

## AVALIAÇÃO DA ISOLAÇÃO DE TRANSFORMADORES ATRAVÉS DE MEDIÇÃO DE DESCARGAS PARCIAIS E TANGENTE DE DELTA

Bruno Ponciano Marques (IC)<sup>1</sup>, Gustavo Paiva Lopes (PQ)<sup>1</sup>

<sup>1</sup>UNIFEI – Universidade Federal de Itajubá.

**Palavras-chave: Descargas parciais. Fator de dissipação. Transformadores.**

### Introdução

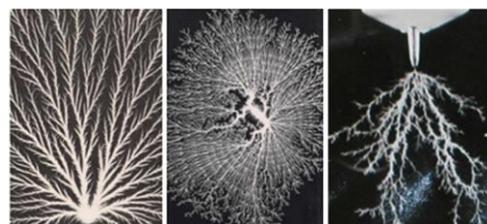
Devido ao surgimento e crescimento de novos sistemas de geração, torna-se necessário a evolução do sistema elétrico como um todo, seja para suportar as novas demandas de energia ou para tratar novos fenômenos na rede como a variação da taxa de distorção harmônica (THD) devido a inserção dos novos sistemas de geração. Baseado nesse fato, é evidente o crescimento do setor elétrico no país, como por exemplo, o anúncio feito pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) do investimento de 25 bilhões de reais no setor para os próximos anos (CORSINI; SALLES, 2022), mostra que as oportunidades para os estudos e aprimoramentos na área estão sendo avaliados de forma otimista pelas organizações. Além disso, os transformadores de distribuição são máquinas elétricas essenciais na rede elétrica, e apesar desse detalhe, não são realizados estudos desses equipamentos com a mesma frequência do que transformadores de potência. Isso acontece, pois, a preocupação com transformadores de potência é maior devido ao seu alto custo e importância no sistema (transformadores de potência são utilizados em redes acima de 33 kV classificados acima de 200 MVA, ao contrário dos transformadores de distribuição que operam em tensões menores, de 230V a 11 kV, classificados abaixo de 200 MVA). Porém, os índices mais significativos de falha no sistema elétrico (próximo a 10%) apresentam como um dos principais fatores de falha, os eventos ocorridos durante a operação de transformadores de distribuição (FARIA et al., 2018). Considerando isso e sabendo que há um número elevado desses equipamentos na rede, os estudos divulgados que abordam o tema não seguem a mesma proporção.

Através desse trabalho, então, pretende-se avaliar a isolação desses ativos através da medição de descargas parciais (DP), como também entender todo o fenômeno envolvido, isto é, estudar a geração e identificação das descargas parciais. Esta proposta não irá abranger apenas o estudo da isolação dos equipamentos, mas também abrangerá o estudo e aplicação de todo um arsenal de equipamentos projetados para esses tipos de medições.

A norma ABNT NBR IEC 60270 – Técnicas de ensaio em alta tensão – Medições de descargas parciais,

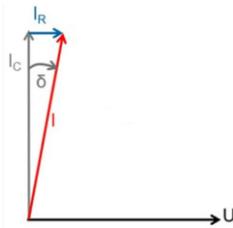
descreve como descarga parcial uma descarga elétrica localizada que rompe apenas de forma parcial a isolação entre condutores e que pode ou não existir adjacente a um condutor. Geralmente, as descargas parciais aparecem devido a concentração localizada de estresse elétrico no interior da isolação ou em sua superfície e ao longo da História, foi descoberta sua influência na isolação dos materiais (CAVALLINI, A. et al, 2005). O primeiro método experimental foi aplicado em 1977 com Lichtenberg (HAUSCHILD, W.; LEMKE, E, 2014). Existem três tipos de descargas parciais: corona, de superfície e interna. A Figura 1 mostra descargas típicas no ar, óleo isolante e em polimetilmetacrilato (PMMA).

