



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
FACULDADE DE ENGENHARIAS, ARQUITETURA E URBANISMO E
GEOGRAFIA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**Avaliação do Desempenho de EPDM e EPS em Bucha de
espaçamento para Transformadores de Corrente sob Testes
de Descarga Parcial**

João David Pelin Wirth

Campo Grande – MS

21 de novembro de 2025

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
FACULDADE DE ENGENHARIAS, ARQUITETURA E URBANISMO E
GEOGRAFIA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**Avaliação do Desempenho de EPDM e EPS em Bucha de
espaçamento para Transformadores de Corrente sob Testes
de Descarga Parcial**

João David Pelin Wirth

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como exigência para obtenção
do grau de Bacharelado em Engenharia
Elétrica da Universidade Federal de Mato
Grosso do Sul – UFMS.

Orientador: Dr. Jéferson Meneguín Ortega

Campo Grande - MS
21 de novembro de 2025



Serviço Público Federal
Ministério da Educação
Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul



Avaliação do desempenho de EPDM e EPS em bucha de espaçamento para transformadores de corrente sob testes de descarga parcial

João David Pelin Wirth

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como exigência para obtenção do grau de Bacharelado em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul – UFMS considerado aprovado.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Jeferson Meneguim Ortega (Orientador)

Prof. Dr. Paulo Irineu Koltermann

Prof. Dr. Jair de Jesus Fiorentino

Campo Grande, 28 de novembro de 2025.

NOTA
MÁXIMA
NO MEC

UFMS
É 10!!!



Documento assinado eletronicamente por Jeferson Meneguim Ortega, Professor do Magisterio Superior, em 28/11/2025, às 15:04, conforme horário oficial de Mato Grosso do Sul, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

NOTA
MÁXIMA
NO MEC

UFMS
É 10!!!



Documento assinado eletronicamente por Paulo Irineu Koltermann, Professor do Magisterio Superior, em 28/11/2025, às 15:18, conforme horário oficial de Mato Grosso do Sul, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

NOTA
MÁXIMA
NO MEC

UFMS
É 10!!!



Documento assinado eletronicamente por Jair de Jesus Fiorentino, Professor do Magisterio Superior, em 28/11/2025, às 16:40, conforme horário oficial de Mato Grosso do Sul, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufms.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador 6069121 e o código CRC DF75175A.

FACULDADE DE ENGENHARIAS, ARQUITETURA E URBANISMO E GEOGRAFIA

Av Costa e Silva, s/nº - Cidade Universitária

AGRADECIMENTOS

Gratidão é o sentimento que tenho para com Deus, pois Ele foi essencial em todas as minhas conquistas e superações.

Aos meus pais, irmão e avós, que me incentivaram nos momentos difíceis e compreenderam a minha ausência enquanto eu me dedicava à realização deste trabalho.

À minha namorada pela parceria nessa jornada, me ajudando em todas as etapas do trabalho. Sua dedicação e empenho foram essenciais para que eu pudesse ter a confiança de que conseguiria finalizar este projeto.

Ao meu orientador, que conduziu o trabalho com paciência e dedicação, sempre disponível a compartilhar todo o seu vasto conhecimento.

Aos professores, por todos os conselhos, pela ajuda e pela paciência com a qual guiaram o meu aprendizado.

Aos meus colegas de turma, por compartilharem comigo tantos momentos de descobertas e aprendizado e por todo o companheirismo ao longo deste percurso.

A todos que participaram, direta ou indiretamente do desenvolvimento deste trabalho de pesquisa, enriquecendo o meu processo de aprendizado.

RESUMO

A confiabilidade dos transformadores de corrente é diretamente proporcional a qualidade de sua isolação elétrica, geralmente constituída por óleos, resinas, buchas ou compostos poliméricos. Uma das principais falhas desse sistema de isolação é o surgimento de descargas parciais que são capazes de ocorrer em diversos locais: dentro do enrolamento, devido ao surgimento de bolhas de ar, impurezas ou problemas no processo de impregnação; nas buchas isolantes, em decorrência de contaminação superficial, rugosidade ou desgaste do material polimérico ou ainda nos cabos e conexões adjacentes, em locais com elevado gradiente de campo elétrico. O objetivo principal foi analisar o desempenho dos materiais Terpolímero de Etileno-Propileno-Dieno Monômero (EPDM) e Poliestireno Expandido (EPS) utilizados nas buchas de espaçamento que acomodam os cabos na janela do transformador de corrente, verificando sua influência na ocorrência de descargas parciais e na confiabilidade do sistema de isolação. A metodologia adotada foi aplicada, com abordagem qualitativa e quantitativa, baseada em revisão bibliográfica e estudo de caso técnico-experimental. Os ensaios seguiram as diretrizes das normas IEC 60270 e IEC 60034-27-1, que estabelecem os princípios para medição por carga aparente e procedimentos para testes off-line em sistemas elétricos. Os resultados demonstraram que a substituição do EPDM pelo EPS não compromete a integridade dielétrica do equipamento, visto que ambos apresentaram desempenho satisfatório sob tensão nominal (13,8 kV). Entretanto, sob condições de sobretensão, o EPS apresentou comportamento superior, sem indícios relevantes de descargas parciais, enquanto o EPDM registrou atividade parcial significativa.

Palavras-Chave: descarga parcial, bucha de espaçamento, transformador de corrente, EPDM, EPS.

ABSTRACT

The reliability of current transformers is directly proportional to the quality of their electrical insulation, usually consisting of oils, resins, bushings, or polymeric compounds. One of the main failures of this insulation system is the occurrence of partial discharges, which can happen in various locations: inside the winding, due to the formation of air bubbles, impurities, or problems in the impregnation process; in the insulating bushings, due to surface contamination, roughness, or wear of the polymeric material; or in adjacent cables and connections, in locations with a high electric field gradient. The main objective was to analyze the performance of Ethylene-Propylene-Diene Monomer (EPDM) and Expanded Polystyrene (EPS) terpolymer materials used in the spacing bushings that accommodate the cables in the current transformer window, verifying their influence on the occurrence of partial discharges and the reliability of the insulation system. The methodology adopted employed a qualitative and quantitative approach, based on a literature review and a technical-experimental case study. Tests followed the guidelines of IEC 60270 and IEC 60034-27-1 standards, which establish the principles for apparent load measurement and procedures for off-line testing in electrical systems. The results demonstrated that replacing EPDM with EPS does not compromise the dielectric integrity of the equipment, as both showed satisfactory performance under nominal voltage (13.8 kV). However, under overvoltage conditions, EPS exhibited superior behavior, with no relevant evidence of partial discharges, while EPDM registered significant partial activity.

Keywords: partial discharge, spacer bushing, current transformer, EPDM, EPS.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- TCs com relações múltiplas. (a) TC com vários enrolamentos primários. (b) TC com vários núcleos secundários. (c) TC com vários enrolamentos secundários. (d) TC com derivação no secundário.	17
Figura 2- Tipos construtivos de TCs para proteção. (a) Tipo enrolado. (b) Tipo bucha. (c) Tipo janela. (d) Tipo barra.	18
Figura 3- DP em um material dielétrico	20
Figura 4- Fenômenos Físicos Associados aos Métodos de Medição de DP.....	21
Figura 5- HIPOT	27
Figura 6 Figura Filtro Hv Filter 50/5 (Power Diagnostix).	28
Figura 7- Conexão utilizada no teste de DP com sistema MPD 800.....	29
Figura 8- Montagem dos elementos para ensaio de DP (TC, Bucha EPDM, Cabos, Capacitor de Acoplamento, HV FILTER 150/5, Garras de conexão de aterramento e fases). 31	
Figura 9- Montagem dos elementos para ensaio de DP (TC, Bucha EPDM, Cabos, Capacitor de Acoplamento, HV FILTER 150/5, Garras de conexão de aterramento e fases). 32	
Figura 10- Transformador de Corrente (TC)	32
Figura 11- Buchas de Espaçamento- Vista Frontal	33
Figura 12- Buchas de Espaçamento- Vista Lateral.....	33
Figura 13- Cabo TRAMALT com bitola de 120 mm ²	33
Figura 14- MCU Conectado por Cabo USB no Computador.....	33
Figura 15- : Mcu2 Vista Lateral Para Realizar Conexão Usb Com O Computador.....	34
Figura 16- MPD 800 Conectado Com RBP1	34
Figura 17- RBP1 Vista Lateral Para Realizar Conexão Com MPD 800	34
Figura 18- MPD 800 Vista Lateral Para Realizar Conexão Com RBP1 e MCU2.	34
Figura 19- MPD 800 Vista Lateral Para Realizar Conexão Com Capacitor De Acoplamento.....	35
Figura 20- Capacitor Acoplador Com Suas Respectivas Conexões (Alimentação E Aterramento).....	35
Figura 21- Capacitor Acoplador Tipo MCC 124 – OMICRON.....	35
Figura 22- Calibrador Haefely KAL 9511 exibindo carga de 1 nC utilizada para verificação do sistema de medição.	38

Figura 23- Gráfico gerado pelo software MPD 800 (OMICRON) para tensão aplicada de 13,8 Kv	40
Figura 24- Gráfico gerado pelo software MPD 800 (OMICRON) para tensão aplica de 16,56.	41
Figura 25 - Ligação em Y Tensão de linha e Tensão de fase	43
Figura 26- Protótipo da Bucha no Material EPS.	44
Figura 27: Montagem dos elementos para ensaio de DP (TC, Bucha EPS, Cabos, Capacitor de Acoplamento, HV FILTER 150/5, Garras de conexão de alimentação e aterramento).....	44
Figura 28- Gráfico gerado pelo software MPD 800 (OMICRON) para tensão aplica de 13,8 Kv – EPS	45
Figura 29- Gráfico gerado pelo software MPD 800 (OMICRON) para tensão aplica de 16.56 Kv – EPS	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Especificações Técnicas do EPDM.	22
Tabela 2 Especificações Técnicas do EPS.....	23
Tabela 3- Componentes da Topologia do Ensaio de Descarga Parcial	29
Tabela 4- Parâmetros utilizados pelo Software MPD 800 (OMICRON)	39

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 OBJETIVOS	14
2.1 Objetivo Geral	14
2.2 Objetivos Específicos	14
3. REVISÃO DE LITERATURA.....	15
3.1 Máquinas Elétricas	15
3.2 Transformador De Corrente (TC).....	16
3.3 Buchas	18
3.4 Descargas Parciais (DP).....	19
3.5 Matérias Primas.....	21
3.5.1 Terpolímero De Etileno, Propileno Dieno Monômero (EPDM).	21
3.5.2 Poliestireno Expandido (EPS).....	23
4. METODOLOGIA.....	24
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	26
5.1 Configuração do Ensaio e Condições Operacionais do EPDM.....	26
5.1.1 Procedimentos de Calibração.....	36
5.1.2 Critérios Normativos, Limiar de Detecção.....	37
5.1.3 Estratégia de Avaliação de DP e Justificativa dos Resultados	38
5.2. Configuração do Ensaio e Condições Operacionais do EPS.....	43
5.2.1 Justificativa dos Resultados.....	45
6. CONCLUSÃO.....	48
REFERÊNCIAS	50

1 INTRODUÇÃO

As máquinas elétricas são equipamentos essenciais para a conversão entre energia mecânica e elétrica, utilizadas em diversos equipamentos, como motores, geradores e sistemas de acionamento industrial. São fundamentadas nas leis do eletromagnetismo que explica como a tensão é gerada nos enrolamentos partindo da variação do fluxo magnético que é considerado a base do processo para gerar energia elétrica (CHAPMAN, 2013). No caso da geração de torque em motores a explicação se dá pela Lei de Lorentz, a qual estabelece a força resultante da relação entre o campo magnético e a corrente elétrica (KOSOW, 2000).

