um fluxograma é apresentado com a finalidade de sintetizar todas as etapas referentes à metodologia de ensaios dielétricos para sistemas de isolamento sólido-líquido, para que sirva de guia para trabalhos futuros.

Com a metodologia apresentada, pode-se definir as curvas de projeto e as margens de segurança do projeto dielétrico, além de fornecer resultados e conclusões que viabilizem o projeto e fabricação de transformadores de potência.

5.2 TRABALHOS FUTUROS

De forma a dar prosseguimento ao trabalho realizado, algumas propostas para trabalhos futuros são:

1. Aplicação da metodologia proposta utilizando os materiais isolantes Nomex[®] 994 PSB e Pressboard celulose T4, imersos em óleo vegetal Biovolt, na obtenção de resultados experimentais e das curvas de projeto;
2. Aplicação da metodologia proposta utilizando os materiais isolantes Nomex[®] 910 e Papel Kraft Termoestabilizado, imersos em óleo vegetal Biovolt, na obtenção de resultados experimentais e das curvas de projeto;
3. Definição das margens de segurança do projeto dielétrico empregando o Nomex[®] 994 PSB e o Nomex[®] 910, imersos em óleo vegetal Biovolt, de modo que forneça resultados e conclusões que viabilizem o projeto e fabricação de um protótipo de transformador.
4. Aplicação da metodologia proposta na obtenção de resultados experimentais utilizando novos materiais isolantes sólidos e líquidos;
5. Desenvolvimento de uma metodologia para definição do número mínimo de amostras a serem rompidas, sem a necessidade de dados experimentais prévios;
6. Investigação de outras configurações de eletrodos para a realização de testes dielétricos.

5.3 ARTIGOS PUBLICADOS

Os seguintes artigos foram submetidos e apresentados durante o desenvolvimento desta dissertação. São eles:

- Artigo apresentado em conferência nacional:
 1. BUENO, D. M.; MEDEIROS, L. H.; QUINTILIANO, M. S.; KAMINSKI, A. M.; NOGUEIRA, G. C.; BELTRAME, R. C.; BENDER, V. C.; MARCHE-SAN, T. B. Análise Dielétrica e Metodologia de Amostragem para Ensaio Dielétricos em Transformadores de Potência. **13th Seminar on Power Electronics and Control (SEPOC)**, 2021.

- Artigo aceito para publicação em conferência internacional:
 1. BUENO, D. M.; MEDEIROS, L. H.; BENDER, V. C.; MARCHESAN, T. B.; MARIN, M. A.; WILHELM, H. M. Dielectric Analysis Applied to Power Transformers Insulation Design. **2021 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)**, 2021.

REFERÊNCIAS

- ABNT. Transformadores de potência - parte 3: Níveis de isolamento, ensaios dielétricos e espaçamentos externos em ar. **ABNT NBR 5356-3**, p. 1–44, 2007.
- ASTM. Standard practice for preparation of insulating paper and board impregnated with a liquid dielectric. **ASTM D2413**, p. 1–4, 1999.
- _____. Standard test method for dielectric breakdown voltage and dielectric strength of solid electrical insulating materials using impulse waves. **ASTM D3426**, p. 1–4, 2019.
- _____. Standard test method for dielectric breakdown voltage and dielectric strength of solid electrical insulating materials at commercial power frequencies. **ASTM D149**, p. 1–13, 2020.
- BAIN, L. J.; ENGLEHARDT, M. **Statistical Analysis of Reliability and Life-Testing Models: Theory and Methods**. [S.l.]: New York: Marcel Dekker, 1991.
- BARMOAV, M. F. Reduced bias factor distribution to reduce the likelihood estimate bias of small sample sizes. In: **2010 Proceedings - Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS)**. [S.l.: s.n.], 2010. p. 1–7.
- BIOVOLT. **Home Biovolt - Biovolt**. 2021. <<http://biovolt.com.br/>>. (Accessed on 11/01/2021).
- CACCIARI, M.; MONTANARI, G. Estimating the cumulative probability of failure data points to be plotted on weibull and other probability paper. **IEEE Transactions on Electrical Insulation**, v. 26, n. 6, p. 1224–1229, 1991.
- CIGRÉ. **CIGRÉ A2.35 Tech Brochure**. 2010. <https://static.mimaterials.com/midel/documents/sales/New_Experiences_in_Service_with_New_Insulating_Liquids.pdf>. (Acessado em 01/27/2021).
- DUART, J.-C.; BATES, L. C. Aging of high temperature insulation systems with alternative fluids. In: **2010 IEEE International Symposium on Electrical Insulation**. [S.l.: s.n.], 2010. p. 1–5.
- FEIL, D. L. P. **Substituição de transformadores de potência em subestações de energia: uma estratégia global**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Maria, 2019.
- FERRITO, S.; STEGEHUIS, R. High temperature reinforced cellulose insulation for use in electrical applications. In: **2001 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition. Developing New Perspectives (Cat. No.01CH37294)**. [S.l.: s.n.], 2001. v. 2, p. 684–687 vol.2.
- FISH, J.; BELYTSCHKO, T. **A First Course in Finite Elements**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2007. ISBN 978-0-470-03580-1.

