



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIAS
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

ISAAC MARCELINO DE MEDEIROS

**ENSAIOS EM CABOS ISOLADOS DE ALTA TENSÃO: NORMAS, MÉTODOS E
APLICAÇÕES**

CARAÚBAS

2025

ISAAC MARCELINO DE MEDEIROS

**ENSAIOS EM CABOS ISOLADOS DE ALTA TENSÃO: NORMAS, MÉTODOS E
APLICAÇÕES**

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Francisco das Chagas Barbosa Sena

CARAÚBAS

2025

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

M488e Medeiros, Isaac Marcelino de .
Ensaaios em cabos isolados de alta tensão:
normas, métodos e aplicações. / Isaac Marcelino de
Medeiros. - 2025.
57 f. : il.

Orientadora: Francisco das Chagas Barbosa de
Sena.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia
Elétrica, 2025.

1. Ensaiosemcabosisolados. 2.
Ensaioselectricos. 3. Metodologiasdeensaio. 4.
VLF. I. Sena, Francisco das Chagas Barbosa de ,
orient. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Biblioteca Campus Caraúbas
Bibliotecária: Sarah Freire Bezerra
CRB: 15/1052

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

ENSAIOS EM CABOS ISOLADOS DE ALTA TENSÃO: NORMAS, MÉTODOS E APLICAÇÕES

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Defendida em: 29 / 07 / 2025.

BANCA EXAMINADORA

Francisco das Chagas Barbosa Sena (UFERSA)
Presidente

Samara De Cavalcante Paiva (UFERSA)
Membro Examinador

Hugo Michel Câmara de Azevedo Maia (UFERSA)
Membro Examinador

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, por me conceder força, sabedoria e perseverança ao longo desta jornada. Sem Sua graça e bênçãos, este trabalho não teria sido possível.

À minha esposa, Carla Simone Costa de Freitas Medeiros, pelo amor, apoio incondicional e paciência em todos os momentos. Sua compreensão e incentivo foram fundamentais para que eu pudesse seguir em frente, mesmo nos dias mais desafiadores. Obrigado por estar sempre ao meu lado.

A minha filha com todo o meu amor, Anny Rebeca, você é o meu maior sonho e minha força para continuar enfrentando todos os problemas que a vida impõem, as maiores batalhas se tornam pequenas quando lembro de você.

À minha mãe, Raimunda Angélica de Medeiros, pelo carinho, pelos ensinamentos e por sempre acreditar no meu potencial. Sua dedicação e sacrifícios ao longo da minha vida foram essenciais para que eu chegasse até aqui.

Ao meu pai, João Marcelino Filho, por ser um exemplo de determinação e esforço. Seu apoio e conselhos foram imprescindíveis nessa caminhada, e sou grato por tudo o que aprendi com você.

Agradeço a meu orientador Francisco das Chagas Barbosa Sena, por todo o apoio, ajuda e auxílio durante todo esse tempo para finalização desse trabalho.

A todos os amigos e familiares que me ajudaram de forma direta ou indiretamente para estar onde estou hoje.

"Qualquer tecnologia suficientemente avançada é indistinguível da magia."

Arthur Charles Clarke

RESUMO

Este estudo teve como principal objetivo desenvolver um guia técnico para a realização de ensaios em cabos isolados de alta tensão, com o foco na aplicação prática fundamentado nas normas internacionais e nacionais. Mesclando a teoria normativa com os resultados reais, nos ensaios de descargas parciais, tange de perda e a tensão aplicada em *Very Low Frequency* (VLF). O estudo normativo foi utilizado para o embasamento, desde a preparação do ambiente de ensaio até os dados adquiridos com os equipamentos da BAUR. Para validação do estudo de caso, foi realizado em uma usina fotovoltaica, considerando dois circuitos trifásicos com cabos XLPE de 630 mm², os resultados adquiridos como o embasamento normativo, demonstraram nível aceitáveis de degradação, permitindo a liberação dos cabos para a conexão e energização do sistema

Palavras-chave: Ensaios em cabos isolados, Ensaios elétricos, Metodologias de ensaio, VLF.

ABSTRACT

This study aimed to develop a technical guide for conducting electrical tests on high-voltage insulated cables, with a focus on practical application grounded in international and national standards. The work integrates theoretical regulations with real field data from tests such as partial discharges, loss tangent, and Very Low Frequency (VLF) applied voltage. The normative framework served as the basis for all stages, from test environment preparation to data acquisition using BAUR equipment. For case study validation, tests were performed at a photovoltaic power plant, analyzing two three-phase circuits composed of 630 mm² XLPE-insulated cables. The results, when compared to standard acceptance criteria, indicated acceptable levels of insulation degradation, confirming the suitability of the cables for connection and energization of the system.

Keywords: Insulated cable testing, Electrical diagnostics, Testing methodologies, VLF.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ilustra a forma construtiva de um cabo isolado de média tensão 20/35kV.....	20
Figura 2 - Ilustração construtiva de um cabo isolado de alta tensão 69/138kV.....	21
Figura 3 - Conexão do calibrador ao objeto de teste.....	26
Figura 4 - Esquema ilustrativo da montagem do equipamento para o ensaio de descargas parciais.....	27
Figura 5 - Ilustração da corrente de fugas num cabo.....	28
Figura 6 - Fator de perdas ($\tan \delta$).....	29
Figura 7 - Configuração de montagem do equipamento para o ensaio de TD.....	30
Figura 8 - Distribuição de campo elétrico na isolação.....	32
Figura 9 - Detector de descargas parciais, PD-TaD.....	34
Figura 10 - Calibrador PD.....	35
Figura 11 - Equipamento viola TD.....	36
Figura 12 - Termo higrômetro.....	38
Figura 13 - Multímetro digital, utilizado para identificação das fases.....	39
Figura 14 - Sinalização e o isolamento adequado da área de trabalho.....	39
Figura 15 - Bastão de aterramento.....	40
Figura 16 - Terminação mufla externa.....	42
Figura 17 - Ilustração do poste com os dois trifólios.....	43
Figura 18 – Captura da tela no software 4 Baur.....	44
Figura 19 - Captura da tela de sinais de DP na fase 1, para o circuito 2.....	45
Figura 20 - Captura da representação de descarga parcial no gráfico de PRPD.....	45
Figura 21 - Captura da representação dos sinais de descarga parciais, no circuito 2.....	46
Figura 22 - Captura da representação de descarga parcial no gráfico de PRPD no circuito2.....	46
Figura 23 – Captura da representação dos sinais de descarga parciais, no circuito 1.....	47
Figura 24 - Captura da representação de descarga parcial no gráfico de PRPD no circuito1.....	47
Figura 25 – Captura da tabela com os valore de TD as três fases, para o circuito 2.....	49
Figura 26 – Captura do gráfico das três fases, para o circuito 2.....	49
Figura 27 - Captura do desvio padrão para as três fases, circuito 2.....	50
Figura 28 - Captura da tabela com os valore de TD as três fases, para o circuito o circuito 1.....	51
Figura 29 - Captura do gráfico das três fases, para o circuito 1.....	51
Figura 30 - Captura do desvio padrão para as três fases, circuito 1.....	52

Figura 31 – Captura de tela representando a tensão aplicada.....	53
---	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Critério de avaliação para cabos XLPE.....	29
Tabela 2 - Critério de avaliação para cabos EPR.....	30
Tabela 3 - Tensões de teste de resistência VLF para onda senoidais e cosseno-retangulares.....	33
Tabela 4 - Valores numéricos para DP circuito 2.....	47
Tabela 5 - Valores numéricos para DP Circuito 1.....	48
Tabela 6 - Valores MTD, SDTD E Δ TD, nas três fases, circuito 2.....	50
Tabela 7 - Representação dos resultados de TD. No circuito 1.....	52
Tabela 8 - Valores de confirmação de tensão aplicada nas três fases, circuito 2.....	53
Tabela 9 - Valores de confirmação de tensão aplicada nas três fases, circuito 1.....	53

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANEEL: Agência Nacional de Energia Elétrica

CENELEC: Comitê Europeu de Normalização Eletrotécnica

DAC: *Damped AC Testing* (Ensaio baseado em ondas de tensão amortecida)

DC: Tensão Contínua

DC Hi-Pot: Tensão aplicada em corrente contínua

EPIs: Equipamentos de Proteção Individual

IEC: *International Electrotechnical Commission*

IEEE: *Institute of Electrical and Electronics Engineers*

NBR: Norma Brasileira

ONS: Operador Nacional do Sistema Elétrico

Std: *Standard*

VLF: *Very Low Frequency*

VLF-AC: Tensão aplicada em corrente alternada (*Very Low Frequency AC*)

MT: Média Tensão

AT: Alta Tensão

MAT: Muito Alta Tensão

EPR: Borracha Etileno Propileno

XLPE: Polietileno Reticulado

PD-TAD: Partial Discharge Transient Analysis Device (Dispositivo de Análise Transiente de Descarga Parciais)

TD: Tangente de Perda

MTD: Média do Tangente De Perda

SDTD: Desvio Padrão

Δ TD: Alteração do Fator de Dissipação Entre os Níveis de Tensão

APL: Fita de Alumínio Politenada

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2.1. INTRODUÇÃO AOS ENSAIOS EM CABOS ISOLADOS DE ALTA TENSÃO.....	18
2.1.1. CABOS ISOLADOS.....	19
2.2. REVISÃO DE GUIAS E REGULAMENTAÇÕES EXISTENTES.....	23
3. TIPOS DE ENSAIOS.....	25
3.1 ENSAIOS DE DESCARGAS PARCIAIS.....	25
3.2 ENSAIOS DE TANGENTE DE PERDA	27
3.3 ENSAIOS DE TENSÃO APLICADA COM <i>VERY LOW FREQUENCY</i> (VLF).....	31
3.4 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS EM CADA ENSAIO.....	34
4 DIRETRIZES PARA A PADRONIZAÇÃO DOS ENSAIOS.....	37
4.1 PROCEDIMENTOS E PREPARAÇÃO NOS ENSAIOS ELÉTRICOS.....	38
5 APLICAÇÕES PRÁTICAS E PROCEDIMENTOS	41
5.1 EXECUÇÃO DOS ENSAIOS.....	41
5.1.1 DESCARGA PARCIAIS	43
5.1.2 TANGENTE DE PERDA	48
5.1.3 TENSÃO APLICADA.....	52
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	52
REFERÊNCIAS.....	54

1 INTRODUÇÃO

A confiabilidade e segurança dos sistemas elétricos de potência dependem diretamente da qualidade e integridade dos cabos isolados de alta tensão, os quais desempenham um papel fundamental na transmissão e distribuição de energia elétrica. Devido às rigorosas exigências de desempenho e segurança, os ensaios realizados nesses cabos são essenciais para verificar sua conformidade com normas técnicas e seu comportamento quando submetido a diferentes condições operacionais (GONÇALVES, 2018). Dessa forma, os ensaios elétricos permitem a identificação de falhas, envelhecimento prematuro dos materiais isolantes e outros problemas que podem comprometer a operação segura e eficiente das redes elétricas (SILVA et al., 2020).

Ensaio como os de tensão aplicada em corrente alternada (VLF-AC), tensão aplicada em corrente contínua (DC Hi-Pot) e descargas parciais são amplamente utilizados para avaliar a condição dos cabos e prever possíveis falhas (IEC, 2021). As exigências técnicas aplicáveis aos ensaios em cabos isolados de alta tensão estão previstas em normas internacionais, como as da *International Electrotechnical Commission* (IEC) e as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Essas regulamentações estabelecem metodologias e critérios para realização dos ensaios, garantindo a padronização dos processos e a confiabilidade dos resultados (ABNT, 2019).

A detecção precoce da deterioração dos materiais isolantes dos cabos de alta tensão é um dos principais desafios enfrentados pelos engenheiros eletricitistas. Fatores como estresse elétrico, variações térmicas, umidade e descargas parciais contribuem para o envelhecimento dos isolamentos, reduzindo sua vida útil e aumentando o risco de falhas de isolamento (MARTINS, 2017). Logo, o estudo dos mecanismos de degradação e a realização de ensaios periódicos são fundamentais para evitar desligamentos não programados e prejuízos financeiros para concessionárias e consumidores (COSTA e OLIVEIRA, 2020).

Um aspecto crítico dos ensaios em cabos isolados de alta tensão é a escolha do método de ensaio adequado para cada aplicação. Ensaio como o de medição de tangente delta (ou fator de dissipação dielétrica) são amplamente utilizados para monitorar o estado do isolamento ao longo do tempo, possibilitando a detecção precoce de falhas (FERNANDES, 2021). Além disso, ensaios como o de medição da rigidez dielétrica são cruciais para determinar a resistência do material isolante sob tensões extremas, garantindo a segurança operacional dos cabos (ALMEIDA e SANTOS, 2019).

Os ensaios elétricos podem ser classificados em ensaios de tipo e ensaios de rotina. Os ensaios de tipo são realizados em amostras representativas para verificar a conformidade dos cabos com os requisitos normativos antes da produção em larga escala (NOGUEIRA et al., 2016). Já os ensaios de rotina são aplicados a cada unidade fabricada, garantindo que os produtos comercializados atendam aos padrões mínimos de qualidade e segurança (SOUZA, 2018). Ambos os ensaios são indispensáveis para assegurar a confiabilidade do cabo elétrico.