No cenário atual é indiscutível a importância dessas máquinas, tendo em vista dois aspectos, o primeiro diz respeito a demanda de energia associada aos motores elétricos, ao qual segundo a Agência Internacional de Energia (IEA), as máquinas elétricas consomem aproximadamente 45% da eletricidade mundial (IEA, 2022). Conforme a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), no Brasil, em 2024, a indústria respondia por cerca de 30% da demanda elétrica nacional, e consumiu quase 40% da energia produzida no Brasil, com a maior parte desse consumo voltado para o acionamento de motores, especialmente os de indução trifásica. (EPE, 2024).

Um segundo aspecto, leva em conta o papel estratégico das máquinas elétricas na transição energética, destacando-se que os geradores síncronos são essenciais para integrar fontes renováveis e os motores de alta eficiência são empregados em veículos elétricos e híbridos, ambos com grande importância tecnológica e ambiental (FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2014).

Um dos elementos essenciais das máquinas elétricas são os transformadores de corrente (TCs). Os TCs são dispositivos utilizados para medir níveis elevados de correntes elétricas de relevância compatível com as de equipamentos de medição e de proteção. A norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) Normas Brasileiras (NBR) IEC 61869-2 de 2021 diz que sua principal função é reduzir valores elevados de corrente a níveis padronizados e seguros, geralmente 1 A ou 5 A, possibilita ainda a medição de correntes elevadas e a alimentação de relés de proteção de forma segura e precisa (KINDERMANN, 2012).

No contexto das máquinas elétricas, como motores de média tensão e geradores de grande porte, os TCs desempenham papel fundamental ao permitir o monitoramento contínuo do regime de operação, detectando condições anormais, como sobrecargas ou curtos-circuitos (FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2014). Assim, a utilização de TCs garante não apenas

a integridade das máquinas, mas também a estabilidade do sistema elétrico, já que a atuação coordenada das proteções depende diretamente das informações fornecidas por esses transformadores de instrumentos (MAMEDE FILHO, 2017). Dessa forma, a correlação entre TCs e máquinas elétricas é intrínseca, pois a operação confiável e segura desses equipamentos só é viável mediante medições e proteções adequadas proporcionadas pelos transformadores de corrente.

A confiabilidade dos TCs é diretamente proporcional a qualidade de sua isolamento elétrica, geralmente constituída por óleos, resinas, buchas ou compostos poliméricos. Uma das principais falhas desse sistema de isolamento é o surgimento de descargas parciais (DP). De acordo com a International Electrotechnical Commission (IEC) 60270 (2021), as DP são fenômenos de ionização local que ocorrem em pequenas regiões do dielétrico, sem atravessá-lo completamente. Apesar de inicialmente não causarem a falha total da isolamento, sua ocorrência repetida provoca degradação progressiva do material, aumento da condutividade local, formação de trilhas de erosão e, em estágios avançados, a ruptura elétrica completa (SOUZA et al., 2022).

As DP são capazes de ocorrer em diversos locais de uma máquina elétrica: dentro do enrolamento, devido ao surgimento de bolhas de ar, impurezas ou problemas no processo de impregnação; nas buchas isolantes, em decorrência de contaminação superficial, rugosidade ou desgaste do material polimérico ou ainda nos cabos e conexões adjacentes, em locais com elevado gradiente de campo elétrico. A identificação e análise das DP são, portanto, fundamentais para assegurar a durabilidade e confiabilidade das máquinas elétricas, sendo utilizadas como critérios de aceitação nos testes de fábrica e supervisão em campo (OMICRON, 2021).

O transformador de corrente na qual foi feito o estudo é de propriedade da empresa WEG SA, situada em Jaraguá do Sul. A WEG é uma empresa que inicialmente produzia motores elétricos e expandiu suas atividades nos anos 80, produzindo componentes eletroeletrônicos, transformadores de força e distribuição, produtos para automação industrial, tintas líquidas e em pó e vernizes eletroisolantes (WEG, 2025).

A WEG, nos anos 90, expandiu filiais comerciais no exterior (Estados Unidos, Inglaterra, França, Alemanha) chegando a exportar para 55 países no final da década, chegando a possuir 79% de market share em motores elétricos no Brasil (WEG, 2025). A partir do ano 2000, a WEG mantém o foco em expansão, comprando empresas menores que se alinhavam com o objetivo da mesma, tanto fabril quanto comercial e entrou no mercado de aerogeradores.

Já em 2020 a WEG entrou no mercado tecnológico voltado para soluções da indústria 4.0 (WEG, 2025).

Assim sendo, este trabalho tem como proposta central avaliar o desempenho dos materiais Terpolímero de Etileno, Propileno Dieno Monômero (EPDM) e Poliestireno Expandido (EPS) utilizados nas buchas de espaçamento que acomodam os cabos na janela do transformador de corrente, considerando sua influência na ocorrência de descargas parciais e na confiabilidade do sistema de isolamento. Serão conduzidas medições com o software MPD 800 da OMICRON, complementadas por ensaios em ambiente controlado sob diferentes níveis de tensão, em conformidade com as normas aplicáveis. Paralelamente, serão analisadas as propriedades mecânicas e elétricas dos materiais, com o propósito de avaliar seu desempenho frente às descargas parciais e, a partir dos resultados, propor alternativas que promovam ganhos de eficiência e redução de custos para a WEG, fortalecendo sua excelência operacional e capacidade de inovação contínua no mercado.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é avaliar o desempenho de materiais como Terpolímero de Etileno, Propileno Dieno Monômero (EPDM) e Poliestireno Expandido (EPS) das buchas que acomodam os cabos na janela do transformador de corrente.

2.2 Objetivos Específicos

Neste contexto, este trabalho tem como objetivos específicos:

1. Detectar a ocorrência de descargas parciais utilizando o software MPD 800 da OMICRON.
2. Identificar e avaliar as propriedades mecânicas e elétricas dos materiais EPDM e EPS segundo as normas que orientam as medidas de descargas parciais.
3. Testar os protótipos dos materiais EPDM e EPS em ambiente controlado para diferentes níveis de tensão.
4. Avaliar a performance destes materiais quando submetidos a teste de descarga parcial.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Máquinas Elétricas

Máquinas elétricas são dispositivos eletromecânicos fundamentadas nos sistemas modernos de energia, onde desempenham a função de converter energia elétrica (relacionados com tensão e corrente) em energia mecânica (torque, rotação), que é chamado de motor elétrico, ou converte energia mecânica em energia elétrica, sendo chamado gerador elétrico. São amplamente utilizadas em diversos sistemas de geração, transmissão, distribuição e consumo de energia (FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2014).

O funcionamento dessas máquinas está fundamentado nos princípios do eletromagnetismo, especialmente na Lei de Faraday da indução eletromagnética, que afirma que uma força eletromotriz é induzida em um condutor quando ocorre variação do fluxo magnético que o atravessa. Complementando, segundo a Lei de Lorentz, uma corrente elétrica quando submetida a um campo magnético, sofre a ação de uma força magnética, sendo a base da produção de torque nos motores (CHAPMAN, 2013).

Ademais, a Lei de Lenz estabelece que o fluxo do campo magnético devido á corrente induzida opõe-se à variação do fluxo de origem, garantindo assim a conservação de energia no sistema, ou seja, o sentido da corrente induzida é tal que se opõe à variação do fluxo magnético que a produziu, refletindo o princípio de conservação de energia nos circuitos onde há corrente induzida (SANTIAGO et al, 2018).

De modo geral, as máquinas elétricas se dividem em máquinas de corrente contínua (CC), máquinas de corrente alternadas (CA) e transformadores. As máquinas de CC convertem energia elétrica em mecânica ou vice versa, possibilitando um controle preciso de velocidade e torque, sendo adequadas para serem aplicadas em processos industriais que exigem variação da velocidade, sistemas de tração elétrica, elevadores. Já as máquinas de corrente alternadas subdividem-se em síncronas, que operam com velocidade constante, determinadas pela frequência de rede elétrica e pelo número de polos, que são utilizadas em usinas hidrelétricas e termoelétricas como geradores e também na compensação de potência reativa. Já as máquinas assíncronas ou de indução são mais utilizadas na indústria por sua robustez, simplicidade construtiva e baixo custo de manutenção, aplicadas em ventiladores, sistemas de transporte industrial, motores de bombas, compressores (CHAPMAN, 2013).

Os transformadores de instrumentos (TI), conforme a norma ABNT NBR IEC 61869-1, dispositivos projetados para transmitir sinais de informativos a medidores e equipamentos de proteção e controle, bem como a dispositivos similares. Eles podem ser classificados em três categorias: transformador de corrente, transformador de potência e transformadores combinados, que integram os dois primeiros tipos (RIBEIRO, 2024). Este trabalho irá focar nos transformadores do tipo corrente.

3.2 Transformador De Corrente (TC)

O TC é um dispositivo eletromagnético com função de reduzir a corrente de um circuito elétrico de alta intensidade para valores proporcionais e adequados à medição e à proteção, para garantir a segurança e precisão nos sistemas elétricos. Seu funcionamento se baseia indução eletromagnética, onde a corrente alternada que circula pelo enrolamento primário induz uma corrente proporcional no enrolamento secundário (FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2014).

De forma construtiva, o TC é composto por dois enrolamentos: o primário, conectado em série com o circuito de potência, e o secundário, ligado a instrumentos de medição e relés de proteção. A relação de transformação é definida pela razão entre as correntes primária e secundária, a qual é inversamente proporcional ao número de espiras de cada enrolamento (CHAPMAN, 2013).

Os TC são utilizados em sistemas elétricos de potência, uma vez que permitem o isolamento galvânico entre o circuito de medição e o de alta tensão, e ainda proporcionam leituras seguras e precisas. É importante destacar que o secundário do TC nunca deve ser aberto em operação, pois pode gerar tensões perigosas devido à indução (ABNT, 2015).

