

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

GUSTAVO PIRES NÓBREGA DE QUEIROZ

**RELATÓRIO DE ESTÁGIO SUPERVISIONADO
LABORATÓRIO DE ALTA TENSÃO (LAT) DA UFCG**

CAMPINA GRANDE

2025

GUSTAVO PIRES NÓBREGA DE QUEIROZ

RELATÓRIO DE ESTÁGIO SUPERVISIONADO

Relatório de estágio supervisionado submetido ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande, como parte dos requisitos para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Pablo Bezerra Villar, D.Sc.

CAMPINA GRANDE

2025

GUSTAVO PIRES NÓBREGA DE QUEIROZ

RELATÓRIO DE ESTÁGIO SUPERVISIONADO

Relatório de estágio supervisionado submetido ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande, como parte dos requisitos para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Pablo Bezerra Villar, D.Sc.

Trabalho Aprovado em: 02/04/2025

Pablo Bezerra Vilar, D.Sc.

Orientador

André Dantas Germano, D.Sc.

Convidado

CAMPINA GRANDE

2025

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus e a todos os Seus Santos e Anjos que intercederam por mim. A fonte de toda sabedoria e força, me guiou durante cada passo dessa jornada. Sem Sua orientação divina, eu não teria chegado até aqui.

Gostaria de expressar minha profunda gratidão ao meu professor orientador e ao laboratório de alta tensão (LAT), onde tive a oportunidade de realizar este estágio. Agradeço ao Professor Doutor Pablo Bezerra Villar pela confiança, apoio e orientação constante ao longo do período, que foram essenciais para meu desenvolvimento.

Um agradecimento especial ao professor Valdemir da Silva Brito, que me auxiliou durante esse estágio, e ao técnico Higor da Costa Rocha, que com sua competência e zelo fez toda a diferença em meu aprendizado. Também sou grato ao Hebert dos Santos Crispim, meu colega de estágio, que compartilhou seus conhecimentos e experiências comigo durante esse período.

Não posso deixar de agradecer à minha família, que sempre esteve ao meu lado: meu pai, José Ledo Nóbrega de Queiroz, minha mãe, Maria Tatjane Carneiro Pires de Queiroz, e minhas irmãs Rebecca Pires Veloso Freire e Maria Beatriz Pires Nóbrega de Queiroz. O apoio incondicional de cada um de vocês me deu a motivação necessária para seguir em frente e buscar sempre mais.

Por fim, com muito carinho e destaque, agradeço à minha noiva, Carolina Feitosa de Oliveira, o amor da minha vida. Sem ela, eu não teria conseguido chegar até aqui. Seu amor, paciência e incentivo foram fundamentais em todos os momentos desta jornada. Você é meu apoio constante, e sou eternamente grato por tê-la ao meu lado.

A todos, meu mais sincero agradecimento.

*“Pedi, e dar-se-vos-á;
buscai, e encontrareis;
batei, e abrir-se-vos-á.
Porque todo aquele que pede, recebe;
e o que busca, encontra;
e ao que bate, se abre.”*
– Mateus 7: 7-8.

RESUMO

Este relatório descreve as atividades realizadas pelo aluno Gustavo Pires Nóbrega de Queiroz durante o estágio supervisionado no Laboratório de Alta Tensão da Universidade Federal de Campina Grande, sob a orientação do professor Dr. Pablo Bezerra Vilar. Com uma carga horária total de 220 horas, o estágio envolveu ensaios elétricos em equipamentos de proteção individual e coletiva, como luvas isolantes, bastões de manobra e tapetes isolantes, além de testes em transformadores de potencial indutivo. Também foram realizadas medições de resistência de isolamento, descargas parciais, tangente de perdas e capacitâncias, além da análise físico-química do óleo isolante. O estágio permitiu a aplicação prática dos conhecimentos adquiridos na graduação e proporcionou experiência no manuseio de equipamentos de alta tensão e na consulta a normas técnicas.

Palavras-chave: Alta Tensão, Transformador de Potencial Indutivo, Descargas Parciais, Ensaio Elétrico, Equipamento de Proteção Individual e Coletiva.

ABSTRACT

This report describes the activities carried out by the student Gustavo Pires Nóbrega de Queiroz during his supervised internship at the High Voltage Laboratory of the Federal University of Campina Grande, under the guidance of Professor Dr. Pablo Bezerra Vilar. With a total workload of 220 hours, the internship involved electrical testing of personal and collective protective equipment, such as insulating gloves, maneuvering sticks, and insulating mats, as well as tests on inductive potential transformers. Additionally, measurements of insulation resistance, partial discharges, dissipation factor, and capacitance were performed, along with the physicochemical analysis of insulating oil. The internship allowed for the practical application of knowledge acquired during the undergraduate program and provided experience in handling high-voltage equipment and consulting technical standards.

Keywords: High Voltage, Inductive Potential Transformer, Partial Discharges, Electrical Testing, Personal and Collective Protective Equipment.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AC	Alternating Current - Corrente Alternada
ASTM	American Society for Testing and Materials
AT	Alta Tensão
CEEI	Centro de Engenharia Elétrica e Informática
CEPEL	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
DC	Direct Current - Corrente Contínua
DEE	Departamento de Engenharia Elétrica
DP	Descargas Parciais
EPC	Equipamento de Proteção Coletiva
EPI	Equipamento de Proteção Individual
HiPOT	High Potential Tester
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
LABIS	Laboratório de Isolamento Elétricos
LAT	Laboratório de Alta Tensão
LDP	Laboratório de Descargas Parciais
LEASE	Laboratório de Eletrônica Aplicada a Sistemas Elétricos
LGIC	Laboratório do Gerador de Impulso de Corrente
LMEE	Laboratório de Materiais e Equipamentos Elétricos
LQE	Laboratório de Qualidade da Energia
LSM	Laboratório de Simulações Multifísicas
NBR	Norma Brasileira
SAT	Salão de Alta Tensão
Tan	Tangente
TPI	Transformador de Potencial Indutivo
UFMG	Universidade Federal de Campina Grande

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Entrada Principal do LAT.....	5
Figura 2 – Salão de alta tensão.....	6
Figura 3 – Salão de alta tensão 2.....	7
Figura 4 – Representação de um transformador de potencial.....	9
Figura 5 – Representação Física de um Transformador de Potencial Indutivo.....	10
Figura 6 – Circuito equivalente e equação da tangente de perdas.....	12
Figura 7 – Luvas de borracha classe 2.....	16
Figura 8 – Luvas de borracha classe 1.....	17
Figura 9 – Luvas de borracha classe 0.....	17
Figura 10 – Ensaio de luvas isolantes.....	18
Figura 11 – Luva submersa em água.....	18
Figura 12 – Foto do HiPot do LAT.....	19
Figura 13 – Luva isolante direita tamanho 10 com furo.....	20
Figura 14 – Segmento de bastão isolante no suporte.....	22
Figura 15 – Ensaio em segmento do bastão.....	23
Figura 16 – Parte superior do tapete.....	26
Figura 17 – Parte inferior do tapete.....	26
Figura 18 – Primeiro quadrante do tapete.....	27
Figura 19 – Segundo quadrante do tapete.....	27
Figura 20 – Terceiro quadrante do tapete.....	28
Figura 21 – Quarto quadrante do tapete.....	28
Figura 22 – Vista geral do ensaio dos tapetes.....	29
Figura 23 – Fotografia da lateral de T1.....	31
Figura 24 – Esquemático do TPI analisado.....	31
Figura 25 – Montagem do ensaio de tensão suportável à frequência industrial a seco.....	32
Figura 26 – Vista 1 da montagem do ensaio de descargas parciais.....	33
Figura 27 – Vista 2 da montagem do ensaio de descargas parciais.....	34
Figura 28 – Distribuição de avaliação de descarga parcial por ângulo de fase do T2.....	35
Figura 29 – Montagem para medição de R_a	37
Figura 30 – Vista aproximada da montagem para medição de R_a	37
Figura 31 – Montagem para medição de R_b	38

Figura 32 – Montagem para medição de R_c , bobinas 1-2.....	38
Figura 33 – Montagem para medição de R_c , bobinas 1-3.....	38
Figura 34 – Montagem para medição de R_c , bobinas 2-3.....	39
Figura 35 – Montagem para medição da tangente de perdas e capacitâncias.....	40
Figura 36 – Peças desenvolvidas para coleta de óleo.....	42
Figura 37 – Procedimento de extração do óleo.....	42
Figura 38 – Óleo extraído em seringa de vidro.....	43

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Objetivos.....	1
1.2 Estrutura do Relatório.....	1
2 LOCAL DE ESTÁGIO.....	3
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	6
3.1 Equipamentos de Alta Tensão e Normas Técnicas.....	6
3.2 Transformador de Potencial Indutivo.....	7
3.3 Tangente de Perdas.....	9
3.4 Descargas Parciais.....	11
4 ATIVIDADES REALIZADAS.....	13
4.1 Equipamentos de Proteção.....	13
4.1.1 Ensaio em Luvas Isolantes.....	13
4.1.1.1 Resultados do Ensaio.....	18
4.1.2 Ensaio em Varas de Manobra.....	19
4.1.2.1 Resultados do Ensaio.....	22
4.1.3 Ensaio em Tapetes Isolantes.....	23
4.1.3.1 Resultados do Ensaio.....	27
4.2 Ensaio em Transformadores de Potencial Indutivo.....	27
4.2.1 Ensaio de Tensão Suportável à Frequência Industrial a Seco	30
4.2.2 Ensaio de Descargas Parciais	31
4.2.2.1 Resultados do Ensaio	33
4.2.3 Ensaio de Resistências de Isolamento	34
4.2.3.1 Resultados do Ensaio	35
4.2.4 Ensaio de Tangente de Perdas e Capacitâncias	37
4.2.4.1 Resultados do Ensaio	38
4.2.5 Análise Físico-Química e Cromatográfica de Óleo Isolante	39
4.2.5.1 Resultados da Análise	41
5 CONCLUSÃO.....	44
REFERÊNCIAS.....	46

1 INTRODUÇÃO

O estágio supervisionado é um componente essencial da formação acadêmica no curso de Engenharia Elétrica, permitindo a imersão do estudante em um ambiente profissional e proporcionando a aplicação prática dos conceitos teóricos adquiridos ao longo da graduação. Neste contexto, o Laboratório de Alta Tensão (LAT) se destaca como um espaço de excelência no ensino, pesquisa e extensão, oferecendo ao estagiário a oportunidade de interagir com equipamentos de alta tecnologia e desenvolver habilidades técnicas fundamentais para sua carreira profissional.

