

Universidade Federal de Campina Grande - UFCG
Centro de Engenharia Elétrica e Informática - CEEI
Departamento de Engenharia Elétrica - DEE

Hebert Santos Crispim

**Relatório de Estágio Supervisionado - Local:
Laboratório de Alta Tensão (LAT) da UFCG**

Campina Grande, Brasil

Janeiro de 2025

Hebert Santos Crispim

Relatório de Estágio Supervisionado - Local: Laboratório de Alta Tensão (LAT) da UFCG

Relatório de Estágio Supervisionado submetido à Coordenação de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande, Campus Campina Grande, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Universidade Federal de Campina Grande - UFCG

Centro de Engenharia Elétrica e Informática - CEEI

Departamento de Engenharia Elétrica - DEE

Orientador: Pablo Bezerra Vilar, D.Sc.

Campina Grande, Brasil

Janeiro de 2025

Hebert Santos Crispim

Relatório de Estágio Supervisionado - Local: Laboratório de Alta Tensão (LAT) da UFCG

Relatório de Estágio Supervisionado submetido à Coordenação de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande, Campus Campina Grande, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Trabalho aprovado em: / /

Pablo Bezerra Vilar, D.Sc.
Orientador

**Luiz Augusto Medeiros Martins
Nobrega, D.Sc.**
Convidado

Campina Grande, Brasil
Janeiro de 2025

Agradecimentos

Inicialmente, expresso minha profunda gratidão a Deus por tudo que me proporciona, especialmente pela saúde e pelas pessoas que coloca em meu caminho.

Aos meus pais, Erika e Helder, e ao meu irmão Erik, meu mais sincero agradecimento pelo apoio incondicional ao longo da minha graduação. Sem vocês, essa conquista não seria possível.

Ao professor Pablo Bezerra Vilar, sou imensamente grato pela oportunidade de estágio e pesquisa sob sua orientação. Seu apoio foi essencial para a realização deste trabalho.

Aos colegas e profissionais do LAT, meu reconhecimento e apreço, em especial ao professor Valdemir da Silva Brito, pela paciência e dedicação em compartilhar seu conhecimento, e a Higor, cuja disposição e vasto conhecimento foram indispensáveis nessa trajetória.

Por fim, agradeço aos amigos de curso Ademar Santos, Edgley Carvalho, Matheus Muller, Marcus Vinicius, Nathan Ferreira, Iago Miguel e Rosmânia Marlla pelo auxílio e companheirismo ao longo dessa caminhada acadêmica.

"Só você pode dominar sua mente, e isso é o necessário para viver com ousadia e construir uma vida repleta de conquistas que a maioria das pessoas considera estar além da própria capacidade."

David Goggins

Resumo

Este relatório de estágio descreve atividades desenvolvidas no Laboratório de Alta Tensão (LAT), usando dos equipamentos e meios necessários do próprio laboratório para diversas atividades que o laboratório presta. O estágio foi realizado no LAT da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), com duração de 236 horas, entre 12/11/2024 a 31/01/2025, sob a orientação do professor Pablo Bezerra Vilar e supervisão do professor George Rossany Soares de Lira.

Palavras-chave: Transformador de Potencial Indutivo; Divisor de Tensão Universal; Ensaio Elétrico; Equipamentos de Proteção Individual, Normas Técnicas.

Abstract

This internship report describes the activities carried out at the High Voltage Laboratory (LAT), using the laboratory's own equipment and resources for various services it provides. The internship took place at the LAT of the Federal University of Campina Grande (UFCG), lasting 236 hours, from 11/12/2024 to 01/31/2025, under the guidance of Professor Pablo Bezerra Vilar and the supervision of Professor George Rossany Soares de Lira.

Key-words: Inductive Potential Transformer; Universal Voltage Divider; Electrical Tests; Personal Protective Equipment; Technical Standards.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Fachada do LAT.	3
Figura 2 – Fachada do LAT em Escala Ampliada.	3
Figura 3 – Salão de Alta Tensão (SAT).	4
Figura 4 – Exemplo de Divisor de Tensão Universal.	6
Figura 5 – Esquemático do TPI.	7
Figura 6 – Diagrama Fasorial da Tangente de Perdas.	10
Figura 7 – Esquemático do Circuito do Divisor de Tensão Universal.	13
Figura 8 – Compartimento do Circuito de Baixa Tensão do Divisor de Tensão Universal.	14
Figura 9 – Esquemático da Montagem do Ensaio de Tensão Alternada.	16
Figura 10 – Montagem Real do Ensaio de Tensão Alternada.	17
Figura 11 – Gráfico das Relação de Transformação Obtido no MATLAB- AC.	19
Figura 12 – Esquemático da Montagem do Ensaio de Tensão Contínua.	20
Figura 13 – Montagem Real do Ensaio de Tensão Contínua.	21
Figura 14 – Gráfico das Relações de Transformação Obtidos no MATLAB- DC.	23
Figura 15 – HiPOT.	25
Figura 16 – Gerador de tensão AC, 120 kV– 0,1 A.	26
Figura 17 – Mesa de Controle do Autotransformador de 120 kV.	26
Figura 18 – Luvas Isolantes - Classe 2.	27
Figura 19 – Luvas Isolantes - Classe 1	28
Figura 20 – Luvas Isolantes- Classe 0.	29
Figura 21 – Esquemático Para o Ensaio das Luvas de Borracha	30
Figura 22 – Ensaio Realizado com as Luvas de Borracha	30
Figura 23 – Luva Reprovada	32
Figura 24 – Bastões De Manobra.	33
Figura 25 – Esquemático Para o Ensaio da Vara de Manobra.	33
Figura 26 – Ensaio Realizado com os Bastões de Manobra.	34
Figura 28 – Esquemático para o ensaio dos tapetes isolantes.	36
Figura 27 – Tapetes isolantes utilizados no ensaio, destacando suas vistas superior e inferior.	37
Figura 29 – Montagem para ensaio dos tapetes isolantes, com destaque para a disposição dos equipamentos.	38
Figura 30 – Ensaio sobre tapete isolante, realizado por quadrantes.	39
Figura 31 – Transformador de Potencial Indutivo (UTF-245).	41
Figura 32 – Esquemático do Arranjo Experimental Utilizado	42
Figura 33 – Montagem do Ensaio do TPI.	43

Figura 34 – Esquemático do Ensaio de Descargas Parciais.	44
Figura 35 – Montagem do Ensaio de Descargas Parciais.	45
Figura 36 – Modelo do JFD Utilizado.	46
Figura 37 – Calibração para O Estudo de DP.	47
Figura 38 – Equipamento Hioki3455.	49
Figura 39 – Ensaio da Isolação Entre o Enrolamento do Primário e a Carcaça = Ra.	50
Figura 40 – Ensaio da Isolação entre os Enrolamentos do Secundário e a Carcaça.	50
Figura 41 – Ensaio da Isolação Entre os Enrolamentos Secundários.	51
Figura 42 – Equipamento MIDAS.	52
Figura 43 – Ensaio de Tangente de Perdas.	54
Figura 44 – Peças Fabricadas para Coleta de Óleo Isolante.	55
Figura 45 – Procedimento de Extração do Óleo Isolante.	56
Figura 46 – Amostra de Óleo Isolante Coletada.	56

Lista de abreviaturas e siglas

LAT: Laboratório de Alta Tensão

TPI: Transformador de Potencial Indutivo

DEE: Departamento de Engenharia Elétrica

CEEI: Centro de Engenharia Elétrica e Informática

UFMG: Universidade Federal de Campina Grande

IEC: *International Electrotechnical Commission*

AC: *Alternating Current*- Corrente Alternada

DC: *Direct Current*- Corrente Contínua

IEEE: *Institute of Electrical and Electronics Engineers*

EPC: Equipamento de Proteção Coletiva

EPI: Equipamento de Proteção Individual

RT: Relação de Transformação

LI: *Lightning Impulse*- Impulsos Atmosféricos

SI: *Switching Impulses*- Impulsos de Manobra

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Objetivos	1
2	LOCAL DO ESTÁGIO	2
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	5
3.1	Divisores de Tensão Universais	5
3.2	Transformadores de Potencial Indutivos	6
3.3	Descargas Parciais	8
3.4	Tangente de Perdas	9
3.5	Normas Técnicas em Equipamentos de Alta Tensão	10
4	ATIVIDADES REALIZADAS	12
4.1	Ensaio do Divisor de Tensão Universal	12
4.1.1	Ensaio Com Tensão Alternada	15
4.1.2	Ensaio Com Tensão Contínua	20
4.2	Ensaio em Equipamentos de Segurança	23
4.2.1	Equipamentos Utilizados	24
4.2.2	Ensaio Em Luvas Isolantes	27
4.2.2.1	Resultados	31
4.2.3	Ensaio Em Bastões de Manobra	32
4.2.3.1	Resultados	34
4.2.4	Ensaio em Tapetes Isolantes	36
4.2.4.1	Resultados	38
4.3	Ensaio Em Transformadores de Potencial Indutivo	39
4.3.1	Metodologia Aplicada	41
4.3.2	Ensaio de Tensão Suportável à Frequência Industrial a Seco	43
4.3.3	Ensaio de Descargas Parciais	44
4.3.3.1	Equipamentos Utilizados Na Medição	45
4.3.3.2	Resultados Obtidos	47
4.3.4	Ensaio de Resistência de Isolamento	47
4.3.4.1	Equipamentos Utilizados	48
4.3.4.2	Resultados Obtidos	49
4.3.5	Ensaio de Tangente de Perdas e Capacitâncias	51
4.3.5.1	Equipamentos Utilizados	52
4.3.5.2	Resultados Obtidos	53

4.3.6	Análise Físico-Química e Cromatográfica de Óleo Isolante	55
4.3.6.1	Resultados Obtidos	57
5	CONCLUSÃO	60
	REFERÊNCIAS	62

1 Introdução

Neste documento são descritas as atividades desenvolvidas pelo discente Hebert Santos Crispim durante o Estágio Supervisionado de 236 horas. O estágio foi realizado no Laboratório de Alta Tensão (LAT), durante 12/11/2024 até 31/01/2025, sob a orientação do professor Pablo Bezerra Vilar e a supervisão do professor George Rossany Soares de Lira.

Este estágio supervisionado teve como objetivo o cumprimento da disciplina Estágio Curricular, parte integrante da grade do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). A disciplina é fundamental para a formação profissional, proporcionando ao aluno a oportunidade de aplicar na prática os conhecimentos adquiridos ao longo do curso.

1.1 Objetivos

Foram desenvolvidas diversas atividades durante o estágio, dando apoio, principalmente as diferentes áreas de atuação do Laboratório de Alta Tensão. Desse modo, foram realizadas as seguintes atividades: acompanhamento e execução de ensaios em equipamentos elétricos de alta tensão e equipamentos de proteção individual/coletiva, elaboração de orçamentos para serviços, elaboração de projetos para a captação de recursos, manutenção na infraestrutura do laboratório, participação em campanhas de medição e elaboração de laudos técnicos.

2 Local do Estágio

O Laboratório de Alta Tensão ([LAT-UFCG, 2024](#)) faz parte do Departamento de Engenharia Elétrica (DEE) do Centro de Engenharia Elétrica e Informática (CEEI) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), localizado no campus de Campina Grande, Paraíba. Localizado na cidade de Campina Grande, no planalto da Borborema, o LAT/UFCG tem por meta a excelência no ensino, pesquisa e extensão relativos aos equipamentos elétricos e à engenharia de alta tensão, bem como seus temas afins.

O laboratório conta com uma infraestrutura moderna que inclui:

- Sala do Laboratório de Materiais e Equipamentos Elétricos (LMEE);
- Salão de Alta Tensão (SAT);
- Sala do Gerador de Impulso de Corrente (LGIC);
- Sala do Laboratório de Descargas Parciais (LDP);
- Laboratório de Isolamento Elétricos (LABIS);
- Laboratório de Eletrônica Aplicada a Sistemas Elétricos (LEASE);
- Laboratório de Simulações Multifísicas (LSM);
- Laboratório de Qualidade da Energia (LQE).

Realizam-se ensaios e testes elétricos em alta tensão sobre equipamentos e componentes de sistemas elétricos de potência tais como: transformadores, cabos, isoladores, para-raios, chaves, religadores, disjuntores, reguladores de tensão e cruzetas, em classes de até 500 kV.

Desenvolvem-se ainda projetos de pesquisas em conjunto com empresas de energia elétrica, bem como há a emissão de relatórios, laudos e pareceres técnicos conforme exigências da legislação brasileira e internacional.

A equipe do LAT/UFCG é composta por professores, técnicos administrativos, engenheiros, mestres e doutores em engenharia elétrica, além de estagiários (estudantes de graduação em engenharia elétrica da Universidade Federal de Campina Grande).

As Figuras 1 e 2 apresentam a fachada do prédio onde se localiza o localiza o LAT/UFCG, destacando sua infraestrutura que oferece um ambiente propício para a realização de atividades acadêmicas e de pesquisa.

Figura 1 – Fachada do LAT.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 2 – Fachada do LAT em Escala Ampliada.



Fonte: Autoria Própria.

A Figura 3 apresenta uma das partes internas do prédio, mais especificamente, o Salão de Alta Tensão, onde são realizados alguns dos ensaios do laboratório.

Figura 3 – Salão de Alta Tensão (SAT).



Fonte: Aatoria Própria.

3 Fundamentação Teórica

Este capítulo apresenta os conceitos teóricos fundamentais que sustentam as atividades desenvolvidas durante o estágio.