O TC é um transformador para equipamentos onde a corrente secundária é, em condições normais, proporcional à corrente primária, mas que difere dela em fase que possui um ângulo de valor aproximado a zero, permitindo uma configuração apropriada das conexões, ou seja, o TC reproduz no secundário uma corrente igual em escala da corrente do primário no sistema elétrico. Os TC, através de conversão eletromagnética, transformam correntes elevadas circulantes no seu primário em correntes secundárias pequenas conforme uma relação de transformação (Mamede Filho, 2020).

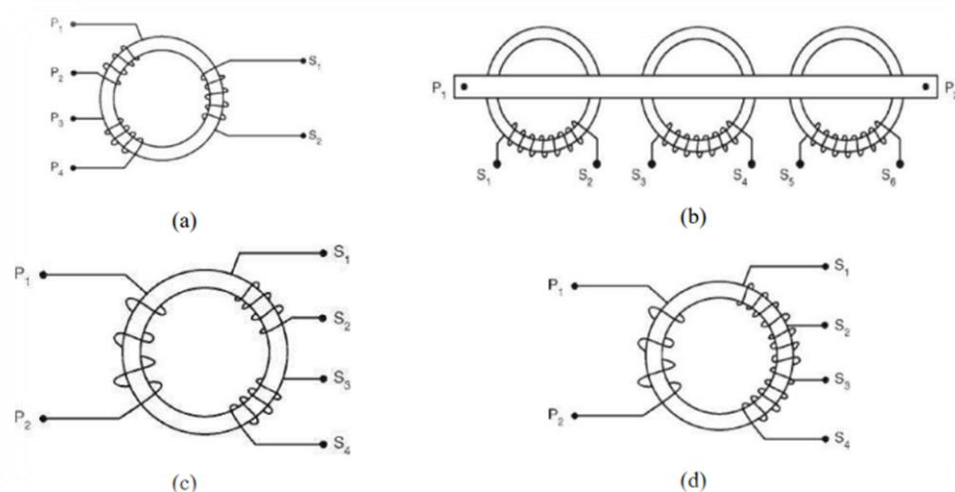
O TC tem por finalidades isolar do circuito de alta tensão os equipamentos conectados no seu secundário, fornece uma forma de onda de corrente no secundário proporcional ao

primário em módulo e fase e ainda fornecer uma corrente em níveis aceitáveis no secundário aos equipamentos conectados a ele (Santos, 2015).

Segundo Mamede Filho (2020) os TCs são compostos por diversos enrolamentos primários, contendo vários núcleos magnéticos secundários ou ainda vários enrolamentos secundários:

- Com diversos enrolamentos primários dispostos de forma isolada e apenas um enrolamento secundário, conforme Figura 1 (a);
- Com diversos núcleos secundários, que são constituídos de dois ou mais enrolamentos secundários onde cada um possui seu núcleo individualmente, conforme Figura 1 (b);
- Com diversos enrolamentos secundários constituídos por apenas um núcleo envolvendo o enrolamento primário e os diversos enrolamentos secundários conforme Figura 1 (c).
- Com derivação no secundário, onde um único núcleo está envolvido pelos enrolamentos primário e secundário, tendo uma ou mais derivações, conforme Figura 1 (d).

Figura 1- TCs com relações múltiplas. (a) TC com vários enrolamentos primários. (b) TC com vários núcleos secundários. (c) TC com vários enrolamentos secundários. (d) TC com derivação no secundário.



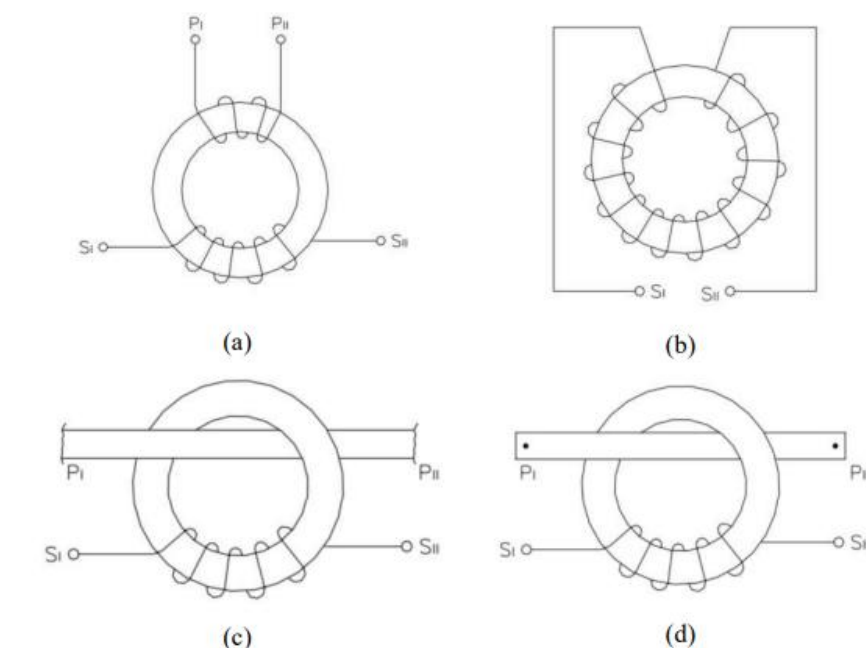
Fonte: Mamede Filho (2020).

No que diz respeito aos elementos construtivos, os transformadores de corrente podem ser categorizados com base no arranjo do enrolamento primário e na forma do núcleo, conforme

o Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE) Std C37-110-2012. Os TCs principais são: transformador do tipo enrolado, onde o enrolamento primário consiste em uma ou mais voltas que cercam mecanicamente o núcleo.

Os enrolamentos primário e secundário são isolados entre si e do núcleo, tudo em uma única unidade (Figura 2 a); transformador do tipo bucha, que é um transformador de núcleo toroidal possuindo um enrolamento secundário ligado ao núcleo e isolado dele, utilizando condutor completamente isolado, passando pelo núcleo como enrolamento primário (Figura 2 b); transformador do tipo janela que é similar ao tipo bucha, possuindo um enrolamento secundário isolado e ligado diretamente ao núcleo, mas não incluindo um enrolamento primário integrado à estrutura e um condutor que atravessa o núcleo é utilizado como enrolamento primário (Figura 2 c) e transformador do tipo barra em que o enrolamento primário é formado por uma barra fixada permanentemente ao longo do núcleo (Figura 2 d).

Figura 2- Tipos construtivos de TCs para proteção. (a) Tipo enrolado. (b) Tipo bucha. (c) Tipo janela. (d) Tipo barra.



Fonte: Adaptado por Sampaio (2021).

3.3 Buchas

As normas da ABNT NBR-5034 e IEC 60137 descrevem as buchas como componentes ou estruturas feitas de materiais isolantes que permitem a passagem segura de um condutor

mediante uma superfície não isolante, facilitando a transferência segura de um ou mais condutores através de uma interface aterrada, podendo ser uma parede de um edifício, um tanque de um reator, um tanque de um transformador ou outros tipos de máquinas ou estruturas (DA SILVA, 2021).

O isolamento de uma bucha de alta tensão precisa ser capaz de suportar a tensão à qual é submetida assim como seu condutor central e deve ter a capacidade de conduzir corrente em condições normais e situações de sobrecarga sem que ocorram aumento de temperatura inaceitáveis em relação aos parâmetros operacionais, devendo manter o isolamento em ambas as situações (DA SILVA, 2021).

As buchas são projetadas para funcionar protegidas ou expostas às condições climáticas e resistir a forças elétricas e mecânicas, além de atuarem como suporte para conexões e condutores externos. Ademais, é essencial assegurar que a distribuição do campo elétrico criado não prejudique seu funcionamento. Assim sendo, uma característica fundamental é que a bucha possua alta rigidez dielétrica (FRONTIN et al., 2013).

As buchas são componentes essenciais nos TC, garantindo o isolamento elétrico e a segurança entre as partes energizadas internas do transformador e o meio externo. Elas permitem a passagem de condutores através da carcaça metálica sem contato elétrico direto com ela, assegurando que a corrente circule apenas pelo caminho desejado (DA SILVA, 2021).

3.4 Descargas Parciais (DP).

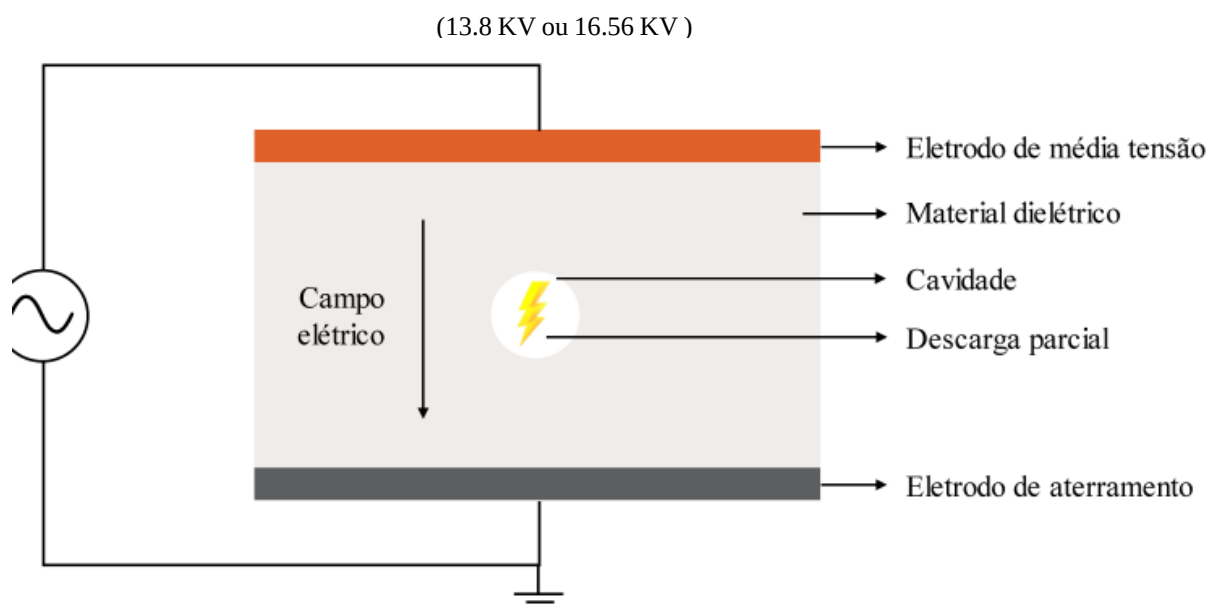
As DPs, pela norma IEC 60270 são descritas como “Descargas elétricas localizadas que apenas curto-circuitam parcialmente a isolação entre os condutores e que pode ou não ocorrer adjacente a um condutor. São rupturas dielétricas localizadas, causadas por sobretensões transitórias de alta frequência que acarretam a degradação acelerada da isolação de TI, podendo inclusive a ocasionar falhas. (ZHANG et al., 2020).