O presente relatório descreve as atividades desenvolvidas durante o Estágio Supervisionado realizado pelo aluno Gustavo Pires Nóbrega de Queiroz no LAT da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). O estágio foi conduzido sob a orientação do professor Dr. Pablo Bezerra Vilar e a supervisão do professor Dr. George Rossany Soares de Lira, no período compreendido entre 02/12/2024 e 14/02/2025, com um carga horária de 20 horas semanais, totalizando 220 horas de estágio.

1.1 Objetivos

O estágio supervisionado tem como objetivo proporcionar ao aluno, uma visão prática de como pode ser a atuação dele como profissional. Para isso, o estagiário realizou diversas atividades durante esse período, dando apoio às variadas tarefas desenvolvidas no laboratório.

Dentre as atividades desenvolvidas, o foco esteve no acompanhamento de serviços e testes de equipamentos no LAT, no acompanhamento de ensaios em equipamentos de proteção individual e coletiva, no apoio à manutenção do laboratório e no auxílio na elaboração de laudos técnicos. Essas atividades proporcionaram ao estagiário uma formação prática importante, aprimorando suas habilidades e preparando-o para os desafios da profissão.

1.2 Estrutura do Relatório

Este documento está organizado da seguinte maneira: inicialmente, apresenta-se uma breve descrição do local de estágio e de suas principais áreas de atuação. Em seguida, é apresentada a fundamentação teórica necessária para entender as atividades realizadas durante o período de estágio que serão descritas na seção posterior. Por fim, são apresentadas as

considerações finais sobre a experiência adquirida e a relevância do estágio para a trajetória do aluno.

2 LOCAL DE ESTÁGIO

O LAT está localizado no bloco CF do Campus Sede da UFCG e é reconhecido como um dos laboratórios estruturados do Brasil, em especial, com relação às Universidades e Instituições de Pesquisa (LAT, 2023). A sua fachada pode ser vista na Figura 1, contendo a sua entrada principal.

Figura 1 – Entrada principal do LAT



Fonte: OLIVEIRA, 2020.

O laboratório conta com uma equipe preparada de pessoas, incluindo professores, pesquisadores, alunos de doutorado, mestrado e graduação, funcionários, técnicos administrativos e estagiários. Além disso, possui diversos ambientes, dentre os quais pode-se citar:

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

Contabilizando esses ambientes com os equipamentos do laboratório, torna-se possível executar ensaios e testes elétricos em alta tensão em equipamentos e componentes de sistemas elétricos de potência, incluindo transformadores, cabos, isoladores, para-raios, chaves, religadores, disjuntores, reguladores de tensão, reatores e cruzetas, em classes de tensão de 15 kV a 500 kV.

Ademais, são desenvolvidos projetos de pesquisa em parceria com empresas do setor de energia elétrica, juntamente com a elaboração de relatórios, laudos e pareceres técnicos em conformidade com as exigências da legislação brasileira e internacional.

As Figuras 2 e 3, apresentam fotos, por ângulos diferentes, do Salão de Alta Tensão, onde o aluno desempenhou boa parte das atividades.

Figura 2 – Salão de alta tensão



Fonte: Dados do autor, 2024.

Figura 3 – Salão de alta tensão 2



Fonte: Dados do autor, 2024.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para entender as atividades que foram desenvolvidas durante o período de estágio, faz-se necessário entender a teoria que as fundamenta. Este capítulo busca apresentar tal fundamentação.

3.1 Equipamentos de Alta Tensão e Normas Técnicas

Os sistemas elétricos de potência operam com diferentes níveis de tensão, sendo a alta tensão (AT) tipicamente classificada como acima de 36 kV. Os principais equipamentos utilizados nesses sistemas incluem transformadores, disjuntores, isoladores, chaves seccionadoras, para-raios e cabos de potência, cada um desempenhando funções essenciais para garantir a confiabilidade e segurança da rede elétrica.

Além dos equipamentos, a segurança dos profissionais que atuam em ambientes de alta tensão é fundamental. O uso de Equipamentos de Proteção Individual (EPIs) é obrigatório para mitigar riscos elétricos, garantindo a integridade dos trabalhadores. Entre os principais EPIs utilizados, destacam-se luvas isolantes, capacetes dielétricos, roupas antichamas, botas isolantes e óculos de proteção. No entanto, além da proteção individual, o uso de Equipamentos de Proteção Coletiva (EPCs) é essencial para minimizar os riscos elétricos no ambiente de trabalho. Esses equipamentos incluem dispositivos de isolamento, sinalização de segurança, sistemas de aterramento e mecanismos de seccionamento, todos projetados para reduzir a exposição dos profissionais a situações de risco.

As normas técnicas têm como objetivo estabelecer diretrizes e requisitos para garantir a segurança, a confiabilidade e o desempenho adequado dos equipamentos elétricos. Elas abrangem aspectos como fabricação, ensaios, operação e manutenção, assegurando que os dispositivos atendam a padrões mínimos de qualidade e segurança. No contexto da engenharia elétrica, essas normas são essenciais para a especificação de testes e validação de dispositivos críticos nos sistemas elétricos.

No que se refere aos EPIs e EPCs utilizados em ambientes de alta tensão, normas técnicas, como as estabelecidas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e pela International Electrotechnical Commission (IEC), determinam requisitos específicos para sua fabricação, ensaios e certificação. Para garantir a eficácia desses equipamentos, são realizados diversos testes, como ensaios dielétricos, que avaliam a resistência elétrica de

luvas, botas e capacetes; testes de inflamabilidade para vestimentas antichamas; e inspeções mecânicas para verificar a integridade estrutural dos materiais. Da mesma forma, os EPCs passam por testes que avaliam sua capacidade de isolamento e resistência, assegurando que oferecem a proteção necessária no ambiente de trabalho. Esses procedimentos garantem que tanto os EPIs quanto os EPCs forneçam a proteção necessária aos trabalhadores, reduzindo os riscos de choques elétricos, arcos voltaicos e outros perigos inerentes ao trabalho em alta tensão.

3.1.1 Luvas Isolantes

No contexto internacional, as luvas de borracha isolantes são regulamentadas pela norma ASTM D120/2022, que estabelece critérios para fabricação, ensaios dielétricos e uso seguro desses equipamentos de proteção individual. Reconhecida mundialmente, essa norma é amplamente adotada por empresas do setor elétrico devido à sua confiabilidade e abrangência técnica.

No Brasil, a ABNT NBR 10622/2019 define parâmetros equivalentes aos da ASTM D120/2022, garantindo controle de qualidade e segurança no uso das luvas isolantes. Entretanto, a norma americana tem sido cada vez mais aplicada em organizações com operações internacionais ou que buscam alinhamento com padrões globais.

3.1.2 Varas de Manobra

Os bastões de manobra, também conhecidos como bastões isolantes ou varas de manobra, são EPCs fundamentais para a segurança em atividades elétricas, especialmente em redes de média e alta tensão. Eles permitem que eletricitistas e técnicos realizem operações em sistemas energizados mantendo uma distância segura, reduzindo o risco de choques elétricos e arcos voltaicos. Sua aplicação inclui o seccionamento e manobra de chaves, como fusíveis e disjuntores, a aplicação e remoção de aterramentos temporários, a realização de testes de presença de tensão com detectores acoplados, a instalação e remoção de limitadores de sobretensão e até mesmo o resgate de trabalhadores acidentados em áreas de risco elétrico.

Os bastões são fabricados com materiais isolantes de alta rigidez dielétrica, sendo os mais comuns a fibra de vidro com resina epóxi, que proporciona leveza e alta resistência a impactos, o policarbonato, utilizado em algumas versões devido à sua boa resistência mecânica, e a madeira tratada, que era mais comum no passado, mas foi substituída por

materiais sintéticos mais eficientes. A norma ASTM F711/2021 estabelece os requisitos técnicos para bastões isolantes de fibra de vidro – uma vez que a norma brasileira que estabelecia os padrões, a ABNT NBR 11854/1992, foi cancelada – determinando critérios como materiais de fabricação, ensaios dielétricos, resistência mecânica e acabamento superficial. Essa norma exige que os bastões sejam submetidos a testes de alta tensão para garantir suas propriedades isolantes, além de especificar que a superfície do equipamento seja lisa e resistente à umidade, prevenindo contaminações que possam comprometer sua rigidez dielétrica.

A classificação dos bastões de manobra leva em conta a tensão de trabalho e o nível de isolamento necessário. Eles podem ser fixos, quando possuem um comprimento único e são utilizados em operações padronizadas, ou telescópicos, que permitem o ajuste de comprimento conforme a necessidade e são mais fáceis de transportar.

Para garantir a segurança e a confiabilidade desses equipamentos, os bastões de manobra devem passar por ensaios dielétricos periódicos, nos quais são submetidos a tensões elevadas para avaliar a integridade do isolamento. Além disso, a manutenção preventiva inclui inspeções regulares para identificar trincas, sujeira ou umidade, fatores que podem comprometer sua eficácia.