FOFANA, I. 50 years in the development of insulating liquids. **IEEE Electrical Insulation Magazine**, v. 29, n. 5, p. 13–25, 2013.

HAEGELE, S. et al. Investigation of interfacial surface creep breakdown at oil-pressboard interfaces in natural ester liquid and mineral oil. In: **2017 IEEE 19th International Conference on Dielectric Liquids (ICDL)**. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–5.

HIPOTRONICS. **Kilovoltmeters | Instruments | Test Equipment | Electrical & Electronic | Products | Hipotronics**. 2021. <<https://www.hubbell.com/hipotronics/en/Products/Electrical-Electronic/Test-Equipment/Instruments/Kilovoltmeters/c/2130487>>. (Accessed on 11/01/2021).

HVEX. **HVEX**. 2021. <<https://hvex.com.br/item/gerador-de-impulso-de-tensao>>. (Accessed on 11/01/2021).

IARONKA, O. **Metodologia para dimensionamento do projeto dielétrico de transformadores**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2019.

IEEE. Iec/ieee guide for the statistical analysis of electrical insulation breakdown data (adoption of tatd 930-2004). **IEC 62539 First Edition 2007-07 IEEE 930**, p. 1–53, 2007.

_____. Ieee standard for the design, testing, and application of liquid-immersed distribution, power, and regulating transformers using high-temperature insulation systems and operating at elevated temperatures. **IEEE Std C57.154-2012**, p. 1–49, 2012.

JACQUELIN, J. A reliable algorithm for the exact median rank function. **IEEE Transactions on Electrical Insulation**, v. 28, n. 2, p. 168–171, 1993.

JUNIOR, C. A. A. **Adequação do Projeto de Isolamento de Transformadores de Potência na Substituição do Óleo Mineral pelo Éster Natural**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Minas Gerais, 2019.

JUNIOR, J. H. **Otimização do projeto dielétrico de transformadores de distribuição por meio de simulações em elementos finitos**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Maria, 2018.

KANG, B. S. et al. Development of a new solid insulation for liquid-immersed transformers. In: **2014 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC)**. [S.l.: s.n.], 2014. p. 344–347.

KASSI, K. S. et al. Impact of local overheating on conventional and hybrid insulations for power transformers. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, v. 22, n. 5, p. 2543–2553, 2015.

_____. Decay products in mineral oil: A comparative study between hybrid and conventional insulation systems. In: **2014 IEEE 18th International Conference on Dielectric Liquids (ICDL)**. [S.l.: s.n.], 2014. p. 1–4.