3.1 Divisores de Tensão Universais

Os divisores de tensão de alta precisão são equipamentos essenciais em medições e ensaios realizados em sistemas elétricos de alta tensão. Eles são amplamente utilizados para medir altos valores de tensão, na ordem de kilovolt (kV) e desacoplar descargas parciais em sistemas de teste. Dependendo do tipo, esses dispositivos podem ser empregados na medição de tensões alternadas (AC), contínuas (DC), impulsos atmosféricos (LI) e impulsos de manobra (SI) ([HIGHVOLT Prüftechnik Dresden GmbH, 2025](#)).

Projetados para operar em conformidade com normas internacionais, como as da *International Electrotechnical Commission* (IEC), esses divisores garantem medições precisas, confiáveis e seguras. Sua versatilidade permite seu uso em ambientes internos e externos, sendo uma solução ideal para laboratórios, indústrias de energia elétrica e ensaios de isolamento. Eles são cruciais para a calibração e verificação de componentes elétricos, como transformadores, cabos e dispositivos de proteção, assegurando que os equipamentos de transmissão e distribuição estejam em conformidade com os requisitos normativos e operacionais.

Os divisores de tensão geralmente consistem em dois tipos de elementos: resistivos e/ou capacitivos. A escolha do elemento depende da aplicação, mas ambos funcionam para dividir a tensão proporcionalmente. Combinando precisão e segurança, esses equipamentos desempenham um papel fundamental na garantia de desempenho confiável e seguro em sistemas elétricos de alta tensão.

A figura 4 exemplifica um divisor de tensão universal, este, desenvolvido pela *HIGHVOLT Prüftechnik Dresden GmbH*.

Figura 4 – Exemplo de Divisor de Tensão Universal.



Fonte: ([HIGHVOLT Prüftechnik Dresden GmbH, 2025](#)).

3.2 Transformadores de Potencial Indutivos

Os transformadores de potencial indutivos, também conhecidos como *Voltage Transformers* (VTs) ou *Potential Transformers* (PTs), são dispositivos essenciais em sistemas de potência, projetados para reduzir tensões elevadas para níveis seguros e mensuráveis. Esses equipamentos desempenham um papel vital na proteção, medição e monitoramento de redes elétricas, garantindo segurança e precisão nas operações.

O princípio de funcionamento de um transformador de potencial indutivo baseia-se no fenômeno de indução eletromagnética. Ele é composto por dois enrolamentos principais: o enrolamento primário, conectado diretamente ao sistema de alta tensão, e o enrolamento secundário, que fornece uma tensão proporcionalmente reduzida. A relação entre as tensões nos enrolamentos é definida pela razão de transformação, a qual é cuidadosamente ajustada para atender aos requisitos específicos de cada aplicação ([CAMARGO, 2015](#)).

Esses transformadores são amplamente utilizados para:

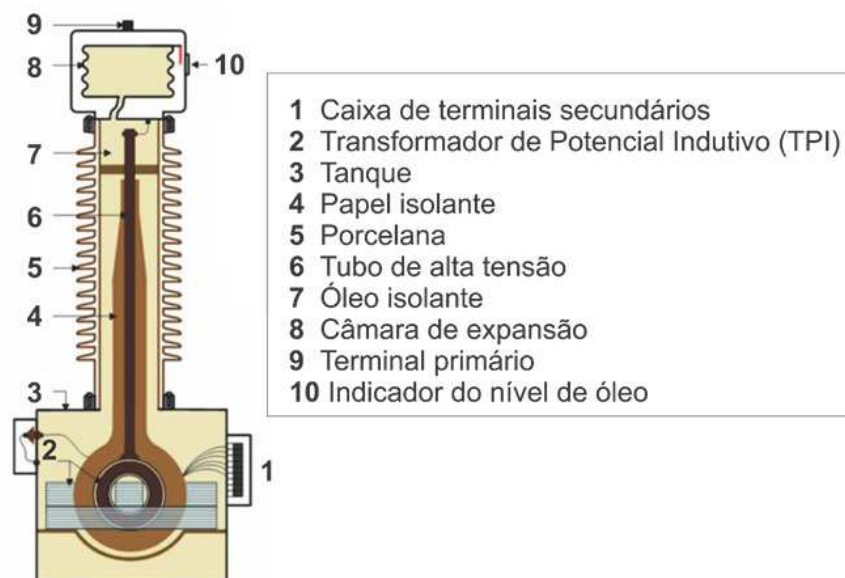
- Alimentar instrumentos de medição (faturamento), como voltímetros e fasímetros, com tensões reduzidas;
- Fornecer entradas para relés de proteção em sistemas elétricos, permitindo que esses dispositivos operem de forma confiável em situações de falhas;
- Monitorar a qualidade da energia em redes de transmissão e distribuição, verificando tensões e detectando desvios que possam comprometer a estabilidade do sistema.

Transformadores de potencial indutivos apresentam as seguintes vantagens:

- Isolamento galvânico entre os circuitos primário e secundário, garantindo que os transitórios no lado primário não se propaguem com a mesma intensidade para o lado secundário;
- Precisão elevada, o que os torna ideais para aplicações de medição;
- Durabilidade e confiabilidade em ambientes de alta tensão.

A figura 5 apresenta as características construtivas de um transformador de potencial indutivo típico.

Figura 5 – Esquemático do TPI.



Fonte: Adaptado de (JUNIOR, 2008).

Estes transformadores devem atender a normas internacionais, como a (IEC 61689-1, 2020), que especifica os critérios de desempenho, precisão e segurança em sistemas

elétricos. Em redes de transmissão e distribuição de energia elétrica, os transformadores de potencial indutivos são essenciais para a integração de sistemas de medição e proteção. Sua precisão na redução de tensões para níveis utilizáveis garante que os equipamentos conectados operem dentro de suas especificações, evitando riscos durante sua operação e garantindo a eficiência do sistema como um todo.

3.3 Descargas Parciais

As descargas parciais (DPs) são fenômenos elétricos que ocorrem em materiais isolantes submetidos a campos elétricos elevados, mas sem provocar falha imediata do isolamento. De acordo com a norma (IEC-60270, 2017) essas descargas representam descargas elétricas que curto-circuitam parcialmente a isolação entre condutores e podem ocorrer tanto no interior do dielétrico quanto em suas proximidades. Embora não resultem em falhas instantâneas, as DPs aceleram a degradação do isolamento, reduzindo a vida útil dos equipamentos elétricos (NATTRASS, 1988).

Essas descargas podem ser classificadas em três categorias principais: internas, superficiais e corona. As descargas internas ocorrem em cavidades dentro do material isolante, devido à menor rigidez e permissividade dielétrica dos gases em comparação com isolantes sólidos ou líquidos. Esse fenômeno leva à intensificação do campo elétrico na cavidade, favorecendo a ocorrência de descargas. Segundo (ZINGALES, 2000), essas descargas possuem curta duração em relação ao período da tensão aplicada e podem ser modeladas matematicamente como uma função impulso ou delta de Dirac.

As descargas superficiais manifestam-se com a parte externa (ar atmosférico). Já as descargas corona ocorrem em meios gasosos quando o campo elétrico próximo a um eletrodo excede um determinado limiar, mas ainda é insuficiente para provocar um arco elétrico.

Embora as descargas parciais não causem falha imediata, seu efeito acumulativo compromete a rigidez dielétrica dos materiais, podendo resultar em falhas mais severas. Entre os principais danos, destacam-se a carbonização do isolante, formação de caminhos condutivos e degradação química devido à produção de calor.

A norma (IEC-60270, 2017) estabelece diretrizes para a medição das descargas parciais, sendo amplamente utilizada para avaliação da qualidade do isolamento em equipamentos de alta tensão. O monitoramento contínuo dessas descargas é essencial para a manutenção preditiva, permitindo identificar falhas em estágios iniciais e evitar danos graves.

3.4 Tangente de Perdas

A tangente de perdas, frequentemente representada como $\tan \delta$, é uma medida importante na avaliação das características dielétricas de materiais isolantes. Ela expressa a relação entre as perdas de energia e a energia armazenada em um material isolante quando sujeito a um campo elétrico alternado. Essas perdas são essencialmente uma forma de dissipação de energia na forma de calor devido à resistência do material isolante à corrente alternada (AC).

A tangente de perdas é um parâmetro crucial em sistemas de alta tensão, pois indica a eficiência do material isolante em resistir à corrente alternada sem gerar perdas excessivas. Quando $\tan \delta$ é alta, isso indica que o material isolante está sofrendo mais perdas, o que pode levar a um aumento na temperatura do sistema, acelerando o envelhecimento do material e, em última instância, reduzindo a vida útil do equipamento.

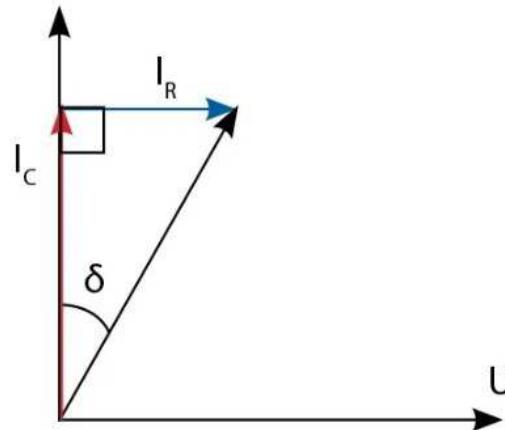
O valor de $\tan \delta$ pode ser determinado por medições de impedância ou, de forma mais direta, pela medição do fator de dissipação em testes de alta tensão. O comportamento do material em relação à tangente de perdas também está diretamente relacionado com sua umidade, temperatura e composição química. Materiais com $\tan \delta$ muito alto podem ser indicativos de degradação do isolamento, como o efeito de envelhecimento de cabos, transformadores ou outros componentes dielétricos.

Em sistemas de energia elétrica, a tangente de perdas é utilizada como um indicador da qualidade do isolamento e para prever falhas iminentes. A norma (IEC 60243-1, 2013) especifica os métodos para a medição da tangente de perdas, sendo fundamental para garantir a segurança e confiabilidade do sistema elétrico. Para a análise de cabos e transformadores, o monitoramento regular da tangente de perdas pode indicar a necessidade de manutenção preventiva ou a substituição do material isolante, evitando falhas mais graves.

O valor típico de $\tan \delta$ para materiais isolantes saudáveis é baixo, mas tende a aumentar com o tempo devido à degradação térmica ou umidade. A presença de $\tan \delta$ alto pode ser usada como um critério para diagnósticos e decisões sobre a vida útil dos equipamentos.

A figura 6 apresenta o diagrama fasorial que representa a corrente capacitiva, corrente resistiva e o ângulo utilizado para o cálculo da tangente de perdas.

Figura 6 – Diagrama Fasorial da Tangente de Perdas.



3.5 Normas Técnicas em Equipamentos de Alta Tensão

As normas térmicas têm como objetivo estabelecer diretrizes e critérios técnicos que asseguram o desempenho seguro e eficaz de equipamentos elétricos, em especial aqueles sujeitos a condições de alta tensão. Elas garantem que os componentes operem dentro de limites térmicos específicos, prevenindo danos causados por aquecimento excessivo. No contexto da engenharia elétrica, essas normas são essenciais para a especificação de testes e para a validação de dispositivos que desempenham funções críticas em sistemas elétricos.

Essas normas são particularmente importantes quando se trata de equipamentos operando em alta tensão, como transformadores de potencial, dispositivos de manobra e luvas de borracha utilizadas por técnicos eletricitas em campo. O controle térmico desses sistemas é vital, pois o aquecimento inadequado pode comprometer a eficiência dos materiais isolantes, causar falhas prematuras nos componentes e gerar riscos de segurança para os operadores.

Os equipamentos de proteção individual (EPIs) e ferramentas utilizadas em operações elétricas, como as luvas de borracha isolantes e varas de manobra, desempenham um papel crucial na segurança dos trabalhadores que atuam em instalações de alta e média tensão. Para assegurar a confiabilidade e eficiência desses dispositivos, normas técnicas específicas regulam os métodos de teste e os critérios de aceitação.

Além dos EPIs, os Equipamentos de Proteção Coletiva (EPCs) também desempenham um papel essencial na segurança das operações elétricas. Os EPCs reduzem os riscos para todos os trabalhadores no ambiente. Dentre esses equipamentos, os tapetes isolantes se destacam por proporcionar uma barreira eficaz contra choques elétricos, impedindo o contato direto com o solo. Outro EPC fundamental é o sistema de aterramento temporário, que desvia correntes indesejadas e protege os trabalhadores contra descargas elétricas acidentais. Esses dispositivos são regulamentados por normas técnicas que estabelecem

requisitos de fabricação, ensaios e aplicação, garantindo sua eficácia na proteção coletiva.

4 Atividades Realizadas

Durante o estágio supervisionado no LAT foram desenvolvidas atividades de diversas finalidades, desde a manutenção, até a prestação de serviços com a realização de ensaios em equipamentos elétricos e em equipamentos de proteção individual e coletiva.