3.1.3 Tapetes Isolantes

Os tapetes isolantes são equipamentos de proteção utilizados para garantir a segurança dos profissionais em ambientes com risco de choque elétrico, como subestações, salas de controle e áreas próximas a equipamentos elétricos em manutenção ou operação. A principal função desses tapetes é fornecer uma barreira de segurança, evitando contato direto com o solo, que pode ser condutor de eletricidade, e garantindo, assim, a proteção contra choques acidentais.

Fabricados com materiais de alta rigidez dielétrica, como borracha de alta qualidade ou compostos sintéticos, os tapetes isolantes são projetados para resistir a tensões elétricas sem permitir a passagem de corrente. Além disso, esses materiais são frequentemente tratados para serem resistentes a abrasões, ozônio e produtos químicos, o que assegura a durabilidade do equipamento, mesmo em condições ambientais exigentes. Os tapetes isolantes são classificados de acordo com a tensão máxima que podem suportar, dependendo do tipo de

tapete e da aplicação. Também podem ter diferentes espessuras e dimensões, conforme a necessidade de proteção exigida pelo ambiente de trabalho.

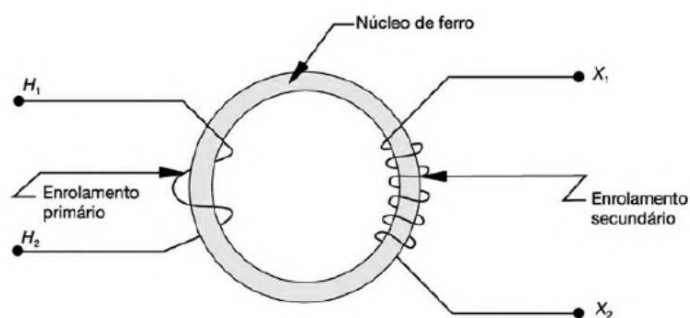
A norma ASTM D178/2022 regula os requisitos para os tapetes isolantes, abordando aspectos como a fabricação, testes dielétricos e os critérios de desempenho.

3.2 Transformador de Potencial Indutivo

Os Transformadores de Potencial Indutivo (TPIs) desempenham um papel fundamental em sistemas elétricos de potência, sendo amplamente empregados na medição e proteção de redes de transmissão e distribuição. Sua função principal é reduzir tensões elevadas a níveis adequados para instrumentos de medição e dispositivos de proteção, garantindo a segurança e a precisão das medições realizadas.

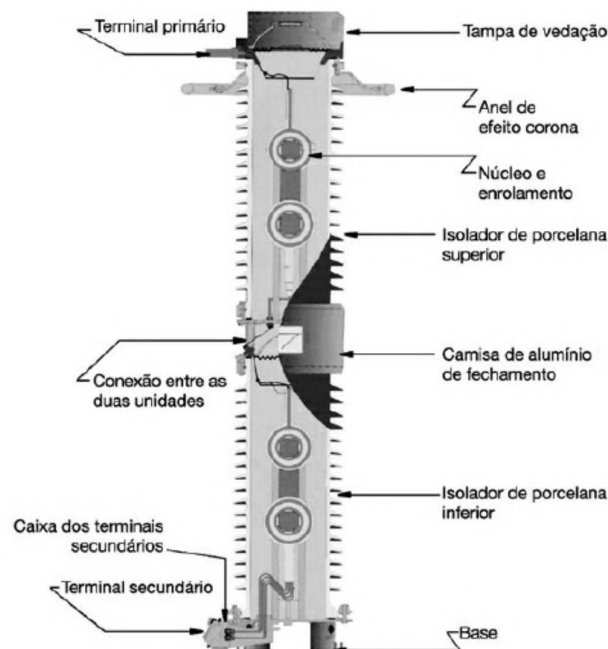
O princípio de funcionamento dos TPIs baseia-se na indução eletromagnética, assim como nos transformadores convencionais. Eles são compostos por um enrolamento primário, conectado diretamente à alta tensão do sistema, e um enrolamento secundário, responsável por fornecer uma tensão reduzida proporcional à relação de transformação (Camargo, 2015). Essa relação é cuidadosamente projetada para garantir que os instrumentos conectados operem de forma segura e confiável, minimizando os requisitos de isolamento e os custos dos equipamentos auxiliares (Mamede, 2013). Pode-se observar uma representação de um transformador de potencial na Figura 4. Já a Figura 5 apresenta um TPI de forma mais detalhada.

Figura 4 – Representação de um transformador de potencial.



Fonte: Mamede, 2013.

Figura 5 – Representação Física de um Transformador de Potencial Indutivo.



Fonte: Mamede, 2013.

A construção dos TPIs envolve a utilização de um núcleo de ferro-silício, material que proporciona alta eficiência magnética e reduz perdas. Conforme a norma NBR 6855/2018, os TPIs são classificados em três grupos de ligação. O primeiro grupo é projetado para ligação entre fases em sistemas de até 34,5 kV; o segundo grupo destina-se à conexão entre fase e neutro em sistemas diretamente aterrados; e o terceiro grupo é utilizado em sistemas sem aterramento eficaz. Além disso, os TPIs podem ser construídos com isolamento a óleo mineral ou a seco (epóxi), dependendo da aplicação e dos requisitos do sistema elétrico (Mamede, 2013).

O comportamento transitório dos TPIs é um aspecto crucial a ser considerado, pois eventos como descargas atmosféricas e curtos-circuitos podem levar à saturação do núcleo. Esse fenômeno pode causar distorções na tensão secundária, afetando a exatidão das medições. Para evitar esse problema, a modelagem dos TPIs é realizada por meio de circuitos equivalentes que levam em conta as indutâncias de dispersão, as perdas no núcleo e as capacitâncias parasitas. Em aplicações que envolvem frequências superiores a 10 kHz, a modelagem deve representar com precisão a ressonância do transformador, garantindo que seu comportamento dinâmico seja adequadamente previsto em simulações (Camargo, 2015).

A confiabilidade dos TPIs é assegurada por meio de rigorosos ensaios elétricos, realizados de acordo com normas técnicas. O ensaio de tensão suportável à frequência industrial avalia a robustez do isolamento diante de tensões elevadas, enquanto o ensaio de descargas parciais permite detectar falhas internas que possam comprometer o desempenho do equipamento. Além disso, o ensaio de tangente de perdas é empregado para avaliar a qualidade dielétrica do isolamento (Mamede, 2013). As normas NBR IEC 61869-1/2020 e NBR IEC 61869-3/2021 estabelecem os critérios de desempenho e precisão dos TPIs, garantindo que eles operem de forma segura e confiável em sistemas de potência.

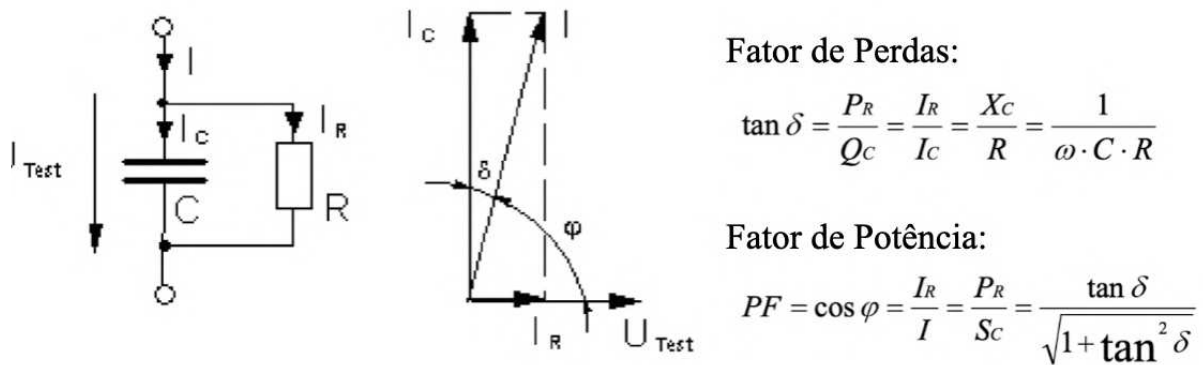
Dessa forma, os Transformadores de Potencial Indutivo desempenham um papel essencial na medição e proteção de sistemas elétricos de alta tensão. Seu correto dimensionamento e manutenção são indispensáveis para garantir medições precisas, segurança operacional e confiabilidade nas redes de transmissão e distribuição de energia.

3.3 Tangente de Perdas

A tangente ($\tan$) de perdas, comumente representada como $\tan \delta$, constitui um parâmetro essencial na caracterização dielétrica de materiais isolantes, sendo amplamente utilizada na avaliação da eficiência de sistemas elétricos de alta tensão. Esse parâmetro expressa a relação entre a energia dissipada e a energia armazenada no material quando este é submetido a um campo elétrico alternado. Em termos práticos, a tangente de perdas reflete a resistência do material à passagem de corrente alternada (AC), manifestando-se como uma dissipação de energia na forma de calor (Haefely Test AG, 2014).

Para calcular a tangente de perdas, considera-se que o objeto de teste pode ser considerado como um arranjo de capacitores, de forma que se fossem capacitores ideais, a corrente estaria adiantada 90 graus da tensão. Contudo é mais apropriado fazer a consideração de capacitores reais e assim, pode-se considerar o circuito equivalente, o diagrama fasorial e a equação da tangente de perdas como na Figura 6.

Figura 6 – Circuito equivalente e equação da tangente de perdas.



Fonte: Adaptado de Haefely Test AG, 2014.

Na qual:

- U_{Test} - Tensão aplicada;
- I_C - Corrente através da capacitância;
- I_R - Corrente através da resistência (material isolante);
- C - Capacitância ideal;
- R - Resistência ideal.