Podem ainda ser descritas como descargas elétricas de pouca intensidade que ocorrem no meio dielétrico em um local que possui imperfeições, que estão sujeitas a um campo elétrico e que o caminho resultante desta descarga não conecta as duas extremidades dessa região, ficando incompleta. A DP depende da força do campo aplicado nos limites desse espaço e do tipo de tensão aplicada (alternada, contínua, sinal transitório ou impulso) (KRUEGER, 1989)

As DPs geralmente são consequências de estresse em pontos da isolação ou na superfície dela. Ocorrem geralmente pela presença de cavidades gasosas no interior do material isolante que são responsáveis por falhas no material dielétrico, conforme exemplificado na Figura 3.

Isto ocorre durante as etapas de fabricação do material dielétrico ou durante o envelhecimento dos equipamentos. Sua ocorrência é ligada a presença de um campo elétrico que ioniza o material dielétrico originando descargas nos pontos de maior intensidade do campo elétrico (RIBEIRO, 2023).

Figura 3- DP em um material dielétrico



Fonte- Machado, 2022.

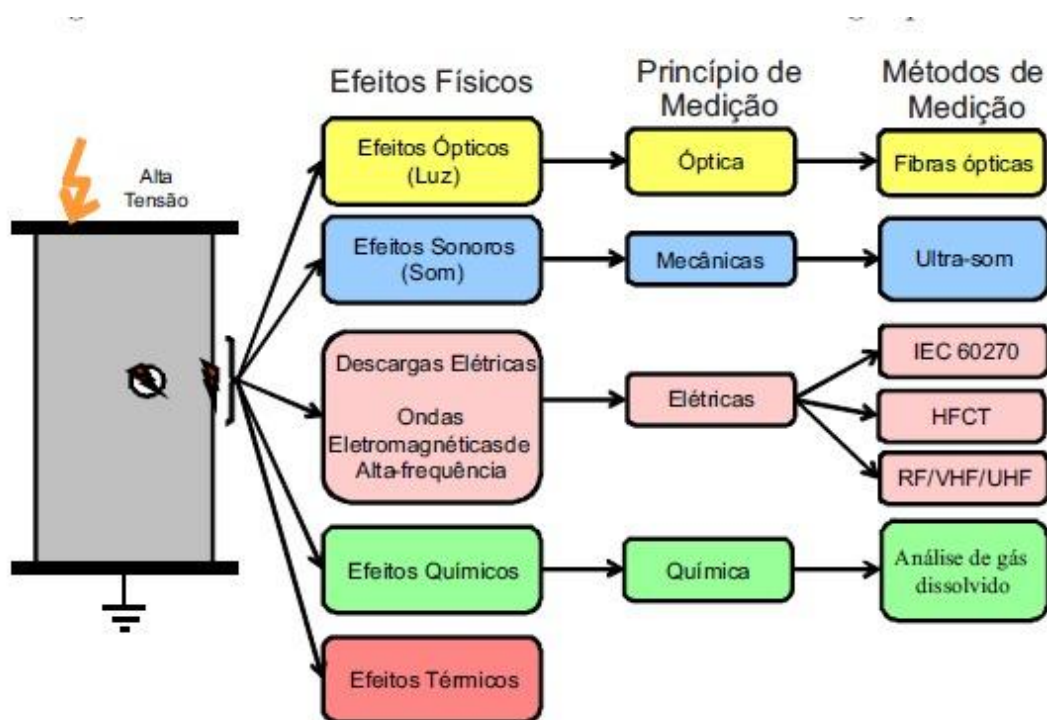
As DPs geralmente são observadas em mecanismos de média e/ou alta tensão. A DP, quando ocorre, produz um pulso de corrente de curta geração, inferior a 1 μ s. É comum que as DP sejam acompanhadas pela emissão de reações químicas, calor e luz. Os efeitos originados por elas, com o passar do tempo, intensificam a deterioração local do material dielétrico e por conseguinte, pode causar ruptura total da isolação, deixando em risco o funcionamento do ativo elétrico (KESSLER, 2020).

Segundo a IEC 60270, de 2000, as descargas parciais se classificam, dependendo da sua localização em: descargas internas, coronas e de superfície. As descargas internas ocorrem, como o nome já diz, dentro do material, em uma ou mais cavidades; as descargas coronas ocorrem quando um campo elétrico se intensifica perto de um eletrodo e em um meio gasoso e as de superfície ocorrem principalmente nas buchas, enrolamento de geradores ou em terminações de cabos na superfície do dielétrico (MACÊDO, 2014).

Existem diversos métodos para medir descargas parciais dependendo do fenômeno originado a partir da ocorrência da descarga, podendo ser físico ou químico. Dentre os

fenômenos físicos podemos citar emissão de luz, variações térmicas (calor), fenômenos elétricos, transformações químicas, radiação eletromagnética, variações mecânicas, ruído acústico (MACÊDO, 2014). A figura 4 representa os fenômenos e os métodos utilizados para sua detecção.

Figura 4-. Fenômenos Físicos Associados aos Métodos de Medição de DP.



Fonte- Macêdo, 2014.

Ainda os métodos de medição de descargas parciais podem ser classificados em elétricos e não elétricos. Pela IEC 60270 o método elétrico consiste em acoplar um equipamento que mede as descargas parciais, muito sensível, ao equipamento que estas estão ocorrendo. Já os métodos não elétricos consistem em métodos acústicos, radiofrequência, químicos e ópticos (MACÊDO, 2014).

3.5 Matérias Primas

3.5.1 Terpolímero De Etileno, Propileno Dieno Monômero (EPDM).

O terpolímero de etileno, propileno dieno monômero (EPDM) é produzido pela polimerização do etileno e propileno incluindo uma pequena porção de um dieno não conjugado. Este material é conhecido pela sua excelente durabilidade, resistência às condições

climáticas adversas e resistência química, além de apresentar boa integridade mecânica e resistência à oxidação. Também permite adição de grande quantidade de cargas e plastificantes, tornando seu processamento mais simples (HERMENEGILDO, 2018).

O EPDM é amplamente empregado na fabricação de componentes peças automotivas (perfis expandidos e maciços, perfis para vedação de vidros e portas), cabos e fios (baixa e alta tensão), mangueiras, guarnições e em usos externos que exigem boa resistência a intempéries. Sua utilização se deve ao fato de ser um componente fácil de encontrar, ter boas propriedades elétrica (GAIKE. 2025). A Tabela 1 traz as principais especificações técnicas do EPDM.

Tabela 1- Especificações Técnicas do EPDM.

Composição	Etileno (C ₂ H ₄) em sua maior parte. Propeno (C ₃ H ₆), queque melhora a elasticidade e a resistência. Dieno (C ₄ H ₆), que é monômero conjugado, que pode ser utilizado para formar ligações cruzadas e melhorar as propriedades de resistência.
Estrutura	Rede polimétrica composta por longas cadeias de polietileno e polipropileno, com ligações cruzadas feitas pelo dieno, conferindo maior resistência mecânica e elasticidade.
Densidade	0,85 a 0,90 g/cm ³
Alongamento na ruptura	250 a 700%.
Resistência a tração	10 a 20 MPa
Elasticidade	2 a 10 MPa
Compressão Permanente	< 30% após compressão por 22h a 70°C
Recuperação após deformação	70% a 90%
Estabilidade Térmica	Faixa de temperatura de operação: -40°C a 150°C, podendo suportar picos temporários de até 180°C.
Constante dielétrica	2,5 a 3,5
Fator de Perda (tanδ)	Em baixa frequência (50Hz a 60 Hz): 0,0005 a 0,003 a 20°C.
Resistência a abrasão	Média resistência, sendo mais adequada para uso em ambientes que não possuam fricção intensa
Resistência ao desgaste	Boa resistência, mais adequada onde não há fricção intensa e abrasão constante.
Resistência à oxidação.	Excelente resistência, tornando adequada para aplicações externas e sujeitas ao envelhecimento pela exposição ao sol e ao oxigênio

Resistência elétrica	Baixa condutividade elétrica, se comportando como um isolante elétrico, adequada para situações que envolvem proteção contracorrentes elétricas
----------------------	---

Fonte: Próprio autor, 2025.

3.5.2 Poliestireno Expandido (EPS).

Segundo a norma DIN ISSO-1043/78, EPS é a sigla internacional do Poliestireno Expandido. Este material foi descoberto pelos químicos Fritz Stastny e Karl Buchholz, em 1949, quando trabalhavam nos laboratórios da Basf, na Alemanha. No Brasil, é mais conhecido como “Isopor ®”, marca registrada da Knauf que designa, comercialmente, os produtos de poliestireno expandido vendidos por esta empresa (RIBEIRO, 2022).

O EPS tem a vantagem de ser um material fácil de manusear, leve e de densidade muito baixa. É bom isolante térmico, é resistente a água e umidade, não conduz eletricidade, sendo seguro nas mais diversas aplicações (LIMA, et.al., 2024). A tabela 2 mostra as principais características do EPS.

Tabela 2 Especificações Técnicas do EPS.

Composição	Polímero termoplástico à base de poliestireno e gás expensor (pentano).
Estrutura	Celular, cadeia fechada, com 95–98% de ar aprisionado em células de poliestireno
Densidade	10 a 40 kg/m ³ (dependendo da aplicação)
Alongamento na ruptura	1,5 – 2,0 %
Resistência a tração	0,2 – 0,7 MPa
Elasticidade	3 – 17 MPa
Compressão permanente	70 – 350 kPa
Recuperação após deformação	≥ 90% após compressão temporária
Estabilidade Térmica	Estável até cerca de 80 °C (acima disso pode deformar)
Constante dielétrica	1,02 – 1,2
Fator de Perda (tanδ)	Em baixa frequência (50Hz a 60 Hz): 0,0001 a 0,0005 a 20°C.
Resistência a abrasão	Baixa – material relativamente macio
Resistência ao desgaste	Baixa – não indicado para atrito constante
Resistência à oxidação.	Boa – material quimicamente estável em ambiente normal
Resistência elétrica	10 ¹⁶ – 10 ¹⁷ Ω·cm (excelente isolante elétrico)

Fonte: Próprio autor, 2025.

4. METODOLOGIA

Esta pesquisa caracteriza-se como aplicada, com abordagem qualitativa e quantitativa, desenvolvida por meio de revisão bibliográfica e estudo de caso técnico-experimental. A escolha desses métodos deve-se à necessidade de analisar, sob uma base teórica e prática, os materiais que podem ser usados nas buchas de espaçamento de cabos em Transformadores de Corrente (TCs) quando submetidos a testes de descargas parciais (DPs), fenômeno relevante para a confiabilidade e vida útil desses equipamentos.

A revisão bibliográfica teve como objetivo identificar os principais conceitos, estudos e resultados disponíveis na literatura sobre descargas parciais, buchas de espaçamento, transformadores de corrente, bem como os materiais e propriedades dielétricas que impactam na sua ocorrência e severidade.