Figura 1: Representações dos tipos gerais de descargas parciais



Pretende-se também estudar as isolações através de outros parâmetros como o fator de dissipação e capacitâncias, a fim de elaborar tendências nos parâmetros dos transformadores. Fator de dissipação, também conhecido como *tangente de delta* é a medida da perda das características dielétricas na isolação elétrica quando aplicado um campo elétrico alternado dissipando energia como calor. A Figura 2 mostra o diagrama fasorial do fator de dissipação. No diagrama,  $I_R$  é a componente resistiva e  $I_C$  é a componente capacitiva da corrente de fuga, a qual está adiantada da tensão em 90 graus.  $I$  é a corrente total, formando um ângulo  $\delta$  (delta) com o eixo ordenado. Para efeitos práticos,  $I_R$  está relacionado com a potência ativa ( $P$ ) e  $I_C$  a potência reativa ( $Q$ ).

Figura 2: Diagrama fasorial representando o fator de dissipação



Portanto, o fator de dissipação é simplesmente a tangente de delta. A Equação (1) mostra o cálculo de  $\tan \delta$ .

$$\tan \delta = \frac{P}{Q} \quad (1)$$

Baseado nisso, tem-se a hipótese de que, os parâmetros de capacitância e tangente de delta podem ser padronizados através de curvas de distribuição de probabilidade, independente do projeto ou fabricante do equipamento, apenas mantendo suas características elétricas principais, como classe de tensão e potência. Esta proposição pode ser verificada neste trabalho devido a grande quantidade de dados disponíveis de amostras ensaiadas (em torno de quatrocentas). Os ensaios serão realizados no laboratório de alta tensão da UNIFEI.

Este assunto é de fundamental importância para o mercado de trabalho, visto que há uma demanda crescente por medições de descargas parciais em campo, bem como dos parâmetros para modelagem do transformador, principalmente o transformador isolado a seco, que também é estudado nesse trabalho.

## Metodologia

### 1- Simulação de Descargas Parciais

Na primeira etapa, foi necessário compreender o fenômeno de descargas parciais. Para isso, uma estrutura foi montada para que fosse possível a simulação das descargas. Foram utilizados os equipamentos AQUILA e PD Simulator, da TECHIMP e foram simulados três tipos de descarga. A Figura 3 mostra os equipamentos usados.

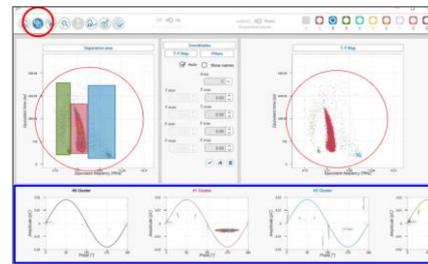
Figura 3: Equipamentos para simulação de DP



### 2- Identificação de Descargas Parciais Através de Programa Computacional

A próxima etapa foi realizar a identificação das descargas parciais simuladas através de programa computacional. O programa usado foi o PDPro (TECHIMP). Neste, foi possível compreender as principais características que diferenciam cada tipo de descarga. A Figura 4 mostra um exemplo, o qual foi feita a separação de descargas utilizando a técnica de separação via mapa T-F (tempo x frequência).

Figura 4: Separação e identificação de descargas parciais



### 3- Medição de Descargas Parciais em Transformador a Seco

Após entender como o fenômeno das descargas parciais acontece, deu-se início a aplicação dos conceitos e medição em equipamentos reais, como por exemplo, o transformador a seco. Foram usados os equipamentos AQUILA, um transformador de corrente de alta frequência (HFCT) e capacitor de acoplamento da TECHIMP. A Figura 5 registra a realização do ensaio.

Figura 5: Medição de descargas parciais em transformador a seco

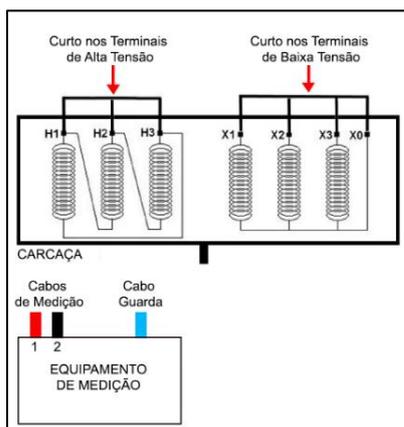


### 4- Medição de Fator de Dissipação e Capacitância e Classificação dos Resultados

Após o estudo do fenômeno de descargas parciais e os seus efeitos na isolação dos equipamentos, deu-se início a uma nova etapa. O estudo em questão ainda se manteve

com foco na isolação dos equipamentos, contudo, a avaliação se deu através de outros parâmetros como capacitâncias e fatores de dissipação em transformadores de distribuição. A metodologia de ensaio está representada na Figura 6. Neste, aplica-se uma fonte alternada e os terminais de interesse são medidos. É necessário também inserir o cabo guarda no terminal excedente para eliminar interferências. Em transformadores, as medições realizadas são: AT-BT (alta-tensão x baixa-tensão), AT-M (alta-tensão x carcaça) e BT-M (baixa-tensão e carcaça).