Matematicamente, a tangente de perdas ($\tan \delta$) é dada pela razão entre a corrente de perda (I_R), responsável pela dissipação de energia, e a corrente capacitiva (I_C), que representa a capacidade do material de armazenar energia. Assim, $\tan \delta = I_R/I_C$. Esse parâmetro também pode ser interpretado a partir do ângulo de fase δ entre a corrente total e a corrente capacitiva ideal, indicando a proporção de energia dissipada no dielétrico.

A relevância da tangente de perdas está diretamente atrelada às condições operacionais dos sistemas elétricos. Valores elevados de $\tan \delta$ indicam que o material isolante está absorvendo e dissipando uma quantidade significativa de energia elétrica, o que pode acarretar um aumento na temperatura do sistema. Esse efeito térmico acelera processos de degradação do isolamento, reduzindo a vida útil de equipamentos como cabos, transformadores e outros componentes dielétricos. Em aplicações de alta tensão, a monitorização contínua desse parâmetro é crucial para antever falhas e garantir a confiabilidade do sistema (IEC 61869-1: 2020).

A determinação experimental da tangente de perdas pode ser realizada por meio de medições de impedância ou pela análise direta do fator de dissipação em testes de alta tensão.

Esse comportamento dielétrico está intrinsecamente ligado a variáveis como umidade, temperatura e composição química do material. A presença de umidade, por exemplo, pode levar a um aumento da condutividade do isolamento, resultando em valores mais elevados de $\tan \delta$ e, conseqüentemente, em maior dissipação de calor (Haefely Test AG, 2014).

Do ponto de vista normativo, a norma IEC 61869-1:2020 estabelece procedimentos para a medição da tangente de perdas, assegurando que os ensaios sejam conduzidos de forma padronizada e confiável. A observação regular desse parâmetro é essencial para a implementação de manutenção preditiva em sistemas de potência, permitindo a identificação precoce de sinais de degradação do isolamento e evitando falhas (IEC 61869-1:2020).

Valores baixos de $\tan \delta$ são indicativos de materiais isolantes em boas condições, enquanto um aumento progressivo ao longo do tempo pode indicar processos de envelhecimento ou contaminação do material. Para equipamentos como transformadores de potência, os valores típicos de $\tan \delta$ variam entre 0,25% e 1,0% para equipamentos novos e até 1,5% para transformadores com 15 anos de operação. Valores acima desses limites podem indicar degradação do isolamento ou contaminação, exigindo atenção especial (Haefely Test AG, 2014). Assim, a tangente de perdas se apresenta não apenas como um indicador da qualidade do isolamento elétrico, mas também como uma ferramenta fundamental para a gestão eficiente da vida útil de equipamentos elétricos de alta tensão.

3.4 Descargas Parciais

As Descargas Parciais (DP) são fenômenos elétricos que ocorrem em materiais isolantes submetidos a campos elétricos elevados, sem resultar imediatamente em falha completa do isolamento. De acordo com a norma IEC 60270 (2017), a DP é definida como uma descarga elétrica localizada que atravessa parcialmente o meio isolante entre dois condutores. Esse fenômeno pode ocorrer no interior do dielétrico ou em suas proximidades e é um dos principais indicadores da degradação do sistema isolante de equipamentos elétricos de alta tensão.

As descargas parciais podem ser classificadas em três categorias principais. As descargas internas ocorrem dentro do material isolante, geralmente em cavidades formadas por falhas no processo de fabricação ou degradação do material. Como os gases presentes nas cavidades possuem menor rigidez dielétrica em comparação com isolantes sólidos ou líquidos, há intensificação do campo elétrico dentro dessas cavidades, favorecendo a

ocorrência de descargas (Zingales, 2000). As descargas superficiais manifestam-se na interface entre um meio isolante sólido e um meio gasoso, como o ar atmosférico. São comuns em equipamentos sujeitos a condições ambientais adversas, como alta umidade e poluição. 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. Esse tipo de descarga é comum em cabos de alta tensão e isoladores expostos ao ar.

Embora as DPs não causem falhas instantâneas, sua ocorrência contínua acelera a degradação dos materiais isolantes, reduzindo a vida útil dos equipamentos elétricos (Natrass, 1988). Entre os principais danos observados estão a carbonização do isolante, que pode levar à formação de caminhos condutivos, a degradação química, devido à geração de calor e formação de compostos químicos agressivos, como ozônio, e a diminuição da rigidez dielétrica, comprometendo a capacidade do equipamento de suportar tensões elevadas. No caso específico dos Transformadores de Potencial Indutivo (TPI), estudos indicam que a presença excessiva de descargas parciais internas pode resultar em aumento anormal da temperatura do óleo isolante, o que pode levar à explosão do equipamento e danificar outros componentes do sistema elétrico (Cepel, 2019).

A detecção precoce de DPs é fundamental para evitar falhas catastróficas. A norma IEC 60270/2017 estabelece diretrizes para a medição dessas descargas, utilizando técnicas que variam de sensores elétricos a métodos ópticos e acústicos. Os principais equipamentos utilizados para a medição de DPs incluem os osciloscópios e analisadores de espectro, que permitem a visualização dos pulsos de descarga em tempo real, os acopladores capacitivos, que captam sinais de DPs em sistemas de alta tensão, e os métodos ópticos e ultrassônicos, empregados em condições onde medições elétricas convencionais não são eficazes. O monitoramento contínuo das DPs é uma ferramenta essencial para a manutenção preditiva de equipamentos elétricos, permitindo a identificação de falhas em estágios iniciais e prevenindo danos severos ao sistema elétrico.

4 ATIVIDADES REALIZADAS

O estágio no Laboratório de Alta Tensão envolveu diversas atividades, incluindo a manutenção de equipamentos, a realização de ensaios em equipamentos elétricos e testes em equipamentos de proteção individual e coletiva, desenvolvidas na forma de prestação de serviços para garantir a confiabilidade dos equipamentos.

4.1 Ensaio em Equipamentos de Proteção

A segurança no trabalho é um aspecto essencial em atividades que envolvem risco elétrico, sendo os Equipamentos de Proteção Individual (EPIs) e os Equipamentos de Proteção Coletiva (EPCs) fundamentais para a prevenção de acidentes. Para garantir sua eficácia, esses dispositivos devem ser submetidos a ensaios periódicos, que avaliam sua capacidade de isolamento elétrico e conformidade com as normas técnicas vigentes. Durante o estágio, foram realizados testes em alguns equipamentos, visando verificar sua integridade e adequação para uso em ambientes de alta tensão.

4.1.1 Ensaio em Luvas Isolantes

Durante o estágio, seguindo os critérios estabelecidos pelas normas, o LAT ficou responsável de realizar ensaios em oito luvas de borracha da classe 2 (17 kV), além de um par de classe 1 (7,5 kV) e outro de classe 0 (1 kV), apresentadas nas Figuras 7, 8 e 9, respectivamente. As classes das luvas isolantes, indicam o nível de tensão que elas suportam garantindo a segurança das pessoas que estão a utilizando. Na Tabela 1, pode-se ver as classes das luvas e as tensões que elas suportam durante o uso normal. Além disso, na coluna 3, pode-se ver também a tensão que deve ser aplicada durante o ensaio e, na coluna 4, qual a corrente de fuga máxima, que se medida, ainda garantiria que a luva fosse aprovada.

Figura 7 – Luvas de borracha classe 2.



Fonte: Dados do Autor, 2024.

Figura 8 – Luvas de borracha classe 1.



Fonte: Dados do Autor, 2024.

Figura 9 – Luvas de borracha classe 0.

Fonte: Dados do Autor, 2024.

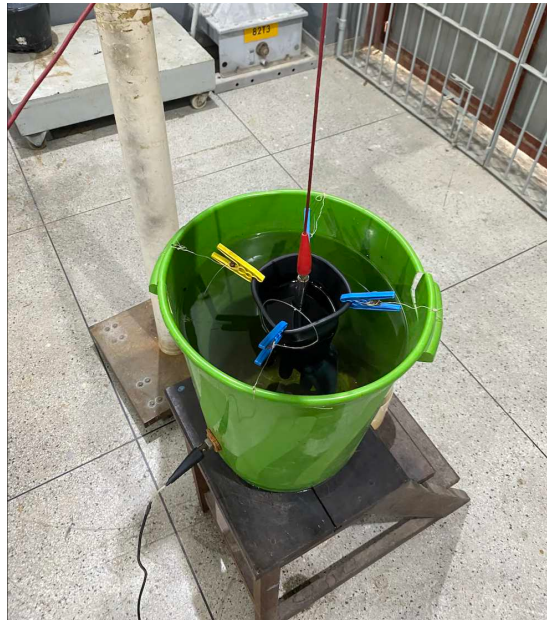
Tabela 1 – Classe das Luvas Isolantes

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

Fonte: Adaptado de ASTM 120 D120, 2022.

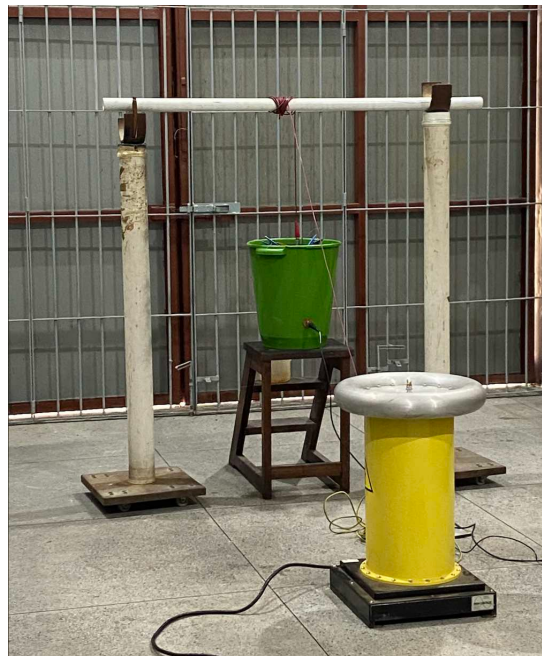
O ensaio é realizado submergindo a luva quase que inteiramente dentro da água, com o intuito de equalizar o potencial ao longo do objeto de ensaio (Figura 10). Nessas condições, é aplicada a devida tensão determinada em norma, que vai variar para cada classe e tamanho de luva, com isso, é medida a corrente de fuga (Figura 11).