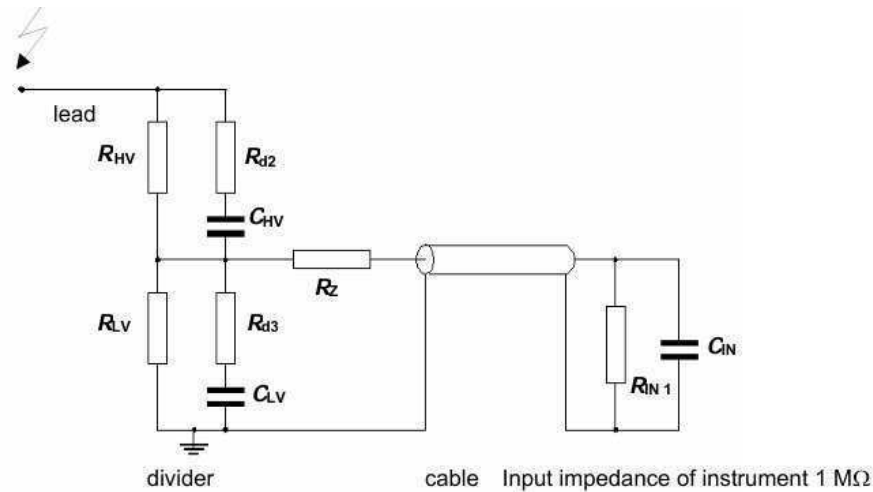
4.1 Ensaio do Divisor de Tensão Universal

O laboratório dispõe de um divisor universal da *Universal Voltage Reference Measuring Divider*, desenvolvido pela *HIGHVOLT Prüftechnik Dresden GmbH*. Este equipamento desempenha um papel fundamental em medições, especialmente em ensaios de sistemas de alta tensão. No entanto, ao longo de sua utilização, foram identificadas discrepâncias nos valores medidos, associadas a alterações na relação de transformação (RT) do divisor. Tais variações sugerem possíveis modificações nos componentes internos do equipamento, o que pode ter comprometido sua precisão e confiabilidade.

Com base nessas observações, a equipe do laboratório realizou uma inspeção detalhada e identificou a necessidade de manutenção. Como parte desse processo, foi efetuada a remoção de um capacitor do circuito de baixa tensão, com o objetivo de restaurar a confiabilidade e a precisão do equipamento. Após essa modificação, foram realizados dois ensaios distintos para determinar a nova relação de transformação do divisor e avaliar sua adequação para futuras aplicações.

A figura 7 apresenta o esquema elétrico do divisor de tensão universal, conforme fornecido pelo fabricante. Esse esquema permite compreender a disposição dos componentes principais e como eles interagem no processo de divisão de tensões. Complementarmente, a tabela 1 fornece os parâmetros e os valores fornecidos pela fabricante antes da manutenção, essenciais para comparação e análise das alterações realizadas.

Figura 7 – Esquemático do Circuito do Divisor de Tensão Universal.



Fonte: Adaptado de ([HIGHVOLT Prüftechnik Dresden GmbH, 2025](#)).

O circuito de baixa tensão do divisor de tensão universal, representado na figura 8, desempenha um papel importante na determinação da impedância total do equipamento. Esse circuito é composto por uma combinação de resistores e capacitores, representados por R_{LV} e C_{LV} . Alterações nesses componentes afetam diretamente o fator de escala do divisor.

Figura 8 – Compartimento do Circuito de Baixa Tensão do Divisor de Tensão Universal.



Fonte: Autorial Própria.

A realização da manutenção no circuito de baixa tensão visava realizar a manutenção do equipamento e depois determinar a nova relação de transformação. Essas mudanças impactam diretamente as partes capacitiva e resistiva do divisor, que são calculadas pelas equações a seguir, considerando as condições ideais, sem capacitâncias parasitas:

Parte capacitiva do divisor:

A relação capacitiva é definida pela Equação (4.1):

$$F_{DC} = \frac{C_{HV} + C_{LV} + C_C}{C_{HV}} \quad (4.1)$$

Parte resistiva do divisor:

A relação resistiva é expressa pela Equação (4.2):

Tabela 1 – Parâmetros e Valores Fornecidos pelo Fabricante. (HIGHVOLT Prüftechnik Dresden GmbH, 2025)

Parâmetro	Símbolo	Valor
Capacitância na alta tensão	C_{HV}	0,5798 nF
Capacitância da parte de baixa tensão	C_{LV}	303,58 nF
Capacitância do cabo de medição L35/25	C_C	2,536 nF
Resistência na alta tensão	R_{HV}	499,17 M Ω
Resistência na baixa tensão	R_{LV}	16,091 M Ω
Resistor de terminação na entrada do cabo	R_Z	50 Ω
Resistência de entrada do instrumento HiRES S4D	$R_{in\ instrument}$	1 M Ω
Resistência resultante na baixa tensão	$R_{LV\ res}$	0,94149 M Ω
Resistor de amortecimento externo para LI, SI	$R_{D\ extern}$	351,7 Ω
Fator de escala calculado do divisor, parte capacitiva	F_{DC}	529,0
Fator de escala calculado do divisor, parte resistiva	F_{DR}	531,2

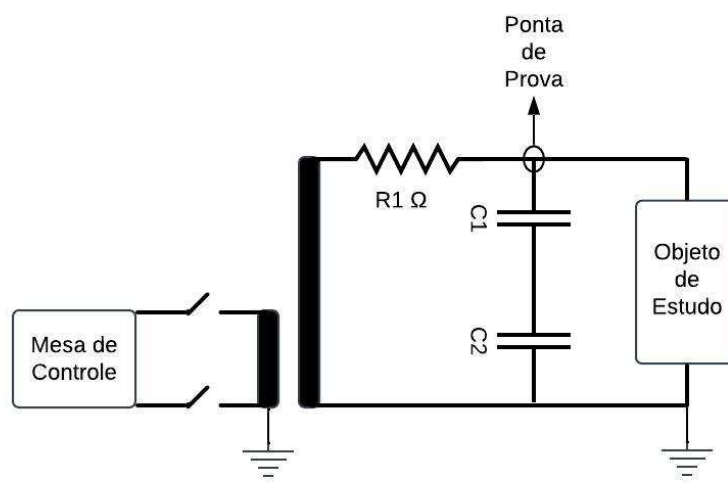
$$F_{DR} = \frac{R_{LV\ res} + R_{HV}}{R_{LV\ res}} \quad (4.2)$$

A partir dessas equações, é possível verificar como as alterações nos componentes influenciam o comportamento global do divisor e, conseqüentemente, a precisão das medições realizadas com o equipamento. Esses resultados serão fundamentais para validar a reutilização do divisor em novos ensaios e garantir que as medições atendam aos padrões de qualidade estabelecidos.

4.1.1 Ensaio Com Tensão Alternada

O objetivo deste ensaio é determinar a nova relação de transformação do divisor universal após a manutenção realizada. A Figura 9 apresenta o esquemático da montagem experimental utilizada para aferição dos valores com tensão alternada.

Figura 9 – Esquemático da Montagem do Ensaio de Tensão Alternada.



Fonte: Autoria Própria.

Com base no esquemático da Figura 9, a Figura 10 ilustra a montagem real do ensaio no laboratório. Essa configuração envolveu o uso de um autotransformador, um resistor e o divisor universal como objeto de estudo.

Figura 10 – Montagem Real do Ensaio de Tensão Alternada.



Fonte: Autoria Própria.

Os valores medidos durante o experimento estão apresentados na Tabela 2. Esses resultados incluem as tensões obtidas em uma ponta de prova de alta tensão (15 kV), variando em função do ajuste da tensão no autotransformador.

Tabela 2 – Valores Obtidos no Ensaio com Tensão Alternada.

Divisor Universal (V)	Ponta de Prova (V)
1,86	946
4,1	2090
6,98	3480
8,91	4500
11,6	5870
12,7	6460
15,4	7800
16,6	8450
19,1	9710
21,8	11000
23,3	11800
25,9	13100
28,5	14600

A partir dos dados apresentados, foram determinados os seguintes resultados para a nova relação de transformação, levando em consideração a tensão aplicada e a tensão aferida no divisor. Os valores finais para cada gráfico são apresentados considerando a média e o desvio padrão associados:

Os valores medidos para a relação de transformação em cada ponto são:

- **Valores Médios:**

- 508.6022
- 509.7561
- 498.5673
- 505.0505
- 506.0345
- 508.6614
- 506.4935
- 509.0361
- 508.3770
- 504.5872
- 506.4378
- 505.7915
- 512.2807

O valor médio calculado para o gráfico foi:

- $RT_{\text{média}} = 506.8981$

O valor ajustado por regressão linear foi:

- $RT_{\text{regressão}} = 509.1069$

O desvio padrão calculado para o conjunto de medições foi:

- $\sigma = 3.2966$

Para facilitar a interpretação e utilização dos resultados, os valores finais para o gráfico foi determinado como a média dos valores calculados pela relação de transformação pontual e pela regressão linear. Esses valores incluem o desvio padrão associado:

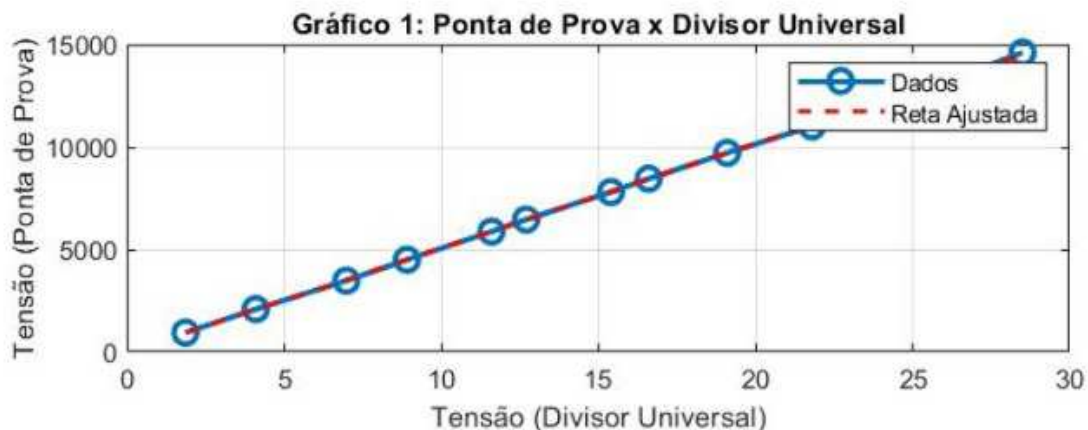
-

$$RT_{\text{final}} = 508.00 \pm 3.30$$

Esse valor final indica a relação de transformação média com sua incerteza, considerando os métodos estatísticos aplicados. A análise confirma a consistência dos dados e valida a manutenção realizada no divisor de tensão universal.

A análise dos dados obtidos durante o ensaio foi complementada com a geração de gráficos no MATLAB, que ilustram a relação de transformação para os diferentes pontos medidos. A Figura 11 apresenta os gráficos correspondentes às medições da Ponta de Prova.

Figura 11 – Gráfico das Relação de Transformação Obtido no MATLAB- AC.



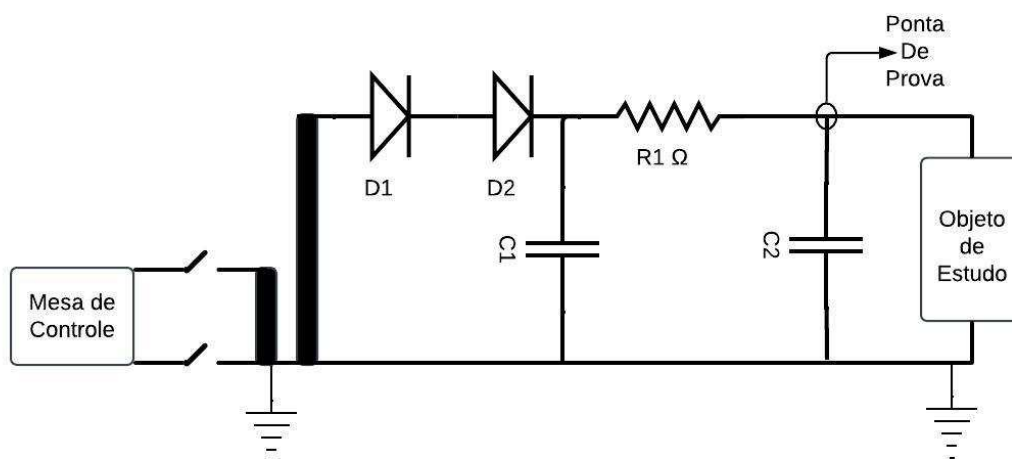
Fonte: Autoria Própria.

O gráfico permite uma visualização clara do comportamento da relação de transformação em função dos ajustes realizados no autotransformador.

4.1.2 Ensaio Com Tensão Contínua

Neste ensaio, foi avaliada a relação de transformação do divisor universal utilizando tensão contínua. A Figura 12 apresenta o esquemático da montagem realizada para o experimento.

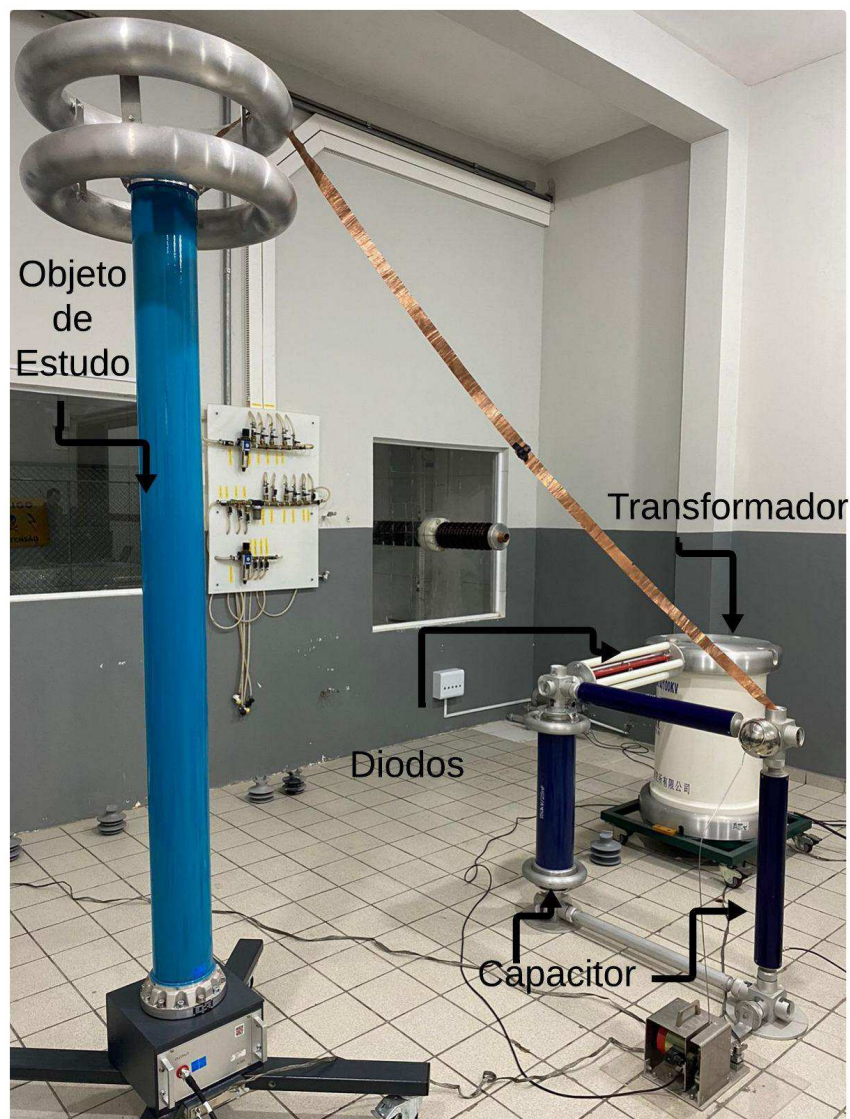
Figura 12 – Esquemático da Montagem do Ensaio de Tensão Contínua.