Destaca-se que as tecnologias de ensaios elétricos têm avançado significativamente nos últimos anos. Métodos mais modernos e menos invasivos, como os ensaios baseados em ondas de tensão amortecida (*Damped AC Testing* – DAC) e espectroscopia de impedância dielétrica, oferecem maior precisão e confiabilidade na avaliação dos cabos isolados (PEREIRA, 2022). A adoção dessas tecnologias permite que as concessionárias de energia elétrica realizem diagnósticos mais detalhados e otimizem seus planos de manutenção preventiva, reduzindo custos operacionais e melhorando a qualidade do serviço prestado (BARBOSA et al., 2021).

Diante desse contexto, este trabalho tem como objetivo desenvolver um estudo técnico capaz de direcionar um profissional engenheiro eletricista a realização de ensaios em cabos isolados de alta tensão, observando o disposto em prescrições técnicas e utilizando equipamentos adequados. A importância desse estudo se justifica pela necessidade crescente de aprimoramento das práticas de manutenção e inspeção, garantindo maior eficiência, segurança e confiabilidade na operação dos sistemas elétricos (SANTOS e LIMA, 2023). Além disso, a pesquisa busca contribuir para o entendimento dos fatores que influenciam a degradação dos isolamentos e as melhores estratégias para prolongar a vida útil dos cabos utilizados em redes de alta tensão.

1.2 Problema

Uma das principais dificuldades na realização de ensaios práticos em cabos de alta tensão é a necessidade de seguir normativas especializadas, muitas vezes disponíveis apenas em fontes internacionais, como as normas do IEEE (do inglês *Institute of Electrical and Electronic Engineering*). Assim, para além da dificuldade de entendimento e aplicação dos procedimentos técnicos, o engenheiro eletricista deverá também superar a dificuldade do estudo de uma normativa escrita em língua estrangeira, muitas das quais são desconhecidas, principalmente, para novos profissionais.

Além disso, os ensaios de comissionamento de cabos de alta tensão requerem o uso de equipamentos especializados e treinamento prático intensivo para o manuseio correto. Esses fatores tornam difícil a inserção de novos profissionais nesse segmento, que muitas vezes desconhecem as especificidades e complexidades envolvidas.

1.4 Justificativa

Entende-se que o presente trabalho constituirá uma base sólida para a realização de ensaios em cabos de alta tensão, permitindo diagnósticos precisos e manutenção eficiente. Além do mais, poderá ser utilizado como material de apoio para capacitação profissional e como fonte bibliográfica para cursos de Engenharia Elétrica, contribuindo para a formação de novos profissionais.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivos Geral

O presente trabalho possui o seguinte objetivo geral:

- Desenvolver um estudo técnico para realização dos seguintes ensaios em cabos isolados de alta tensão: descargas parciais; tangente de perda; e tensão aplicada com VLF;

1.5.2 Objetivos Específicos

Para alcançar o objetivo geral, propõe-se os seguintes objetivos específicos:

- Realizar uma revisão bibliográfica de guias e normas técnicas envolvendo o tema do presente trabalho;
- Resumir e traduzir trechos importantes das normativas aplicáveis aos ensaios abordados no presente trabalho;
- Detalhar os equipamentos usados em cada ensaio;
- Ilustra e exemplificar o uso dos equipamentos em situações práticas;
- Resumir os procedimentos necessários a realização de cada um dos ensaios abordados no presente trabalho;

1.6 Organização do Trabalho

O presente trabalho encontra estruturado da seguinte forma: Ao longo deste trabalho, será abordada uma análise detalhada dos principais ensaios aplicados aos cabos isolados, com foco na sua importância para a manutenção da confiabilidade e segurança do sistema elétrico.

- **Capítulo 1:** Revisão bibliográfica e fundamentação teórica necessária ao estudo de ensaios e normas técnicas aplicáveis.
- **Capítulo 2:** Apresentação dos conceitos normativos para os ensaios.
- **Capítulo 3:** Apresentação das metodologias e equipamentos necessários para a realização dos ensaios, proporcionando uma visão técnica de cada um.
- **Capítulo 4:** Diretrizes para a padronização dos ensaios, visando a qualidade e a segurança.
- **Capítulo 5:** Aplicações práticas, procedimentos e resultados
- **Capítulo 6:** Conclusão

É importante frisar, que a organização do presente trabalho foi pensada de modo a fornecer uma visão abrangente e estruturada sobre os processos de ensaio em cabos isolados, com vistas à melhoria da qualidade e confiabilidade dos sistemas elétricos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E NORMAS TÉCNICAS

Neste capítulo, serão abordados os principais conceitos relacionados aos ensaios de cabos isolados de alta tensão, destacando a importância desses testes para a segurança e confiabilidade dos sistemas elétricos. Serão discutidas as normativas aplicáveis, incluindo regulamentações da IEC, ABNT e IEEE, que estabelecem padrões técnicos para a realização dos ensaios. Além disso, será feita uma revisão da literatura e de guias técnicos existentes, analisando os principais estudos e diretrizes que embasam a aplicação dos ensaios elétricos em cabos de alta tensão.

2.1. INTRODUÇÃO AOS ENSAIOS EM CABOS ISOLADOS DE ALTA TENSÃO

Os ensaios realizados em cabos isolados de alta tensão são procedimentos fundamentais para garantir a integridade e o desempenho seguro dos sistemas elétricos. Esses testes permitem avaliar a resistência elétrica, a durabilidade dos materiais isolantes e a presença de possíveis defeitos que possam comprometer a operação do sistema (MENDES et al., 2021). Em função da crescente demanda por redes elétricas mais confiáveis e eficientes, os ensaios vêm se tornando cada vez mais sofisticados, abrangendo metodologias avançadas de diagnóstico e predição de falhas (SOUZA e PEREIRA, 2020).

Os testes em cabos de alta tensão são realizados em diversas etapas do ciclo de vida do cabo, desde a fabricação até sua operação em campo. Durante a fase de produção, os ensaios servem para garantir a conformidade do material com as normas técnicas. Já na fase de instalação, os testes asseguram que o cabo foi corretamente montado e que não há defeitos provenientes do transporte ou do manuseio inadequado (COSTA, 2019). Além disso, ao longo da vida útil do cabo, os ensaios periódicos são essenciais para monitorar o estado do isolamento e prever possíveis falhas antes que ocorram danos graves ao sistema elétrico (FERREIRA et al., 2022).

Verifica-se que a importância dos ensaios em cabos isolados de alta tensão está diretamente relacionada aos riscos que falhas nesses componentes podem gerar, curtos-circuitos, superaquecimento e rompimentos de isolamento podem resultar em interrupções no fornecimento de energia, prejuízos financeiros e riscos à segurança de pessoas e equipamentos (SANTOS e LIMA, 2023). Dessa forma, os ensaios representam uma ferramenta preventiva

essencial para minimizar tais riscos e garantir a continuidade do fornecimento seguro e eficiente de energia elétrica.

O avanço das tecnologias de monitoramento tem permitido a evolução dos ensaios em cabos isolados, tornando-os cada vez mais precisos e eficientes. Métodos como a análise por espectroscopia dielétrica e o uso de inteligência artificial na predição de falhas vêm sendo explorados como alternativas para otimizar o diagnóstico do estado dos cabos (PEREIRA et al., 2021). Essas inovações possibilitam um controle mais rigoroso da condição dos cabos, reduzindo custos com manutenção corretiva e aumentando a confiabilidade do sistema elétrico.

No contexto normativo, os ensaios em cabos de alta tensão são regulamentados por órgãos internacionais como a IEC (*International Electrotechnical Commission*) e a IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*). Essas normas estabelecem os critérios para a realização dos testes, os parâmetros de aceitação e os limites de tolerância para cada tipo de ensaio (COSTA, 2019). No Brasil, a ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) também desempenha um papel fundamental na padronização dos procedimentos de ensaio, garantindo que as práticas adotadas no país estejam alinhadas às diretrizes internacionais.

Diante da importância desses ensaios para a segurança e confiabilidade dos sistemas elétricos, torna-se essencial que profissionais da área elétrica tenham um conhecimento aprofundado sobre as metodologias aplicáveis. A capacitação e o treinamento adequado dos técnicos responsáveis pelos testes são fatores determinantes para a obtenção de resultados precisos e confiáveis (SOUZA e PEREIRA, 2020). Além disso, a correta interpretação dos resultados obtidos nos ensaios é crucial para a tomada de decisões eficazes no que diz respeito à manutenção e operação dos cabos de alta tensão.

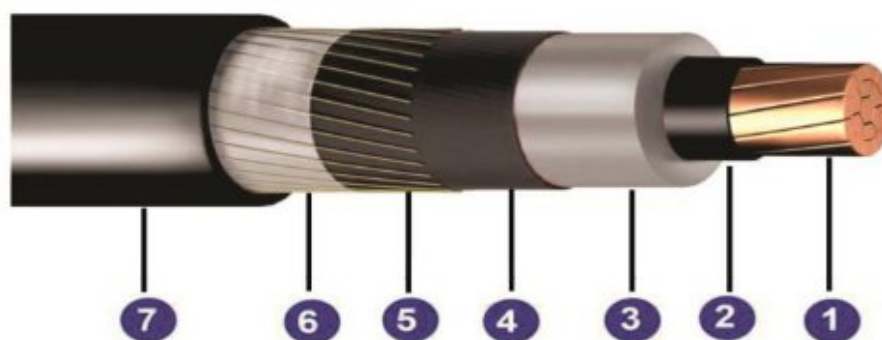
2.1.1. CABOS ISOLADOS

Os cabos isolados desempenham um papel crucial nos sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica, sendo empregados quando a utilização de cabos nus não é viável devido a restrições ambientais, urbanas ou de segurança. Esses cabos são projetados para suportar diferentes níveis de tensão, garantindo a integridade da rede elétrica e minimizando falhas operacionais. A crescente demanda por redes elétricas mais confiáveis e seguras tem impulsionado o desenvolvimento tecnológico desses cabos, resultando em

materiais mais resistentes e técnicas avançadas de fabricação (MACHADO e MOURA, 2014).

O valor empregado aos cabos isolados de linhas subterrâneas é bastante elevando quando se comparado aos cabos nus de redes aéreas, esses custos são compensados quando se trata da manutenção e seguranças desses cabos. Sendo compostas por diferentes camadas, sendo eles: condutor geralmente cobre ou alumínio; isolação sendo XLPE ou EPR; blindagem semicondutor interna e externa e cobertura contra agente mecânico e ambientais, mudando sua estrutura construtiva de acordo com a sua classe de tensão e utilização, como é mostrado na Figura 1 e Figura 2. (PIMENTEL, 2010).

Figura 1 - Ilustra a forma construtiva de um cabo isolado de média tensão 20/35kV



Fonte Inducabos 2025

Abaixo estão apresentados os diversos elementos que compõem um cabo isolado de média tensão 20/35 kV:

- Ponto 1, condutor, responsável pelo transporte da corrente elétrica.,
- Ponto 2, blindagem do condutor, evitando degradação da isolação do cabo,
- Ponto 3, isolamento, geralmente feito de XLPE ou EPR, tem a função de suportar os gradientes de tensão aplicados ao cabo;
- Ponto 4, blindagem de isolação, reduzir a interferência eletromagnética;
- Ponto 5, blindagem metálica, controlando o estresse elétrico de tensão do cabo,
- Ponto 6, separador, utilizado para separação das camadas internas e integridade estrutural do cabo;
- Ponto 7, cobertura, possuindo a função de proteção mecânica.

Figura 2 - Ilustração construtiva de um cabo isolado de alta tensão 69/138kV.



Fonte: Inducabos 2025

Abaixo estão apresentados os diversos elementos que compõem um cabo isolado de média tensão 69/138 kV:

- Ponto 1, condutor, cobre eletrolítico nu ou alumínio;
- Ponto 2, Blindagem do condutor: Composto termofixo semiconductor;
- Ponto 3, isolamento: Composto termofixo de polietileno reticulado retardante à arborescência TR XLPE (Tree Retardant) 90° C;
- Ponto 4, Blindagem da isolamento: Composto termofixo semiconductor;
- Ponto 5, Enfaixamento da isolamento: Fita semicondutora bloqueada contra penetração longitudinal de água;
- Ponto 6, Blindagem metálica: Fios de cobre nu com seção adequada ao projeto e bloqueada contra penetração longitudinal de água;
- Ponto 7, Separador: Fita semicondutora bloqueada contra penetração longitudinal de água;
- Ponto 8, Bloqueio: Fita de alumínio politenada (APL) contra penetração radial de água;
- Ponto 9, Cobertura: Composto de polietileno termoplástico PE ST7 (HDPE).

A evolução dos cabos isolados tem sido impulsionada pela busca por materiais mais eficientes e sustentáveis. Tecnologias recentes envolvem a utilização de nanocompósitos no

isolamento, aumentando sua resistência térmica e elétrica. Além disso, métodos avançados de extrusão e controle de descargas parciais estão sendo aplicados para garantir maior confiabilidade na operação desses cabos. A modernização dos sistemas elétricos, aliada a investimentos em pesquisa e desenvolvimento, tem permitido a ampliação do uso de cabos isolados, tornando-os uma alternativa cada vez mais viável para redes elétricas subterrâneas e subaquáticas (GOCKENBACH ET AL., 2016).