Figura 10 – Luva submersa em água.



Fonte: Dados do Autor, 2024.

Figura 11 – Ensaio de luvas isolantes.



Fonte: Dados do Autor, 2024.

Outro item mostrado na Figura 11 é o High Potential Tester (“Testador de Alta Potência”, HiPOT), que é um equipamento utilizado para testar a resistência dielétrica de materiais isolantes em dispositivos elétricos. Seu principal objetivo é verificar se um

equipamento ou EPI pode suportar uma tensão superior à sua nominal sem permitir a passagem de corrente elétrica indesejada, garantindo a segurança do usuário e a integridade do sistema.

O HiPOT conta com um gerador que consegue chegar a até 120 kV nominal e 0,1 A, permitindo realizar ensaios para diversos equipamentos e classes. Além disso, é acompanhado por uma mesa de controle onde é possível fazer os devidos ajustes para tensões desejadas. Utilizando tal equipamento, os testes consistem na aplicação de uma tensão sobre o equipamento testado, enquanto se mede a corrente de fuga. Caso essa corrente ultrapasse os limites aceitáveis, indica que o isolamento está comprometido e que o equipamento pode não ser seguro para uso. Esse equipamento foi utilizado em todos os ensaios de equipamentos de proteção individuais ou coletivos e pode ser visto na Figura 12.

Figura 12 – Foto do HiPot do LAT.



Fonte: Dados do Autor, 2024.

4.1.1.1 Resultado do Ensaio

Os ensaios em luvas isolantes de borracha classe 2 foram realizados conforme as normas vigentes, aplicando-se uma tensão de 20.000 V (60 Hz) por 3 minutos, com medição da corrente de fuga. A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 2 – Resultado dos ensaios nas luvas isolantes classe 2.

Lado	Nome	Tamanho (pol)	Corrente de Fuga máxima em mA	Laudo
Direito	1	11	11,04	Aprovado
Esquerdo	2	11	11,04	Aprovado
Direito	3	11	12,19	Aprovado
Esquerdo	4	11	11,73	Aprovado
Direito	5	11	11,10	Aprovado
Esquerdo	6	11	11,35	Aprovado
Direito	7	10	Perfuro/Reprovado	Reprovado
Esquerdo	8	10	9,72	Aprovado

Fonte: Dados do Autor, 2025.

A maioria das luvas foi aprovada dentro dos critérios estabelecidos, exceto um item reprovado devido a um defeito de perfuração. A Figura 13 exibe a luva direita, tamanho 10, onde o furo foi identificado, resultando na falha no teste.

Figura 13 – Luva isolante direita tamanho 10 com furo.



Fonte: Dados do Autor, 2024.

Para as demais luvas, a corrente de fuga variou entre 11,04 mA e 12,19 mA, valores dentro dos limites aceitáveis. Ademais, vale ressaltar que as luvas de classe 0 e 1 também foram aprovadas. Os resultados confirmam a conformidade da maioria dos equipamentos, reforçando a importância dos ensaios para a segurança desses EPIs.

4.1.2 Ensaio em Varas de Manobra

Durante o estágio, o aluno também auxiliou o LAT na realização de ensaios em dois conjuntos de bastões de manobra, X e Y. Para realização de tal ensaio, primeiro o bastão deve ser antes do teste começar, o bastão isolante deve ser devidamente limpo e seco para evitar interferências nos resultados. A limpeza garante que não haja umidade ou contaminantes na superfície, que poderiam reduzir a resistência dielétrica. Em seguida o bastão é colocado em um suporte para que nele sejam colocados os eletrodos, como na Figura 14.

Figura 14 – Segmento de bastão isolante no suporte.



Fonte: Dados do Autor, 2024.

Posteriormente, após ser verificado as condições do ambiente de temperatura e umidade, são colocados os eletrodos com uma distância de 30 centímetros entre eles. Um dos eletrodos é conectado ao HiPOT e o outro é conectado à terra. Ademais, um multímetro é conectado entre o bastão e o aterramento, para que seja medida a corrente de fuga. A montagem pode ser vista nas Figuras 15.

Figura 15 – Ensaio em segmento do bastão

Fonte: Dados do Autor, 2024.

Uma vez conectado, a norma determina que o bastão seja submetido a uma tensão, que nesse caso, foi-se utilizado de 100 kV na frequência de 60 Hz, durante 3 minutos. Durante esse período, é monitorada a corrente de fuga para garantir que permaneça dentro dos limites seguros.

Se houver perfuração ou aumento significativo da corrente de fuga, o bastão não atende aos requisitos da norma e deve ser descartado ou reparado, se possível. Caso ocorram descargas elétricas, falhas de isolamento ou perfuração do material, o bastão é reprovado no teste. Caso a corrente de fuga esteja dentro do limite estabelecido, que varia de acordo com o diâmetro das varas, e não haja rompimento do isolamento, o bastão é considerado aprovado. A tabela 3 apresenta a corrente de fuga máxima permitida para uma tensão aplicada de 100 kV variando de acordo com o diâmetro.

Tabela 3 – Corrente de fuga relacionada com diâmetro para varas de manobra.

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

Fonte: Adaptado de ASTM F711 – 17, 2021.

4.1.2.1 Resultado do Ensaio

As Tabelas 4 e 5 apresentam os resultados dos ensaios realizados nos bastões de manobra de números de patrimônio X e Y, respectivamente. Os limites de corrente de fuga, definidos com base no diâmetro dos bastões e nas tensões aplicadas, estão apresentados na Tabela 3 e serviram como referência para avaliar a conformidade dos bastões testados.

Tabela 4 – Resultado do ensaio dos bastões isolantes do patrimônio X.

Segmento	Nome	Diâmetro (mm)	Corrente de Fuga (μA)	Laudo
Punho	X1	38	11,92	Aprovado
Intermediário	X2	38	11,35	Aprovado
Intermediário	X3	38	11,71	Aprovado
Intermediário	X4	38	14,41	Reprovado
Intermediário	X5	38	14,49	Reprovado
Ponta	X6	32	13,57	Reprovado

Fonte: Dados do Autor, 2024.

Tabela 5 – Resultado do ensaio dos bastões isolantes do patrimônio Y.

Segmento	Nome	Diâmetro (mm)	Corrente de Fuga (μA)	Laudo
Punho	Y1	38	11,75	Aprovado
Intermediário	Y2	38	11,45	Aprovado
Intermediário	Y3	38	11,75	Aprovado
Intermediário	Y4	38	12,10	Aprovado
Intermediário	Y5	38	12,40	Aprovado
Ponta	Y6	32	13,15	Reprovado

Fonte: Dados do Autor, 2024.

O bastão de patrimônio X apresentou três reprovações: duas no segmento intermediário (X4 e X5) e uma na ponta (X6), devido a valores de corrente de fuga superiores ao limite estabelecido. De acordo com a Tabela 3, para bastões com diâmetro de 38 mm e tensão de 100 kV, o limite de corrente de fuga é de 12 μA , enquanto que para diâmetro de 32 mm, o limite seria 10 μA . Os resultados detalhados podem ser consultados na Tabela 4.

No caso do bastão de patrimônio Y, todos os segmentos avaliados foram aprovados, exceto a ponta (Y6). A corrente de fuga nos segmentos estava dentro dos limites

estabelecidos, mas a ponta apresentou valores de corrente de fuga superiores ao aceitável, conforme indicado na Tabela 3. Os resultados detalhados estão apresentados na Tabela 5.

4.1.3 Ensaio em Tapetes Isolantes

Durante o período de estágio, o laboratório recebeu serviço para realização de ensaios em tapetes isolantes classe 2, que tem como intuito garantir que suportem as tensões especificadas pela norma supracitada por um tempo também determinado. Como forma de exemplificação, um tapete pode ser visto nas Figuras 16 e 17 que mostram a parte superior e inferior de um mesmo objeto de ensaio.

Figura 16 – Parte superior do tapete.



Fonte: Dados do Autor, 2025.

Figura 17 – Parte inferior do tapete.



Fonte: Dados do Autor, 2025.

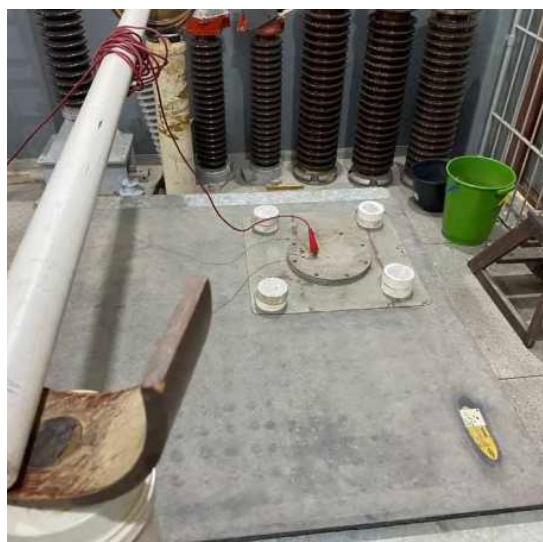
O ensaio de tensão dielétrica consiste em aplicar uma tensão de 20 kV na superfície do tapete através de uma chapa metálica durante um minuto e observar se teria ou não algum rompimento. É importante notar que na parte superior do tapete é colocada uma chapa que será conectada a um eletrodo, conectado ao HiPOT. E fica sobre outra chapa metálica conectada ao aterramento. Para este ensaio de cada tapete foi dividido em 4 quadrantes, onde foi aplicada a mesma tensão. Tal montagem de ensaio pode ser observada nas Figuras 18, 19, 20, 21 e 22.