- KULKARNI, S. V.; KHAPARDE, S. A. **Transformer Engineering Design and Practice**. [S.l.]: Marcel Dekker, 2004.
- LIU, R. et al. Ester fluids as alternative for mineral oil: The difference in streamer velocity and li breakdown voltage. In: **2009 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena**. [S.l.: s.n.], 2009. p. 543–548.
- MADENCI, E.; GUVEN, I. **The Finite Element Method and Applications in Engineering Using ANSYS®**. [S.l.]: Springer, 2015.
- MALAQUIAS, P. E. **Estudo da degradação do papel isolante através de ensaios de envelhecimento**. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual de Campinas, 2017.
- MARCHESAN, T. B.; HARMEL, D. F. Emprego do óleo vegetal isolante em transformadores de potência: uma abordagem dielétrica. In: **Décimo Quinto Encontro Regional Ibero-americano do CIGRÉ**. [S.l.: s.n.], 2013.
- MAREK, R.; PREVOST, T.; DUART, J. High temperature insulation systems: An option for resilient transformers. In: **2018 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T D)**. [S.l.: s.n.], 2018. p. 1–9.
- MARTIN, D.; WANG, Z. D. Statistical analysis of the ac breakdown voltages of ester based transformer oils. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, v. 15, n. 4, p. 1044–1050, 2008.
- MEDEIROS, L. H. **Desenvolvimento de um programa computacional para análise dielétrica de transformadores de potência imersos em óleo isolante**. (Trabalho de Conclusão de Curso) — Universidade Federal de Santa Maria, 2017.
- MEHTA, D. M. et al. A review of critical evaluation of natural ester vis-a-vis mineral oil insulating liquid for use in transformers: Part ii. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, v. 23, n. 3, p. 1705–1712, 2016.
- _____. A review on critical evaluation of natural ester vis-a-vis mineral oil insulating liquid for use in transformers: Part 1. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, v. 23, n. 2, p. 873–880, 2016.
- MORCOS, M.; CHERUKUPALLI, S. Review of statistical testing of solid insulating materials. In: **Proceedings of the 3rd International Conference on Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics**. [S.l.: s.n.], 1989. p. 574–581.
- MOSER, H. P. **Transformerboard**. [S.l.]: Scientia Electrica, 1979.
- MYUNG, I. J. Tutorial on maximum likelihood estimation. **Journal of Mathematical Psychology**, v. 47, n. 1, p. 90–100, 2003.
- NELSON, J. An assessment of the physical basis for the application of design criteria for dielectric structures. **IEEE Transactions on Electrical Insulation**, v. 24, n. 5, p. 835–847, 1989.

- NELSON, J.; SHAW, C. The impulse design of transformer oil-cellulose structures. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, v. 13, n. 3, p. 477–483, 2006.
- PREVOST. Dielectric properties of natural esters and their influence on transformer insulation system design and performance. In: **2005/2006 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition**. [S.l.: s.n.], 2006. p. 30–34.
- PREVOST, T.; FRANCKEK, M. Conductor insulation tests in oil: aramid vs. kraft. **IEEE Electrical Insulation Magazine**, v. 5, n. 4, p. 10–14, 1989.
- PREVOST, T.; OOMMEN, T. Cellulose insulation in oil-filled power transformers: Part i - history and development. **IEEE Electrical Insulation Magazine**, v. 22, n. 1, p. 28–35, 2006.
- PREVOST, T. A. Dielectric properties of natural esters and their influence on transformer insulation system design and performance – an update. In: **2009 IEEE Power Energy Society General Meeting**. [S.l.: s.n.], 2009. p. 1–7.
- QUADROS, A. M. **Papel Nomex[®] Utilizado em Transformadores: Avaliação das Características e Degradação Térmica**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2006.
- RAO, S. S. **The Finite Element Method in Engineering**. [S.l.]: Butterworth-Heinemann, 2011. ISBN 978-1-85617-661-3.
- RAPP, K. J. et al. Lightning impulse testing of natural ester fluid gaps and insulation interfaces. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, v. 16, n. 6, p. 1595–1603, 2009.
- RAPP, K. J.; VANDERMAAR, J.; FRANCKEK, M. A. Switching impulse of long oil gaps of natural ester fluid. In: **2012 International Conference on High Voltage Engineering and Application**. [S.l.: s.n.], 2012. p. 638–642.
- REAL. **Anéis e Toróides Anti-Corona - Real Conectores**. 2021. <<http://www.realconectores.com.br/produtos/aneis-e-toroides-anticorona>>. (Accessed on 11/01/2021).
- _____. **Classe 500 KV - Real Conectores**. 2021. <<http://www.realconectores.com.br/produtos/classe-500kv>>. (Accessed on 11/01/2021).
- RIBEIRO, C. d. J. et al. Faults and defects in power transformers - a case study. In: **2009 IEEE Electrical Insulation Conference**. [S.l.: s.n.], 2009. p. 142–145.
- RIES, W. **Transformadores - Fundamentos para Projeto e Cálculo**. [S.l.]: EDI-PUCRS, 2007.
- _____. _____. [S.l.]: EDI-PUCRS, 2007.
- RIZK, F. A.; TRINH, G. N. **High Voltage Engineering**. [S.l.]: CRC Press, 2014.