O controle de qualidade dos cabos isolados é um fator determinante para sua eficiência operacional. Para garantir sua conformidade com os padrões internacionais, os fabricantes realizam uma série de ensaios laboratoriais. Esses ensaios são classificados em quatro categorias principais, são eles:

- ensaios de rotina;
- ensaios de amostra;
- ensaios de tipo;
- e ensaios de pré-qualificação.

Os ensaios de rotina são aplicados a todos os cabos fabricados, e asseguram que atendam aos critérios mínimos de desempenho elétrico e mecânico. Os ensaios de amostra são realizados em lotes específicos para avaliar variações no processo produtivo. Já os ensaios de tipo, são conduzidos antes da comercialização de um novo modelo de cabo, e visam garantir sua adequação a longo prazo. Por fim, os ensaios de pré-qualificação simulam condições operacionais reais, assegurando a durabilidade do cabo ao longo dos anos (CIGRÉ, 2012).

Na prática, os principais tipos de ensaios realizados em cabos de alta tensão são os seguintes: testes de descargas parciais; tangente de perda; e tensão aplicada com VLF. O ensaio de descargas parciais é utilizado para detectar falhas internas ao isolamento, prevenindo o desenvolvimento de defeitos que podem levar à falha total da isolação do cabo (ALMEIDA e SANTOS, 2019). O ensaio de tangente de perda permite avaliar as perdas dielétricas no isolamento que recobre o cabo, indicando o nível de degradação do material ao longo do tempo (GONÇALVES, 2018). Já o ensaio de tensão aplicada com VLF é amplamente utilizado para verificar a resistência do isolamento a tensões elevadas (SILVA et al., 2020).

Como apresentado, os cabos isolados representam um avanço significativo na engenharia elétrica, proporcionando maior segurança, confiabilidade e eficiência no transporte de energia elétrica. Com a adoção de normas rigorosas e tecnologias inovadoras, espera-se

que esses cabos desempenhem um papel ainda mais relevante na modernização das infraestruturas elétricas globais.

2.2. REVISÃO DE GUIAS E REGULAMENTAÇÕES EXISTENTES

A regulamentação e normatização dos ensaios em cabos isolados de alta tensão são fundamentais para garantir a segurança e confiabilidade dos sistemas elétricos. Diversos guias técnicos e regulamentações têm sido desenvolvidos ao longo dos anos por entidades reconhecidas globalmente, como a IEC, ABNT e IEEE, além de órgãos reguladores nacionais, como a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) no Brasil. (ABNT NBR 9311, 2021)

A *International Electrotechnical Commission* (IEC) publica normas amplamente adotadas globalmente, incluindo a IEC 60287, que fornece diretrizes para o cálculo da capacidade de condução de corrente dos cabos elétricos, e a IEC 60502, que trata de cabos de potência com isolamento extrudado para tensões até 30 kV. Essas normas são frequentemente revisadas para acompanhar os avanços tecnológicos e as novas demandas do setor. (IEC 60502-1, 2009)

Nos Estados Unidos, o *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) desenvolve normas técnicas de grande relevância, como a IEEE 576, que fornece diretrizes para a seleção e aplicação de cabos elétricos, e a IEEE 525, que trata de práticas recomendadas para a instalação de cabos em sistemas de potência subterrâneos. (IEEE Std 525, 2007)

No caso dos cabos de Média Tensão (MT), a norma IEC 60502-2 estabelece requisitos técnicos para tensões entre 6 kV e 36 kV, incluindo especificações sobre materiais, dimensões e testes de desempenho. Para cabos de Alta Tensão (AT), a IEC 60840 cobre tensões entre 30 kV e 150 kV, enquanto para sistemas de Muita Alta Tensão (MAT), acima de 150 kV, a referência normativa é a IEC 62067. Essas normas garantem a confiabilidade dos cabos, estabelecendo diretrizes rigorosas para seu desempenho e vida útil (IEC 60840, 2020)

A União Europeia, por sua vez, possui diretrizes rígidas para a segurança elétrica, estabelecidas pelo Comitê Europeu de Normalização Eletrotécnica (CENELEC). Normas como a EN 50341, que trata das diretrizes para a instalação de linhas aéreas, complementam as regulamentações específicas de cada país membro. (EN 50341-1, 2012)

Além das normas técnicas, a regulamentação governamental também desempenha um papel essencial no setor elétrico. No Brasil, a ANEEL estabelece diretrizes para a segurança e

confiabilidade das redes de transmissão e distribuição, incluindo requisitos específicos para os ensaios e certificação de cabos de alta tensão. Regulamentos como a Resolução Normativa ANEEL nº 414/2010 definem critérios para a qualidade do fornecimento de energia e a manutenção dos sistemas elétricos. (ANEEL REN 414, 2010)

No Brasil, a regulamentação dos ensaios em cabos isolados de alta tensão é conduzida por órgãos como a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). A ANEEL estabelece diretrizes regulatórias que visam garantir a confiabilidade e segurança da rede elétrica nacional, incluindo requisitos específicos para a certificação e testes de cabos de alta tensão. Já a ABNT adapta e publica normas técnicas alinhadas com padrões internacionais, garantindo que os ensaios atendam às necessidades do setor elétrico brasileiro. Além disso, o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) também desempenha um papel importante na definição de diretrizes para a operação e manutenção de sistemas de transmissão, incluindo recomendações para inspeção e monitoramento de cabos isolados. Essas regulamentações são revisadas periodicamente para acompanhar os avanços tecnológicos e as novas demandas da infraestrutura elétrica do país. (ONS Submódulo 2.7, 2023)

A constante revisão e atualização dos guias e regulamentos são fundamentais para acompanhar os avanços tecnológicos, garantir a compatibilidade dos sistemas elétricos modernos e reduzir riscos operacionais. Profissionais do setor devem estar atentos às novas edições das normas e regulamentações para garantir a conformidade e otimizar a segurança das redes elétricas. (IEEE Std 400, 2021)

Dessa forma, a revisão das regulamentações existentes permite que os procedimentos de ensaio em cabos de alta tensão sejam continuamente aprimorados, contribuindo para a confiabilidade e longevidade dos sistemas elétricos

3. TIPOS DE ENSAIOS

Este capítulo apresenta os principais ensaios utilizados no estudo de cabos isolados, bem como os equipamentos necessários à sua realização. Serão abordados os ensaios de descargas parciais, tangente de perda e tensão aplicada com *Very Low Frequency* (VLF).

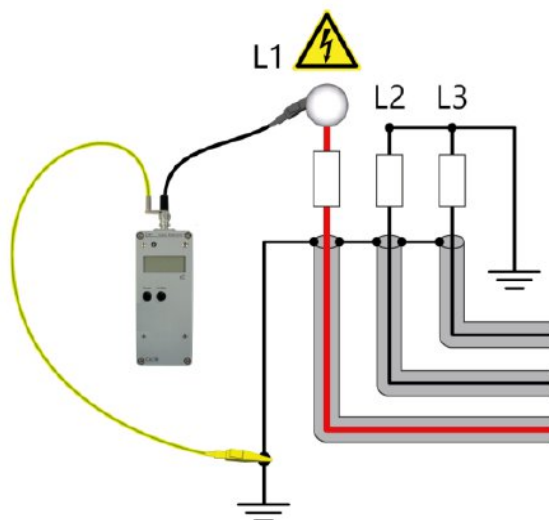
3.1 ENSAIOS DE DESCARGAS PARCIAIS

A Descarga Parcial (PD) é um fenômeno elétrico que ocorre em meio isolante ou dielétrico, em que o campo elétrico em determinado ponto ou região do material excede a sua rigidez dielétrica, mas não é suficiente para causar a falha completa do mesmo. Como resultado do campo elevado, tem-se a formação de pequenas descargas elétricas que podem acontecer em cabos isolados, transformadores e outros equipamentos elétricos, sem atravessar completamente o meio isolante. (JOSÉ, 2013)

Os ensaios de Descargas Parciais (DP) são fundamentais para avaliar a integridade dos cabos isolados, pois permitem detectar imperfeições no isolamento que podem levar a falhas prematuras (IEEE, 2012). Pode-se entender descargas parciais como sendo pequenas descargas elétricas que ocorrem dentro de cavidades ou imperfeições do isolamento, podendo degradá-lo ao longo do tempo e comprometer a confiabilidade da isolação elétrica (IEC, 2011). Entre as principais causas de descargas parciais estão defeitos na fabricação do cabo, danos mecânicos durante a instalação, contaminação do isolamento e envelhecimento térmico. (IEC 60270, 2015)

Para garantir uma maior precisão nos testes, se faz necessário a realização de um procedimento de calibração, em que um pulso de carga conhecido (em pC), é lançado no cabo de ensaio, a Figura 3, ilustra a configuração de calibração normalmente utilizada. Com isso, sendo possível a visualização de picos iniciais e finais, claros, validando a sensibilidade do sistema, sendo importante uma baixa carga de calibração para uma melhor sensibilidade e apresentar melhores resultados. (IEC, 2011)

Figura 3 - Conexão do calibrador ao objeto de teste.



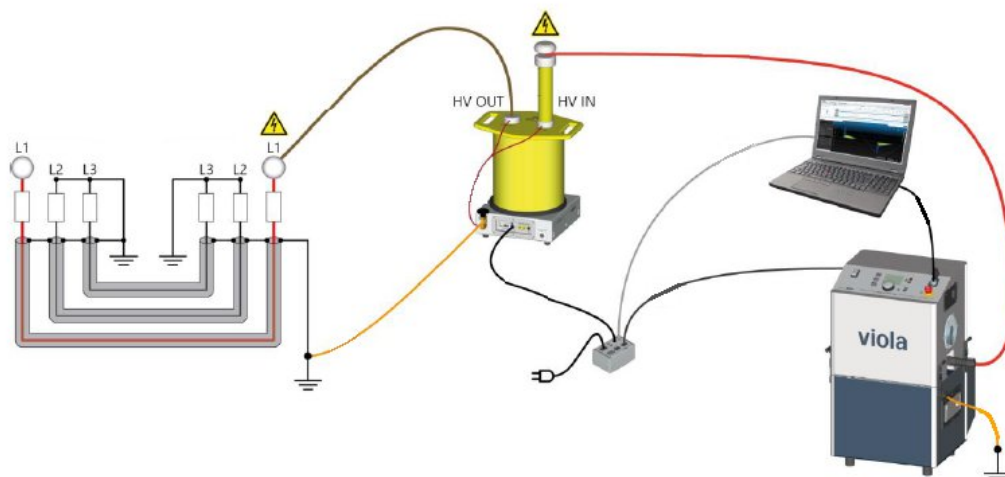
Fonte: Adaptado do manual de operação Baur, 2025.

A principal norma que rege os ensaios de DP em cabos de alta tensão é a IEC 60270, que estabelece os princípios de medição, critérios de aceitação e procedimentos de calibração para garantir a precisão dos testes (IEC, 2011). No Brasil, a ABNT NBR 9317 também aborda a realização desses ensaios, alinhando-se aos padrões internacionais (ABNT, 2020).

A medição das descargas parciais pode ser feita por métodos convencionais, utilizando acopladores capacitivos, ou por técnicas mais avançadas, como sensores ópticos e antenas de radiofrequência. A escolha da metodologia depende das características do cabo e das condições operacionais do sistema elétrico (IEEE, 2006).

Como ilustrado na Figura 4 é representado a configuração usada para o ensaio de descarga parciais utilizando o equipamento Viola como fonte de alimentação com uma baixa frequência e o PdTad, (*Partial Discharge Transient Analysis Device* - Dispositivo de Análise Transiente de Descarga Parcial) empregado para o ensaio de descargas parciais nos cabos, responsável por detectar, quantificar e classificar os pulsos gerados, durante a execução. (IEEE 400.3-2006)

Figura 4 - Esquema ilustrativo da montagem do equipamento para o ensaio de descargas parciais.



Fonte: Adaptado do manual de operação Baur, 2025.

Sensores de DP podem ser instalados permanentemente nos cabos para fornecer dados em tempo real sobre a degradação do isolamento, permitindo a realização de manutenções preditivas (IEC, 2011).

Nos ensaios de descargas parciais, a principal métrica analisada é a magnitude das descargas e sua localização ao longo do cabo. Valores elevados podem indicar defeitos no isolamento, como bolhas, pontos de arborescência, fissuras ou contaminação por umidade. *Softwares* especializados são utilizados para mapear a distribuição dessas descargas e facilitar a identificação de pontos críticos (IEEE, 2019).

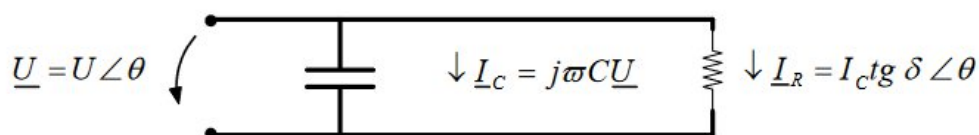
3.2 ENSAIOS DE TANGENTE DE PERDA

Os ensaios de tangente de perda desempenham um papel fundamental na avaliação da integridade do isolamento de cabos elétricos de alta tensão. Esse tipo de ensaio baseia-se na medição da dissipação de energia no isolamento do cabo, permitindo identificar possíveis deteriorações e falhas incipientes (IEEE, 2018). O parâmetro tangente de perda, ou tangente delta, ou fator de dissipação, expressa a relação entre a potência ativa dissipada e a potência reativa armazenada no dielétrico, sendo um indicador direto das condições do isolamento (IEC, 2020).