Fonte: Autoria Própria.

A Figura 13 mostra a montagem real do sistema, realizada no laboratório, seguindo o esquemático da Figura 12.

Figura 13 – Montagem Real do Ensaio de Tensão Contínua.



Fonte: Autorial Própria.

Os valores obtidos no experimento estão apresentados na Tabela 3. Esses resultados incluem as tensões medidas no divisor universal, na ponta de prova e na mesa de controle, permitindo a avaliação detalhada do desempenho do divisor universal.

Tabela 3 – Valores Obtidos no Ensaio com Tensão Contínua.

Divisor Universal (V)	Ponta de Prova (V)
2,21	1190
5,08	2790
9,13	5090
12	6660
15,2	8460
18,3	10200
21,1	11900
23	12900

A partir dos dados apresentados, foram determinados os seguintes resultados para a relação de transformação. Os valores finais para o gráfico são apresentados considerando a média e o desvio padrão associados:

Divisões Pontuais (Tensão Retificada x Divisor):

- 538.4615
- 549.2126
- 557.5027
- 555.0000
- 556.5789
- 557.3770
- 563.9810
- 560.8696

Os valor médio calculados para o gráfico foi:

- (Ponta de Prova após Diodos): 554.8729

O valor ajustado por regressão linear foi:

- 564.2050

O desvio padrão calculado para o conjunto de medições foi:

- 7.8958

Esses dados são essenciais para calcular a relação de transformação do divisor universal, verificando a precisão do mesmo e sua viabilidade para aplicações futuras. Para facilitar a interpretação e utilização dos resultados, o valor final para o gráfico foi determinado como a média dos valores calculados pela relação de transformação pontual e pela regressão linear. Esses valores incluem o desvio padrão associado:

$$RT_{\text{final}} = 564.21 \pm 7.90$$

Esse valor final indicam a relação de transformação média com sua incerteza, considerando os métodos estatísticos aplicados.

A análise dos dados obtidos durante o ensaio foi complementada com a geração de gráficos no MATLAB, que ilustra a relação de transformação para os diferentes pontos medidos. A Figura 14 apresenta o gráfico correspondente às medições da Ponta de Prova.

Figura 14 – Gráfico das Relações de Transformação Obtidos no MATLAB- DC.



Fonte: Autoria Própria.

O gráfico permite uma visualização clara do comportamento da relação de transformação em função dos ajustes realizados no autotransformador para a tensão contínua aplicada.

4.2 Ensaio em Equipamentos de Segurança

Os equipamentos utilizados em serviços que envolvem eletricidade devem ser submetidos a ensaios elétricos verificando a eficácia do isolamento e caracterizando a condição dielétrica do material, para que evitem riscos na operação e na integridade física dos envolvidos. A principal finalidade desses ensaios é constatar a integridade do isolamento dos equipamentos e ferramentas, mantendo assim a sua capacidade de proteção.

4.2.1 Equipamentos Utilizados

Para a realização dos ensaios em Equipamentos de Proteção Individual (EPIs) e Equipamentos de Proteção Coletiva (EPCs), foi utilizado um **HiPOT** de alta tensão. Um hipot (abreviação de *high potential tester*) é um equipamento utilizado para realizar testes de isolamento em componentes elétricos, cabos, transformadores e outros dispositivos de alta tensão. Ele verifica a capacidade do material isolante de resistir a tensões elevadas sem falhar, garantindo a segurança e a confiabilidade do equipamento em operação. Esse conjunto de equipamentos foi fundamental para avaliar a capacidade dielétrica e a resistência elétrica dos equipamentos testados, assegurando sua conformidade com as normas técnicas de segurança.

O HiPOT apresentado na Figura 15 foi empregado como a principal ferramenta de geração de alta tensão necessária para os testes. Este equipamento é capaz de aplicar tensões controladas e monitorar a corrente de fuga, permitindo verificar a integridade do isolamento elétrico dos EPIs e EPCs. Complementando o sistema, o gerador de tensão AC mostrado na Figura 16 tem a capacidade de fornecer a tensão de até 120 kV e corrente de 0,1 A, garantindo a potência elétrica necessária para os ensaios de alta tensão. O controle desse sistema foi realizado por meio da mesa de controle do autotransformador (Figura 17), que possibilita o ajuste gradual da tensão aplicada, além de monitorar parâmetros críticos como tensão e corrente durante os testes.

Essa configuração garantiu a segurança e confiabilidade durante os ensaios, permitindo a utilização do sistema completo identificando possíveis falhas nos materiais isolantes e confirmando a adequação dos EPIs e EPCs para operação em ambientes sujeitos a altas tensões.

Figura 15 – HiPOT.



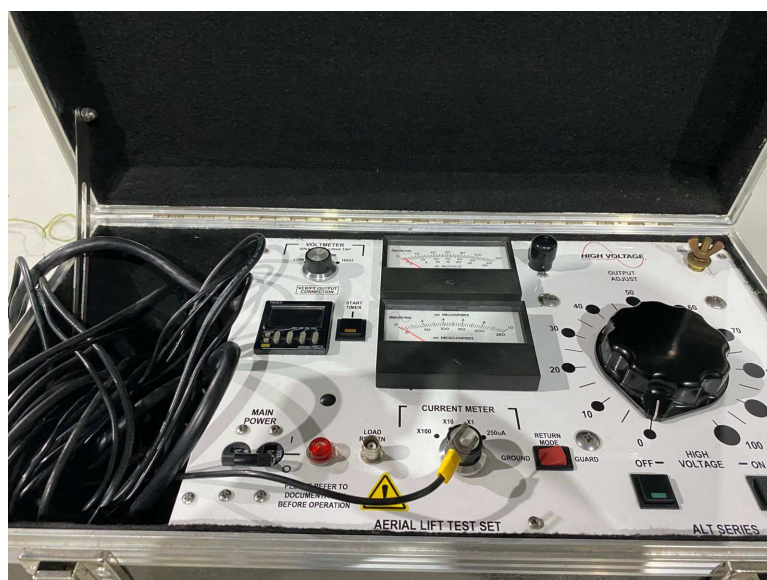
Fonte: Aatoria Própria.

Figura 16 – Gerador de tensão AC, 120 kV- 0,1 A.



Fonte: Aatoria Própria.

Figura 17 – Mesa de Controle do Autotransformador de 120 kV.



Fonte: Aatoria Própria.

4.2.2 Ensaio Em Luvas Isolantes

O LAT ficou responsável pelo ensaio de 8 luvas isolantes de borracha, classe 2 (17 kV), um par de luvas de classe 1 (7.5 kV) e um par de luvas classe 0 (1 kV), como classificação das normas ABNT NBR 10622 e ASTM D120 (tabela 4). As luvas de classe 2 são mostradas na figura 18, as luvas de classe 1 na figura 19 e as luvas de classe 0 são mostradas na figura 20.

Figura 18 – Luvas Isolantes - Classe 2.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 19 – Luvas Isolantes - Classe 1



Fonte: Autoria Própria.

Figura 20 – Luvas Isolantes- Classe 0.



Fonte: Autoria Própria.

Tabela 4 – Tabela de Classificação de Luvas Isolantes de Acordo com a Norma ABNT NBR 10622.

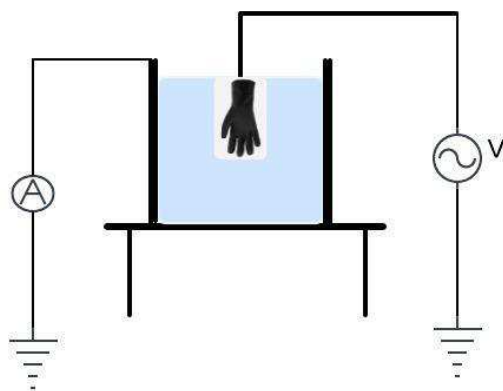
Classe da Luva	Tensão Máxima de Uso (V)	Tensão de Ensaio (V)	Corrente Máxima (mA)
00	500	2500	12
0	1000	5000	14
1	7500	10000	16
2	17000	20000	18
3	26500	30000	20
4	36000	40000	22

As luvas de borracha isolantes são regulamentadas pela norma internacional ASTM D120, que define requisitos para fabricação, testes dielétricos e uso desses EPIs. Essa norma é amplamente adotada devido à sua relevância global, sendo reconhecida como referência no setor elétrico.

No Brasil, a norma (ABNT 10622, 2019) é equivalente à ASTM D120, estabelecendo parâmetros para o controle de qualidade e segurança das luvas isolantes. Contudo, a aplicação da ASTM D120 tem ganhado destaque em empresas com operações internacionais ou que buscam harmonização com padrões globais.

A figura 21 apresenta o esquemático da montagem realizada seguindo os padrões de ensaios.

Figura 21 – Esquemático Para o Ensaio das Luvas de Borracha



Fonte: Autoria Própria.

A figura 22 apresenta a montagem do ensaio.



(a). Vista do Ensaio para as Luvas.



(b). Recipiente Contendo a Água e a Luva Submersa.

Figura 22 – Ensaio Realizado com as Luvas de Borracha

Fonte: Autoria Própria.

4.2.2.1 Resultados

Os ensaios realizados em luvas isolantes de borracha, classe 2, seguiram as normas, utilizando uma tensão aplicada de **20.000 V (60 Hz)** por um período de 3 minutos, com medição da corrente de fuga. Na Tabela 5, estão apresentados os resultados obtidos para cada item avaliado.

As luvas ensaiadas, foram submetidas à análise de corrente de fuga, e os resultados indicaram que a maioria dos itens obtiveram aprovação conforme os critérios estabelecidos pelas normas. Contudo, foi identificado um caso de reprovação:

- A luva apresentada na figura 23, correspondente à luva direita de tamanho 10, que apresentou um defeito de perfuração, levando à reprovação no teste.

A corrente de fuga registrada para as demais luvas variou entre **11,04 mA e 12,19 mA**, estando dentro dos limites aceitáveis para aprovação. Com base nesses resultados, foi possível atestar a conformidade de grande parte dos equipamentos avaliados, destacando-se a importância do ensaio para garantir a segurança no uso desses EPIs.

Tabela 5 – Resultados dos ensaios em luvas isolantes- Classe 2.

Lado	Nome	Tamanho (pol)	Corrente de Fuga (mA)	Laudo
Direito	1	11	11,04 / 10,92	Aprovado
Esquerdo	2	11	11,04 / 10,95	Aprovado
Direito	3	11	12,19 / 12,08	Aprovado
Esquerdo	4	11	11,73 / 11,69	Aprovado
Direito	5	11	11,10 / 11,07	Aprovado
Esquerdo	6	11	11,35 / 11,24	Aprovado
Direito	7	10	Perfuro / Reprovado	Reprovado
Esquerdo	8	10	9,72 / 9,65	Aprovado

O único caso de reprovação é apresentado na Figura 23, onde é possível observar o furo que levou à sua desaprovação. Esse dano ocorreu durante o ensaio, quando a luva não suportou a tensão imposta, resultando na ruptura do seu isolamento.

Figura 23 – Luva Reprovada



Fonte: Autoria Própria.

Os EPI's de classe 2, 1 e 0 também foram aprovados.

4.2.3 Ensaio Em Bastões de Manobra

Os bastões de manobra, utilizadas para o acionamento seguro de equipamentos energizados, possuem especificações e critérios de ensaio definidos pela norma ([ASTM F711, 2021](#)). Essa norma estabelece métodos para avaliação de resistência dielétrica, durabilidade e desempenho mecânico. No Brasil, a norma ([NBR 11854, 1992](#)), que regulamentava os requisitos para varas de manobra, foi revogada. Assim, a ASTM F711 é frequentemente empregada como referência técnica, devido à sua ampla aceitação e abrangência.

Diante do contexto o laboratório também realizou ensaio em dois conjuntos de bastões de manobra, de nome X e Y respectivamente, um desses é exemplificado na figura [24](#).

