



Um Estudo Qualitativo das Técnicas Utilizadas para Medição e Localização de Descargas Parciais em Transformadores de Potência

A Qualitative Study of the Techniques Used to Measure and Locate Partial Discharge in Power Transformers

Jonatas Policarpo AMERICO [1](#); Sérgio Henrique Lopes CABRAL [2](#); Stéfano Frizzo STEFENON [3](#); Marcos Antônio SALVADOR [4](#); Carlos Roberto Pereira OLIBONI [5](#); Gabriel Granzotto MADRUGA [6](#)

Recibido: 16/02/2017 • Aprobado: 15/03/2017

Conteúdo

- [1. Introdução](#)
- [2. Métodos de medição de descargas parciais](#)
- [3. Conclusões](#)
- [Bibliografia](#)

RESUMO:

Este artigo tem como foco principal apresentar técnicas de medição e localização de Descargas Parciais, doravante DPs, em transformadores de potência. Este procedimento tem como objetivo detectar possíveis falhas no sistema de isolamento, tanto em equipamentos novos quanto em equipamento em operação. Atualmente a NBR 6940 regulamenta os procedimentos de ensaio e os níveis admissíveis de DPs. Vários métodos são utilizados para detecção, sendo o mais utilizado o método elétrico. No entanto, tal abordagem pode sofrer influência de interferência eletromagnética quando aplicado a equipamento em operação. Neste contexto, os métodos não elétricos são utilizados na tentativa de identificar e localizar tais distúrbios de modo minimizar a possibilidade de interrupções e prejuízos.
Palavras-chave: Descargas parciais. Transformador. Ensaio elétrico.

ABSTRACT:

This article has as main focus to present the techniques of measurement and location of Partial Discharges (DPs), in power transformers. This procedure aims to detect possible failures in the insulation system, both in new equipment and in equipment in operation. Currently the NBR 6940 regulates the test procedures and the permissible levels of DPs. Several methods are used for detection, the most used being the electrical method. However, such an approach suffers the influence of electromagnetic interference when applied to equipment in operation. In this context, non-electrical methods are used in an attempt to identify and locate such disturbances so as to minimize the possibility of breakdown and damage.
Key words: Partial discharges. Transformer. Electrical testing.

1. Introdução

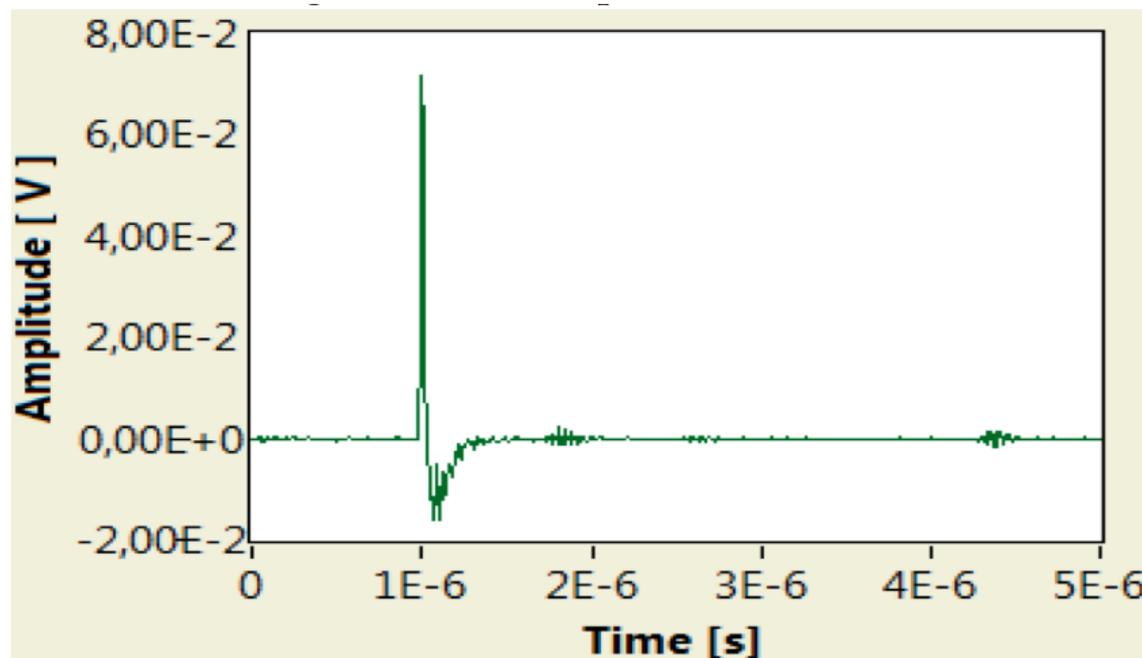
O transformador é um equipamento essencial nos sistemas de energia, sendo atribuído a ele, basicamente, a tarefa de conversão de energia com elevados níveis de eficiência. Nos transformadores de potência, assim como em outros equipamentos do sistema de energia, falhas inesperadas não são aceitáveis, uma vez que a interrupção do fornecimento de energia implica em severas punições pelo órgão regulamentador de energia. A ocorrência de deformidades no sistema isolante provenientes de bolhas ou fissuras, podem implicar na redução da distância efetiva de isolamento, causando o surgimento de descargas parciais e diminuindo a vida útil do equipamento (Americo, 2013).