Figura 18 – Primeiro quadrante do tapete.



Fonte: Dados do Autor, 2025.

Figura 19 – Segundo quadrante do tapete.



Fonte: Dados do Autor, 2025.

Figura 20 – Terceiro quadrante do tapete.



Fonte: Dados do Autor, 2025.

Figura 21 – Quarto quadrante do tapete.



Fonte: Dados do Autor, 2025.

Figura 22 – Vista geral do ensaio dos tapetes

Fonte: Dados do Autor, 2025.

4.1.3.1 Resultados do Ensaio

As duas unidades de tapetes isolantes de classe 2 (20 kV) não apresentaram qualquer falha em seu isolamento durante os ensaios, o que confirma que estão em boas condições para uso (Tabela 6). Os resultados indicam que os tapetes atendem aos requisitos normativos e garantem a segurança em aplicações que exigem proteção contra descargas elétricas. Outrossim, os testes realizados em cada quadrante mostraram consistência na capacidade dielétrica ao longo de toda a superfície dos tapetes.

Tabela 6 – Quadro resumo dos resultados do ensaio dos tapetes.

Nome do Tapete	Laudo
Tapete 1	Aprovado
Tapete 2	Aprovado

Fonte: Dados do Autor, 2025.

4.2 Ensaios em Transformadores de Potencial Indutivo

Durante o período de estágio, o Laboratório de Alta Tensão recebeu três transformadores de potencial indutivo para serem analisados para determinar se estariam aptos ou não a serem colocados em operação. Tais dispositivos foram projetados para operação em sistemas de alta tensão. Cada um desses transformadores possui um peso total de 650 kg, incluindo 157 kg de óleo isolante, e suportam um esforço mecânico de até 200 kg nos terminais primários.

Do ponto de vista elétrico, os TPIs possuem uma tensão nominal de isolamento de 245 kV, em conformidade com os padrões da International Electrotechnical Commission (2024). A tensão máxima de serviço atinge 245 kV para a IEC e 242 kV segundo a norma IEEE. Durante os ensaios elétricos, as tensões alcançaram 460 kV (Impulsos de Manobra) e 1050 kV (Impulsos Atmosféricos), com uma distância de fuga padrão de 6865 mm, para garantir desempenho seguro em ambientes de alta tensão.

Ademais, o equipamento possui uma potência térmica total de 3500 VA e permite a conexão de até três enrolamentos secundários. Sua precisão atende a normas internacionais, incluindo as classes 0.2, 0.5 e 1.0 conforme a CEI/IEC, e as classes 0.3, 0.6 e 1.2 segundo a norma IEEE. Além disso, a utilização de óleo isolante contribui para a confiabilidade e a longevidade do transformador.

Para atestar se tais transformadores estariam aptos ou não, uma série de ensaios foram realizados, sendo eles: a) Inspeção Visual; b) Ensaio de Tensão Suportável à Frequência Industrial a Seco; c) Ensaio de Descargas Parciais; d) Ensaio de Medição de Resistência de Isolamento e) Ensaio de Tangente de Perdas e Capacitâncias; f) Análise Físico-química e cromatográfica do Óleo Isolante.

Por serem três transformadores, eles foram identificados como T1, T2 e T3, sendo eles do ano de 2011 e possuindo a mesma tensão nominal de isolamento de 245 kV.

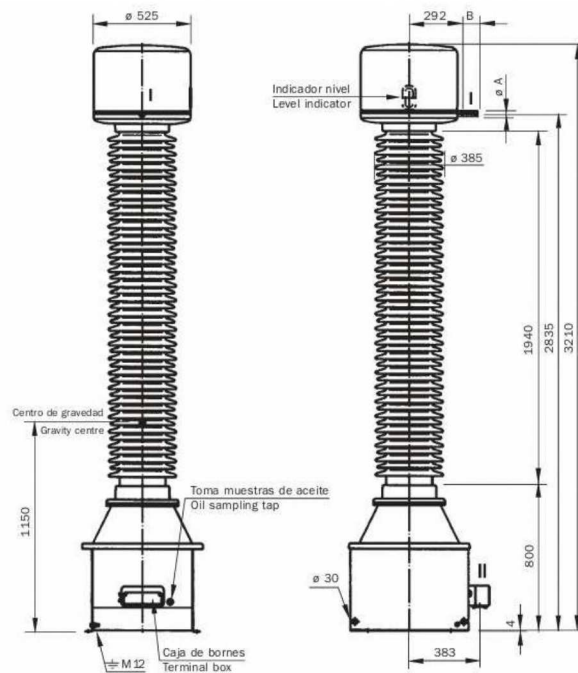
As Figuras 23 e 24 apresentam respectivamente uma fotografia lateral de um dos transformadores e um esquemático do transformador de potencial indutivo com suas cotas.

Figura 23 – Fotografia da lateral do T1



Fonte: Dados do Autor, 2025.

Figura 24 – Esquemático do TPI analisado



Fonte: CRISPIM, 2025.

4.2.1 Ensaio de Tensão Suportável à Frequência Industrial a Seco

O ensaio elétrico foi conduzido em conformidade com a norma NBR IEC 61689-1/2020. Durante o teste, a tensão aplicada deve seguir os valores estabelecidos na Tabela 2 da norma, de acordo com a tensão máxima suportada pelo equipamento. A aplicação da tensão ocorre entre os terminais primários e o aterramento.

Para a repetição de ensaios de frequência industrial nos terminais primários, recomenda-se a utilização de 80% do valor nominal especificado para o ensaio, a fim de preservar a integridade do equipamento.

No caso do 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.

Para a realização deste ensaio, foi utilizado um circuito que integrava a mesa de controle do laboratório, permitindo o comando dos transformadores em cascata de 600 kV. Esses transformadores estavam interligados a um divisor capacitivo com relação de transformação de 7828,85:1, além de um indutor de 15 mH conectado diretamente ao terminal de alta tensão do TPI. Pode-se observar a montagem na Figura 25.

Figura 25 – Montagem do ensaio de tensão suportável à frequência industrial a seco



Fonte: Dados do Autor, 2024.

Nenhum dos transformadores submetidos ao ensaio apresentou irregularidades ou falhas durante a aplicação da tensão especificada, confirmando a conformidade do isolamento elétrico.

4.2.2 Ensaio de Descargas Parciais

O teste de descargas parciais deve ser realizado em conformidade com as diretrizes da norma NBR 60270/2017, que define diferentes configurações para a execução desse ensaio.

A aplicação da tensão pode seguir uma das quatro sequências estabelecidas na NBR IEC 61869-1/2020. Foi escolhido o procedimento A, no qual as tensões do ensaio de descargas parciais são alcançadas por meio da redução da tensão logo após a realização do teste de tensão suportável à frequência industrial. Por isso, a montagem do experimento seguiu similar à montagem do ensaio de tensão suportável à frequência industrial a seco, com a adição de um capacitor e um impedor para conseguir recuperar o sinal da carga da descarga parcial. Pode-se observar a montagem nas Figuras 26 e 27.

Figura 26 – Vista 1 da montagem do ensaio de descargas parciais



Fonte: Dados do Autor, 2024.

Figura 27 – Vista 2 da montagem do ensaio de descargas parciais



Fonte: Dados do Autor, 2024.

As tensões que foram aplicadas durante o ensaio e o seu respectivo tempo podem ser vistas na Tabela 7.

Tabela 7 – Tensões aplicadas durante ensaio de descargas parciais.

	Tensão (kV)	Tempo (s)
Tensão Nominal	245	30
1,2 x Tensão Nominal	294	30
0,8 x Tensão Suportável	316	60
1,2 x Tensão Nominal	294	30
Tensão Nominal	245	30

Fonte: Dados do Autor, 2024.

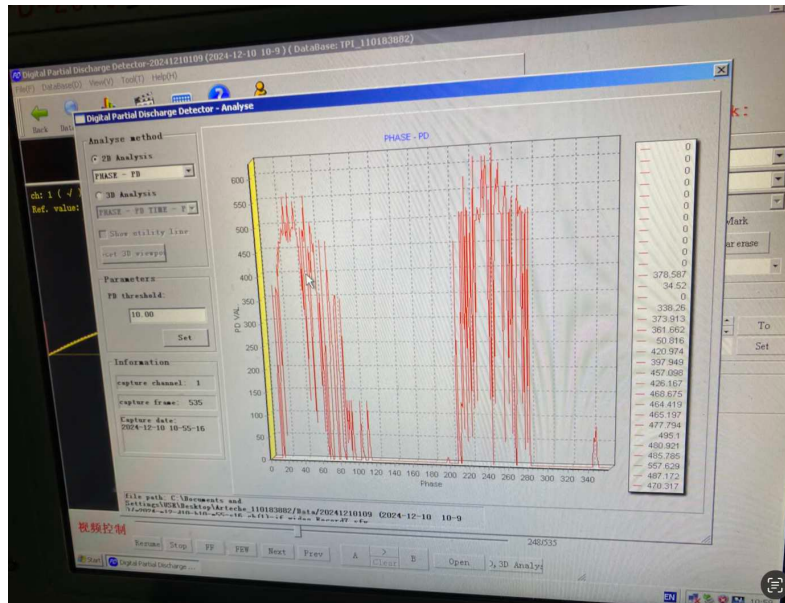
Para realizar as medições, foi utilizado um equipamento chamado JFD-2010 Multichannel Partial Discharge Detector (também chamado de KGJF2010), que é um equipamento avançado para monitoramento de descargas parciais em sistemas de alta tensão. Ele possui dois canais independentes, permitindo a análise simultânea dos sinais, com alta sensibilidade para detectar descargas a partir de 0,1 pC. Além disso, conta com sincronização interna ou externa, garantindo medições precisas.