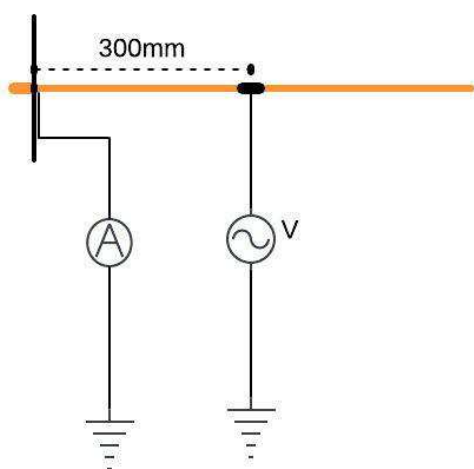
Figura 24 – Bastões De Manobra.



Fonte: Autoria Própria.

A figura 25 apresenta o esquemático da montagem realizada seguindo os padrões estabelecidos nas normas.

Figura 25 – Esquemático Para o Ensaio da Vara de Manobra.

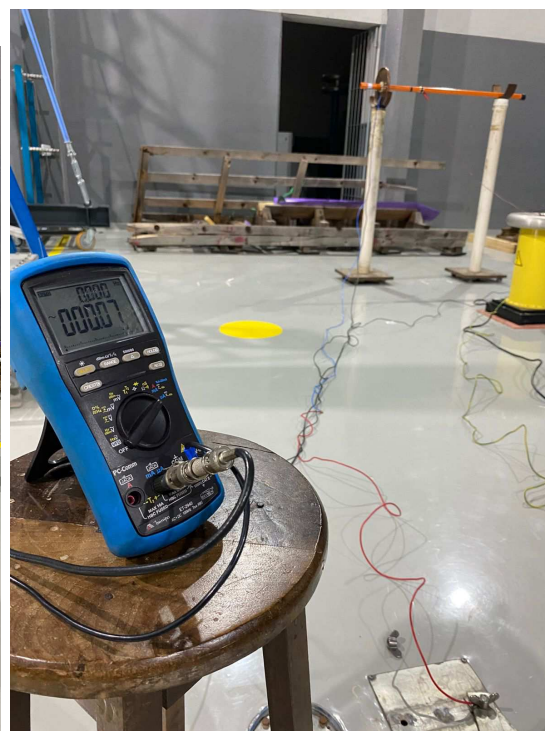


Fonte: Autoria Própria.

A figura 26 apresenta a montagem do ensaio.



(a). Vista do Ensaio para os Bastões.



(b). Equipamento de Medição da Corrente de Fuga

Figura 26 – Ensaio Realizado com os Bastões de Manobra.

Fonte: Autoria Própria.

4.2.3.1 Resultados

Os ensaios realizados em bastões de manobra de 6 elementos foram conduzidos conforme as normas ABNT NBR 11864 e ASTM F711, utilizando uma tensão aplicada de **100 kV (60 Hz)** por 3 minutos, com medição de corrente de fuga. A Tabela 6 apresenta os limites de corrente de fuga especificados para diferentes diâmetros de bastões em tensão de 100 kV, sendo esta uma referência fundamental para avaliação dos resultados obtidos. As Tabelas 7 e 8 apresentam os resultados dos ensaios realizados em bastões de manobra com números de patrimônio X e Y, respectivamente.

Os valores limites de corrente de fuga, definidos em função do diâmetro dos bastões e das tensões aplicadas, são apresentados na Tabela 6. Estes limites foram utilizados como base para determinar a conformidade dos bastões avaliados.

Tabela 6 – Limites de Corrente de Fuga para Bastões de Manobra em Função do Diâmetro e da Tensão aplicada de Acordo com a Norma NBR 11864.

Diâmetro (mm)	Corrente de Fuga (μA) a 100 kV
32	10
38	12
51	15
64	20

O bastão de manobra de patrimônio X apresentou três casos de reprovação, dois no segmento intermediário e um na ponta, devido a valores de corrente de fuga superiores ao limite aceitável. Conforme a Tabela 6, para bastões com diâmetro de 38 mm e tensão de 100 kV, o limite de corrente de fuga é de **12 μA** . Os resultados detalhados são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Resultados dos ensaios em bastões de manobra com o número de patrimônio X.

Segmento	Seção/Diâmetro (mm)	Corrente de Fuga (μA)	Laudo	Nome
Punho	38	11,92 / 11,75	Aprovado	1
Intermediário	38	11,35 / 11,31	Aprovado	2
Intermediário	38	11,71 / 11,65	Aprovado	3
Intermediário	38	14,09 / 14,41	Reprovado	4
Intermediário	38	14,49 / 14,41	Reprovado	5
Ponta	32	13,57 / 13,22	Reprovado	6

Para o bastão de patrimônio Y, todos os segmentos avaliados foram aprovados com exceção da ponta. A corrente de fuga nos segmentos permaneceu dentro dos limites especificados pelas normas, no entanto a ponta obteve uma corrente de fuga superior ao aceitável como mostrado na Tabela 6. Os resultados detalhados são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Resultados dos ensaios em bastões de manobra com o número de patrimônio Y.

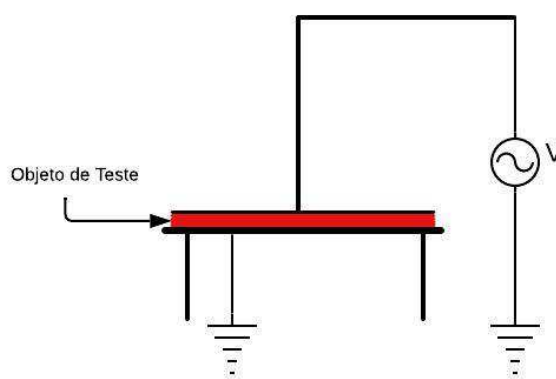
Segmento	Seção/Diâmetro (mm)	Corrente de Fuga (μA)	Laudo	Nome
Punho	38	11,63 / 11,75	Aprovado	1
Intermediário	38	11,31 / 11,45	Aprovado	2
Intermediário	38	11,75 / 11,60	Aprovado	3
Intermediário	38	12,10 / 12,14	Aprovado	4
Intermediário	38	12,40 / 12,45	Aprovado	5
Ponta	32	13,09 / 13,15	Reprovado	6

4.2.4 Ensaio em Tapetes Isolantes

O Laboratório de Alta Tensão (LAT) ficou responsável por realizar os ensaios em tapetes isolantes de classe 2, conforme ilustrado na Figura 27. Esses ensaios têm como objetivo garantir que os tapetes suportem tensões especificadas pela norma (ASTM D178, 2022), assegurando sua eficácia em aplicações práticas.

A Figura 28 apresenta o esquemático da montagem realizada para os ensaios. Esse diagrama foi elaborado para exemplificar a conexão dos equipamentos de teste, como a fonte de alta tensão, os eletrodos e os sistemas de proteção utilizados.

Figura 28 – Esquemático para o ensaio dos tapetes isolantes.



Fonte: Autoria Própria.

A Figura 29 exibe a montagem prática do ensaio. Os equipamentos foram dispostos de maneira a garantir a segurança e a precisão das medições, com a aplicação de tensão de classe 2 (20 kV) por um período de 1 minuto em cada segmento do tapete.



(a). Vista Superior do Tapete.



(b). Vista Inferior do Tapete.

Figura 27 – Tapetes isolantes utilizados no ensaio, destacando suas vistas superior e inferior.

Figura 29 – Montagem para ensaio dos tapetes isolantes, com destaque para a disposição dos equipamentos.



Fonte: Autoria Própria.

Os tapetes foram ensaiados por partes, conforme ilustrado na Figura 30, sendo divididos em quatro quadrantes. Cada quadrante foi submetido individualmente à tensão especificada, assegurando a uniformidade do teste. Dois tapetes foram avaliados, e os resultados confirmaram a integridade dielétrica de cada segmento.

4.2.4.1 Resultados

Por fim, as duas unidades de tapetes isolantes de classe 2 (20 kV) não apresentaram nenhum rompimento em seu isolamento durante os ensaios realizados. Esse resultado indica que os tapetes estão em boas condições para o uso, cumprindo os requisitos normativos e garantindo a segurança em aplicações que demandam proteção contra descargas elétricas.

Além disso, os ensaios realizados em cada quadrante demonstraram uniformidade na capacidade dielétrica ao longo de toda a superfície dos tapetes. A ausência de deformidades visíveis ou falhas durante 1 minuto de aplicação da tensão de teste reforça a confiabilidade do material e a adequação dos procedimentos de manutenção e armazena-

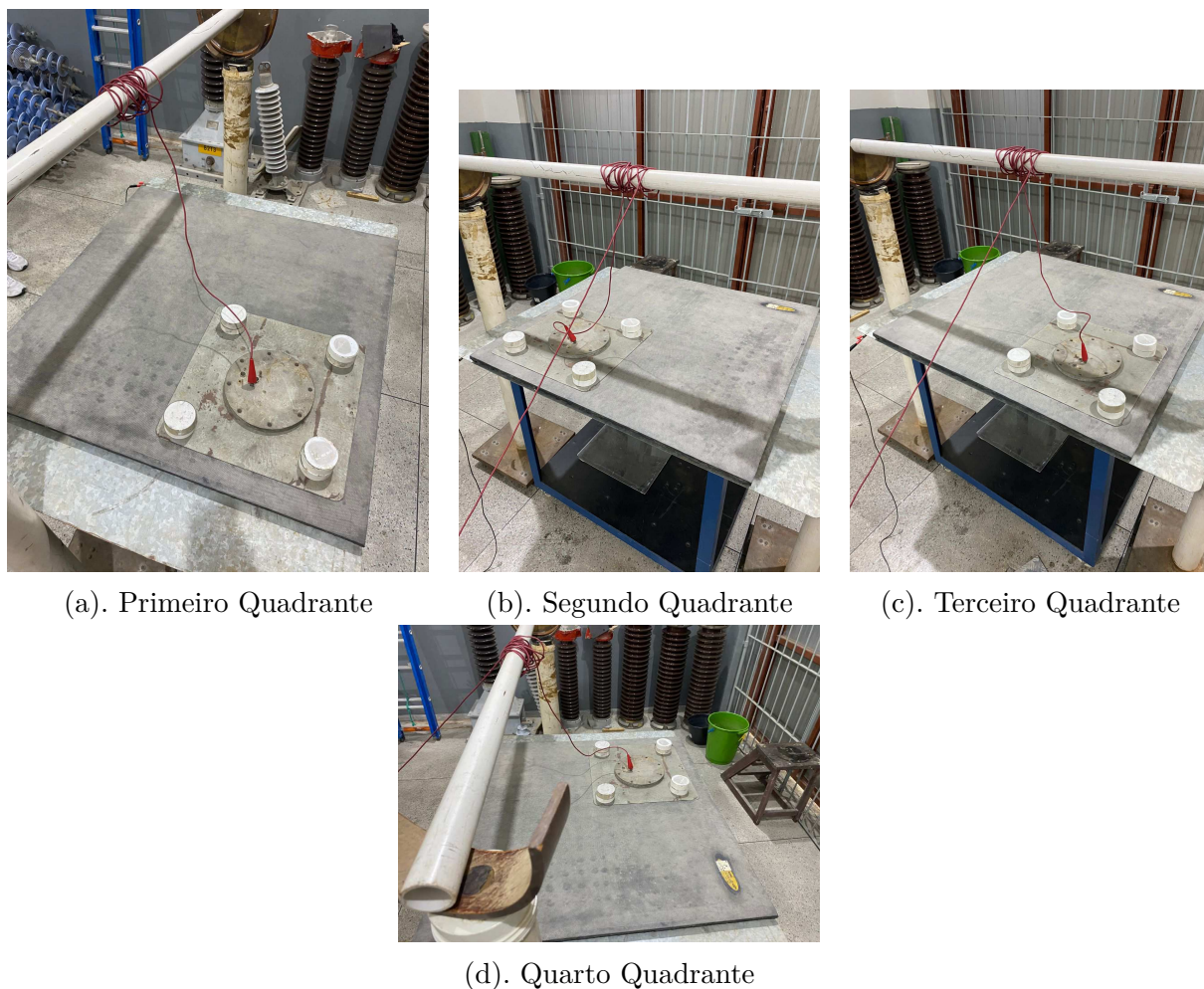


Figura 30 – Ensaio sobre tapete isolante, realizado por quadrantes.

Fonte: Autoria Própria.

mento adotados.

4.3 Ensaio Em Transformadores de Potencial Indutivo

Foram utilizados como objeto de análise três transformadores de potencial indutivo (TPI's) para realização de uma série de ensaios, com a finalidade de assegurar ou não a utilização desses equipamentos em subestações de energia. Dessa forma, os equipamentos serão identificados como TPI1, TPI2 e TPI3, como segue a tabela 9.