Com a identificação do local de ocorrência de DPs na parte interna do transformador, obtêm-se uma valiosa informação indicando uma região de estresse no enrolamento, possibilitando ações corretivas no projeto, tal como alterações de geometria e/ou intensificação do isolamento, com intuito de reduzir a degradação do enrolamento e assim propiciando a elevação de sua vida útil bem como a do transformador (Schwab, 1972).

1.1. Descargas parciais

Segundo Huáman Cuenca (2005), tem-se a definição clássica de DPs como sendo sucessões de descargas elétricas incompletas, rápidas e intermitentes, que ocorrem em um meio gasoso em série com isolantes sólidos ou líquidos. Estes pulsos de descargas, ilustrado pela figura 1, podem ocorrer em cavidades gasosas, isolantes gasosos, líquidos e sólidos, ou ainda em superfícies e em pontas de materiais sólidos. Sua ocorrência tem sido analisada com atenção muito especial, principalmente como parâmetro para a avaliação da qualidade e do desempenho dos equipamentos elétricos de alta tensão.

Figura 1 - Pulso típico de uma DP



Fonte: Americo, 2013

A DP é elemento de grande relevância na investigação e avaliação relacionadas aos mecanismos físicos e químicos de materiais isolantes (Bartnikas, 2002). Sua ocorrência está associada com efeitos elétricos e físicos, que possibilitam a sua detecção e medição. Dentre os efeitos, destacam-se os pulsos de corrente, luminescências, ondas eletromagnéticas, ondas acústicas, consumo de energia, variações térmicas, variações químicas e vibrações mecânicas (Huáman Cuenca, 2005).

1.2. Descargas parciais em transformadores

O sistema de isolamento de um transformador imerso em óleo consiste essencialmente do próprio óleo e de algum meio de isolamento sólida, em sua maioria basicamente composta por celulose (papel e madeira). A isolamento de transformadores, principalmente quando estes estão em operação, fica submetida a esforços, que provocam a sua degradação. Durante o seu ciclo de vida, o sistema de isolamento de transformadores composto por materiais orgânicos é submetido a um processo de degradação, que é causado pela temperatura, umidade, oxigênio, esforços elétricos e eletrodinâmicos.