Ademais, para garantir a precisão das medições, o equipamento utiliza um calibrador, que aplica sinais de referência e permite ajustar o detector corretamente. Esse processo evita erros, assegurando que o equipamento diferencie ruídos elétricos de descargas reais. A calibração periódica também mantém o detector funcionando dentro dos padrões exigidos.

4.2.2.1 Resultados do Ensaio

Os testes elétricos realizados detectaram a presença de descargas parciais em todos os TPIs avaliados. Os padrões observados indicaram descargas fora da faixa típica de corona que se dá perto dos 90°, ocorrendo em ambos os semiciclos da tensão aplicada, como pode ser visto na Figura 28. Confirmando assim, que os sinais registrados originaram-se de descargas parciais no sistema de isolamento.

Figura 28 – Distribuição de avaliação de descarga parcial por ângulo de fase do T2.



Fonte: Dados do Autor, 2024.

Cada TPI apresentou padrões específicos na distribuição dos pulsos de descargas parciais em relação à fase. Em T1, as descargas exibiram um padrão estável de 12 pC. Em T3, os padrões foram irregulares, com pulsos de descargas reduzidos ao limite normativo de 5 pC durante o teste. Após a aplicação da tensão suportável, os valores aumentaram para 11 pC na tensão de referência e caíram para 3 pC (sendo 0,5 pC atribuídos ao ruído do laboratório) na tensão nominal. Por sua vez, T2 apresentou os níveis mais elevados de descargas parciais, atingindo 500 pC, como pode ser visto na Figura 28, após o ensaio de tensão suportável.

4.2.3 Ensaio de Resistência de Isolamento

O ensaio de resistência de isolamento tem como objetivo verificar a integridade do sistema de isolamento do equipamento, garantindo que ele possa operar com segurança em ambientes de alta tensão. Esse ensaio é fundamental para identificar possíveis falhas no isolamento, prevenindo descargas elétricas e curtos-circuitos.

Para realizar o ensaio, seguiu-se a norma ABNT NBR 6855/2018, e assim, coloca-se os terminais de cada enrolamento do TPI em curto e, utilizando um megômetro, aplica-se uma tensão a fim de descobrir a resistência de isolamento. As tensões e tempos mínimos podem ser observadas na Tabela 8. Importante notar que esse ensaio deve ser feito antes e depois do ensaio de descargas parciais.

Não obstante, existem três diferentes resistências de isolamento e para cada uma delas, existe um arranjo diferente de ligações e tensão aplicada. As resistências são:

- R_a – resistência de isolamento entre o enrolamento primário e a carcaça;
- R_b – resistência de isolamento entre os enrolamentos secundários e a carcaça;
- R_c – resistência de isolamento entre os enrolamentos secundários.

Tabela 8 – Parâmetros utilizados para ensaio de resistência de isolamento.

Ligação	Tensão Mínima Aplicada (V)	Duração Mínima (s)	Isolação
Primário contra secundário mais terra	1000	60	R_a
Secundários contra terra	500	30	R_b
Entre secundários	500	30	R_c

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 6855/21018, 2018.

4.2.3.1 Resultados do Ensaio

Para o ensaio a medição de R_a , foi utilizada a montagem mostrada nas Figuras 29 e 30. Já a Figura 31, mostra a montagem para a medição de R_b . E as Figuras 32, 33 e 34 mostram as montagens para medição das resistências de isolamento entre os terminais do secundário.

Figura 29 – Montagem para medição de R_a



Fonte: Dados do Autor, 2024.

Figura 30 – Vista aproximada da montagem para medição de R_a



Fonte: Dados do Autor, 2024.

Figura 31 – Montagem para medição de R_b



Fonte: Dados do Autor, 2024.

Figura 32 – Montagem para medição de R_c , bobinas 1-2

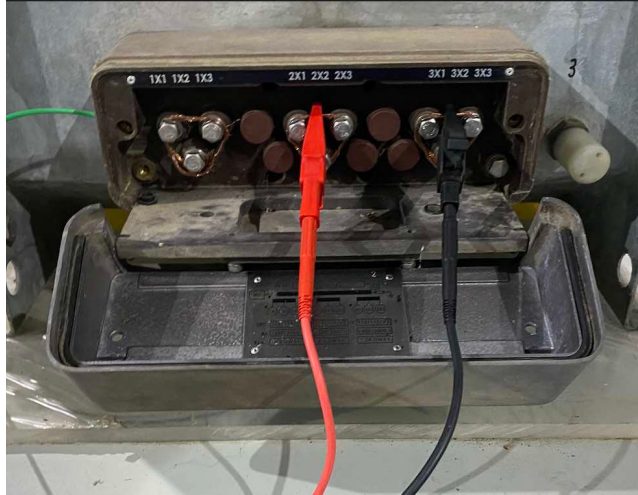


Fonte: Dados do Autor, 2024.

Figura 33 – Montagem para medição de R_c , bobinas 1-3



Fonte: Dados do Autor, 2024.

Figura 34 – Montagem para medição de R_c , bobinas 2-3

Fonte: Dados do Autor, 2024.

Todos esses ensaios foram realizados em cada um dos TPIs. Além disso, o ensaio foi feito antes e depois do ensaio de descargas parciais. Os resultados podem ser vistos na Tabela 9. Em tal tabela, pode ser visto as configurações de ligação para medição em cada ensaio, além do resultado antes (colunas 2, 4 e 6) e depois do ensaio de descargas parciais (colunas 3, 5 e 7). Também é possível observar o índice de absorção (IA), que indica a presença de correntes de absorção dielétrica, que estão associadas à polarização das moléculas do isolamento.

Tabela 9 – Resultados de resistência de isolamento e índice de absorção para os TPIs.

Ensaio	T1		T2		T3	
	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final
Alta – Terra (GΩ)	281	273	115	248	227	229
Secundários – Terra (GΩ)	25,6	23,6	18,95	21,3	33,4	27,4
Secundário – Secundário (GΩ)	96,7	83,0	86,9	80,0	99,6	82,8
Índice de Absorção (IA)	1,31		1,40		1,32	

Fonte: Dados do Autor, 2024.

Os resultados obtidos para os três TPIs mostraram que os equipamentos estão em conformidade com os padrões normativos e os requisitos técnicos exigidos. As resistências de isolamento apresentaram valores elevados, o que confirma a integridade dos materiais

dielétricos. Além disso, os índices de absorção e a tangente de perdas indicaram um desempenho adequado, garantindo a confiabilidade dos equipamentos.

4.2.4 Ensaio de Tangente de Perdas e Capacitâncias

Assim como no ensaio de resistências de isolamento, o de tangente de perdas e capacitâncias também precisa ser realizado antes e depois do ensaio de descargas parciais. O limite máximo especificado para a tangente de perdas, com base na norma IEC 61869-1:2020, é menor do que 0,5%, ou seja, que as perdas seja representante de menos de 0,5% da corrente utilizada na parte capacitiva, como mostrado na seção 3.3 deste documento. Para essa medição foi utilizado o MIDAS Micro 2883. A montagem utilizada pode ser vista na Figura 35.

Figura 35 – Montagem para medição da tangente de perdas e capacitâncias



Fonte: Dados do Autor, 2024.

4.2.4.1 Resultados do Ensaio

Os resultados obtidos para cada um dos TPIs, antes e depois do ensaio de descargas parciais pode ser visto na Tabela 10.

Tabela 10 – Resultado do Ensaio de Tangente de Perdas e Capacitâncias.

TPI	Momento do Teste	Temperatura (°C)	Capacitância (pF)	Tangente de Perdas (%)
T1	Antes	27,4	534,1	0,25 (0,22 a 20 °C)
	Depois	28,1	534,2	0,25 (0,21 a 20 °C)
T2	Antes	25,9	541,3	0,31 (0,27 a 20 °C)
	Depois	26,6	541,2	0,29 (0,26 a 20 °C)
T3	Antes	27,0	546,3	0,30 (0,25 a 20 °C)
	Depois	26,6	546,3	0,29 (0,24 a 20 °C)

Fonte: Dados do Autor, 2024.

Os ensaios realizados confirmaram que os três TPIs analisados atendem aos requisitos normativos, apresentando valores de tangente de perdas consistentemente inferiores ao limite máximo de 0,5%. Na tabela 10 é importante ressaltar também que no cálculo do tangente de perdas, foi-se posto o valor de tangente de perdas corrigido para 20 °C, que acontece devido a ao requisito em norma. Isso ocorre, porque a tangente de perdas varia com a temperatura. Ademais, foi registrada uma leve diminuição nos valores após os testes, o que indica estabilidade e boa qualidade do sistema isolante.

4.2.5 Análise Físico-Química e Cromatográfica de Óleo Isolante

Para realizar essa análise, foi necessário, inicialmente, coletar amostras de óleo do transformador em estudo, com o intuito de enviá-las a uma empresa especializada para avaliação físico-química. A Figura 36 apresenta as peças desenvolvidas para facilitar a extração do óleo isolante do transformador. A coleta foi feita com o auxílio de uma seringa, conforme mostrado nas Figura 37. As amostras foram submetidas a exames para identificar alterações químicas e a presença de gases dissolvidos, que podem indicar falhas no transformador.

Figura 36 – Peças desenvolvidas para coleta do óleo



Fonte: Dados do Autor, 2024.