Ano	Tensão Máxima	Nomeação
2011	245 kV	TPI1
2011	245 kV	TPI2
2011	245 kV	TPI3

Tabela 9 – Especificações Técnicas Gerais dos TPIs Ensaçados

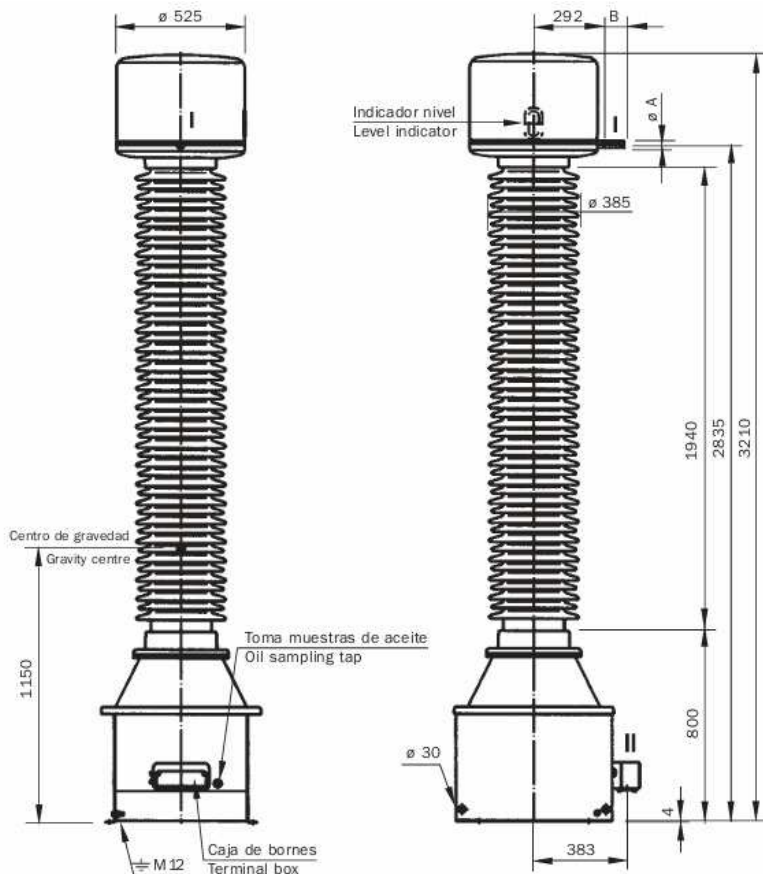
Os ensaios realizados são:

- Inspeção Visual
- Ensaio de Tensão Suportável à Frequência Industrial a Seco;
- Ensaio de Descargas Parciais;
- Ensaio de Tangente de Perdas e Capacitâncias;
- Ensaio de Medição de Resistência de Isolamento;
- Análise Físico-química e cromatográfica do Óleo Isolante.

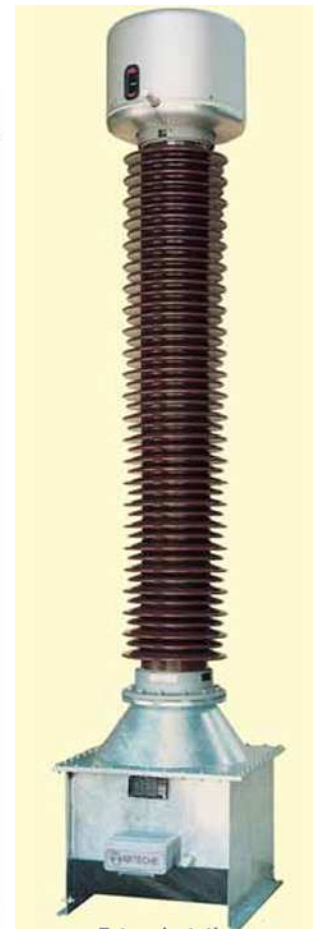
Esses transformadores são projetados para sistemas de alta tensão, utilizando-os em subestações de energia e aplicações industriais. Suas características incluem um peso total de 650 kg, com 157 kg de óleo isolante, e um esforço garantido nos terminais primários de 200 kg. No aspecto elétrico, o equipamento apresenta uma tensão nominal de isolamento de 245 kV, compatível com os padrões ([International Electrotechnical Commission, 2024](#)), e uma tensão máxima de serviço de 245 kV e 242 kV para a *IEEE*. As tensões de ensaio alcançam 460kV (Impulsos de Manobra) e 1050 kV (Impulsos Atmosféricos), com uma distância de fuga padrão de 6865 mm, garantindo sua operação em condições rigorosas de alta tensão.

O transformador oferece uma potência térmica total de 3500 VA, suportando até três enrolamentos secundários. A precisão é assegurada de acordo com normas internacionais, incluindo classes 0.2, 0.5 e 1.0 conforme *CEI/IEC*, e classes 0.3, 0.6 e 1.2 segundo *IEEE*. Além disso, ele é preenchido com óleo isolante, garantindo confiabilidade e durabilidade.

A figura 31 apresenta o transformador de potencial indutivo, com suas vistas detalhadas e uma ilustração complementar.



(a). Vistas do Transformador



(b). Ilustração do Transformador

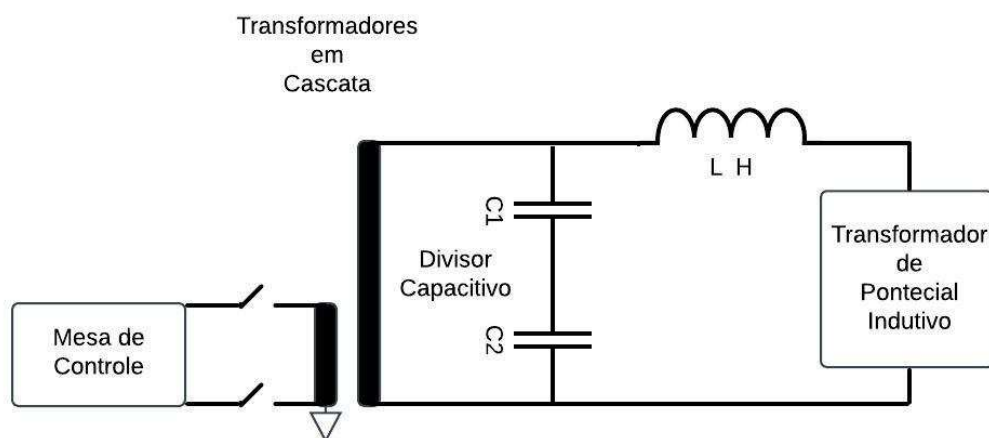
Figura 31 – Transformador de Potencial Indutivo (UTF-245).

Fonte: Adaptado de (Arteche, 2025).

4.3.1 Metodologia Aplicada

Todos os ensaios utilizavam da mesa de controle do laboratório o qual era responsável por comandar remotamente os transformadores em cascata de 600 kV interligado a um divisor capacitivo com relação de transformação de 7828,85 e um indutor de 15mH conectado diretamente ao terminal de alta do TPI. A topologia inicial do ensaio pode ser verificada na figura 32.

Figura 32 – Esquemático do Arranjo Experimental Utilizado



Fonte: Autoria Própria.

A figura 33 apresenta a montagem realizada para a realização dos ensaios, exemplificando a disposição dos equipamentos de acordo com o esquemático da figura 32.

Figura 33 – Montagem do Ensaio do TPI.



Fonte: Autoria Própria.

4.3.2 Ensaio de Tensão Suportável à Frequência Industrial a Seco

O ensaio elétrico realizado está em conformidade com a norma da IEC (IEC 61689-1, 2020). A tensão aplicada durante o ensaio deve corresponder aos valores indicados na Tabela 2 (da norma), conforme a tensão máxima suportada pelo equipamento. Essa tensão deve ser aplicada entre os terminais primários e o aterramento. É recomendável que, em caso de repetição dos ensaios de frequência industrial nos terminais primários, seja utilizado 80% do valor nominal especificado para o ensaio.

Para o TPI com classe de tensão de 245 kV, cuja tensão suportável à frequência industrial é de 395 kV, o valor especificado para o ensaio corresponde a 316 kV.

Os três transformadores submetidos ao ensaio não apresentaram qualquer irregularidade ou falha durante a aplicação da tensão especificada.

4.3.3 Ensaio de Descargas Parciais

O teste de descargas parciais deve ser executado conforme as diretrizes da norma (NBR-60270, 2017). A norma descreve algumas configurações possíveis para a realização do ensaio de descargas parciais.

A aplicação da tensão durante o teste pode seguir uma das quatro sequências definidas na NBR IEC 61869-1, a seguir tem-se duas delas:

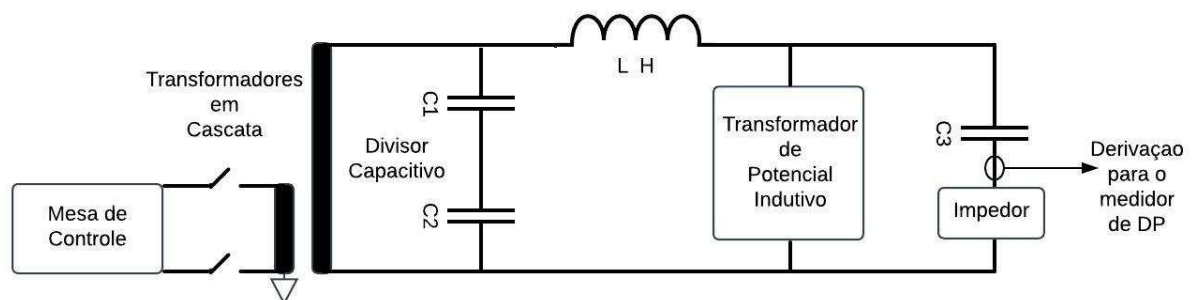
- Procedimento A: as tensões para o ensaio de descargas parciais são atingidas ao reduzir a tensão logo após o teste de tensão suportável à frequência industrial;
- Procedimento B: o ensaio de descargas parciais ocorre após o teste de tensão suportável à frequência industrial. A tensão aplicada é elevada a 80% da tensão suportável à frequência industrial, mantida por no mínimo 60 segundos e, em seguida, reduzida, sem interrupção, até os valores especificados para o ensaio de descargas parciais.

O método selecionado para todos os TPIs foi o Procedimento A. Nesse contexto, o TPI deve ser submetido às seguintes etapas de aplicação de tensão durante o ensaio:

- Tensão Nominal (30 s);
- 1,2 x Tensão Nominal (30 s);
- 0,8 x Tensão Suportável (60 s);
- 1,2 x Tensão Nominal (30 s);
- Tensão Nominal (30 s).

A figura 34 apresenta o esquemático da montagem para o estudo de descargas parciais nos transformadores seguindo o Procedimento A.

Figura 34 – Esquemático do Ensaio de Descargas Parciais.



Fonte: Autoria Própria.

A figura 35 apresenta a montagem realizada com base no esquemático apresentado da figura 34.

Figura 35 – Montagem do Ensaio de Descargas Parciais.



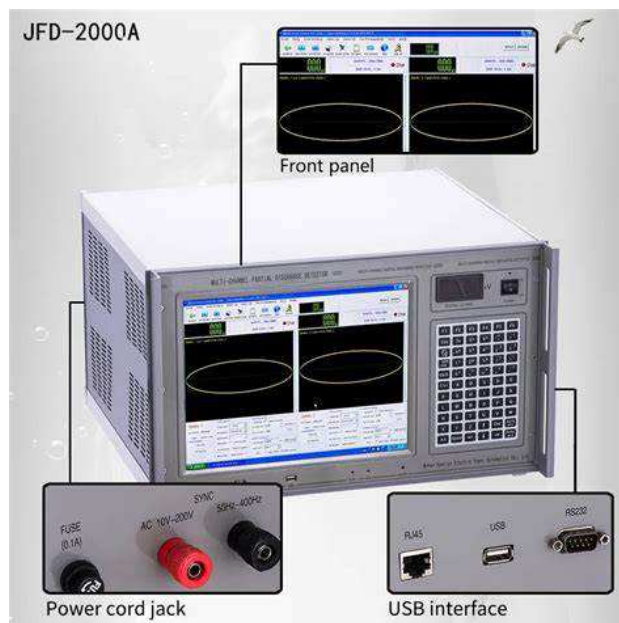
Fonte: Autoria Própria.

4.3.3.1 Equipamentos Utilizados Na Medição

O *JFD-2010 Multichannel Partial Discharge Detector* (também chamado de KGJF-2010) é um equipamento avançado para monitoramento e análise de descargas parciais em sistemas de alta tensão. Projetado para atender às exigências do setor de energia elétrica, o dispositivo possui medição multicanal, com dois canais independentes que permitem a amostragem e o processamento simultâneo de sinais. Sua alta sensibilidade possibilita a detecção de descargas parciais com níveis mínimos de 0,1 pC. Além disso, conta com sincronização flexível, seja interna ou externa, garantindo marcações precisas de zero e alta resolução de fase.

A figura 36 apresenta o modelo do equipamento utilizado para o estudo das descargas parciais.

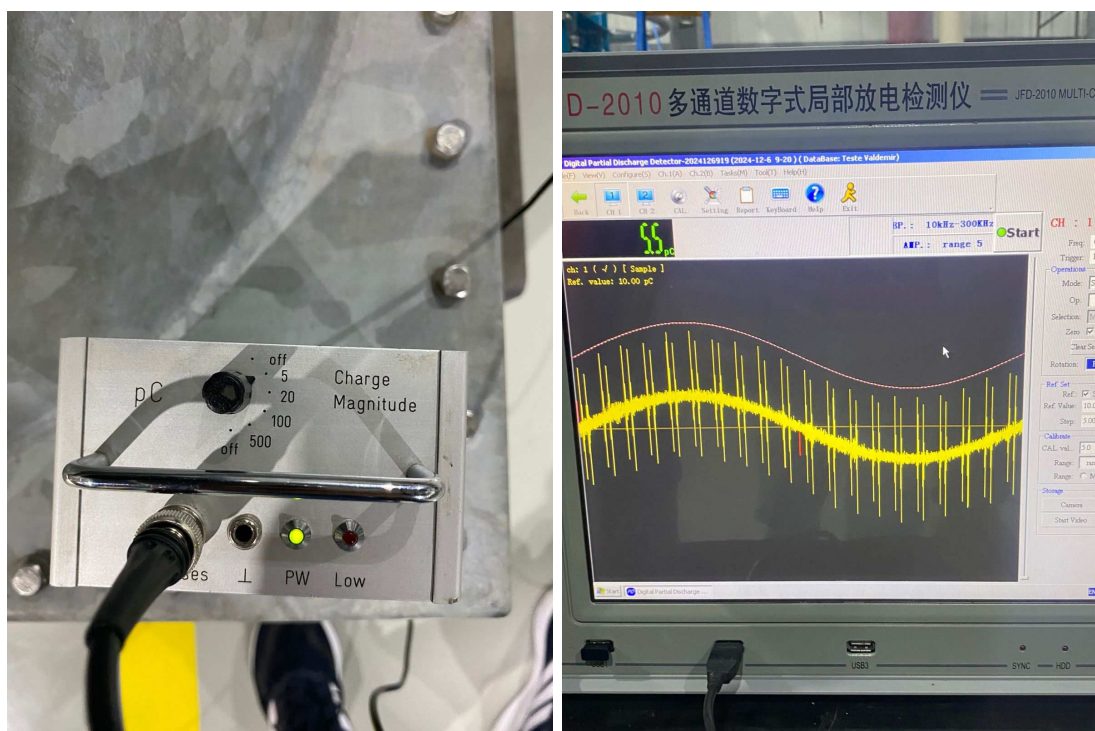
Figura 36 – Modelo do JFD Utilizado.