- ROSS, R. Graphical methods for plotting and evaluating weibull distributed data. In: **Proceedings of 1994 4th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM)**. [S.l.: s.n.], 1994. v. 1, p. 250–253 vol.1.
- _____. Bias and standard deviation due to weibull parameter estimation for small data sets. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, v. 3, n. 1, p. 28–42, 1996.
- ROZGA, P. Using the three-parameter weibull distribution in assessment of threshold strength of pressboard impregnated by different liquid dielectrics. **IET Science, Measurement & Technology**, v. 10, p. 665–670, 2016.
- ROZGA, P.; STANEK, M. Assessment of electrical strength of liquid immersed pressboard using three-parameter weibull distribution. In: **2016 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD)**. [S.l.: s.n.], 2016. p. 368–371.
- SHAW, C.; NELSON, J.; PREVOST, T. On the criterion for the design of oil-cellulose structures. In: **IEEE International Conference on Dielectric Liquids, 2005. ICDL 2005**. [S.l.: s.n.], 2005. p. 385–388.
- SILVA, D. C. da. **Avaliação da Interação de Materiais Internos do Transformador com Fluidos Isolantes Tipo Éster Natural e Óleo Mineral**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Paraná, 2013.
- SILVA, L. L. da. **Envelhecimento Acelerado Comparativo de Papéis Kraft Neutro e Termoestabilizado em Óleo Mineral e Éster Natural Isolantes**. Dissertação (Mestrado) — Instituto De Tecnologia para o Desenvolvimento, 2013.
- SOUZA, R. M. d. **O Método dos Elementos Finitos Aplicado ao Problema de Condução de Calor**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Pará, 2003.
- STONE, G. C.; HEESWIJK, R. G. V. Parameter estimation for the weibull distribution. **IEEE Transactions on Electrical Insulation**, EI-12, n. 4, p. 253–261, 1977.
- SUPPLIER. **Fonte Ca Trifásica - Supplier**. 2021. <<http://www.supplier.ind.br/produto/fontes-ca-trifasicas/8/fonte-ca-trifasica/213>>. (Accessed on 11/01/2021).
- SWINSCOW, T. D. V. **Statistics at Square One**. [S.l.]: BMJ Books, 2002.
- TENBOHLEN, S. et al. Application of vegetable oil-based insulating fluids to hermetically sealed power transformers. In: **CIGRE**. [S.l.: s.n.], 2008.
- TERMOFILTRO. **Purificadores Termovácuo - Termofiltro**. 2021. <<https://termofiltro.com.br/termovacuo.php>>. (Accessed on 11/01/2021).
- UEKI, M.; ZANIN, M. Influência de aditivos na rigidez dielétrica do polietileno de alta densidade. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 7, n. 4, p. 42–50, 1997.

- VECCIO, D. **Transformer Design Principles**. [S.l.]: Gordon and Breach Science Publishers, 2001.
- WANG, Z. et al. Breakdown characteristics of oil-paper insulation under lightning impulse waveforms with oscillations. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, v. 22, n. 5, p. 2620–2627, 2015.
- _____. _____. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, v. 22, n. 5, p. 2620–2627, 2015.
- WEIBULL. **Weibull Distribution: Characteristics of the Weibull Distribution**. 2021. <<https://www.weibull.com/hotwire/issue14/relbasics14.htm>>. (Accessed on 09/14/2021).
- WEIBULL, W. The phenomenon of rupture in solids. **Ingeniörs Vetenskaps Akademiens Handlingar**, n. 153, 1939.
- _____. A statistical theory of the strength of material. **Ingeniörs Vetenskaps Akademiens Handlingar**, n. 151, 1939.
- _____. A statistical distribution function of wide applicability). **Journal of Applied Mechanics**, v. 18, p. 293–297, 1951.
- WILHELM, H. M.; TULIO, L.; UHREN, W. Produção e uso de óleos vegetais isolantes no setor elétrico. **Engenharia (São Paulo)**, v. 592, p. 120–124, 2009.
- XU, X. et al. Screen test and analysis for eis design of liquid immersed transformer. In: **2018 12th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM)**. [S.l.: s.n.], 2018. p. 760–763.
- YANG, Y. et al. Sample sizes based on weibull distribution and normal distribution for frp tensile coupon test. **Materials**, v. 12, n. 126, p. 10, 2019.
- ZHANG, L.; XIE, M.; TANG, L. A study of two estimation approaches for parameters of weibull distribution based on wpp. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 92, n. 3, p. 360–368, 2007.
- ZHANG, X. et al. Thermal evaluation of high-temperature insulation system for liquid-immersed transformer. In: **2016 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC)**. [S.l.: s.n.], 2016. p. 272–275.
- ZIOMEK, W. et al. High voltage power transformer insulation design. In: **2011 Electrical Insulation Conference (EIC)**. [S.l.: s.n.], 2011. p. 211–215.