O levantamento foi realizado em bases de dados científicas, como IEEE Xplore, Scielo, ScienceDirect, CAPES Periódicos e Google Scholar, abrangendo publicações entre os anos de 2020 e 2025.

Os critérios de seleção das fontes incluíram: relevância do conteúdo para o tema proposto; clareza metodológica dos estudos; disponibilidade de dados sobre materiais isolantes aplicados a TCs e trabalhos que abordassem medições ou modelagens de descargas parciais.

O estudo de caso foi conduzido a partir da análise de transformadores de corrente de média e alta tensão, utilizados em sistemas elétricos. O objetivo foi avaliar como diferentes materiais empregados na isolação — como EPDM e EPS — influenciam o comportamento dielétrico do equipamento diante de descargas parciais. Os dados analisados incluíram medições de descargas parciais, parâmetros elétricos e informações de composição dos materiais isolantes, obtidos por meio de relatórios técnicos, ensaios laboratoriais e documentação de fabricantes.

O Transformador de Corrente no qual foi utilizado para o estudo é de propriedade da empresa WEG S.A. situada em Jaraguá do Sul-SC. A WEG é uma empresa que inicialmente produzia motores elétricos e expandiu suas atividades nos anos 80, produzindo componentes eletroeletrônicos, transformadores de força e distribuição, produtos para automação industrial, tintas líquidas e em pó e vernizes eletroisolantes (WEG, 2025).

Este TC é composto por cabos passando por dentro de buchas de borracha (EPDM). Nessas buchas foram realizados ensaios para medir as DP, cujos resultados serão apresentados ao longo deste trabalho. Posteriormente foi desenvolvido um protótipo de bucha utilizando

como matéria prima o EPS, sendo submetido aos mesmos testes de DP, a fim de analisar e comparar os dois materiais.

A análise foi conduzida em três etapas: levantamento e sistematização das informações sobre os materiais utilizados em TCs; comparação das propriedades elétricas e dielétricas dos materiais isolantes, considerando parâmetros como rigidez dielétrica, constante dielétrica, fator de dissipação e resistência à umidade e correlação teórica entre as propriedades dos materiais das buchas que acomodam os cabos na janela do TC quando submetidos a testes de descargas parciais, demonstradas graficamente, e com base nas evidências encontradas na literatura e nos documentos técnicos consultados.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste tópico são apresentados e analisados os resultados obtidos a partir dos ensaios de descargas parciais realizados em buchas de espaçamento utilizadas em transformadores de corrente. Os testes foram conduzidos com dois tipos de materiais isolantes: EPDM e EPS, com o objetivo de avaliar o desempenho dielétrico de cada material frente à ocorrência de descargas parciais.

A metodologia empregada permitiu a verificação de ocorrência ou não dos fenômenos de descarga parcial, possibilitando a comparação entre os materiais quanto à sua eficácia como isolantes elétricos. A análise dos dados obtidos é fundamental para compreender os mecanismos de degradação do isolamento e para subsidiar decisões técnicas quanto à escolha de materiais em projetos de equipamentos elétricos.

Nos tópicos subsequentes, serão apresentados os resultados dos ensaios, acompanhados de gráficos, tabelas e interpretações técnicas, com o intuito de discutir o comportamento observado em cada amostra testada e suas implicações práticas.

5.1 Configuração do Ensaio e Condições Operacionais do EPDM

Os ensaios foram realizados em buchas de espaçamento de EPDM (borracha) instaladas em um transformador de corrente e condutores TRAMALT com bitola de 120 mm² que passam pela janela do TC, reproduzindo a condição real de montagem.

O conjunto de aquisição e análise empregado foi o MPD 800 (OMICRON), operando com o software MPD Suite. Para a aplicação das tensões de ensaio, utilizou-se o equipamento mostrado na Figura 5 HIPOT, projetado para testes dielétricos em alta tensão. A função desse equipamento é gerar e controlar a tensão alternada em frequência de rede (50/60 Hz) de forma precisa e estável, permitindo submeter o objeto sob teste a níveis crescentes de tensão até os valores especificados, garantindo:

Estresse elétrico controlado sobre o isolamento para avaliação do comportamento dielétrico;

- Simulação de condições operacionais e de sobretensão conforme critérios normativos;
- Segurança operacional, por meio de monitoramento de corrente de fuga e desligamento automático em caso de falha;

- Controle preciso do nível de tensão aplicado, permitindo incrementos graduais para avaliar o comportamento do isolamento em diferentes regimes.

Figura 5- HIPOT



Fonte- WEG, 2025.

Com esse dispositivo, foram aplicadas as seguintes tensões: 13,8 kV (valor nominal da máquina) e 16,56 kV (sobretensão de verificação), assegurando estabilidade e repetibilidade durante todo o ensaio.

Na montagem do circuito de ensaio foi utilizado um filtro de alta tensão do tipo HV FILTER 50/5 (Power Diagnostix) (Figura 6) conectado na fase do cabo (TRAMALT com bitola de 120 mm²) e aterrado com o capacitor de acoplamento. Esse componente tem a função de bloquear componentes de alta frequência e ruídos eletromagnéticos provenientes da fonte de alta tensão e do ambiente, garantindo que apenas os sinais característicos das DP sejam conduzidos ao sistema de medição. O filtro atua como um elemento de desacoplamento, evitando que interferências externas ou pulsos espúrios sejam interpretados como DP, o que assegura maior precisão e confiabilidade nos resultados. Além disso, contribui para a proteção do sistema de medição contra sobretensões transitórias e para a manutenção da linearidade do circuito.

Figura 6 Figura Filtro Hv Filter 50/5 (Power Diagnostix).



Fonte- WEG, 2025.

A configuração para o ensaio utilizada, difere do padrão recomendado pela OMICRON, pois não foi empregado o quadripolo CPL1. O capacitor de acoplamento foi conectado diretamente à entrada PD do MPD 800, com o quadripolo interno ativado via software, conforme permitido pelo manual do equipamento. Essa configuração é tecnicamente aceitável para circuitos com baixa corrente reativa e curtas distâncias, mantendo a conformidade com a IEC 60270 e garantindo a sensibilidade necessária para a medição.

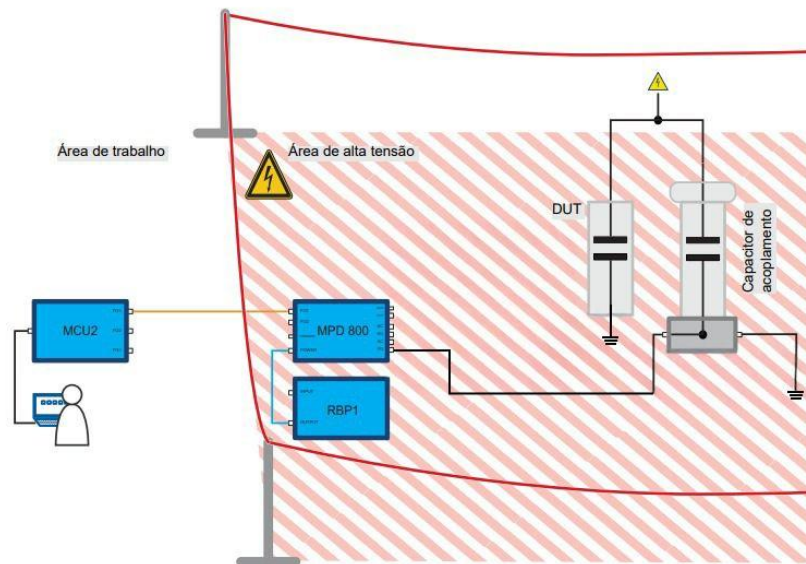
De acordo com o Manual do MPD 800 (Seção 2.3.2): *“Se nenhum quadripolo externo for usado, o capacitor de acoplamento deve ser conectado diretamente à entrada PD, a entrada AC deve ser deixada aberta e o quadripolo interno do sistema de medição MPD 800 deve ser ativado.”* (OMICRON, 2024).

Essa orientação assegura que a ausência do CPL1 não compromete a exatidão da medição, desde que a corrente reativa do circuito esteja dentro dos limites especificados pelo equipamento. A ativação do quadripolo interno garante a impedância adequada para a medição da carga aparente, preservando a linearidade e a rastreabilidade metrológica exigidas pela IEC 60270. Essa solução é recomendada para aplicações com baixa complexidade e reduzida interferência eletromagnética, evitando saturação do sistema e mantendo a faixa dinâmica necessária para análise de padrões PRPD.

O MPD 800 é um sistema de medição de DP versátil de amplo alcance para testes de descarga parcial, com uma grande variedade de sensores de descarga parcial para medir quantidades, como carga, RIV ou milivolts. É um sistema capaz de detectar e localizar defeitos em isolamento com precisão e ainda ajuda a avaliar com segurança o risco de falha no equipamento (OMICRON, 2024).

Para melhor compreensão, a seguir são apresentadas o diagrama de conexão do sistema MPD 800 adotado no ensaio (figura 7), a tabela 3, que determina os componentes utilizados na topologia do ensaio e as figuras 8 e 9, que mostram a montagem dos elementos do ensaio de DP e as figuras 10 até 21 mostram os principais componentes da topologia utilizada.

Figura 7- Conexão utilizada no teste de DP com sistema MPD 800.



Fonte- Próprio autor, 2025.

Tabela 3- Componentes da Topologia do Ensaio de Descarga Parcial

ITEM	DESCRIÇÃO	FUNÇÃO NO ENSAIO DE DP
DUT	Equipamento sob teste (buchas de espaçamento EPDM entre TC e condutores TRAMALT com bitola de 120 mm ²)	Elemento onde se avalia a ocorrência de Descargas Parciais, sendo o foco principal da medição.
Capacitor de Acoplamento	Conectado em paralelo ao DUT	Bloqueia alta tensão e permite passagem dos pulsos de DP medição.