Dessa forma o $\tan \delta$ (tangente delta), mede o ângulo de perdas, que ocorre na corrente de fuga capacitiva (I_c) e a tensão (U), sendo representado na Figura 5. A corrente gerada,

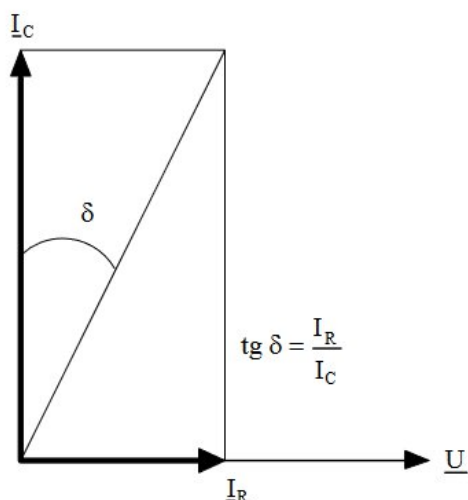
idealmente, deveria ser puramente capacitiva, visto que o cabo atuaria como um dielétrico, contudo, com o surgimento de imperfeições no material isolante, surge a componente resistiva (I_r), indicando o processo de degradação do isolamento. Enquanto a componente capacitiva está ligada às características geométricas e construtivas do cabo, dessa forma o aumento do valor de $\tan \delta$ ao passar do tempo é uma indicação da deterioração e envelhecimento. Ressalta-se que a indutância, associada aos condutores e ao campo magnético externo, não influencia significativamente o ensaio de $\tan \delta$, pois este isola o comportamento do dielétrico. Em baixa frequência, a contribuição da indutância no modelo elétrico do isolamento é considerada desprezível. (BRANCO, 2014)

Figura 5 - Ilustração da corrente de fugas num cabo.



Fonte (SANTOS, 2005)

Com relação ao dielétrico ideal, a corrente capacitiva expõe uma tendência a 90° com relação a tensão aplicada, tendo em vista que esse material não apresenta perdas dielétricas pois é livre de impureza, dessa forma, resultando em um ângulo de perdas igual a zero. Já para os dielétricos reais, em que surgem impurezas, o ângulo de defasagem passa a diminuir, sendo inferior a 90° , essa variação acarretaria em uma dissipação de energia, e por consequência, no aquecimento do isolamento. Dessa forma, o ângulo que passa a ser formado proporciona a análise do grau de envelhecimento e degradação do material isolante, sendo ilustrado na Figura 6. (BENTO, 2019)

Figura 6 - Fator de perdas ($\tan \delta$).

Fonte: (SANTOS, 2005)

As normas técnicas estabelecem critérios para a execução dos ensaios e interpretação dos resultados. A IEC 60270 e a IEEE Std 400.2, por exemplo, definem os procedimentos padronizados para a medição da tangente de perda em cabos isolados de média e alta tensão, como por exemplo XLPE e o EPR (IEEE, 2018). Além disso, a ABNT NBR 11734 detalha os limites aceitáveis de fator de dissipação para diferentes tipos de materiais isolantes utilizados em cabos elétricos (ABNT, 2017). Com isso, as Tabela 1 e Tabela 2, fazem referências aos valores de aceitação e classificação.

Tabela 1 - Critério de avaliação para cabos XLPE

Valores característicos	Nível de alarme	Ramp-up
SDTD	Risco elevado	>0,5
	Risco	>0,1
	Bom	<0,1
MTD	Risco elevado	>50
	Risco	>4
	Bom	<4
ΔTD	Risco elevado	>80
	Risco	>5
	Bom	<5

Fonte: Adaptado da IEEE 400.2

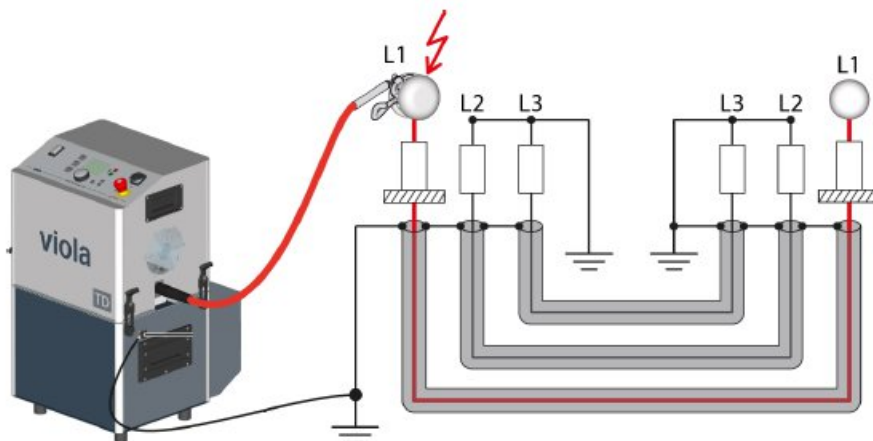
Tabela 2 - Critério de avaliação para cabos EPR.

Valores característicos	Nível de alarme	Ramp-up
SDTD	Risco elevado	$>1,3$
	Risco	$>0,1$
	Bom	$<0,1$
MTD	Risco elevado	>120
	Risco	35
	Bom	<4
ΔTD	Risco elevado	>80
	Risco	>5
	Bom	<5

Fonte: Adaptado da IEEE 400.2

Apresentando os critérios de avaliação para cada tipo de ensaios representando sua degradação, a partir do nível atingido, classificando com bom, risco ou risco elevado (IEEE, 2018)

A aplicação do ensaio de tangente de perda com tensão de frequência industrial é um dos métodos mais comuns, pois reflete diretamente as condições operacionais dos cabos. No entanto, variações como a utilização de tensão VLF também são amplamente empregadas, Figura 7 ilustra a configuração do equipamento para realizar esse ensaio, especialmente para ensaios de campo em cabos recém-instalados ou em serviço (IEEE, 2019). Essa abordagem facilita a detecção de degradação sem comprometer a integridade do sistema.

Figura 7 - Configuração de montagem do equipamento para o ensaio de TD.

Fonte: Adaptado do manual de operação Baur, 2025.

Fatores ambientais, como temperatura e umidade, podem influenciar os resultados do ensaio, tornando essencial a compensação de variáveis durante a análise dos dados (IEC, 2020). Métodos avançados, como a correção automática de temperatura e o uso de algoritmos preditivos, têm sido cada vez mais adotados para melhorar a precisão da interpretação dos ensaios (ABNT, 2017).

Além de ser um método de diagnóstico eficiente, o ensaio de tangente de perda pode ser combinado com outros testes, como ensaios de descargas parciais e testes de tensão aplicada, para uma avaliação mais completa do isolamento dos cabos (IEEE, 2018). Essa abordagem integrada permite uma melhor tomada de decisão quanto à substituição ou manutenção dos cabos.

3.3 ENSAIOS DE TENSÃO APLICADA COM *VERY LOW FREQUENCY* (VLF)

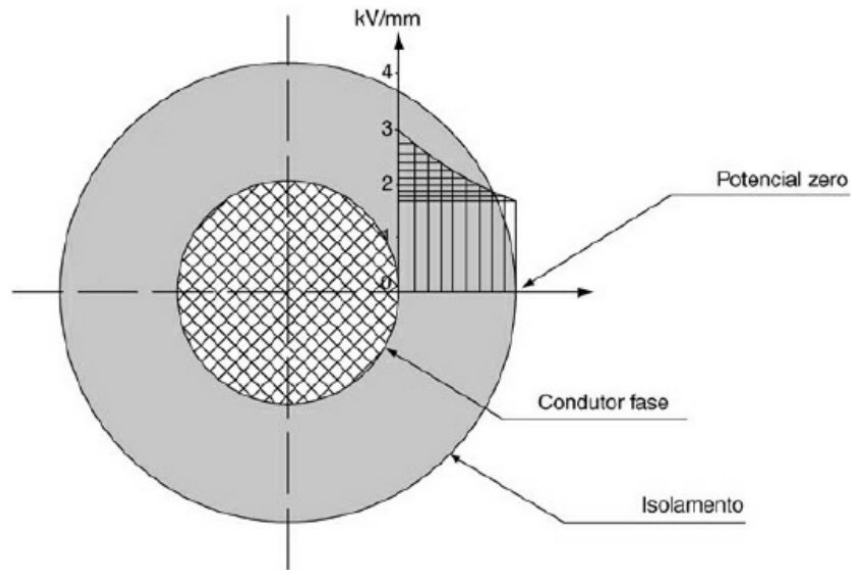
Os ensaios de tensão aplicada com *Very Low Frequency* (VLF) são amplamente utilizados para avaliar a integridade do isolamento de cabos elétricos de alta tensão. Esse tipo de ensaio é especialmente indicado para testes em cabos novos e em operação, pois permite a detecção de falhas incipientes sem causar danos ao material isolante (IEEE, 2018).

A VLF é definida como uma frequência abaixo de 1 Hz, sendo comumente utilizada em valores de 0,01 Hz a 0,1 Hz para minimizar o estresse no isolamento (IEC, 2020). A principal vantagem desses ensaios em relação aos testes convencionais de tensão contínua (DC) é que a baixa frequência reduz o risco de degradação do isolamento, garantindo uma avaliação mais confiável das condições operacionais do cabo (ABNT, 2017).

O ensaio envolve aplicar uma tensão alternada de frequência muito baixa, como já foi explicado, para observar como o isolamento reage. Enquanto o teste acontece, são avaliados fatores como a corrente de fuga e a resistência do isolamento. (IEEE, 2019).

Com isso, o gradiente de potencial ou estresse elétrico, apresenta a ligação entre a tensão aplicada e a espessura do isolamento do cabo, essa medida varia ao longo do comprimento do cabo, apresentando uma maior intensidade na parte de contato entre o condutor e o isolamento e mínimo na sua parte externa, sendo ilustrada na Figura 8 . Dessa forma, caso o valor máximo de tensão exceda a resistência do isolamento, pode ocorrer uma ruptura dielétrica, principalmente em setores com a presença de impurezas, bolhas e umidade. (BRANCO, 2014).

Figura 8 - Distribuição de campo elétrico na isolação.



Fonte (FILHO, 2013)

Para se obter os valores de gradientes de potencial, a superfície do condutor e a do isolamento, nas seguintes Equações (1) e (2), baseado na norma IEC 60840 (BRANCO, 2014)

$$E_i \frac{2U_0}{d_{ii} \ln\left(\frac{D_{io}}{d_{ii}}\right)} \quad (1)$$

$$E_o \frac{2U_0}{D_{io} \ln\left(\frac{D_{io}}{d_{ii}}\right)} \quad (2)$$

Em que:

E_i – Gradiente de potência à superfície do condutor (KV/mm);

E_o – Gradiente de potencial à superfície do isolamento (KV/mm);

U_0 – Tensão simples (KV);

D_{io} – Diâmetro exterior normal do isolamento (mm);

d_{ii} - Diâmetro interno declarado do isolamento (mm);

t_n – Espessura nominal do isolamento (mm);

$D_{io} = d_{ii} + 2t_n$.

Diferentes formas de onda podem ser utilizadas nos ensaios VLF, sendo as mais comuns a senoidal, retangular e trapezoidal. Alguns desses valores são apresentados na Tabela 3, encontrando os valores de tensão nominal para os critérios de instalação, aceitação e manutenção. Sendo a forma de onda senoidal a mais amplamente adotada, pois proporciona uma distribuição uniforme da tensão ao longo do cabo, permitindo uma melhor avaliação das condições do isolamento (IEEE, 2019). A escolha da forma de onda influencia diretamente os resultados e deve ser feita conforme as recomendações normativas

Tabela 3 - Tensões de teste de resistência VLF para onda senoidais e cosseno-retangulares.

Forma de onda	Tensão nominal U (fase - terra) [kV]	Instalação (fase – terra) [kVms]	Aceitação (fase – terra) [kVms]	Manutenção (fase – terra) [kVms]
Senoidal	5	9	10	7
	8	11	13	10
	15	19	21	16
	20	24	26	20
	25	29	32	24
	28	32	36	27
	30	34	28	29
	35	39	44	33
	46	51	57	43
	69	75	84	63
Cosseno retangular	5	13	14	10
	8	16	18	14
	15	27	30	22
	20	34	37	28
	25	41	45	34
	28	45	51	38
	30	48	54	41
	35	55	62	47
	46	72	81	61
	69	106	119	89

Fonte: Adaptado de IEEE 400.2

A norma IEEE 400.2 estabelece critérios para cada um dos estagios: para os cabos em instalação, cabos lançados, porém sem terminações; aceitação – cabos lançados e com terminações; e Manutenção - cabos em operação.

3.4 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS EM CADA ENSAIO

Os ensaios elétricos em cabos isolados, exigem o uso de equipamentos especializados que garantam a precisão das medições e a segurança do procedimento. A escolha do equipamento é fundamental para avaliar corretamente a integridade do isolamento e diagnosticar possíveis falhas (IEEE, 2018). Cada tipo de ensaio requer instrumentos específicos que permitem a aplicação das metodologias estabelecidas nas normas técnicas vigentes (IEC, 2020).

No ensaio de descargas parciais, um dos principais equipamentos utilizados é o detector de descargas parciais também conhecido como PD-TaD ilustrado na Figura 9, que monitora sinais elétricos gerados por falhas internas no isolamento. Além disso, é necessário a utilização de um calibrador, ilustrado na Figura 10, para uma precisão mais assertiva no monitoramento dos sinais melhorando a interpretação dos dados coletados (ABNT, 2017).