APÊNDICES

Apêndice A – Descrição dos equipamentos

Neste Apêndice serão apresentados com mais detalhes os equipamentos e elementos que compõem a configuração de ensaio para o modelo CB e T2T.

A.1 TRATAMENTO DO ÓLEO

O tratamento do óleo é realizado através da termo vácuo desenvolvida pela Termo Filtro, modelo TFI-500, apresentada na Figura A.1. O equipamento é fabricado exclusivamente para utilização em óleo isolante de transformadores, possui vazão de 500 L/h e controle ajustável de temperatura (TERMOFILTRO, 2021).

Figura A.1 – Termo vácuo utilizada para o tratamento do óleo.



Fonte: Autor.

Neste trabalho, adotou-se como fluido isolante o óleo vegetal Biovolt, fornecido pela empresa MineralTec (BIOVOLT, 2021). Foram adquiridos 2400 litros do fluido, conforme pode ser visto na Figura A.2.

Figura A.2 – Óleo vegetal Biovolt MineralTec.



Fonte: Autor.

A.2 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NA CONFIGURAÇÃO DE ENSAIO T2T

A alimentação do ensaio T2T é realizado através da fonte CA trifásica fabricada pela Supplier, modelo FCATH 10000-60-40 PFC, conforme é mostrado na Figura A.3 (SUPPLIER, 2021). O controle da fonte é realizado via interface remota, através de um *software* do fabricante, localizado em um computador na área de controle do laboratório, conforme apresentado na Figura A.4.

Para limitar a corrente do TP, conecta-se em série com a fonte um banco de resistores e um indutor com impedância total de $0,6 \Omega$ e $5,65 \Omega$, respectivamente. Tais elementos podem ser visualizados na Figura A.5.

Na Figura A.6 é apresentado o TP utilizado para a elevação da tensão, conectado em série ao indutor, banco de resistores e fonte. O equipamento é fabricado pela PFIFFNER, é do tipo EOF e possui uma classe de tensão de 220 kV entre fases, no lado de alta tensão. O lado de baixa tensão possui três terminais, permitindo escolher o nível de tensão desejado. Para este trabalho, adotou-se o terminal de 115 V.

O divisor de tensão da série KVM-W de 300 kV desenvolvido pela HIPOTRONICS, foi adquirido para realizar a medição da tensão durante os ensaios. O equipamento possui um módulo de medição sem fio e um aplicativo móvel, no qual é possível realizar diversas medições, incluindo medições CC, pico CA, RMS CA, média absoluta CA, frequência e fator de crista. Além disso, os dados medidos podem ser exportados no formato .csv. Na Figura A.7 é apresentado o equipamento e o seu aplicativo móvel (HIPOTRONICS, 2021).

Figura A.3 – Fonte trifásica Supplier.

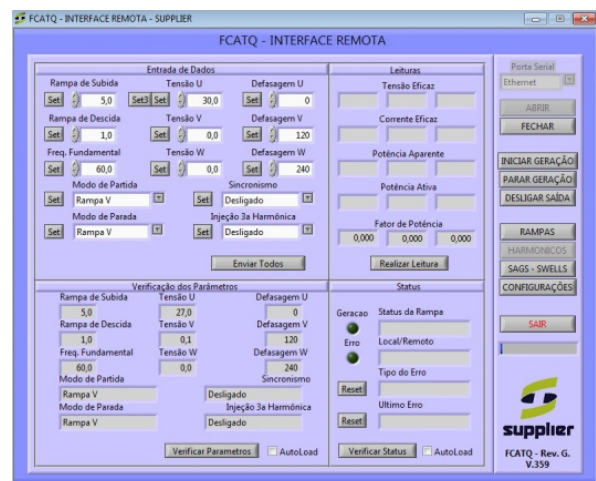


Fonte: Autor.

Figura A.4 – (a) Área de controle do laboratório. (b) *Software* do fabricante.



(a)



(b)

Fonte: Autor.

Figura A.5 – (a) Banco de resistores. (b) Indutor.