Figura 37 – Procedimento de extração do óleo



Fonte: Dados do Autor, 2024.

O óleo coletado foi devidamente armazenado e enviado à empresa especializada, onde passou por testes laboratoriais para identificar a presença de gases dissolvidos. A Figura 38 mostra a seringa usada para a coleta do óleo, que foi posteriormente enviada para análise.

Figura 38 – Óleo extraído em seringa de vidro



Fonte: Dados do Autor, 2024.

Após o envio das amostras, foi feita uma análise detalhada dos gases dissolvidos no óleo isolante. A presença de gases como metano (CH_4), etileno (C_2H_4) e acetileno (C_2H_2) pode indicar falhas em componentes do transformador, como os enrolamentos ou o núcleo.

4.2.5 Resultados da Análise

É importante ressaltar que o óleo foi colhido antes e depois dos ensaios elétricos, assim, os resultados das análises físico-químicas podem ser vistos nas Tabelas 11, 12 e 13, contendo a concentração de gases para ambos os cenários.

Tabela 11 – Comparação de Gases Dissolvidos (ppm a 25°C) - T1

Gás	Antes da Energização	Depois da Energização
Hidrogênio	21	24
Oxigênio	10486	10837
Nitrogênio	25628	26555

Metano	4	5
Monóxido de Carbono	259	260
Dióxido de Carbono	622	646
Etileno	0	0
Etano	0	0
Acetileno	0	0
Concentração Total	37020	38327
Concentração de Gases Combustíveis	284	289

Fonte: Dados Adaptados da Análise do Laboratório Especializado, 2024.

Tabela 12 – Comparação de Gases Dissolvidos (ppm a 25°C) - T2

Gás	Antes da Energização	Depois da Energização
Hidrogênio	23	26
Oxigênio	9957	10837
Nitrogênio	24275	21459
Metano	5	4
Monóxido de Carbono	225	205
Dióxido de Carbono	496	441
Etileno	0	0
Etano	0	0
Acetileno	0	0
Concentração Total	34981	30862
Concentração de Gases Combustíveis	253	235

Fonte: Dados Adaptados da Análise do Laboratório Especializado, 2024.

Tabela 13 – Comparação de Gases Dissolvidos (ppm a 25°C) - T3

Gás	Antes da Energização	Depois da Energização
Hidrogênio	16	17
Oxigênio	11613	10969
Nitrogênio	30907	28374
Metano	6	5
Monóxido de Carbono	278	295
Dióxido de Carbono	618	658
Etileno	0	0
Etano	0	0
Acetileno	0	0

Concentração Total	43438	40318
Concentração de Gases Combustíveis	300	317

Fonte: Dados Adaptados da Análise do Laboratório Especializado, 2024.

A Tabela 11 apresenta os resultados de T1. Observa-se que os níveis 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 aumentou, porém os níveis de gases combustíveis (metano, monóxido de carbono e etileno) permanecem baixos, indicando que não há indícios de falhas graves ou arcos elétricos internos.

No caso do T2, de acordo com a Tabela 12, observou-se 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, pois indica que não houve falhas graves ou anômalas durante os testes. A diminuição nos níveis de oxigênio e nitrogênio pode ser explicada por variações normais durante o processo de energização.

Para o T3, os resultados, que estão na Tabela 13, mostram um pequeno aumento 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 indicar processos de degradação, mas ainda está dentro dos níveis aceitáveis. Como nas tabelas anteriores, os níveis de gases combustíveis continuam dentro dos limites aceitáveis, sem 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 são alarmantes, e os transformadores analisados apresentam boas condições operacionais. Contudo, o monitoramento contínuo desses gases é fundamental para garantir a durabilidade e a segurança dos transformadores, conforme os critérios da norma NBR 10576 (2011).

5 CONCLUSÃO

O estágio supervisionado no Laboratório de Alta Tensão da Universidade Federal de Campina Grande foi uma experiência extremamente enriquecedora e fundamental para a consolidação dos conhecimentos adquiridos ao longo da graduação em Engenharia Elétrica. Durante o período de estágio, foi possível ter um contato direto com ensaios elétricos, normas técnicas e equipamentos de alta tensão, proporcionando uma imersão prática na área de sistemas elétricos de potência.

Dentre as principais atividades desenvolvidas, destacam-se os ensaios em equipamentos de proteção individual e coletiva, como luvas isolantes, bastões de manobra e tapetes isolantes. Esses testes exigiram um rigoroso cumprimento das normas técnicas, como a ASTM D120/2022 e a ASTM F711/2021, garantindo que os equipamentos analisados estivessem em conformidade com os padrões de segurança exigidos para ambientes de alta tensão. Esse trabalho reforçou a importância da proteção dos trabalhadores do setor elétrico e do uso adequado dos EPIs e EPCs, bem como da necessidade de ensaios periódicos para assegurar sua eficácia.

Além dos ensaios em equipamentos de proteção, o estágio também possibilitou a realização de testes em transformadores de potencial indutivo, que incluíram ensaios de tensão suportável à frequência industrial, medições de resistência de isolamento, análise de descargas parciais, ensaios de tangente de perdas e capacitâncias e, por fim, a análise físico-química e cromatográfica do óleo isolante. Cada um desses testes desempenha um papel essencial na avaliação da integridade do sistema isolante e na confiabilidade operacional dos transformadores, sendo amplamente utilizados em laboratórios de ensaios de alta tensão e em indústrias do setor elétrico.

O ensaio de descargas parciais, por exemplo, demonstrou a importância da detecção precoce de falhas nos sistemas isolantes dos transformadores, uma vez que descargas excessivas podem indicar a degradação do isolamento e a possibilidade de falhas catastróficas no equipamento. Outro ponto importante foi a realização dos ensaios de resistência de isolamento e tangente de perdas, que permitiram avaliar a integridade elétrica dos TPIs, utilizando o MIDAS Micro 2883, que ajudou no entendimento sobre a instrumentação utilizada na engenharia elétrica aplicada à alta tensão.

Além dos conhecimentos técnicos adquiridos, o estágio proporcionou uma experiência significativa no ambiente de trabalho, envolvendo a interação com professores, pesquisadores e outros profissionais da área. A necessidade de seguir rigorosamente os protocolos de ensaios e documentar os resultados de forma precisa evidenciou a importância da organização e da metodologia científica na engenharia elétrica. O contato com normas internacionais, como as da IEC e da ABNT, fortaleceu a compreensão da importância da padronização e da certificação na indústria elétrica, elementos essenciais para garantir a qualidade e a segurança dos equipamentos elétricos.

Por fim, a experiência no LAT demonstrou a importância do trabalho em equipe, da comunicação eficiente e da atenção aos detalhes, habilidades que serão fundamentais para a trajetória profissional do estagiário. O estágio supervisionado foi, portanto, uma etapa essencial da formação acadêmica, permitindo a aplicação prática dos conhecimentos teóricos adquiridos ao longo do curso e preparando o estagiário para desafios futuros na área de engenharia elétrica. Diante disso, pode-se afirmar que o estágio atingiu plenamente seus objetivos, contribuindo significativamente para a formação profissional e acadêmica do aluno, além de reforçar a importância da pesquisa e do desenvolvimento tecnológico no setor elétrico.

REFERÊNCIAS

ABNT NBR 10622. **Luvas de borracha isolantes**. 2019.

ABNT NBR 6855. **Transformador de Potencial Indutivo - Requisitos e Ensaio**s. Rio de Janeiro, Brasil: ABNT, 2018.

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

ASTM INTERNATIONAL. ASTM D120-22: **Standard Specification for Rubber Insulating Gloves**. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2022.

ASTM F711. **Standard Specification for Insulated and Insulating Hand Tools**. 2021.

CAMARGO, Matheus de Castro. **Metodologia para modelagem de transformadores de potencial indutivos e capacitivos para estudos de transitórios em altas frequências**. 2015. 92 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.

CEPEL. **Manual de Engenharia de Manutenção**. Rio de Janeiro: Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, 2019.

CRISPIM, Hebert Santos. **Relatório de estágio** – CEEI – Bacharelado em Engenharia Elétrica. Laboratório de Alta Tensão UFCG, 2025.

HAEFELY TEST AG. **Operating Instructions MIDAS micro 2883**. Suíça, 2014.

IEC 60243-1. **Electric strength of insulating materials - Test methods** - Part 1: Tests at power frequencies. Genebra: International Electrotechnical Commission, 2013.

IEC 60270. **High-voltage test techniques**: Partial discharge measurements. Genebra: International Electrotechnical Commission, 2017.

LAT-UFCG. **Laboratório de Alta Tensão**. 2024. Disponível em: <https://www.lat.dee.ufcg.edu.br/>.

MAMEDE, João. **Manual de equipamentos elétricos**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

NATTRASS, D. A. **Partial discharge measurement and interpretation**. IEEE Electrical Insulation Magazine, v. 4, n. 3, p. 9-22, 1988.

NBR IEC 61689-1. **Transformadores de medição - Parte 1: Requisitos gerais**. 2020.

NBR IEC 61689-3. **Transformadores de medição - Parte 3: Requisitos gerais**. 2021.

NBR 10576. **Óleo isolante mineral de transformadores e reatores de potência: Requisitos e métodos de ensaio**. 2011. Disponível em: <http://www.abnt.org.br>.

NBR 11854. **Bastão isolante para trabalho em redes energizadas de distribuição**. 1992.

NBR 60270. **Medição de Impulsos Elétricos de Alta Tensão em Materiais Isolantes**. 2017.

OLIVEIRA, Iago Batista. **Relatório de estágio em Engenharia Elétrica**. Laboratório de Alta Tensão UFCG, 2020.

ZINGALES, G. **The requirements of a PD measuring system analyzed in the time domain**. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, v. 7, n. 1, p. 3-10, 2000.