Fonte: Autoria Própria.

O *JFD-2010* é equipado com uma tela LCD de 15 polegadas, com resolução de 1024 x 768 pixels, além de conectividade por meio de interfaces como USB, RJ45 e RS232. Com dimensões de 540 x 460 x 320 mm e peso aproximado de 18 kg, o equipamento opera com alimentação de 220V AC a 50 Hz, destacando-se como uma ferramenta de alta precisão e confiabilidade.

A figura 37 apresenta o modelo do equipamento utilizado para a calibração do JFD e o estudo das descargas parciais. O calibrador desempenha um papel fundamental na garantia da precisão e confiabilidade das medições, pois permite a aplicação de sinais de descarga parcial conhecidos, geralmente na faixa de poucos picocoulombs (pC). Dessa forma, o detector pode ser ajustado corretamente para diferenciar ruídos elétricos de eventos reais de descarga parcial, evitando falsas detecções e assegurando a qualidade dos diagnósticos. Além disso, a calibração periódica é essencial para compensar possíveis variações nos componentes eletrônicos do sistema de medição, garantindo que o equipamento opere dentro das especificações normativas. Esse procedimento também permite verificar a linearidade da resposta do detector em diferentes níveis de descarga, assegurando que medições subsequentes reflitam com precisão as condições do sistema em teste.



(a). Calibrador.

(b). Sinal Obtido pelo JFD com 5 pC.

Figura 37 – Calibração para O Estudo de DP.

Fonte: Autoria Própria.

4.3.3.2 Resultados Obtidos

Os testes elétricos realizados revelaram a ocorrência de descargas parciais em todos os TPIs avaliados. Os padrões observados indicaram descargas fora da faixa típica de corona (próxima a 90°) e presentes em ambos os semi-ciclos da tensão aplicada, confirmando que os sinais registrados são originados de descargas parciais no sistema de isolamento.

Cada TPI apresentou padrões específicos de distribuição dos pulsos de DPs em relação à fase. No TPI 1, as descargas mostraram um padrão estável de 12 pC. Já no TPI 3, os padrões foram irregulares, com os pulsos de DPs reduzidos ao limite normativo de 5 pC durante o teste. Contudo, após a aplicação da tensão suportável, os valores alcançaram 11 pC na tensão de referência e caíram para 3 pC (onde 0.5pC eram ruído do laboratório) na tensão nominal. Por outro lado, o TPI 2 apresentou níveis elevados de DPs, atingindo 500 pC após o ensaio de tensão suportável.

4.3.4 Ensaio de Resistência de Isolamento

Para a execução do ensaio, todos os terminais de cada enrolamento do transformador foram curto-circuitados. A resistência foi avaliada aplicando uma tensão durante um período específico, conforme as instruções da Tabela 10 e seguindo parâmetros da Norma

(ABNT 6855, 2018).

Tabela 10 – Configurações Utilizadas Para Medição com o Megômetro.

Ligação	Tensão Mínima Aplicada	Duração Mínima	Isolação Medida
Primário contra Se- cundários + Terra	1000 V	1 min	Ra
Secundários contra Terra	500 V	30 s	Rb
Entre Se- cundários	500 V	30 s	Rc

As isolações medidas foram definidas conforme segue:

- **Ra**: resistência de isolamento entre o enrolamento primário e a carcaça;
- **Rb**: resistência de isolamento entre os enrolamentos secundários e a carcaça;
- **Rc**: resistência de isolamento entre os enrolamentos secundários.

4.3.4.1 Equipamentos Utilizados

A medição da resistência de isolamento foi realizada utilizando um megômetro digital. O *Hioki 3455 High Voltage Insulation Tester* é um instrumento avançado projetado para medir a resistência de isolamento em sistemas de alta tensão. Amplamente utilizado em aplicações industriais e de manutenção, o equipamento avalia a integridade do isolamento elétrico de motores, geradores, cabos e outros equipamentos elétricos, garantindo a segurança e o desempenho adequado.

A figura 38 apresenta o modelo do equipamento utilizado para o ensaio de resistência de isolamento.

Figura 38 – Equipamento Hioki3455.



Fonte: Autoria Própria.

Entre suas principais características, destaca-se a tensão de teste ajustável, que oferece uma ampla faixa entre 250 V e 5.000 V, tornando-o versátil para diferentes equipamentos. Sua alta precisão permite medir resistências de isolamento de até 5 T (teraohms), ideal para equipamentos de alta resistência, com compensação integrada para reduzir erros causados por correntes de fuga. O equipamento também conta com um display digital LCD de fácil leitura, com alguns modelos oferecendo gráficos de tendência e capacidade de registrar medições ao longo do tempo.

4.3.4.2 Resultados Obtidos

Os ensaios de resistência de isolamento realizados nos transformadores de potencial indutivo (TPI's): TPI1, TPI2 e TPI3; tiveram como objetivo verificar a integridade dielétrica e a conformidade com os requisitos normativos. Os testes foram conduzidos utilizando o equipamento de medição HIOKI IR3455, de acordo com as Figuras 39, 40, 41 e os resultados apresentaram valores de resistência de isolamento, índices de absorção e tangente de perdas dentro dos limites estabelecidos, conforme a Tabela 11.



(a). Vista Ampliada do Ensaio Primário-Secundários-Terra. (b). Vista Aproximada do Ensaio Primário-Secundários-Terra.

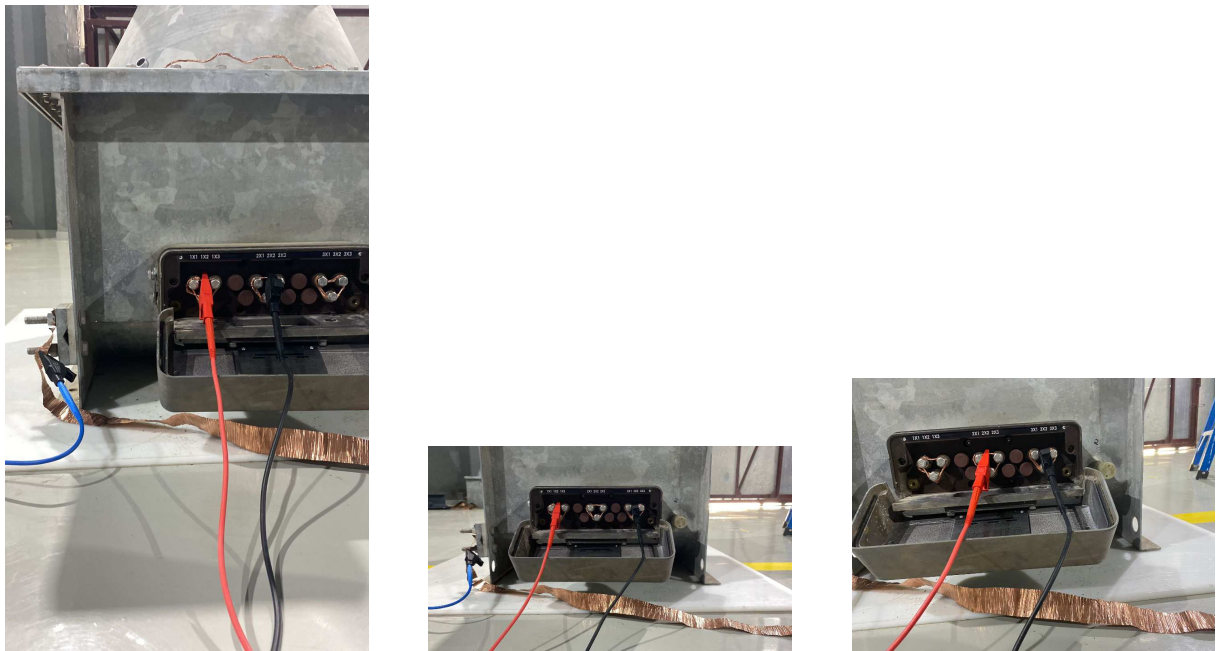
Figura 39 – Ensaio da Isolação Entre o Enrolamento do Primário e a Carcaça = Ra.

Fonte: Autoria Própria.

Figura 40 – Ensaio da Isolação entre os Enrolamentos do Secundário e a Carcaça.



Fonte: Autoria Própria.



(a). Bobinas 1-2.

(b). Bobinas 1-3.

(c). Bobinas 2-3.

Figura 41 – Ensaio da Isolação Entre os Enrolamentos Secundários.

Fonte: Autorial Própria.

Tabela 11 – Resultados de resistência de isolamento e índice de absorção para os TPIs.

Ensaio	TPI1		TPI2		TPI3	
	Inicial	Após Ensaio	Inicial	Após Ensaio	Inicial	Após Ensaio
A-T (GΩ)	281	273	115	248	227	229
S-T (GΩ)	25,6	23,6	18,95	21,3	33,4	27,4
S-S (GΩ)	96,7	83,0	86,9	80,0	99,6	82,8
Índice de Absorção (IA)	1,31		1,40		1,32	

Os resultados obtidos para os três TPI's indicaram conformidade com os parâmetros normativos e os requisitos técnicos estabelecidos. As resistências de isolamento apresentaram valores elevados, demonstrando a integridade dos materiais dielétricos. Os índices de absorção e tangente de perdas confirmaram o desempenho adequado, garantindo a confiabilidade dos equipamentos.

4.3.5 Ensaio de Tangente de Perdas e Capacitâncias

O teste deve ser realizado após a aplicação da tensão suportável à frequência industrial nos terminais primários com o objetivo de verificar a conformidade dos valores obtidos com o limite máximo especificado ($\tan \delta < 0,5\%$).

4.3.5.1 Equipamentos Utilizados

O equipamento utilizado para medição de tais requisitos foi o MIDAS Micro 2883. Ele é um equipamento avançado projetado para diagnósticos precisos de isolamento em sistemas de alta tensão. Este dispositivo é amplamente utilizado para avaliar a integridade de componentes como transformadores, buchas, capacitores, disjuntores e para-raios. Sua principal funcionalidade está na medição de fatores de potência ($\cos \phi$), dissipação ($\tan \delta$) e capacitância, parâmetros fundamentais para determinar a condição do isolamento elétrico.

A figura 42 apresenta o modelo do equipamento utilizado para os testes de tangente de perdas nos TPI's.

Figura 42 – Equipamento MIDAS.



Fonte: Autoria Própria.

O equipamento possui uma fonte de alta tensão integrada que permite operações com tensões de até 12 kV e frequências variáveis de 15 a 400 Hz, tornando-o extremamente versátil para diferentes cenários de teste. Sua precisão destaca-se pela capacidade de medir capacitâncias com erro de apenas 0,3% e $\tan \delta$ com exatidão de 1×10^{-4} . Esses níveis de precisão garantem resultados confiáveis, mesmo em condições adversas de teste.

A figura 43 apresenta a utilização do equipamento para os testes de tangente de perdas nos TPI's.

4.3.5.2 Resultados Obtidos

Com o objetivo de verificar a conformidade dos valores obtidos com o limite máximo especificado ($\tan \delta < 0,5\%$) foram realizados os ensaios nos três TPIs, com base na norma (IEC 61689-1, 2020).

Os resultados dos ensaios para os três TPIs são apresentados nas Tabelas 12, 13 e 14. Além disso, uma tabela comparativa (Tabela 15) resume os valores obtidos.

Tabela 12 – Resultados do TPI 1

Condição	Temperatura (°C)	Capacitância (pF)	Tangente de Perdas (%)
Antes do Ensaio	27,4	534,1	0,25 (0,22 a 20 °C)
Após o Ensaio	28,1	534,2	0,25 (0,21 a 20 °C)

Tabela 13 – Resultados do TPI 2

Condição	Temperatura (°C)	Capacitância (pF)	Tangente de Perdas (%)
Antes do Ensaio	25,9	541,3	0,31 (0,27 a 20 °C)
Após o Ensaio	26,6	541,2	0,29 (0,26 a 20 °C)

Tabela 14 – Resultados do TPI 3

Condição	Temperatura (°C)	Capacitância (pF)	Tangente de Perdas (%)
Antes do Ensaio	27,0	546,3	0,30 (0,25 a 20 °C)
Após o Ensaio	26,6	546,3	0,29 (0,24 a 20 °C)

Tabela 15 – Comparação Geral dos TPIs

TPI	Condição	Temperatura (°C)	Capacitância (pF)	Tangente de Perdas (%)
TPI 1	Antes	27,4	534,1	0,25 (0,22 a 20 °C)
	Após	28,1	534,2	0,25 (0,21 a 20 °C)
TPI 2	Antes	25,9	541,3	0,31 (0,27 a 20 °C)
	Após	26,6	541,2	0,29 (0,26 a 20 °C)
TPI 3	Antes	27,0	546,3	0,30 (0,25 a 20 °C)
	Após	26,6	546,3	0,29 (0,24 a 20 °C)

Os ensaios realizados confirmaram a conformidade dos três TPIs analisados com os requisitos normativos, apresentando valores de tangente de perdas ($\tan \delta$) consistentemente abaixo do limite máximo de 0,5%. Além disso, foi observada uma leve redução nos valores após os ensaios, indicando estabilidade e boa qualidade do sistema isolante.