Figura 9 - Detector de descargas parciais, PD-TaD.



Fonte: Autoria própria. ,2025.

A Figura 10 apresenta o calibrador PD.

Figura 10 - Calibrador PD



Fonte: Adaptado do manual de operação Baur,2025.

Para os ensaios de tangente de perda, utiliza-se um medidor de fator de dissipação, que avalia as perdas dielétricas no isolamento do cabo. Esse equipamento é frequentemente combinado com uma fonte de alta tensão e um capacitor de referência para garantir a exatidão dos resultados obtidos (IEEE, 2019).

Nos ensaios de tensão aplicada e tangente de perda, com *Very Low Frequency* (VLF), o principal equipamento utilizado é o gerador de VLF, representado na Figura 11, que aplica tensão alternada de baixa frequência ao cabo em teste. Sensores de corrente e tensão são empregados para monitorar a resposta dielétrica do isolamento, permitindo a detecção de degradação e defeitos incipientes (IEC, 2020).

Figura 11 - Equipamento viola TD.



Fonte: Autoria Própria. ,2025.

Além dos equipamentos específicos para cada ensaio, diversos acessórios complementares são utilizados para garantir a segurança e a confiabilidade das medições. Entre eles, destacam-se haste de descarga, aterramento dos cabos isolados, proteção anti-corona, sistemas de aterramento e blindagem para minimizar interferências externas (ABNT, 2017).

A automação e a digitalização dos equipamentos de ensaio têm permitido maior precisão e agilidade nos diagnósticos. *Softwares* avançados de análise de dados auxiliam na interpretação dos resultados, possibilitando uma identificação mais rápida de falhas e tendências de degradação no isolamento dos cabos (IEEE, 2018).

4 DIRETRIZES PARA A PADRONIZAÇÃO DOS ENSAIOS

Neste capítulo, serão abordadas as diretrizes iniciais para a realização dos ensaios elétricos, focando na segurança e qualidade dos procedimentos. O tópico 4.1 trata dos protocolos iniciais antes da realização dos testes, minimizando os riscos operacionais na atividade.

4.1 PROCEDIMENTOS E PREPARAÇÃO NOS ENSAIOS ELÉTRICOS

Antes de ser realizado qualquer ensaio elétrico, é importante adotar procedimentos para garantir a segurança dos profissionais e a integridade dos equipamentos. A preparação do local de trabalho, o isolamento, aterramento, a inspeção visual, são algumas etapas importantes antes de acontecer os ensaios. (ABNT,2021)

Como já mencionada a verificação das condições ambientais precedem os ensaios, fazendo necessário a utilização do termo higrômetro, como ilustrado na Figura 12, responsável por medir os valores de temperatura e umidade, essa medida permite que o ensaio ocorra em condições ideais, evitando interferências externas que possam comprometer os resultados (IEC, 2020).

Figura 12 - Termo higrômetro.



Fonte: Autoria própria,2025.

Outro ponto importante é a identificação correta das fases, essencial para evitar equívocos operacionais que possam comprometer a segurança do ensaio, gerar erros de conexão, falhas em manutenções futuras ou até mesmo para simples identificação entre as fases. Para essa conferência, utiliza-se um multímetro digital, ilustrado na Figura 13, geralmente na função de medição de resistência. Esse procedimento é simples, mas crucial, deve ser executando com o cabo desenergizado e isolado do sistema, garantindo que a extremidade oposta também seja identificada de forma correta (ABNT,2018).

Figura 13 - Multímetro digital, utilizado para identificação das fases.



Fonte: HIOKI multímetro digital,2025.

Para que os ensaios possam ser iniciados com segurança, é de extrema importância a isolamento e a sinalização adequada da área que será trabalhada, devido a aplicação de altas tensões, representando riscos elétricos e descargas inesperadas. A fim de garantir a segurança dos profissionais envolvidos e evitar a aproximação de pessoas não autorizadas, é necessário que a área seja isolada com a utilização de cones, corretes plásticas zebradas e placas informativas como ilustrada na Figura 14, alertando o perigo para alta tensão, delimitando o perímetro do ensaio e mantendo a distância segura em relação aos cabos e equipamentos energizados (ABNT,2018).

Figura 14 - Sinalização e o isolamento adequado da área de trabalho.



Fonte: autoria própria, 2025.

Após a execução de cada ensaio é necessário que o seja feito a descarga segura de cada fases, uma vez que pode ser mantida energia residual. Essa energia, quando não descarregada, pode gerar risco de choque aos profissionais que acessarem o sistema posteriormente. Para esse procedimento de descarga é utilizado o bastão de aterramento ilustrado na Figura 15, em que o mesmo deve estar conectado ao aterramento, para que a energia residual possa ser direcionada à terra, dessa forma, o operador deverá está utilizando os equipamentos de proteções individuais adequados e iniciar o contato do bastão pela extremidade do cabo (ABNT, 2018).

Figura 15 - Bastão de aterramento.



Fonte: Adaptado do manual de operação Baur, 2025.

Durante a execução dos ensaios, deve incluir a confirmação das conexões elétricas, o ajuste correto dos parâmetros de teste, como tensão aplicada e frequência, e o monitoramento

contínuo das medições. Qualquer anomalia observada deve ser registrada imediatamente para análise posterior (ABNT, 2017).

Por sua vez, esse tópico tentou apresentar pontos importantes iniciais para facilitar a atividade e na tentativa de melhorar a segurança necessária para a execução dos ensaios. Com isso, na execução dos ensaios, caso ocorra algum resultado alterado, é necessária investigação e se necessário efetuar medidas corretivas, como inspeção mais detalhada ou ensaios complementares, os cabos e acessórios (IEC, 2020).

5 APLICAÇÕES PRÁTICAS E PROCEDIMENTOS

Este capítulo aborda a aplicação prática dos ensaios elétricos em cabos isolados, apresentando os dados extraídos com o software 4 BAUR, detalhando e comparando os resultados obtidos em dois trechos de teste.

5.1 EXECUÇÃO DOS ENSAIOS

Com o intuito de consolidar os conhecimentos teóricos abordados ao longo desse trabalho, o estudo de caso proposto tem por objetivo a aplicação dos ensaios em cabos isolados, com o destaque no uso das técnicas de VLF. A preferência por sua utilização, é motivada devido a eficácia comprovada em isolamentos com relação a manutenção e comissionamento em novos circuitos.

Os dados apresentados são estudos reais levantados em campo, no estado da Bahia, em que foram realizados os ensaios de descargas parciais, tangente de perda e tensão aplicada. Com embasamento nas normas, conciliando dados teóricos aos reais, com o intuito de avaliar a legitimidade desses dados.

Os ensaios foram realizados em usina fotovoltaica, especificamente em um trecho de travessia de rede aérea, possuindo cabos diretamente enterrados, essa transição ocorre se dá com terminações tipo mufla, ilustrada na Figura 16, permitindo a transição de cabeamento aéreo e subterrâneo.

Figura 16 - Terminação mufla externa



Fonte: Prysmian. ,2025.

Essa instalação contempla dois circuitos distintos, nomeados por “SPE-03 _ C2 P3.41 - P3.40”, possuindo 106 metro de comprimento e “SPE-03 _ C1 P3.41 - P3.40”, com apenas 93 metros. Em que cada um deles é composto por um trifólio, ilustrada na Figura 17. Cada um dos cabos ensaiados é do fabricante Prysmian possuindo a isolamento em XLPE (polietileno reticulado) e possuindo a bitola no condutor principal de 630 mm^2 , sendo apropriada para conduzir altas correntes com baixas perdas e uma grande segurança operacional.

Figura 17 - Ilustração do poste com os dois trifólios.



Fonte: autoria própria. ,2025.

Nos capítulos anteriores, foram apresentados os parâmetros para dar início aos ensaios, no capítulo seguinte será abordado as informações encontradas no *software*. Para que possa ser executados os ensaios, é utilizado o *software 4 da BAUR*, com ele pode ser analisado os resultados obtidos em cada um dos ensaios de descarga parciais, tangente de perda e tensão aplicada.

5.1.1 DESCARGA PARCIAIS

Para que o ensaio de descarga parcial possa ocorrer, é necessário que o cabo seja calibrado, como já referido ao longo do trabalho. Dessa forma, visualizando o sinal de onda no *software*, por meio do calibrado, os eventos são caracterizados com picos de onda. Ao localizar os dois picos de onda, que para esse caso, seriam as duas extremidades do cabo, o sistema passa a estar pronto. A Figura 18 ilustra calibração de ocorrendo em 200 pC. Essa mesma ação foi executada para todos os cabos ensaios.

Figura 18 – Captura da tela no software 4 Baur.

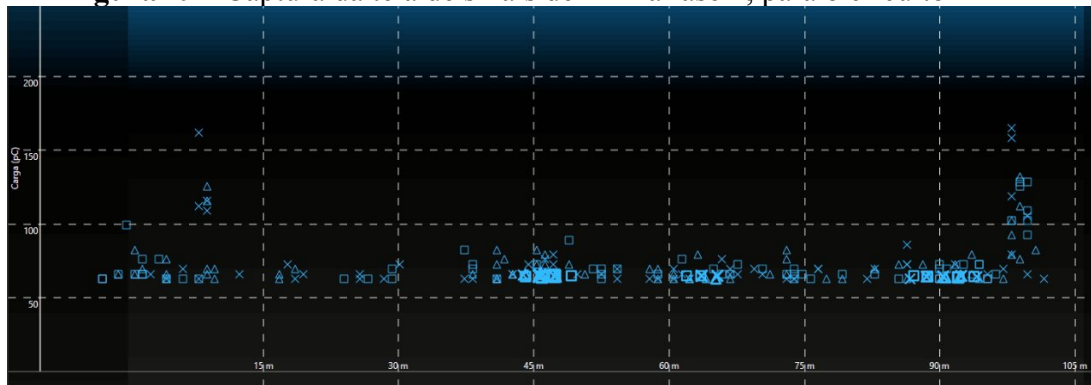


Fonte: Autoria própria, 2025.

Nessa imagem temos dois elementos importantes que apresentam características do circuito em questão como no ponto 1 em que temos a lista de sequencias, bem como as fases de teste e pôr fim a representação de cada nível de tensão. Já para o ponto 2 temos a nomeação do trecho de ensaio, seu comprimento, velocidade de propagação, tensão nominal e quantidade de fases, essas informações são importantes para melhor entendimento do andamento do ensaio, com tudo, essa informação acaba sendo repetida em cada uma das capturas subsequentes, com isso em mente foi retirado dessas imagens para uma melhor visualização dos dados adquiridos com testes.

Com o cabo devidamente calibrado, o teste pode ser iniciado, a Figura 19, representa o ensaio executado para a fase 1, descrita como “L1N” na imagem, visualizando todas as distribuições de possíveis sinais de descarga parcial encontrada nesse cabo, onde cada símbolo demarca um possível evento. Todos os resultados são atualizados de forma continua e alterados automaticamente quando necessário, em que cada grupamento de símbolo representaria um nível de tensão X- 0,5U₀ (10kV) Δ-1U₀ (20kV) e □-1,5U₀ (30kV) e mesma coloração para sua fase. A calibração como mencionada foi realizada em 200 pC, dessa forma os valores estariam aceitos, pois estão abaixo do permitido, como ilustra a imagem.

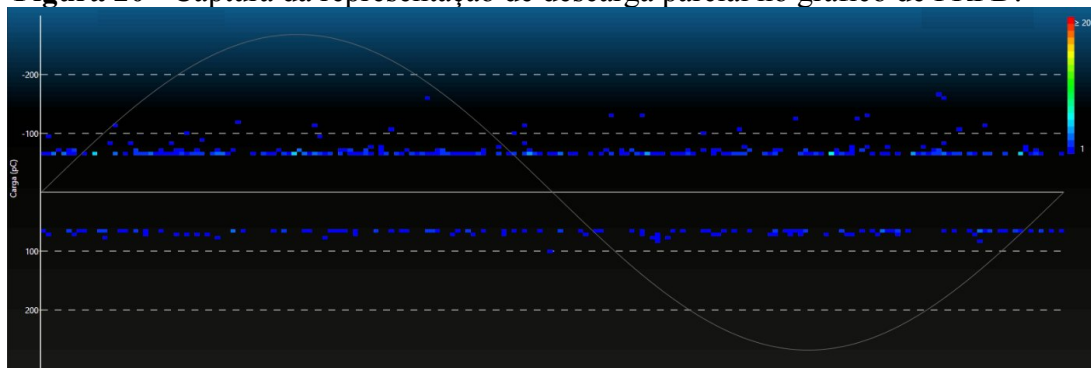
Figura 19 - Captura da tela de sinais de DP na fase 1, para o circuito 2



Fonte: Autoria própria, 2025.

Continuando, temos o botão de PRPD (*Phase Resolved Partial Discharges*), com ele é observado os eventos de descarga parcial, sendo formado diretamente pela quantidade de eventos, baseada na ocorrência e da intensidade, ao longo de vários ciclos, representada em um único gráfico, a Figura 20, ilustra essa situação para a fase 1.