MPD 800	Analizador de Descarga Parcial	Detecta, mede e analisa pulsos de DP conforme IEC 60270.
RBP1 (Reference and Blocking Unit)	Unidade de referência e bloqueio	Fornece sincronismo e bloqueia interferências da fonte de alta tensão.
HIPOT	Equipamento para geração e controle de tensão alternada em frequência de rede (50/60 Hz), garantindo aplicação precisa e estável de níveis de tensão para testes dielétricos.	Fornece as tensões (13,8 kV e 16,56 kV) necessárias para submeter o objeto sob teste a níveis crescentes, simulando condições operacionais e de sobretensão.
HV FILTER	Filtro de alta tensão T50/5 utilizado para bloquear componentes de alta frequência e ruídos eletromagnéticos provenientes da fonte e do ambiente, UN 50 Kv , IN 5, Frequência 0-300 Hz, conectado na fase do cabo (UP Fex de 120mm ²) e aterrado com capacitor de acoplamento.	Elimina interferências e pulsos espúrios, garantindo que apenas sinais reais de DP sejam medidos e melhorando a relação sinal-ruído.
MCU2	Computador com software OMICRON MPD	Configuração, aquisição de dados e geração de relatórios.
Cabo TRAMALT	Condutor de cobre classe 5, seção 120 mm ² , isolado e protegido por borracha silicone, tensão nominal até 15 kV, alta flexibilidade e resistência térmica (-70°C a 200°C)	Garantir condução elétrica segura e isolamento adequado para aplicação da tensão durante o ensaio de Descargas Parciais
Transformador de Corrente (TC)	TC tipo janela, 5 VA, 50/60 Hz, Relação 50:5 A, Faixa de	Atuar como elemento estrutural para simular a

	temperatura -40 a 70 °C, Diâmetro da janela 134 mm.	condição real de instalação, permitindo a passagem dos condutores energizados pelo seu vão e contribuindo para a configuração eletromagnética do sistema
Bucha de Espaçamento EPDM	Faixa de temperatura -40 a 140 °C, 4 furos com diâmetro de 38 mm.	Garante isolamento e posicionamento adequado dos condutores no ensaio.

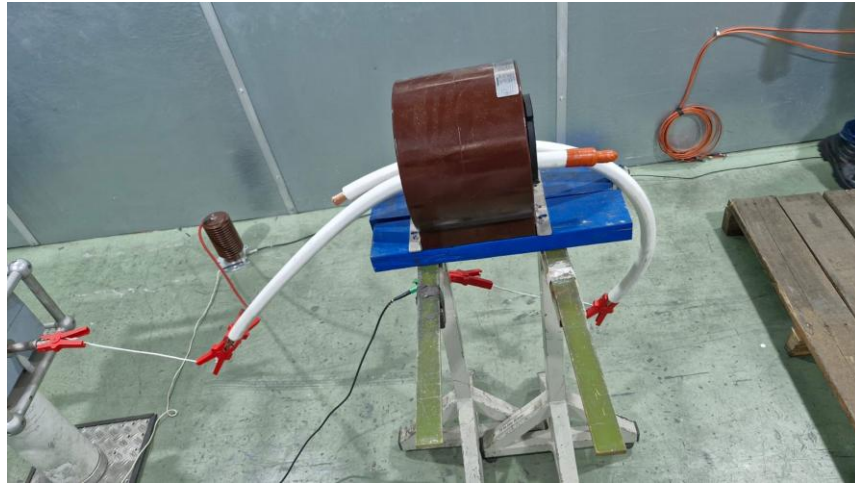
Fonte- Próprio autor, 2025

Figura 8- Montagem dos elementos para ensaio de DP (TC, Bucha EPDM, Cabos, Capacitor de Acoplamento, HV FILTER 150/5, Garras de conexão de aterramento e fases).



Fonte- WEG, 2025

Figura 9- Montagem dos elementos para ensaio de DP (TC, Bucha EPDM, Cabos, Capacitor de Acoplamento, HV FILTER 150/5, Garras de conexão de aterramento e fases).



Fonte- WEG, 2025

Figura 10- Transformador de Corrente (TC)



Fonte- WEG, 2025.

Figura 11- Buchas de Espaçamento-
Vista Frontal



Fonte- WEG, 2025

Figura 12- Buchas de Espaçamento-
Vista Lateral.



Fonte- WEG, 2025

Figura 13- Cabo TRAMALT com
bitola de 120 mm²



Fonte- WEG, 2025

Figura 14- MCU Conectado por Cabo USB
no Computador



Fonte- WEG, 2025

Figura 15-Mcu2 Vista Lateral Para Realizar Conexão Usb Com O Computador



Fonte- WEG, 2025

Figura 16- MPD 800 Conectado Com RBP1



Fonte- WEG, 2025

Figura 17- RBP1 Vista Lateral Para Realizar Conexão Com MPD 800



Fonte- WEG, 2025

Figura 18- MPD 800 Vista Lateral Para Realizar Conexão Com RBP1 e MCU2.



Fonte- WEG, 2025

Figura 19- MPD 800 Vista Lateral Para Realizar Conexão Com Capacitor De Acoplamento



Fonte- WEG, 2025

Figura 20- Capacitor Acoplador Com Suas Respectivas Conexões (Alimentação E Aterramento)



Fonte- WEG, 2025

Figura 21- Capacitor Acoplador Tipo MCC 124 – OMICRON



Fonte- WEG, 2025

5.1.1 Procedimentos de Calibração

A confiabilidade das medições de descargas parciais (DP) depende diretamente da correta calibração do sistema e da verificação de sua conformidade com os requisitos normativos. Para garantir essa precisão, foi realizada inicialmente a calibração da carga aparente (q_{app}) por meio da injeção de uma carga conhecida de 1 nC, utilizando o calibrador Haefely KAL 9511 (Figura 22). Esse dispositivo foi conectado em paralelo ao objeto sob ensaio, dentro da configuração real de medição, que inclui o capacitor de acoplamento. A aplicação de 1 nC está alinhada às recomendações da norma IEC 60270, pois representa uma magnitude típica de DP em sistemas de média tensão, permitindo validar a linearidade e a rastreabilidade do sistema sem saturar os filtros ou comprometer a precisão. Essa etapa assegura que os valores medidos pelo MPD 800 correspondam fielmente à grandeza física esperada, garantindo confiabilidade metrológica e conformidade normativa.

Além da calibração da carga aparente, procedeu-se à calibração da tensão de ensaio por meio do HIPOT, normalmente realizada entre 10% e 20% do valor máximo aplicado. Essa verificação consistiu em correlacionar a leitura do canal de sincronismo do MPD 800 com um instrumento de referência, assegurando a coerência da escala de tensão e a correta formação dos diagramas PRPD (*Phase-Resolved Partial Discharge*), cuja interpretação depende da sincronização precisa entre pulsos e ângulo de fase.

A verificação do desempenho geral do sistema foi conduzida por meio do recurso Performance Check Wizard, disponível no software MPD Suite, que avalia filtros, resposta e linearidade, garantindo estabilidade e comparabilidade entre diferentes campanhas de ensaio. Complementarmente, foram ajustadas as larguras de banda conforme as recomendações da IEC e aplicados recursos de *gating* temporal e frequencial para otimizar a relação sinal-ruído, minimizando interferências externas e assegurando sensibilidade adequada para detecção de pulsos genuínos.

Essas práticas, associadas à documentação das condições de ensaio e à especificação metrológica do MPD 800 (com exatidão típica de $\pm 7\%$ para medições IEC), conferem robustez e credibilidade aos resultados obtidos, permitindo que as conclusões sobre a presença ou ausência de DP sejam tecnicamente defensáveis.

5.1.2 Critérios Normativos, Limiar de Detecção

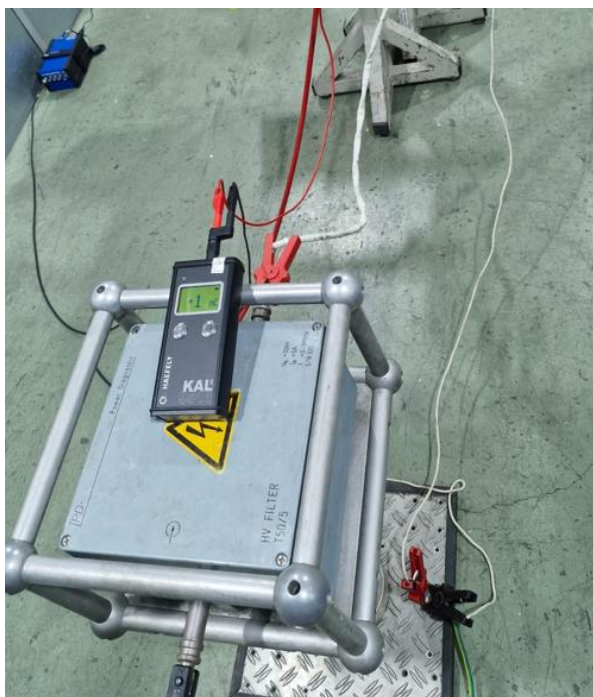
A avaliação das descargas parciais (DP) neste estudo foi conduzida conforme as normas IEC 60270 e IEC 60034-27-1, que estabelecem, respectivamente, os princípios de medição por carga aparente e as diretrizes para ensaios off-line em sistemas elétricos. A IEC 60270 define os circuitos de medição, os métodos de calibração por injeção de carga e os parâmetros necessários para garantir rastreabilidade metrológica. Já a IEC 60034-27-1 orienta quanto à interpretação dos resultados, enfatizando que a decisão sobre a presença de DP deve considerar não apenas valores absolutos, mas também a assinatura em fase (*Phase-Resolved Partial Discharge – PRPD*) e a reprodutibilidade com a variação da tensão aplicada (IEC 60270, 2025; IEC 60034-27-1, 2017).

Após a etapa de calibração do sistema, descrita no item 5.1.1, realizou-se a medição do ruído de fundo do ambiente, utilizando o sistema MPD 800 (OMICRON) com o arranjo completo de ensaio (capacitor de acoplamento e filtros ajustados) e tensão desligada, conforme previsto na IEC 60270. Essa medição registrou os pulsos presentes no ambiente, resultando em um valor próximo de 15 pC, que serviu como referência para definição do limiar prático de detecção, garantindo que apenas pulsos significativamente acima do nível de ruído fossem considerados.

O método PRPD, por sua vez, relaciona os pulsos de descarga parcial ao ângulo de fase da tensão aplicada, permitindo identificar padrões característicos do fenômeno. Descargas genuínas apresentam agrupamentos reprodutíveis em regiões específicas do ciclo, geralmente com simetria entre semiciclos, enquanto ruídos se distribuem de forma aleatória. Por essa razão, a IEC 60034-27-1 recomenda que a interpretação considere não apenas a magnitude em pC, mas também a consistência do padrão PRPD e sua repetibilidade com a variação da tensão.

Embora o ruído medido tenha sido próximo de 15 pC, por diretriz interna e visando maior robustez contra falsos positivos, optou-se por adotar como limiar prático o dobro desse valor (30 pC). Ressalta-se que essa prática é uma escolha organizacional e não constitui exigência da norma IEC 60034-27-1.

Figura 22- Calibrador Haefely KAL 9511 exibindo carga de 1 nC utilizada para verificação do sistema de medição.



Fonte- WEG, 2025

5.1.3 Estratégia de Avaliação de DP e Justificativa dos Resultados

A identificação da presença de descargas parciais (DP) neste estudo foi conduzida conforme as diretrizes da norma IEC 60034-27-1, que recomenda que a avaliação não se baseie exclusivamente em valores absolutos de carga aparente, mas também considere a consistência do padrão por fase (*Phase-Resolved Partial Discharge – PRPD*) e sua repetibilidade frente à variação da tensão aplicada.