Figura 6: Esquema de medição de capacitância e tangente de delta



## 5 – Geração de Curvas de Distribuição de Probabilidade

A partir dos resultados previamente obtidos, o banco de dados foi organizado e foram geradas as curvas de distribuição de probabilidade. Foi utilizado o programa Minitab, utilizando sua função de *Identificação de Distribuição Individual*. Para gerar as curvas, foi necessário estabelecer intervalos baseados nas características das amostras. Dividindo primeiramente entre amostras trifásicas e monofásicas, os dois tipos de amostra foram classificados em três classes, 15kV, 25kV e 36kV, das quais a separação pela potência foi:

Amostras trifásicas:

- 15-75 kVA, para medições AT-BT, AT-M, BT-M
- 75 kVA–150 kVA, para medições AT-BT, AT-M, BT-M;
- 225- 300 kVA, para medições AT-BT, AT-M, BT-M

Amostras monofásicas:

- 5-15 kVA, para medições AT-BT
- 25- 100kVA, para medições AT-BT

## Resultados e discussão

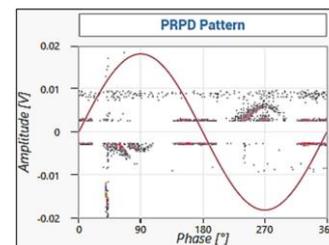
### 1 – Medição de Descargas Parciais em Transformador a Seco.

Após a medição e a utilização dos equipamentos, foram registrados os padrões PRPD (*Descargas Parciais Resolvidas por Fase*) como mostra o exemplo da Figura 7. Além do padrão PRPD, também foi possível registrar o mapa T-F (tempo X frequência), pois esse mapa é complementar para se descobrir qual tipo de descarga está se fazendo presente no objeto sob teste. Foi possível identificar vários fenômenos de descargas parciais na amostra ensaiada. Entre os subtipos de descarga encontrados foram: descarga interna no papel isolante e corona, nas três fases da amostra. A Tabela 1 mostra um resumo dos resultados.

Tabela 1: Tipos de descargas identificadas no transformador a seco

<i>Diagnóstico</i>	<i>Local</i>
Descarga interna no papel isolante	H1
Descarga interna no papel isolante + Corona	H1
Descarga interna no papel isolante	H2
Descarga interna no papel isolante	H3
Descarga interna no papel isolante + Corona	H3

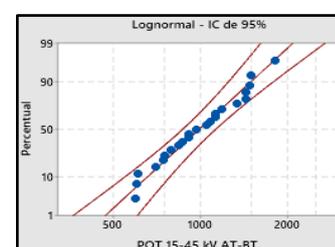
Figura 7: padrão PRPD gerado no ensaio



### 2 – Curvas de Distribuição de Probabilidade

A partir do Minitab, foram geradas diversas curvas como a mostrada na Figura 8. Entre essas, destacaram-se distribuições como a Lognormal, Normal e Weibull. Devido a quantidade de resultados, estes se encontram nos Apêndices do relatório completo do trabalho.

Figura 8: Exemplo de curva de distribuição gerada



## Conclusões

Primeiramente, sobre a etapa de estudo teórico tratado no projeto, pode-se concluir que os temas trabalhados têm influência significativa na isolação dos equipamentos elétricos. Sobretudo, o tema de descargas parciais, embora cativante e desafiador, ainda não é tratado com a devida importância e frequência pelos profissionais da área, uma vez que os métodos de análise não-convencionais ainda não estão totalmente normatizados. O mesmo desinteresse acontece para o tema de transformadores de distribuição pois estes não possuem custo significativo perante os outros equipamentos da rede elétrica.