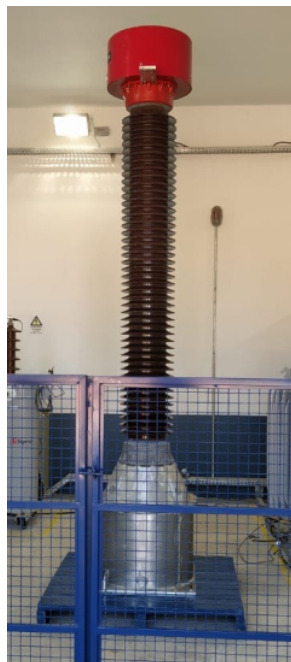
(a)



(b)

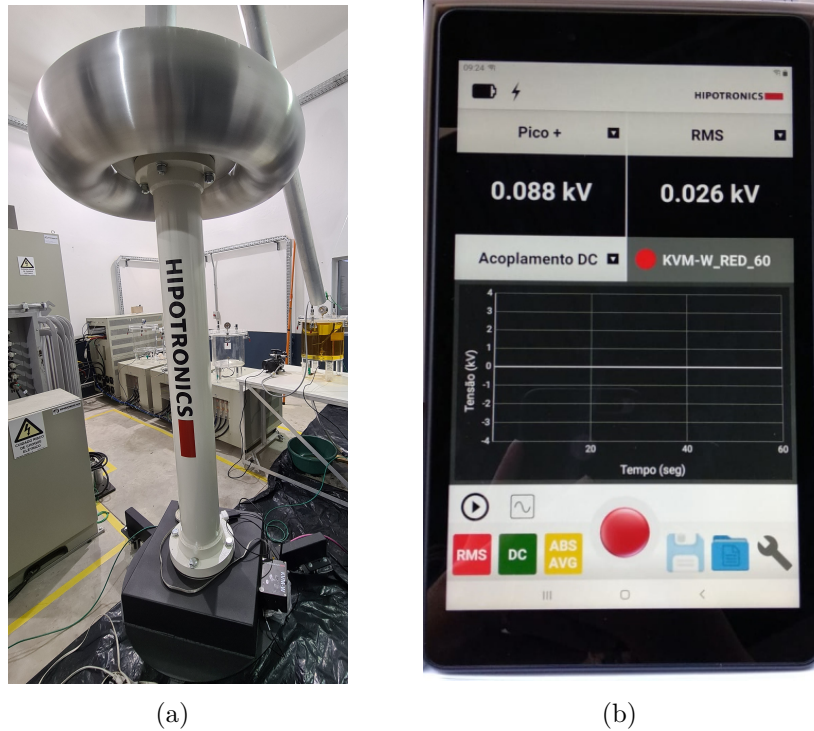
Fonte: Autor.

Figura A.6 – Transformador de potencial PFIFFNER.



Fonte: Autor.

Figura A.7 – (a) Divisor de tensão. (b) Aplicativo móvel.



Fonte: Autor.

Por fim, a configuração de ensaio no modelo T2T possui um conjunto de blindagens para ensaios na classe de tensão de até 550 kV, fabricado pela empresa Real Conectores, conforme Figura A.8. O conjunto consiste em tubos e conectores que envolvem o fio condutor, com a finalidade de manter o gradiente de tensão superficial abaixo do gradiente existente no respectivo condutor. Além disso, o conjunto possui anéis anti-corona, o qual possui a função principal de atuar como dissipador do gradiente de potencial em conectores (REAL, 2021a; REAL, 2021b).

Figura A.8 – Conjunto de blindagens.