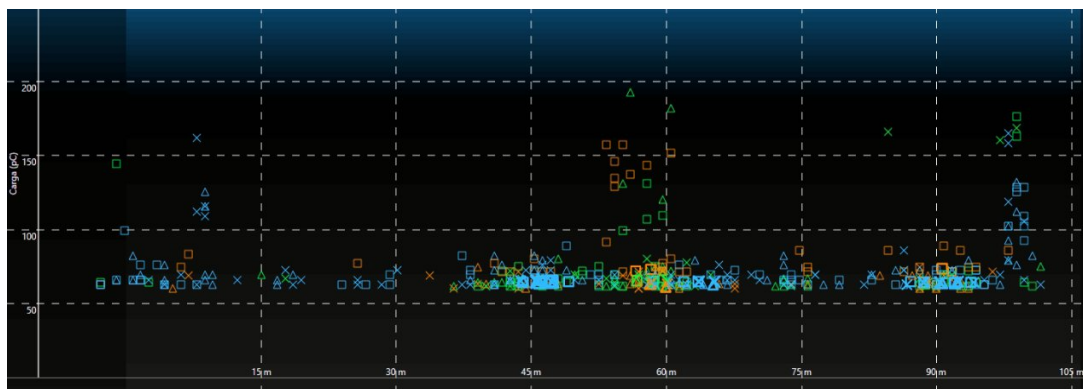
Figura 20 - Captura da representação de descarga parcial no gráfico de PRPD.



Fonte: Autoria própria. , 2025.

Os mesmos passos são executados para as demais fases, dessa forma, também é observada o DP, dos três em um único gráfico a Figura 21, ilustra essa representação.

Figura 21 - Captura da representação dos sinais de descarga parciais, no circuito 2.

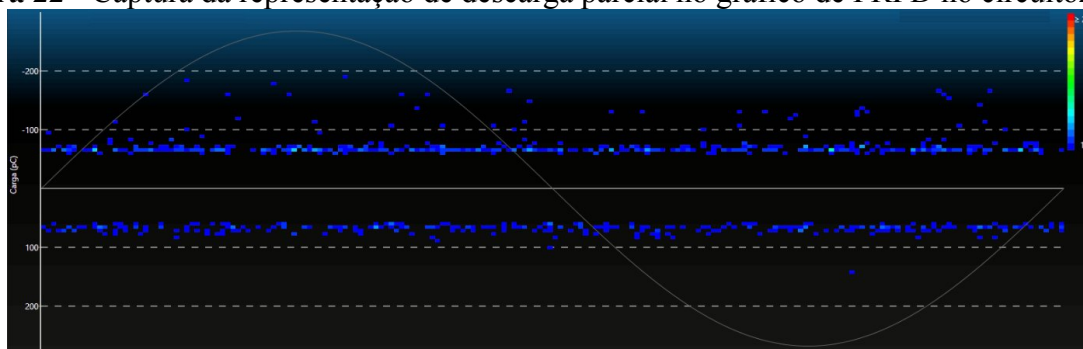


Fonte: Autoria própria ,2025.

A imagem anterior demonstra um aumento de símbolos Quadrados e Triângulos nas cores laranja e verde, respectivamente (fase 2 e fase 3) em 60m, e Quadrados e X's, nas cores verdes e azuis, respectivamente (fase 2 e fase 1) em aproximadamente 98m, é observado que, nenhum desses eventos ultrapassaram a carga máxima de calibração 200pC ou que esses símbolos se intensificaram ao longo que a tensão sobe de nível, essa representação demonstra que não foi ultrapassado o aceitável ou um risco elevado, apenas sinais isolados.

Assim, a mesma análise foi executada para o PRPD nas demais fases e representadas em um único gráfico, temos a Figura 22, demonstrando que o nível de DP não ultrapassou o limite aceitável, nem que seu nível foi de alta intensidade.

Figura 22 - Captura da representação de descarga parcial no gráfico de PRPD no circuito2.



Fonte: Autoria própria ,2025.

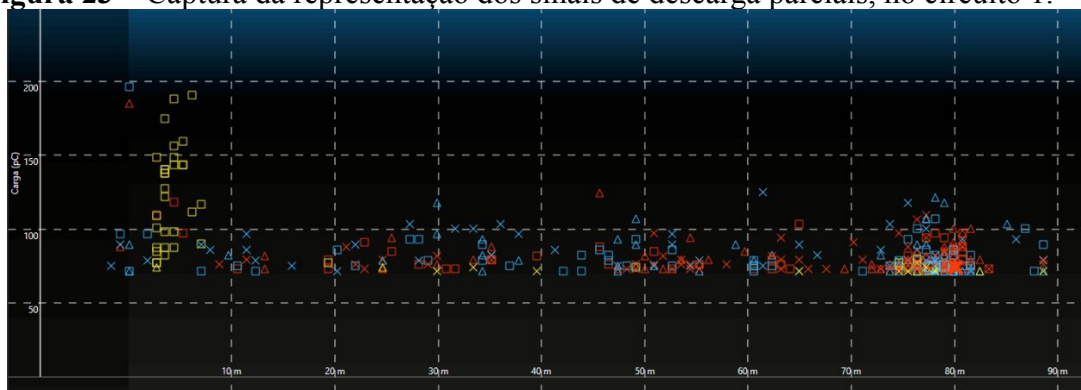
Por fim, esses dados podem ser resumidos na seguinte Tabela 4, extraído do *software* com ela é obtido dados numéricos, como: a quantidade de DP, carga máxima por nível de tensão e em cada fase.

Tabela 4 - Valores numéricos para DP circuito 2

Detalhes (medição DP)						
Comprimento total do cabo 0 – 106 m	L3N 29/05/2025 10:11:53		L2N 29/05/2025 10:23:06		L1N 29/05/2025 10:34:51	
	DP confirmada	Carga máx. (pC)	DP confirmada	Carga máx. (pC)	DP confirmada	Carga máx. (pC)
0,5 U ₀ / 10,1 kV	40	74,5	47	168,6	167	165,1
1,0 U ₀ / 20,2 kV	49	74,5	43	192,7	133	132,1
1,5 U ₀ / 30,3 kV	61	157,6	63	176,6	152	128,8
Total de DP: 755					Carga máx. (pC): 192,7	

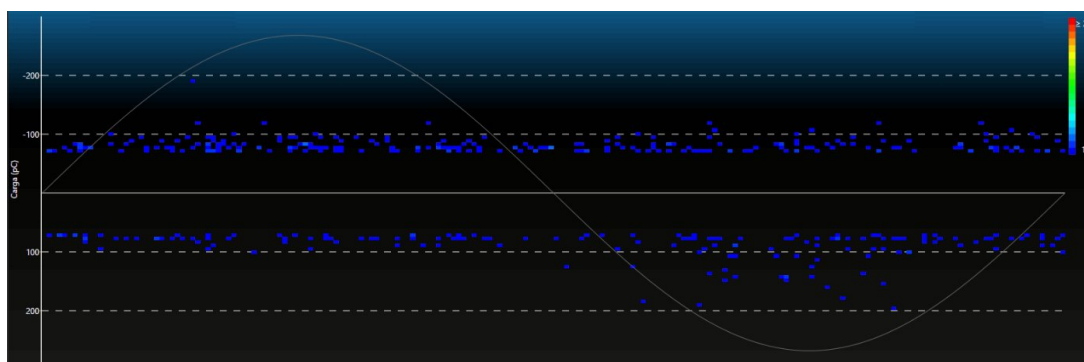
Fonte: Adaptado do *software 4 Baur*,2025.

Para o segundo trifólio SPE-03_C1 P3.41 - P3.40, como já mencionado, foi executado o mesmo padrão de calibração, sendo efetuando o ensaio para cada uma das fases, alcançando os seguintes resultados ilustrado na Figura 23, é observado um aumento de carga na fase 1 em 30kv, na primeira extremidade, aproximadamente 5 metros e uma maior agrupamento de sinais na extremidade oposta, os valores estão aceitáveis, tendo em vista que não foi ultrapassado o nível limite.

Figura 23 – Captura da representação dos sinais de descarga parciais, no circuito 1.

Fonte: Autoria própria.,2025.

Para uma melhor análise, é observado o gráfico de PRPD, ilustrado na Figura 24, confirmando que os valores de DP estão aceitáveis e que o nível limite de calibração não foi ultrapassado.

Figura 24 - Captura da representação de descarga parcial no gráfico de PRPD no circuito1

Fonte: Autoria própria.,2025.

Na Tabela 5 é representado os valores numéricos, resumidos do ensaio de DP para o circuito 1, obtendo os seguintes valores.

Tabela 5 - Valores numéricos para DP Circuito 1

Detalhes (medição DP)						
Comprimento total do cabo 0 – 93 m	L1N 28/05/2025 14:01:10		L1N 28/05/2025 14:14:15		L2N 28/05/2025 14:34:52	
	DP confirmada	Carga máx. (pC)	DP confirmada	Carga máx. (pC)	DP confirmada	Carga máx. (pC)
0,5 U ₀ / 10,1 kV	10	77	65	109,4	51	125,1
1,0 U ₀ / 20,2 kV	5	74,3	55	185,3	45	121,5
1,5 U ₀ / 30,3 kV	37	191,1	48	118,5	67	196,6
Total de DP: 383						Carga máx. (pC): 196,6

Fonte: Adaptado do *software 4* Baur ,2025.

Fazendo uma análise comparativa entre as duas tabelas, é notado que os valores da Tabela 4 têm uma maior quantidade de DP total, se comparado com a segunda tabela Tabela 5, graças a uma maior quantidade de registros colhidos na fase 1. Contudo, em nenhum dos dois trifólios ensaiados os valores excederam o limite estipulado, dessa forma não apresentando nenhuma falha ou problema na isolamento.

5.1.2 TANGENTE DE PERDA

Os ensaios de tange de perda são executados conforme o programa e critérios de aceitação, para o estudo de caso foi utilizado o cabo XLPE, dessa forma, os parâmetros adotados são os mesmos da norma IEEE 400.2, Tabela 1. Logo que os primeiros resultados de medição são exibidos, para o primeiro nível de tensão, o gráfico e os valores são adicionados a tela de registro, a Figura 25, representa os valores obtidos nos ensaios para as três fases, esses valores são atualizados a cada medição e nível de tensão, sendo finalizado automaticamente, quando o programa é finalizado.

Figura 25 – Captura da tabela com os valores de TD as três fases, para o circuito 2.

Nº	Time	Phase	kV	mA	E-3
1	09:59	L1N	10,1	0,19	0,561
2	09:59	L1N	10,1	0,19	0,564
3	09:59	L1N	10,1	0,19	0,565
4	09:59	L1N	10,1	0,19	0,568
5	10:00	L1N	10,1	0,19	0,562
6	10:00	L1N	10,1	0,19	0,570
7	10:00	L1N	10,1	0,19	0,563
8	10:00	L1N	10,1	0,19	0,568
9	10:01	L1N	20,2	0,38	0,546
10	10:01	L1N	20,2	0,38	0,546
11	10:01	L1N	20,2	0,38	0,546
12	10:01	L1N	20,2	0,38	0,546
13	10:01	L1N	20,2	0,38	0,549
14	10:01	L1N	20,2	0,38	0,548
15	10:02	L1N	20,2	0,38	0,548
16	10:02	L1N	20,2	0,38	0,549
17	10:02	L1N	30,3	0,56	0,526
18	10:02	L1N	30,3	0,56	0,527
19	10:03	L1N	30,3	0,56	0,527
20	10:03	L1N	30,3	0,56	0,527
21	10:03	L1N	30,3	0,56	0,528
22	10:03	L1N	30,3	0,56	0,524
23	10:03	L1N	30,3	0,56	0,527
24	10:03	L1N	30,3	0,56	0,531

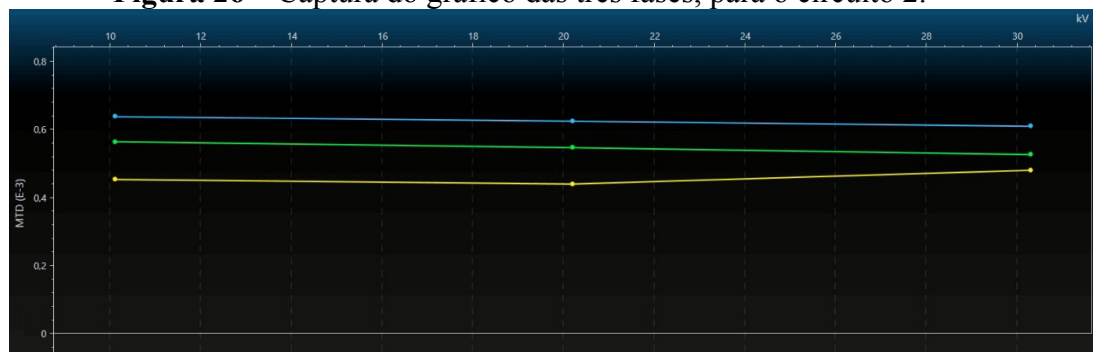
Nº	Time	Phase	kV	mA	E-3
1	09:53	L2N	10,1	0,19	0,640
2	09:53	L2N	10,1	0,19	0,641
3	09:53	L2N	10,1	0,19	0,633
4	09:53	L2N	10,1	0,19	0,639
5	09:53	L2N	10,1	0,19	0,639
6	09:54	L2N	10,1	0,19	0,641
7	09:54	L2N	10,1	0,19	0,638
8	09:54	L2N	10,1	0,19	0,638
9	09:54	L2N	20,2	0,38	0,622
10	09:55	L2N	20,2	0,38	0,622
11	09:55	L2N	20,2	0,38	0,625
12	09:55	L2N	20,2	0,38	0,625
13	09:55	L2N	20,2	0,38	0,626
14	09:55	L2N	20,2	0,38	0,626
15	09:55	L2N	20,2	0,38	0,627
16	09:56	L2N	20,2	0,38	0,629
17	09:56	L2N	30,3	0,56	0,608
18	09:56	L2N	30,3	0,56	0,609
19	09:56	L2N	30,3	0,56	0,610
20	09:57	L2N	30,3	0,56	0,612
21	09:57	L2N	30,3	0,56	0,610
22	09:57	L2N	30,3	0,56	0,611
23	09:57	L2N	30,3	0,56	0,610
24	09:57	L2N	30,3	0,56	0,612