Em relação a etapa de simulação e identificação das descargas parciais, pode-se concluir que o estudo referente aos três tipos de descargas abordados foi de extrema importância, pois, se alcança uma capacitação técnica suficiente para que tais atividades possam ser expandidas com segurança para serviços práticos em equipamentos reais.

Após a etapa de ensaios de descargas parciais em equipamentos, foi possível concluir que os equipamentos TECHIMP utilizados no projeto são muito eficazes para medições não-convencionais, possuindo alto grau de repetibilidade e confiabilidade, contudo, foram identificadas certas limitações em relação a sensibilidade dos equipamentos perante interferências externas. Tais considerações podem ser discutidas e julgadas procedentes ou não, dependendo de cada caso a ser trabalhado.

Por fim, após realizada a etapa de ensaios de capacitância e tangente de delta nos equipamentos propostos, foi possível adquirir mais experiência em relação ao funcionamento do transformador, às técnicas de medição e aos critérios de validação. Ter o conhecimento desses processos é fundamental, pois pode ser reproduzido em outros ativos de alta tensão. É importante ressaltar que a etapa de geração e validação das curvas de distribuição foi uma das etapas mais importantes do projeto e que necessitou maior atenção, visto que o resultado (ou produto) final poderá ser consultado posteriormente. Foi possível concluir que todas as curvas de distribuição de probabilidade apresentadas possuem ótimo nível de significância, isto é, são consideradas de fato, do ponto de vista analítico, distribuições de probabilidade.

Em resumo, contemplando a totalidade do projeto de iniciação científica, equiparando com os objetivos inicialmente apresentados, pode-se concluir que os participantes obtiveram êxito em suas atribuições, e assim, compartilhando todo o estudo prévio necessário e procedimentos das atividades executadas.

Finalmente, o projeto colabora com a comunidade acadêmica, disponibilizando ferramentas (gráficos de consulta) importantes que podem ser aplicáveis em futuros projetos do setor elétrico mundial.

## Agradecimentos

Registram-se aqui os mais sinceros agradecimentos aos docentes e profissionais do LAT-EFEI - Laboratório de Alta Tensão de Itajubá, Prof. Estácio Tavares Wanderley Neto, Prof. Credson de Salles, Cleython Silvestre Aguiar, Matheus Penha Pereira, Gabriel Henrique de Faria, Thiago Arantes Nogueira e Francine Sedy Pinto, os quais não mediram esforços para proporcionar novos conhecimentos e oportunidades ao orientado. Registram-se também, agradecimentos especiais a Prof. Gustavo Paiva Lopes e Jansen Paula Villibor. pela ajuda que foi dada ao orientado durante as atividades de pesquisa como também pela disposição e confiança em permitir ao orientado participar de novos projetos e atividades, as quais permitiu seu amadurecimento acadêmico e pessoal.

## Referências

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR IEC 60270 - Técnicas de Ensaios Elétricos de Alta-Tensão - Medição de Descargas Parciais**. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR5356-3: Transformadores de Potência - Parte 1: Generalidades**. 1. ed. São Paulo: ABNT, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR5440: Transformadores para redes aéreas de distribuição - Requisitos**. 3. ed. São Paulo: ABNT, 2014.

CAVALLINI, A. et al. A new methodology for the identification of PD in electrical apparatus: properties and applications. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, p. 203–215, 16 maio 2005.

CORSINI, I.; SALLES, S. **Plano do ONS estima mais de R\$ 23 bilhões para o setor elétrico até 2026**. Disponível em: <[www.cnnbrasil.com.br/business/plano-do-ons-estima-mais-de-r-23-bilhoes-para-o-setor-eletrico-ate-2026/](http://www.cnnbrasil.com.br/business/plano-do-ons-estima-mais-de-r-23-bilhoes-para-o-setor-eletrico-ate-2026/)>. Acesso em: 18 abr. 2022.

FARIA, G. et al. Evaluation of Capacitance and Dielectric Dissipation Factor of Distribution Transformers-Experimental Results. **2018 IEEE Electrical Insulation Conference, EIC 2018**, p. 336–339, 3 out. 2018.

HAUSCHILD, W.; LEMKE, E. **High Voltage Test and Measuring Techniques**. Berlin: Springer, 2014.