Para garantir confiabilidade, foram estabelecidos dois critérios simultâneos para classificar um evento como descarga parcial genuína:

1. Apresentar carga aparente superior ao limiar definido;
2. Exibir padrão PRPD característico e reproduzível.

Inicialmente, foi realizada a medição do ruído de fundo, utilizando o sistema MPD 800 (OMICRON) com o arranjo completo de ensaio, porém sem tensão aplicada. O valor obtido foi de aproximadamente 15 pC, o que assegura uma relação sinal-ruído adequada. Em conformidade com boas práticas laboratoriais e visando maior robustez contra falsos positivos, adotou-se como limiar prático o valor de 30 pC, equivalente ao dobro do ruído medido.

Ressalta-se que essa escolha é uma diretriz interna e não constitui exigência normativa, sendo aplicada para garantir maior confiabilidade na detecção.

A aplicação desses critérios permitiu justificar os resultados obtidos nos ensaios realizados sob tensões de 13,8 kV (valor nominal) e 16,56 kV (sobretensão). Os gráficos gerados pelo software MPD Suite, associado ao sistema MPD 800, apresentam os diagramas PRPD, que correlacionam a ocorrência dos pulsos com o ângulo da tensão aplicada, possibilitando identificar padrões típicos de descargas internas, superficiais ou corona. Cada gráfico exibe a distribuição dos pulsos em função da fase da tensão senoidal, com a amplitude da carga aparente indicada por cores conforme a escala cromática. Além disso, o software fornece parâmetros estatísticos, como carga aparente máxima, taxa de pulsos e nível de ruído, fundamentais para interpretação conforme a norma IEC 60034-27-1.

Na sequência, serão apresentados os parâmetros utilizados pelo software MPD 800 (Tabela 4) e as Figuras 23 e 24, que ilustram os resultados obtidos e sua correlação com os critérios normativos e metrológicos adotados.

Tabela 4- Parâmetros utilizados pelo Software MPD 800 (OMICRON)

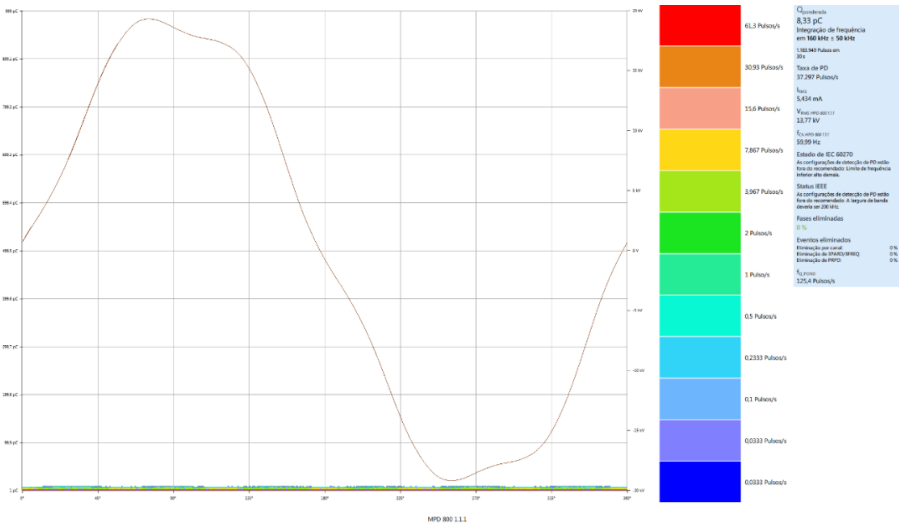
Parâmetros	Unidade	Descrição
Qponderada	pC	Carga aparente média ponderada dos pulsos detectados, indicando a intensidade das DP.
Integração de frequência	kHz	Faixa de frequência utilizada para detecção das DP, definida pelo filtro do sistema.
Número de pulsos	Pulsos / tempo	Quantidade total de pulsos registrados no intervalo de medição (ex.: 30 s).
Taxa de PD	Pulsos/s	Frequência de ocorrência dos pulsos por segundo, útil para avaliar atividade elétrica.
IRMS	mA	Corrente eficaz medida durante o ensaio.
VRMS	kV	Tensão eficaz aplicada ao equipamento durante o teste.
fCA	Hz	Frequência da tensão aplicada, normalmente próxima à frequência da rede elétrica.
Estado IEC 60270	—	Indica conformidade das configurações com a norma IEC 60270 para medição de DP.

Status IEEE	—	Avalia conformidade com recomendações IEEE, incluindo largura de banda e filtros.
Fases eliminadas	%	Percentual de fases excluídas da análise durante o ensaio.
Eventos eliminados	%	Percentual de pulsos descartados por filtros (ex.: por canal, frequência ou padrão PRPD).
fo_pond	Pulsos/s	Taxa ponderada de pulsos considerando ajustes internos do software.

Fonte- Próprio autor, 2025

Figura 23- Gráfico gerado pelo software MPD 800 (OMICRON) para tensão aplicada de 13,8

Kv



Fonte- MPD 800- OMICRON, 2025

Para a análise gráfica apresentada, observou-se que a carga aparente ponderada (Qponderada) manteve-se em torno de 8,33 pC, valor significativamente inferior ao limiar de detecção adotado neste estudo (30 pC), definido conforme diretriz interna para garantir robustez contra falsos positivos.

A taxa de pulsos totalizou aproximadamente 37.297 pulsos, mantendo-se praticamente constante ao longo do teste, sem variações significativas que indicassem evolução do fenômeno. Essa estabilidade reforça a ausência de atividade parcial real, pois descargas genuínas tendem a apresentar aumento de frequência com a elevação da tensão aplicada.

O diagrama PRPD (Phase-Resolved Partial Discharge) não evidenciou agrupamentos definidos ou padrões característicos, apresentando distribuição aleatória dos pulsos ao longo do ciclo de tensão. Esse comportamento é típico de sinais não correlacionados com o ângulo de

- A DP manifesta-se quando o gradiente de campo elétrico atinge valores críticos, geralmente próximos aos máximos da tensão aplicada. Essa correlação é evidenciada pela concentração dos pulsos na região de pico da forma de onda, conforme indicado pelos pontos azuis no gráfico;
- O software MPD 800 correlaciona a fase da tensão com os pulsos medidos, descartando sinais aleatórios. A repetibilidade e concentração dos pulsos confirmam que não se trata de ruído;
- Diferentemente de ruído eletromagnético, os pulsos apresentam distribuição e comportamento compatíveis com mecanismos internos de falha dielétrica, como cavidades gasosas ou inclusões no material isolante. Esse padrão é típico de descargas parciais genuínas conforme critérios da IEC 60270.

Embora tenha sido constatada atividade de descargas parciais (DP) durante o ensaio, é imprescindível salientar que a tensão aplicada não corresponde à condição nominal de operação do equipamento, que é 13,8 kV. Ensaio sob tensões superiores possuem caráter diagnóstico e visam avaliar a robustez do sistema isolante, não refletindo necessariamente o comportamento do ativo em regime permanente. Assim, a ocorrência de DP sob tensão elevada não implica, de forma direta, em comprometimento da confiabilidade do equipamento na sua tensão nominal. A interpretação dos resultados deve ser conduzida com base em critérios normativos, considerando a tensão operacional, o histórico do ativo e a criticidade da instalação, de modo a evitar conclusões equivocadas sobre sua integridade.

Para compreender essa análise, é necessário destacar que a tensão de 13,8 kV refere-se à tensão entre fases (linha-linha) como mostrado na figura 25. Cada TC é projetado para monitorar a corrente de apenas uma fase, não havendo passagem simultânea de duas fases pelo mesmo TC. Por esse motivo, não ocorre uma tensão de 13,8 kV dentro do TC, pois ele não está submetido à tensão entre fases, mas sim à tensão da fase em relação ao neutro.

Essa tensão é calculada pela relação:

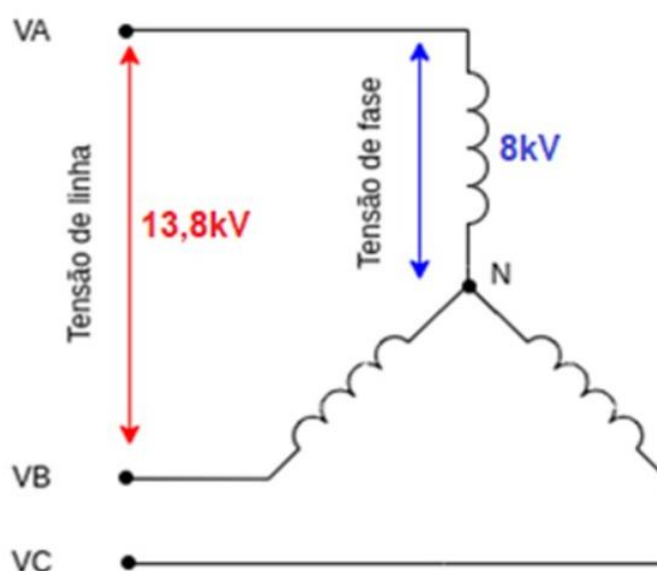
$$V_{\text{fase}} = \frac{V_{\text{linha}}}{\sqrt{3}}$$

Aplicando para um sistema de 13,8 kV:

$$V_{\text{fase}} = \frac{13,8 \text{ kV}}{\sqrt{3}} \approx 7,98 \text{ kV}$$

Dessa forma, cada fase apresenta aproximadamente 8 kV em relação ao neutro. Essa característica é essencial para definir os parâmetros do ensaio, que têm como objetivo verificar a qualidade da isolamento e identificar possíveis falhas internas antes que evoluam para uma ruptura completa. É importante destacar que os TCs podem ser utilizados em configurações com 1, 2 ou 4 condutores, dependendo da necessidade de divisão de corrente ou inclusão do neutro. Essas configurações, entretanto, não alteram a tensão aplicada ao TC, que permanece a tensão fase-neutro calculada pela fórmula acima.

Figura 25 - Ligação em Y Tensão de linha e Tensão de fase



Fonte- Wantronics, 2025

Por mais que tenham sido aplicadas tensões superiores ao valor nominal máximo do equipamento durante os ensaios, essa prática tem caráter exclusivamente diagnóstico e visa garantir a robustez do sistema isolante. Isso não significa que o equipamento será submetido a essas condições em operação normal, mas sim que foi avaliado para suportar cenários críticos, assegurando maior confiabilidade ao longo de sua vida útil.

5.2. Configuração do Ensaio e Condições Operacionais do EPS.

Os ensaios seguiram rigorosamente os mesmos procedimentos metodológicos aplicados ao EPDM, todas as etapas foram replicadas para os protótipos de EPS (Figura 26) sendo, configuração do circuito de ensaio, calibração do sistema de medição, definição de limiares de detecção, aplicação das tensões (13,8 kV e 16,56 kV) e análise dos padrões PRPD para

caracterização do fenômeno. Essa padronização assegura comparabilidade técnica entre os materiais e elimina variáveis externas que poderiam comprometer a análise.