Nº	Time	Phase	kV	mA	E-3
1	09:46	L3N	10,1	0,19	0,450
2	09:46	L3N	10,1	0,19	0,451
3	09:46	L3N	10,1	0,19	0,452
4	09:47	L3N	10,1	0,19	0,456
5	09:47	L3N	10,1	0,19	0,454
6	09:47	L3N	10,1	0,19	0,452
7	09:47	L3N	10,1	0,19	0,457
8	09:47	L3N	10,1	0,19	0,460
9	09:48	L3N	20,2	0,38	0,442
10	09:48	L3N	20,2	0,38	0,443
11	09:48	L3N	20,2	0,38	0,442
12	09:48	L3N	20,2	0,38	0,441
13	09:48	L3N	20,2	0,38	0,439
14	09:49	L3N	20,2	0,38	0,440
15	09:49	L3N	20,2	0,38	0,438
16	09:49	L3N	20,2	0,38	0,438
17	09:49	L3N	30,3	0,57	0,472
18	09:50	L3N	30,3	0,57	0,475
19	09:50	L3N	30,3	0,57	0,477
20	09:50	L3N	30,3	0,57	0,482
21	09:50	L3N	30,3	0,57	0,480
22	09:50	L3N	30,3	0,57	0,489
23	09:50	L3N	30,3	0,57	0,487
24	09:51	L3N	30,3	0,57	0,485

Fonte: autoria própria, 2025.

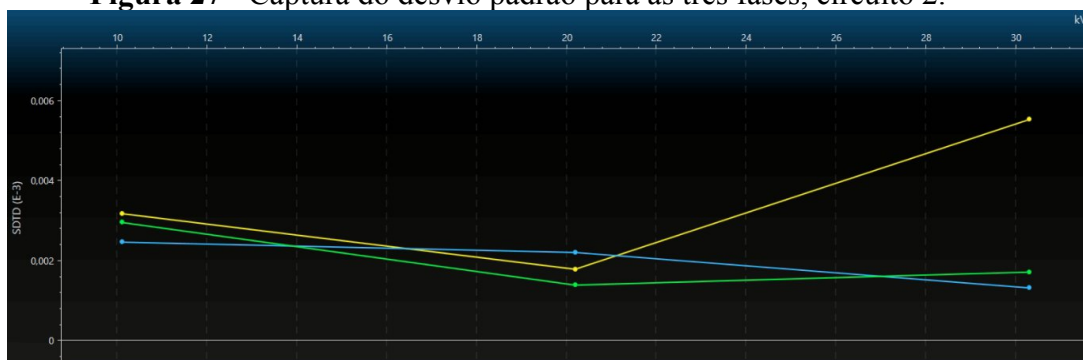
Esses valores também são convertidos em gráficos, dessa forma a Figura 26, contempla a representação gráfica para o TD das três fases

Figura 26 – Captura do gráfico das três fases, para o circuito 2.



Fonte: autoria própria, 2025.

Com a opção de SDTD ativo é exibido o desvio padrão, essa representação também é demonstrada graficamente. A Figura 27, demonstra esses gráficos para as três fases.

Figura 27 - Captura do desvio padrão para as três fases, circuito 2.

Fonte: autoria própria, 2025.

A Tabela 6, representa um resumo dos valores obtidos no ensaio com o *software* 4 Baur. Podendo assim contemplar a média do tangente de perda, desvio padrão e alteração do fator de dissipação entre os níveis de tensão, bem como a auto avaliação que o próprio *software* executa para os valores obtidos.

Tabela 6 - Valores MTD, SDTD E Δ TD, nas três fases, circuito 2.

Valores MTD			
	L1N 29/05/2025 09:46:02	L2N 29/05/2025 09:52:34	L3N 29/05/2025 09:58:49
0,5 U ₀ / 10,1 kV	0,454	0,638	0,565
1,0 U ₀ / 20,2 kV	0,440	0,625	0,547
1,5 U ₀ / 30,3 kV	0,481	0,610	0,527
			Resultado: 😊
Valores SDTD			
	L1N 29/05/2025 09:46:02	L2N 29/05/2025 09:52:34	L3N 29/05/2025 09:58:49
0,5 U ₀ / 10,1 kV	0,003	0,002	0,003
1,0 U ₀ / 20,2 kV	0,002	0,002	0,001
1,5 U ₀ / 30,3 kV	0,006	0,001	0,002
			Resultado: 😊
Valores Δ TD			
	L1N 29/05/2025 09:46:02	L2N 29/05/2025 09:52:34	L3N 29/05/2025 09:58:49
1,5 - 0,5 U ₀ / 30,3 - 10,1 kV	0,027	-0,028	-0,038
			Resultado: 😊

Fonte: adaptado do software 4 BAUR,2025.

Continuando com o segundo estudo de caso, os valores obtidos com o ensaio de tangente de perda são representados na Figura 28, bem como sua representação gráfica, ilustrada na Figura 29 .

Figura 28 - Captura da tabela com os valores de TD as três fases, para o circuito 1.

00:00:00

kVrms

AtualHistórico

Nº	kV	mA	E-3	
1	14:41 L1N	10,1	0,15	0,844
2	14:41 L1N	10,1	0,15	0,845
3	14:41 L1N	10,1	0,15	0,842
4	14:41 L1N	10,1	0,15	0,845
5	14:41 L1N	10,1	0,15	0,847
6	14:41 L1N	10,1	0,15	0,847
7	14:42 L1N	10,1	0,15	0,847
8	14:42 L1N	10,1	0,15	0,843
9	14:42 L1N	20,2	0,30	0,793
10	14:42 L1N	20,2	0,30	0,790
11	14:43 L1N	20,2	0,30	0,791
12	14:43 L1N	20,2	0,30	0,785
13	14:43 L1N	20,2	0,30	0,790
14	14:43 L1N	20,2	0,30	0,788
15	14:43 L1N	20,2	0,30	0,788
16	14:43 L1N	20,2	0,30	0,790
17	14:44 L1N	30,3	0,46	0,768
18	14:44 L1N	30,3	0,46	0,770
19	14:44 L1N	30,3	0,46	0,767
20	14:44 L1N	30,3	0,46	0,764
21	14:45 L1N	30,3	0,46	0,766
22	14:45 L1N	30,3	0,46	0,766
23	14:45 L1N	30,3	0,46	0,767
24	14:45 L1N	30,3	0,46	0,767

MTD (E-3)

00:00:00

kVrms

AtualHistórico

Nº	kV	mA	E-3	
1	14:33 L2N	10,1	0,16	0,941
2	14:33 L2N	10,1	0,16	0,939
3	14:34 L2N	10,1	0,16	0,944
4	14:34 L2N	10,1	0,16	0,949
5	14:34 L2N	10,1	0,16	0,949
6	14:34 L2N	10,1	0,16	0,951
7	14:34 L2N	10,1	0,16	0,952
8	14:34 L2N	10,1	0,16	0,952
9	14:35 L2N	20,2	0,32	0,919
10	14:35 L2N	20,2	0,32	0,921
11	14:35 L2N	20,2	0,32	0,920
12	14:35 L2N	20,2	0,32	0,920
13	14:36 L2N	20,2	0,32	0,919
14	14:36 L2N	20,2	0,32	0,921
15	14:36 L2N	20,2	0,32	0,922
16	14:36 L2N	20,2	0,32	0,925
17	14:37 L2N	30,3	0,47	0,909
18	14:37 L2N	30,3	0,47	0,908
19	14:37 L2N	30,3	0,47	0,910
20	14:37 L2N	30,3	0,47	0,910
21	14:37 L2N	30,3	0,47	0,910
22	14:37 L2N	30,3	0,47	0,907
23	14:38 L2N	30,3	0,47	0,912
24	14:38 L2N	30,3	0,47	0,911

MTD (E-3)

00:00:00

kVrms

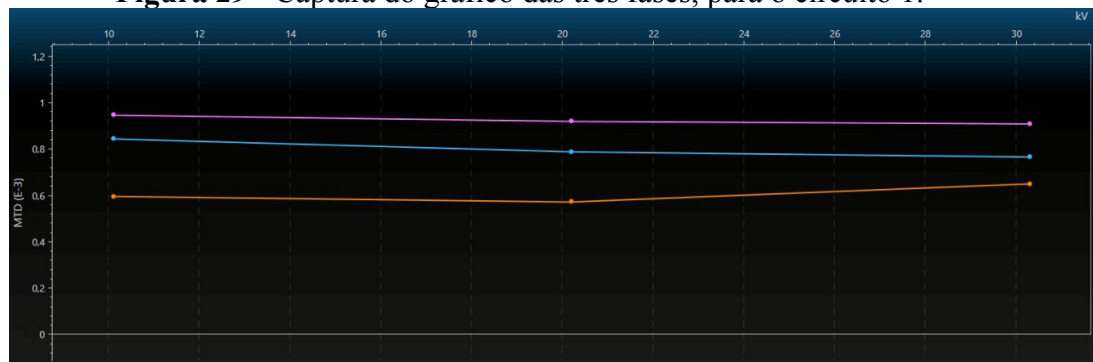
AtualHistórico

Nº	kV	mA	E-3	
1	14:48 L3N	10,1	0,16	0,594
2	14:48 L3N	10,1	0,16	0,594
3	14:48 L3N	10,1	0,16	0,597
4	14:48 L3N	10,1	0,16	0,597
5	14:48 L3N	10,1	0,16	0,596
6	14:48 L3N	10,1	0,16	0,596
7	14:49 L3N	10,1	0,16	0,597
8	14:49 L3N	10,1	0,16	0,602
9	14:49 L3N	20,2	0,32	0,571
10	14:49 L3N	20,2	0,32	0,569
11	14:50 L3N	20,2	0,32	0,570
12	14:50 L3N	20,2	0,32	0,573
13	14:50 L3N	20,2	0,32	0,573
14	14:50 L3N	20,2	0,32	0,576
15	14:50 L3N	20,2	0,32	0,576
16	14:50 L3N	20,2	0,32	0,575
17	14:51 L3N	30,3	0,48	0,628
18	14:51 L3N	30,3	0,48	0,638
19	14:51 L3N	30,3	0,48	0,647
20	14:51 L3N	30,3	0,48	0,650
21	14:52 L3N	30,3	0,48	0,658
22	14:52 L3N	30,3	0,48	0,658
23	14:52 L3N	30,3	0,48	0,662
24	14:52 L3N	30,3	0,48	0,669

MTD (E-3)

Fonte: adaptado do *software* 4 BAUR,2025.

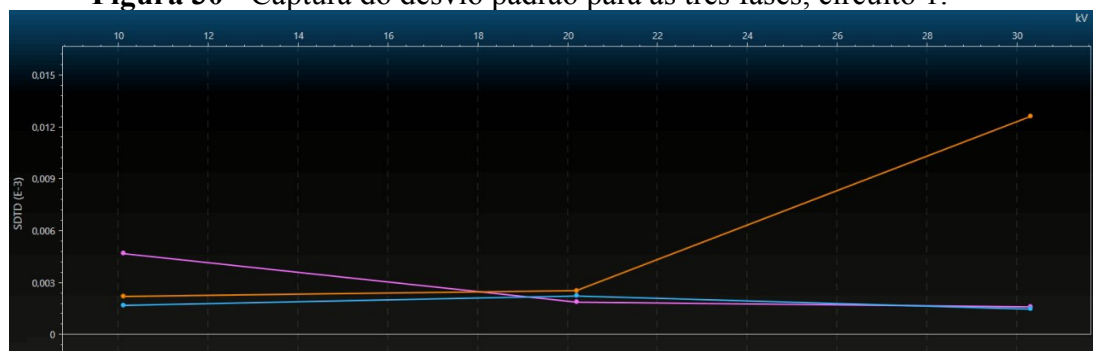
Figura 29 - Captura do gráfico das três fases, para o circuito 1.



Fonte: adaptado do *software* 4 BAUR,2025.

Também obtendo a representação gráfica do desvio padrão para as três fases, ilustrado na Figura 30.

Figura 30 - Captura do desvio padrão para as três fases, circuito 1.



Fonte: adaptado do *software* 4 BAUR,2025.

Dessa forma, é representado os valores obtidos com os ensaios de TD, ilustrado na Tabela 7.

Tabela 7 - Representação dos resultados de TD. No circuito 1.