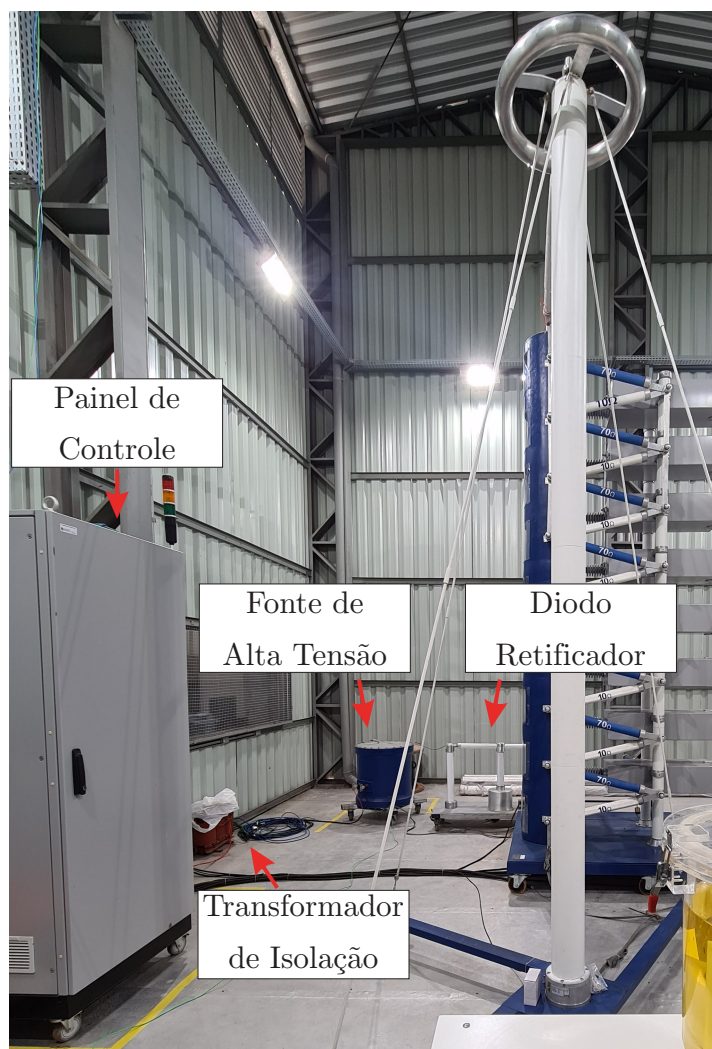


Fonte: Autor.

A.3 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NA CONFIGURAÇÃO DE ENSAIO CB

O conjunto gerador de impulso atmosférico, utilizado na configuração de ensaio CB, é fabricado pela empresa HVEX e é composto por: painel de controle, transformador de isolamento, fonte de alta tensão, diodo retificador e o gerador de impulso. O equipamento possui 8 módulos de 100 kV cada, com capacidade total de até 800 kV de tensão impulsiva. Além disso, utiliza-se um divisor de tensão responsável por medir a tensão durante os ensaios e um *software* que realiza o controle do GI (HVEX, 2021). Todos esses equipamentos e ferramentas podem ser visualizados nas Figuras A.9 e A.10.

Figura A.9 – Conjunto gerador de impulso.



Fonte: Autor.

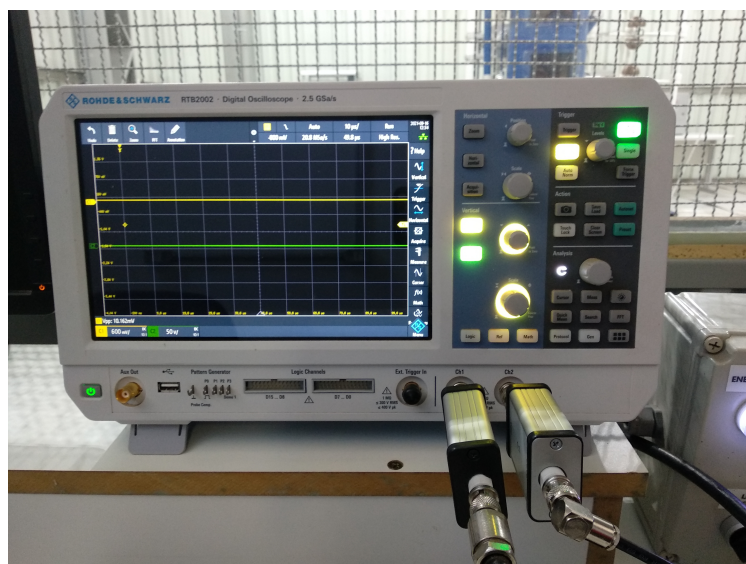
Figura A.10 – Gerador de impulso e divisor de tensão.



Fonte: Autor.

Por fim, tem-se o osciloscópio Rohde&Schwarz modelo RTB2004, mostrado na Figura A.11, utilizado para fazer a aquisição dos dados de ensaio. Este equipamento está localizado na área de controle do laboratório, juntamente do computador que realiza a operação do GI.

Figura A.11 – Osciloscópio Rohde&Schwarz localizado na área de controle do laboratório.



Fonte: Autor.