Figura 26- Protótipo da Bucha de espaçamento no Material EPS.



Fonte- WEG, 2025

Conforme mencionado anteriormente, a configuração do ensaio manteve a topologia apresentada na Figura 7, utilizada nos testes com a bucha de EPDM. No entanto, a faixa de temperatura da bucha de espaçamento do EPS é de -150 a 73°C. O sistema de medição foi composto pelo MPD 800 (OMICRON) operando com o software MPD Suite, associado à fonte de alta tensão HIPOT, responsável pela aplicação de tensão alternada em frequência de rede (50/60 Hz), com controle preciso e incrementos graduais (Figura 27).

Figura 27: Montagem dos elementos para ensaio de DP (TC, Bucha EPS, Cabos, Capacitor de Acoplamento, HV FILTER 150/5, Garras de conexão de alimentação e aterramento)



Fonte- WEG, 2025

alternada. Na área destinada à representação dos pulsos, observa-se uma distribuição dispersa, sem formação de agrupamentos característicos. Ainda, observa-se que os pulsos estão distribuídos de forma esparsa, sem qualquer padrão de concentração em regiões específicas do ciclo elétrico. A escala cromática indica predominância de tonalidades frias, associadas a baixíssima ocorrência de eventos, enquanto não há presença de cores quentes, que seriam indicativas de atividade parcial significativa. Essa disposição confirma que os sinais detectados não apresentam relação com a variação de fase da tensão aplicada, caracterizando um comportamento típico de ruído aleatório e não de descargas parciais genuínas.

O valor da carga aparente ($Q_{ponderada}$) foi de 10,36 pC, inferior ao limiar de 30 pC estabelecido na metodologia como referência para caracterização de descargas parciais significativas. Esse parâmetro é decisivo para a avaliação da integridade do isolamento, pois valores abaixo do limite normativo são indicativos de ausência de atividade parcial relevante, reforçando a confiabilidade do material ensaiado.

A tensão aplicada durante o teste atingiu 16,56 kV, nível superior ao normalmente utilizado em condições operacionais. Esse valor foi adotado exclusivamente para avaliação sob regime severo e não deve ser considerado para operação contínua. Mesmo submetido a essa tensão elevada, o material analisado não apresentou indícios de descargas parciais, comportamento que contrasta com o EPDM, o qual, sob a mesma condição, exibiu atividade parcial significativa, evidenciando diferenças importantes na performance entre os materiais.

6. CONCLUSÃO

Este estudo avaliou a influência dos materiais utilizados nas buchas que acomodam os cabos na janela dos transformadores de corrente quando submetidos a ensaios de descargas parciais (DP), comparando o desempenho do EPDM (borracha) e do EPS (isopor). Os testes foram conduzidos conforme as normas IEC 60270 e IEC 60034-27-1, que estabelecem os princípios para medição e interpretação dos resultados.

Os resultados indicaram que a substituição do EPDM pelo EPS não compromete a integridade dielétrica do equipamento, visto que ambos apresentaram comportamento satisfatório sob tensão nominal (13,8 kV). Contudo, em condições de sobretensão (16,56 kV), o EPDM apresentou atividade parcial significativa, enquanto o EPS manteve desempenho superior, sem indícios relevantes de descargas parciais.

Além do aspecto técnico, a adoção do EPS pode representar uma redução expressiva de custos para a WEG, devido à sua menor complexidade de fabricação, ampla disponibilidade no mercado e preço inferior em relação ao EPDM. Essa vantagem econômica é estratégica, pois contribui para diminuir o custo final do produto, otimizar investimentos e ampliar a margem de lucratividade sem comprometer a confiabilidade elétrica.

Sob a ótica da cadeia de suprimentos, essa mudança abre oportunidades para ampliar a base de fornecedores, fortalecer parcerias e adotar critérios mais flexíveis nos processos de homologação. A maior disponibilidade do EPS no mercado reduz riscos de desabastecimento, aumenta a previsibilidade nas negociações e favorece uma gestão de estoques mais eficiente. Tais iniciativas estão alinhadas aos objetivos corporativos de competitividade e sustentabilidade, impactando diretamente áreas estratégicas como desenvolvimento e qualificação de fornecedores.

Por limitações de tempo, não foi possível concluir totalmente a implementação prática das mudanças propostas. Entretanto, os testes realizados confirmaram a viabilidade técnica do EPS como alternativa ao EPDM. É essencial destacar que o propósito central deste estudo foi verificar a ocorrência ou não de descargas parciais nos materiais analisados, e não determinar sua localização. Para pesquisas futuras, recomenda-se aprofundar essa análise com equipamentos e métodos específicos capazes de identificar os pontos de origem das descargas, ampliando a compreensão do fenômeno.

Sugere-se também que estudos complementares incluam avaliações das propriedades mecânicas, da tensão de ruptura operacional do EPS e testes sob ciclos térmicos prolongados,

assegurando que a substituição seja viável não apenas do ponto de vista elétrico, mas também estrutural. Além disso, recomenda-se investigar novas alternativas de materiais que conciliem desempenho elétrico, resistência mecânica e custo reduzido, consolidando estratégias de inovação e sustentabilidade alinhadas às exigências do mercado global.

Com base nos resultados obtidos, a substituição do EPDM pelo EPS revela potencial não apenas para reduzir custos, mas também para fortalecer processos internos e ampliar oportunidades estratégicas para a organização. Essa perspectiva reforça a necessidade de continuidade das pesquisas, integrando análises técnicas, econômicas e operacionais, a fim de consolidar soluções inovadoras que elevem a eficiência, a competitividade e a responsabilidade corporativa, garantindo um posicionamento sólido da empresa em um mercado cada vez mais dinâmico.

REFERÊNCIAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR IEC 61869-2: Transformadores para instrumento - Parte 2: Requisitos adicionais para transformadores de corrente. [S.l.]: ABNT, 2021.

ABNT-Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6856:2015 – Transformadores de corrente para medição e proteção. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

CHAPMAN, S. J. Fundamentos de Máquinas Elétricas. Porto Alegre: AMGH, 2013. Ebook. ISBN 9788580552072.

DA SILVA, P.R.C. Avaliação de buchas de transformadores utilizando métodos sem malha. 2021.

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY JR, C; UMANS, S. D. Máquinas Elétricas. 7. Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

FUHR, J.; ASCHWANDEN, T. "Identification and localization of PDsources in powertransformers and power-generators". IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 24, no. 1, pp. 17-30, Feb. 2017.

FRONTIN, S O. et al. Equipamentos de alta tensão–prospecção e hierarquização de inovações tecnológicas. Brasília: Teixeira, v. 2000, 2013.

GAIKE, L. D. (2025). Avaliação das propriedades finais de nanocompósitos de EPDM/NBR reforçados com óxido de grafeno reduzido.

HERMENEGILDO, G. Desenvolvimento de uma formulação elastomérica de EPDM para aplicação em temperaturas elevadas. 2018.

IEC- INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMISSION 60270:High-voltage test techniques – Charge-based measurement of partial discharges.2025

IEC- INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMISSION. 60034-27-1 Rotating electrical machines - Part 27-1: Off-line partial discharge measurements on the winding insulation, 2017.

IEC- INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMISSION. 61869-1: Instrument Transformers - General Requirements. [S.l.]. 2007.

IEC- INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMISSION. (2012). IEC 61869-2 - Instrument transformers 3 Part 2: Additional requirements for current transformers.

IEEE- Guide for the Application of Current Transformers Used for Protective Relaying Purposes," in *IEEE Std C37.110-2023*, vol., no., pp.1-89, 24 May 2023, doi: 10.1109/IEEESTD.2023.10132388.

KESSLER, O. The importance of partial discharge testing: PD testing has proven to be a very reliable method for detecting defects in the insulation system of electrical equipment and for 118 assessing the risk of failure. IEEE Power and Energy Magazine, v. 18, n. 2, p. 62-65, 2020. <https://doi.org/10.1109/MPE.2020.2974599>

KINDERMANN, G. Proteção de Sistemas Elétricos de Potência, volume 1, 3. ed., Florianópolis: Edição do autor, 2012.

KOSOW, I. L. Máquinas Elétricas e Transformadores. Porto Alegre: Globo, 2000.

LIMA, A. D. S., BALDIM, C. D. O., OLIVEIRA, M. S. D., RISOLINO, M. J. M., & OLIVEIRA, T. F. C. L. D. Método construtivo em poliestireno expandido. 2024

MACÊDO, E.C.T. et al. Metodologia para a classificação de descargas parciais utilizando redes neurais artificiais. 2014.

MACHADO, G. O. et al. Análise dos impactos das distorções harmônicas de tensão sobre a ocorrência de descargas parciais utilizando um modelo de elementos finitos. 2022.

MAMEDE FILHO, J. Instalações Elétricas Industriais. 9ª Edição. Editora LTC, 2017

OMICRON. Practical Guide to Partial Discharge Measurements in MV Equipment. OMICRON Electronics, 2021.

OMICRON- MPD 800. 2024.

RIBEIRO, J. J. H. P. Estudo de saturação de transformadores de corrente conforme a norma IEC 61869-2 utilizando o software ATPDraw. 2024

RIBEIRO, G.S.ouza. Análise do poliestireno expandido na construção civil. Ouro Branco, MG, 2022.

RIBEIRO, G. F. et al. Contribuições à avaliação da degradação da isolação de cabos por meio da análise de descargas parciais. 2023.

SAMPAIO, R. F. Transformadores de Instrumentos: Unidade 7. Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Elétrica. Apostila da disciplina de Proteção de Sistemas Elétricos de Potência. 2021.

SANTIAGO, A. J. et al. Construindo Um Motor Eletrico De Corrente Continua Como Aprendizagem Ativa Da Lei De Faraday. Revista do Professor de Física• Brasília, v. 2, n. 2, 2018.

SANTOS, E. M. dos. Compensação das formas de onda distorcidas pela saturação de transformadores de corrente com auxílio da estimação de frequência. Universidade Federal de Santa Maria. 2015.

SOUZA, M. A. et al. Impacto do envelhecimento de isolantes poliméricos no comportamento de descargas parciais. Revista Brasileira de Engenharia Elétrica, v. 28, n. 4, p. 45-58, 2022.

VAZ, F.S.O. Máquinas elétricas. – Florianópolis : SENAI/SC, 2010. 99 p. : il. color ; 28 cm.

WANTRONICS. <https://wantronics.com.br/calculadora-tensao-de-linha-e-de-fase/>.

WEG. Site Institucional WEG. Jaraguá do Sul: [s.n.], 2025. Disponível em: <https://www.weg.net/institucional/BR/pt/>

ZHANG, Y. et al. Enhanced Electrical Performance of EPDM-based Composites for High Voltage Insulation. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, v. 28, n. 5, p. 1880-1890, 2021.