Valores MTD			
	L2N 28/05/2025 14:33:06	L1N 28/05/2025 14:40:25	L3N 28/05/2025 14:47:32
0,5 U ₀ / 10,1 kV	0,947	0,845	0,597
1,0 U ₀ / 20,2 kV	0,921	0,789	0,573
1,5 U ₀ / 30,3 kV	0,910	0,767	0,651
			Resultado: 😊
Valores SDTD			
	L2N 28/05/2025 14:33:06	L1N 28/05/2025 14:40:25	L3N 28/05/2025 14:47:32
0,5 U ₀ / 10,1 kV	0,005	0,002	0,002
1,0 U ₀ / 20,2 kV	0,002	0,002	0,003
1,5 U ₀ / 30,3 kV	0,002	0,001	0,013
			Resultado: 😊
Valores ΔTD			
	L2N 28/05/2025 14:33:06	L1N 28/05/2025 14:40:25	L3N 28/05/2025 14:47:32
1,5 - 0,5 U ₀ / 30,3 - 10,1 kV	-0,037	-0,078	0,054
			Resultado: 😊

Fonte: Adaptado do *software* 4 BAUR,2025.

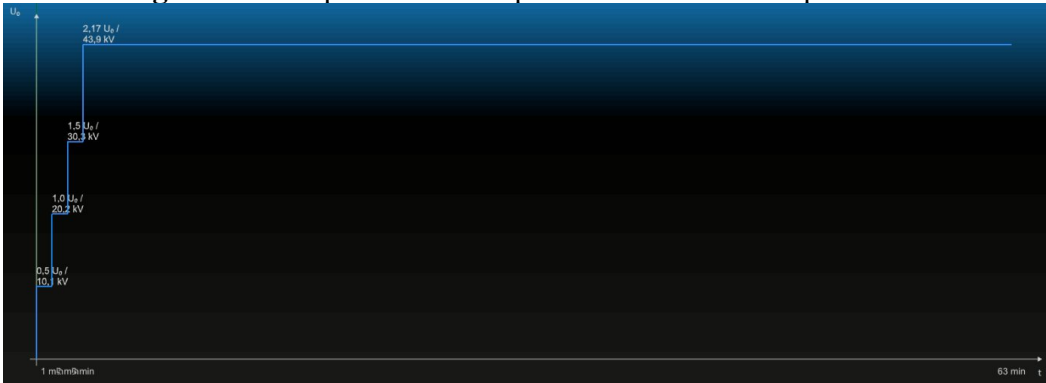
Por fim, quando analisando e comparando as duas tabelas com a norma vigente (referenciar a tabela de TD), é observado que os valores obtidos estão estáveis nos dois trifólios, dessa forma aptos para conexão.

5.1.3 TENSÃO APLICADA

Nos ensaios de tensão aplicada os requisitos para aprovação não são tão exigentes quando comparado com os demais ensaios, sendo esse, um ensaio passa ou não passa, o *software* executado automaticamente após a liberação do operador, os níveis de tensão irão subindo até o nível programado, e finalizado após a duração ser concluída, também podendo ocorrer uma paralização imediata quando houver uma ruptura ou o cancelamento com o botão de parada.

Contudo, como os trechos ensaiados são curtos com 106 metros para o Circuito 2 e 93 metros para o Circuito 1, sendo feita um *Jumper* entre as três fases de teste e injetado a tensão por 63 minutos, assim a Figura 31 representa a tela que é encontrada para os dois circuitos ensaiados.

Figura 31 – Captura de tela representando a tensão aplicada.



Fonte: Adaptado do *software 4* BAUR,2025.

Nesses ensaios não ocorreram nenhum problema de operação, obtendo êxito na sua execução assim obtido as Tabela 8 e Tabela 9 de status, para o Circuito 2 e Circuito1.

Tabela 8 - Valores de confirmação de tensão aplicada nas três fases, circuito 2.

Visão geral						
Data/Hora	Fase	Resistência de isolação (carga R)	Capacidade (carga C)	Frequência de teste	Status	Equipamento
29/05/2025 08:39:20	L1L2L3N	> 100 MΩ	93 nF	0,10 Hz	A medição concluída.	foi Viola 2146445004 V5.109
Resultado						
L1L2L3N 29/05/2025 08:39						
0,5 U ₀ / 10,1 kV	Teste bem-sucedido					
1,0 U ₀ / 20,2 kV	Teste bem-sucedido					
1,5 U ₀ / 30,3 kV	Teste bem-sucedido					
2,17 U ₀ / 43,9 kV	Teste bem-sucedido					

Fonte: Adaptado do *software 4* BAUR,2025.

Tabela 9 - Valores de confirmação de tensão aplicada nas três fases, circuito 1

Visão geral						
Data/Hora	Fase	Resistência de isolação (carga R)	Capacidade (carga C)	Frequência de teste	Status	Equipamento
28/05/2025 14:57:25	L1L2L3N	> 100 MΩ	78 nF	0,10 Hz	A medição concluída.	foi Viola 2146445004 V5.109
Resultado						
L1L2L3N 28/05/2025 14:57						
0,5 U ₀ / 10,1 kV	Teste bem-sucedido					
1,0 U ₀ / 20,2 kV	Teste bem-sucedido					
1,5 U ₀ / 30,3 kV	Teste bem-sucedido					
2,17 U ₀ / 43,9 kV	Teste bem-sucedido					

Fonte: Adaptado do *software 4* BAUR,2025.

Por fim, todos os valores aqui obtidos para cada ensaio, foi organizado e comparado com os limites normativos, permitindo uma interpretação crítica das condições dos circuitos ensaiados. Os dados numéricos e a análise gráfica demonstraram a competência dos equipamentos e a veracidade dos resultados normativos quando comparados com os de campo, indicando que os ensaios foram executados de forma correta e permitindo a energização dos circuitos.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo principal deste trabalho, que era desenvolver um estudo técnico abordando os ensaios em cabos isolados de alta tensão, foi alcançado com sucesso. Através de uma revisão bibliográfica abrangente e da análise das normas técnicas internacionais e nacionais, foi possível compilar e apresentar as metodologias mais utilizadas, os equipamentos necessários e os procedimentos padronizados para a execução dos ensaios. O presente trabalho reúne diretrizes claras e aplicáveis para profissionais da área, contribuindo para a melhoria das práticas de manutenção e inspeção, garantindo maior eficiência, segurança e confiabilidade na operação dos sistemas elétricos.

No entanto, é importante destacar algumas limitações do estudo. A principal delas reside na complexidade e na variabilidade das condições operacionais dos cabos de alta tensão, que podem influenciar os resultados dos ensaios. Além disso, a disponibilidade de equipamentos de alta precisão e a necessidade de treinamento especializado para a execução dos testes podem representar desafios para algumas organizações. Outra limitação é a dependência de normas técnicas que, embora sejam atualizadas periodicamente, podem não acompanhar totalmente os avanços tecnológicos mais recentes. Esses fatores podem impactar a aplicabilidade universal do guia em diferentes contextos operacionais.

Por fim, este trabalho traz contribuições significativas para a área de engenharia elétrica, especialmente no que diz respeito à manutenção preditiva e à detecção precoce de falhas em cabos de alta tensão. A padronização dos ensaios e a adoção de boas práticas propostas no guia têm o potencial de reduzir custos operacionais e aumentar a confiabilidade dos sistemas elétricos. Como perspectivas futuras, sugere-se a realização de estudos adicionais para incorporar novas tecnologias, como inteligência artificial e aprendizado de máquina, na análise dos dados obtidos nos ensaios. Além disso, a expansão do guia para incluir outros tipos de cabos e condições operacionais específicas pode ampliar sua aplicabilidade e impacto no setor.

REFERÊNCIAS

- ABNT.** NBR 11734: Ensaios elétricos em cabos isolados de potência. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.
- ABNT.** NBR 11844: Ensaios elétricos em cabos isolados de potência utilizando Very Low Frequency (VLF). Rio de Janeiro: ABNT, 2017.
- ABNT.** NBR 7286: Cabos de potência isolados com material extrudado para tensões de 69 kV a 500 kV. Rio de Janeiro, 2019.
- ABNT.** NBR 7286:2016 - Cabos elétricos isolados com extrusão para tensões de 3 kV a 500 kV – Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2016.
- ABNT.** NBR 9317: Métodos de ensaio para cabos isolados de potência. Rio de Janeiro, 2020.
- ABNT.** NBR 9317:2015 - Cabos elétricos isolados – Ensaio de tensão aplicada em corrente alternada e corrente contínua. Rio de Janeiro, 2015.
- COSTA, M.** Normas Técnicas para Ensaios em Cabos Isolados. Rio de Janeiro: EletroPublicações, 2019.
- FERREIRA, L.** et al. Monitoramento da Vida Útil de Cabos de Alta Tensão. Belo Horizonte: Engenharia Elétrica Avançada, 2022.
- GONÇALVES, A.** Perdas Dielétricas e Diagnóstico em Cabos Isolados. Porto Alegre: Editora de Engenharia, 2018.
- IEC.** IEC 60060-3: High-voltage test techniques – Definitions and requirements for on-site testing. Geneva: IEC, 2020.
- IEC.** IEC 60270: High-voltage test techniques – Partial discharge measurements. Geneva: IEC, 2011.
- IEC.** IEC 60270: High-voltage test techniques – Partial discharge measurements. Geneva: IEC, 2020.
- IEC.** IEC 60840:2020 - Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages above 30 kV ($U_m = 36$ kV) up to 150 kV ($U_m = 170$ kV) – Test methods and requirements. Genebra, 2020.
- IEC.** IEC 62067:2011 - Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages above 150 kV ($U_m = 170$ kV) up to 500 kV ($U_m = 550$ kV) – Test methods and requirements. Genebra, 2011.
- IEEE.** IEEE 400: Guide for Field Testing and Evaluation of the Insulation of Shielded Power Cable Systems. New York, 2012.
- IEEE.** IEEE 400:2012 - Guide for Field Testing and Evaluation of the Insulation of Shielded

Power Cable Systems. Nova York, 2012.

IEEE. IEEE 400.1: Guide for Field Testing of Laminated Dielectric, Shielded Power Cable Systems Rated 5 kV and Above with High Direct Current Voltage. New York, 2007.

IEEE. IEEE 400.2: Guide for Field Testing of Shielded Power Cable Systems Using Very Low Frequency (VLF). New York, 2013.

IEEE. IEEE 400.2: Guide for Field Testing of Shielded Power Cable Systems Using Very Low Frequency (VLF). New York: IEEE, 2018.

IEEE. IEEE 400.2:2013 - Guide for Field Testing of Shielded Power Cable Systems Using Very Low Frequency (VLF). New York, 2013.

IEEE. IEEE 400.3: Guide for Partial Discharge Testing of Shielded Power Cable Systems in a Field Environment. New York, 2006.

IEEE. IEEE Std 400: Guide for Field Testing and Evaluation of the Insulation of Shielded Power Cable Systems. New York: IEEE, 2019.

IEEE. IEEE Std 400.2: Guide for Field Testing of Shielded Power Cable Systems Using Very Low Frequency (VLF). New York: IEEE, 2018.

MENDES, F. et al. Ensaios Elétricos em Sistemas de Potência. Brasília: Instituto de Energia, 2021.

PEREIRA, T. et al. Técnicas Modernas para Ensaios e Manutenção de Cabos Elétricos. Campinas: Engenharia e Inovação, 2021.

PEREIRA, J.; SOUZA, P. Avanços na Predição de Falhas em Cabos de Alta Tensão. Florianópolis: Tecnologia e Energia, 2020.

SANTOS, C.; LIMA, R. Gestão e Manutenção de Redes Elétricas. Salvador: Eletricidade Aplicada, 2023.

SILVA, E. et al. Avaliação de Descargas Parciais em Cabos Isolados. Curitiba: Revista de Engenharia Elétrica, 2020.

SOUZA, P.; PEREIRA, J. Avanços na Predição de Falhas em Cabos de Alta Tensão. Florianópolis: Tecnologia e Energia, 2020.

SANTOS, R. Análise da Degradação do Isolamento em Cabos de Alta Tensão. São Paulo: Editora Técnica, 2019.

BENTO, D. Ensaios em cabos isolados de média tensão, 2019.

BRANCO, F. R. L. Otimização de Procedimentos para o Ensaio de Cabos Isolados de AT e MT, 2014.

FILHO, J. M. Manual de Equipamentos Elétricos. [S.l.]: Grupo Editorial Nacional, 2013.

PIMENTEL, B. M. Introdução Ao Estudo De Linhas De Transmissão , 2010.

SANTOS, N. D. Condutores e cabos de energia, 2005.

FERNANDES, L. R. Diagnóstico de isolamentos elétricos por meio da tangente delta: aplicação em sistemas de média e alta tensão. Revista Técnica de Engenharia Elétrica, 2021

GONÇALVES, R. M. Ensaios elétricos em cabos isolados: teoria e prática. São Paulo: Interenergia, 2018.

SILVA, R. A. et al. Falhas em sistemas isolados: análise estatística de ensaios elétricos em campo. Revista Engenharia em Foco, 2020.

SOUZA, D. R. Controle de qualidade em cabos de potência: procedimentos de rotina e testes de aceitação. Revista Técnica da Eletricidade, 2018.

ABNT. NBR 9311:2021 – Cabos de potência com isolamento extrudada de EPR ou XLPE para tensões de 1 kV a 35 kV – Requisitos de desempenho. Rio de Janeiro: ABNT, 2021

IEEE. Std 525-2007 – Guide for the Design and Installation of Cable Systems in Substations. New York: IEEE, 2007.