(a). Análise de Tangente de Perdas no TPI 2.



(b). Análise de Tangente de Perdas TPI 3.

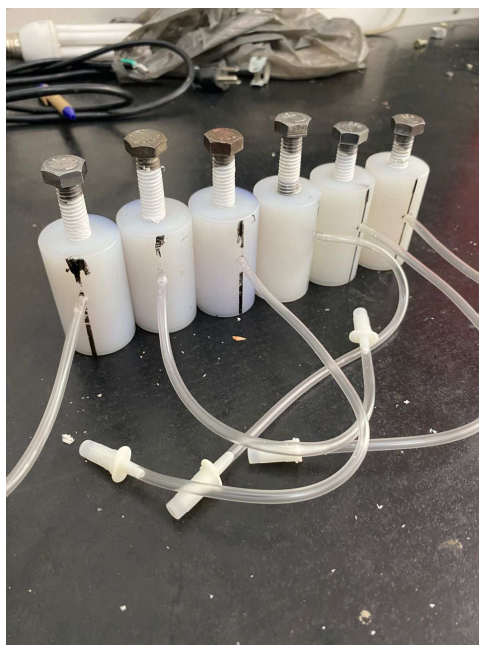
Figura 43 – Ensaio de Tangente de Perdas.

4.3.6 Análise Físico-Química e Cromatográfica de Óleo Isolante

Para a realização desta análise, inicialmente foi necessário retirar amostras de óleo do transformador de estudo, com a finalidade de enviá-las a uma empresa especializada para a análise físico-química do material. A amostragem foi feita com o auxílio de uma seringa, como ilustrado nas figuras abaixo. As amostras foram analisadas para detectar possíveis alterações químicas e gases dissolvidos no óleo, que podem indicar falhas no transformador.

A figura 44 apresenta as peças produzidas para facilitar a retirada do óleo isolante do transformador.

Figura 44 – Peças Fabricadas para Coleta de Óleo Isolante.



Fonte: Autoria Própria.

Após a confecção das peças, o procedimento de coleta foi realizado com o uso de uma seringa de vidro, conforme mostrado na figura 45. A amostra de óleo isolante retirada foi armazenada adequadamente e enviada para a empresa especializada, onde foi submetida a testes laboratoriais para determinar a presença de gases dissolvidos.

Figura 45 – Procedimento de Extração do Óleo Isolante.



Fonte: Autorial Própria.

A figura 46 mostra a seringa com a coleta do óleo, que foi posteriormente enviada para análise.

Figura 46 – Amostra de Óleo Isolante Coletada.



Fonte: Autorial Própria.

Após a coleta e envio das amostras, foi realizada uma análise detalhada dos gases

dissolvidos no óleo isolante. A presença de certos gases, como metano (CH_4), etileno (C_2H_4) e acetileno (C_2H_2), pode indicar falhas em componentes do transformador, como o enrolamento ou o núcleo.

4.3.6.1 Resultados Obtidos

Abaixo estão os resultados das análises físico-químicas do óleo isolante, incluindo a concentração de diversos gases dissolvidos, antes e após a energização do transformador.

Resultado do Ensaio Cromatográfico dos Gases Dissolvidos Antes e Após a Energização (TPI 1)

Tabela 16 – Comparação de Gases Dissolvidos (ppm a 25°C) - TPI 1

Gás	Antes da Energização	Após a Energização
Hidrogênio (H_2)	21	24
Oxigênio (O_2)	10486	10837
Nitrogênio (N_2)	25628	26555
Metano (CH_4)	4	5
Monóxido de Carbono (CO)	259	260
Dióxido de Carbono (CO_2)	622	646
Etileno (C_2H_4)	0	0
Etano (C_2H_6)	0	0
Acetileno (C_2H_2)	0	0
Concentração Total	37.020	38.327
Concentração de Gases Combustíveis	284	289

Análise dos Resultados:

A tabela acima mostra os resultados dos gases dissolvidos no óleo isolante, tanto antes quanto após a energização do transformador. É possível observar que os valores de hidrogênio e oxigênio aumentaram levemente após a energização, o que pode ser atribuído a reações térmicas internas no transformador. A concentração total de gases também apresentou um aumento, mas o nível de gases combustíveis (metano, monóxido de carbono e etileno) permanece baixo, indicando que não há sinais de falhas graves ou arcos elétricos internos.

Os resultados estão dentro dos limites recomendados pela norma ([NBR10576, 2011](#)), que estipula valores máximos para gases dissolvidos em óleo isolante. A presença de gases combustíveis deve ser monitorada, mas os valores atuais não indicam um risco iminente de falhas.

Resultado do Ensaio Cromatográfico dos Gases Dissolvidos Antes e Após a Energização (TPI 2)

Análise dos Resultados:

Tabela 17 – Comparação de Gases Dissolvidos (ppm a 25°C) - TPI 2

Gás	Antes da Energização	Após a Energização
Hidrogênio (H ₂)	23	26
Oxigênio (O ₂)	9957	8727
Nitrogênio (N ₂)	24275	21459
Metano (CH ₄)	5	4
Monóxido de Carbono (CO)	225	205
Dióxido de Carbono (CO ₂)	496	441
Etileno (C ₂ H ₄)	0	0
Etano (C ₂ H ₆)	0	0
Acetileno (C ₂ H ₂)	0	0
Concentração Total	34.981	30.862
Concentração de Gases Combustíveis	253	235

Os resultados para o TPI 2 mostram uma leve redução na concentração total de gases após a energização do transformador. A concentração de gases combustíveis também diminuiu um pouco, o que é um bom sinal de que não houve nenhum tipo de falha grave ou anômala durante os testes. A redução na concentração de oxigênio e nitrogênio pode ser explicada por variações normais durante o processo de energização.

Resultado do Ensaio Cromatográfico dos Gases Dissolvidos Antes e Após a Energização (TPI 3)

Tabela 18 – Comparação de Gases Dissolvidos (ppm a 25°C) - TPI 3

Gás	Antes da Energização	Após a Energização
Hidrogênio (H ₂)	16	17
Oxigênio (O ₂)	11613	10969
Nitrogênio (N ₂)	30907	28374
Metano (CH ₄)	6	5
Monóxido de Carbono (CO)	278	295
Dióxido de Carbono (CO ₂)	618	658
Etileno (C ₂ H ₄)	0	0
Etano (C ₂ H ₆)	0	0
Acetileno (C ₂ H ₂)	0	0
Concentração Total	43.438	40.318
Concentração de Gases Combustíveis	300	317

Análise dos Resultados:

Na tabela do TPI 3, os resultados mostram uma pequena elevação na concentração total de gases após a energização, com destaque para o aumento no nível de monóxido de carbono. A presença de monóxido de carbono pode ser um indicativo de processos de degradação, mas ainda está em níveis aceitáveis. Assim como nas tabelas anteriores,

os gases combustíveis continuam dentro dos limites aceitáveis, e não há sinais de falhas críticas no equipamento.

Com base nas análises físico-químicas (teor de umidade) e cromatográficas realizadas, podemos concluir que os resultados indicam um comportamento estável do óleo isolante. As concentrações de gases combustíveis não estão em níveis preocupantes, e os transformadores analisados apresentam boas condições operacionais. No entanto, o monitoramento contínuo desses gases é essencial para garantir a longevidade e segurança dos transformadores, conforme os critérios estabelecidos pela norma ([NBR10576, 2011](#)).

5 Conclusão

O estágio supervisionado realizado no Laboratório de Alta Tensão (LAT) da Universidade Federal de Campina Grande proporcionou uma experiência prática valiosa, permitindo a aplicação de conceitos teóricos adquiridos ao longo do curso de Engenharia Elétrica. Durante esse período, foi possível aprofundar o conhecimento sobre ensaios elétricos, medições e técnicas de diagnóstico em equipamentos utilizados em sistemas elétricos de potência, fortalecendo a compreensão sobre o comportamento dos materiais e dispositivos sob condições de alta tensão.

Durante o estágio, foram realizados testes e ensaios em diferentes equipamentos elétricos, abrangendo desde a caracterização de materiais isolantes até a avaliação do desempenho de dispositivos de proteção e medição. Esses ensaios foram conduzidos de acordo com normas técnicas, garantindo a confiabilidade dos resultados e a segurança dos procedimentos laboratoriais.

Os desafios encontrados ao longo do estágio, como a montagem, transporte e preparação dos equipamentos para os ensaios, demandaram um planejamento cuidadoso e a aplicação de boas práticas laboratoriais. Além disso, a necessidade de interpretar os resultados e correlacioná-los com os parâmetros elétricos exigiu uma abordagem analítica, permitindo a consolidação dos conhecimentos adquiridos em disciplinas da graduação.

As medições realizadas no LAT possibilitaram a operação de quatro equipamentos essenciais para o diagnóstico de sistemas elétricos de potência:

- **HiPOT**: empregado em ensaios dielétricos de EPIs e EPCs, garantindo sua segurança em alta tensão;
- **JFD-2010**: utilizado na detecção de descargas parciais, permitindo a identificação precoce de falhas em isolantes;
- **Hioki 3455**: medidor de resistência de isolamento para motores, geradores e cabos, prevenindo falhas elétricas;
- **MIDAS Micro 2883**: avalia a qualidade do isolamento de transformadores e para-raios, medindo $\tan \delta$, capacitância e fator de potência.

Por fim, o estágio não apenas complementou a formação acadêmica, mas também ampliou a visão sobre as aplicações práticas da engenharia elétrica, preparando para desafios futuros no campo dos sistemas elétricos de potência. A experiência adquirida reforçou a importância da realização de testes e ensaios para garantir a confiabilidade e

segurança dos sistemas elétricos, além de demonstrar a relevância do trabalho laboratorial para o desenvolvimento tecnológico e a inovação no setor.

Referências

ABNT 10622. *ABNT NBR 10622: Luvas de borracha isolantes*. 2019. Citado na página 29.

ABNT 6855. *Transformador de Potencial Indutivo - Requisitos e Ensaios*. Rio de Janeiro, Brasil: ABNT, 2018. Norma Brasileira NBR 6855. Citado na página 48.

Arteche. *Arteche Group*. 2025. Acessado em: 18 jan. 2025. Disponível em: <<https://www.artechecom.com/>>. Citado na página 41.

ASTM D178. *ASTM D178-22: Standard Specification for Rubber Insulating Matting*. 2022. Especifica os requisitos para tapetes isolantes de borracha utilizados como proteção em ambientes elétricos. Citado na página 36.

ASTM F711. *ASTM F711: Standard Specification for Insulated and Insulating Hand Tools*. 2021. Citado na página 32.

CAMARGO, M. de C. *Metodologia para Modelagem de Transformadores de Potencial Indutivos e Capacitivos para Estudos de Transitórios em Altas Frequências*. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brasil, 2015. Citado na página 6.

HIGHVOLT Prüftechnik Dresden GmbH. *HIGHVOLT Universal Voltage*. 2025. Acessado em: 17 jan. 2025. Disponível em: <<https://www.highvolt.com>>. Citado nas páginas 5, 6, 13 e 15.

IEC 60243-1. *IEC 60243-1: Electric Strength of Insulating Materials - Test Methods - Part 1: Tests at Power Frequencies*. 2013. Especifica os métodos para a medição da tangente de perdas, sendo fundamental para garantir a segurança e confiabilidade do sistema elétrico. Citado na página 9.

IEC-60270, N. *IEC 60270: High-voltage test techniques – Partial discharge measurements*. Geneva, Switzerland, 2017. Citado na página 8.

IEC 61689-1. *ABNT NBR IEC 61689-1:2020: Transformadores de medição - Parte 1: Requisitos gerais*. 2020. Citado nas páginas 7, 43 e 53.

International Electrotechnical Commission. *International Electrotechnical Commission (IEC)*. 2024. Acessado em: 17 jan. 2025. Disponível em: <<https://www.iec.ch/>>. Citado na página 40.

JUNIOR, A. V. C. *Interação transitória entre transformadores de potencial capacitivos e linhas de transmissão: uma contribuição para minimizar falhas*. Dissertação (Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)) — Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil, 2008. Citado na página 7.

LAT-UFCG. *Laboratório de Alta Tensão*. 2024. Acesso em: 17 jan. 2025. Disponível em: <<https://www.lat.dee.ufcg.edu.br/>>. Citado na página 2.

NATTRASS, D. Partial discharge measurement and interpretation. *Electrical Insulation Magazine, IEEE*, v. 4, n. 3, p. 10–23, 1988. ISSN 0883-7554. Citado na página 8.

NBR 11854. *Bastão isolante para trabalho em redes energizadas de distribuição*. 1992. Esta norma estabelece as condições mínimas exigíveis no fornecimento de bastões isolantes para uso em trabalhos com redes energizadas de distribuição. Citado na página 32.

NBR-60270. *NBR 60270: Medição de Impulsos Elétricos de Alta Tensão em Materiais Isolantes*. 2017. Especifica os métodos para medição de impulsos elétricos de alta tensão em materiais isolantes, sendo uma norma importante para garantir a confiabilidade em sistemas de alta tensão. Citado na página 44.

NBR10576. *NBR 10576: Óleo isolante mineral de transformadores e reatores de potência – Requisitos e métodos de ensaio*. 2011. Disponível em: <<http://www.abnt.org.br>>. Acesso em: 15 jan. 2025. Citado nas páginas 57 e 59.

ZINGALES, G. The requirements of a pd measuring system analyzed in the time domain. *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, v. 7, n. 1, p. 2–5, 2000. ISSN 1070-9878. Citado na página 8.