O papel pode se deteriorar mais rápido que os outros componentes isolantes caso seja submetido a sobrecargas térmicas, sobretudo se estas ocorrerem em equipamentos com a presença de oxigênio em seu interior (Kbawaja, Ariastina & Blackburn, 2003). Esse processo de degradação da isolamento, quando aliado à circulação do óleo junto ao aumento de temperatura dos enrolamentos e à diferença de condutividade elétrica entre isolantes líquido e sólido, provoca o fenômeno de movimentação de cargas espaciais (elétrons livres), em volta das bolhas que estejam dissolvidas no óleo isolante (Lundgaard et. al., 2000). Esse fenômeno, diante do *stress* causado pelos campos elétricos existentes no interior dos transformadores, é decisivo no processo de formação de DPs, sendo este, um dos principais fatores que podem levar um equipamento a sofrer uma falha elétrica.

Portanto, transformadores são suscetíveis a ocorrência de DPs, mesmo aqueles projetados e fabricados dentro de padrões de alta qualidade, dada a impossibilidade de fabricá-los sem imperfeições, mesmo que pequenas no sistema isolante. De modo a diminuir a ocorrência de DPs em transformadores de potência, são necessários cuidados especiais com extremidades metálicas, concentradoras de linhas de campo elétrico, e um bom projeto para o sistema isolante. Além disso, atenção especial deve ser dada ao processo de secagem e de impregnação da parte ativa, porque, no processo de fabricação de transformadores, imperfeições nos sistemas isolantes acontecem, causando assim o surgimento de DPs, normalmente detectáveis durante os ensaios de comissionamento realizados no laboratório fabril.

Nos transformadores em campo, o aumento significativo do nível de DPs fornece indicativos antecipados de que algo está acontecendo no interior do transformador, e por isso deve ser analisado.

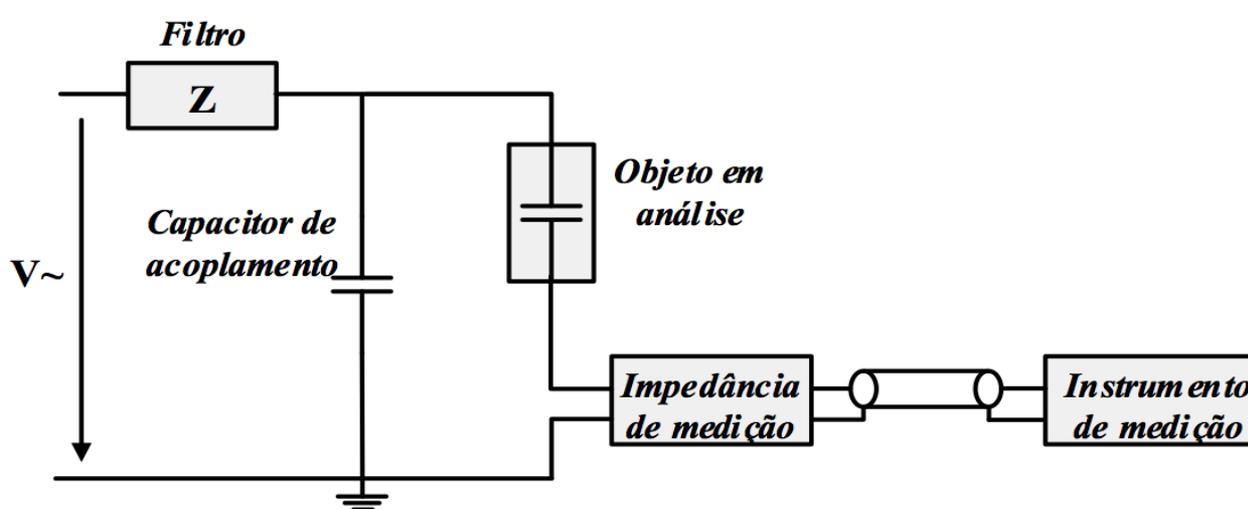
2. Métodos de medição de descargas parciais

As técnicas de medição e detecção podem ser divididas em dois grupos: elétricos e não elétricos. O método elétrico insere o circuito de medição no circuito onde as descargas estão ocorrendo. Já os métodos não elétricos, geralmente, servem apenas de suporte aos métodos elétricos. Todos os métodos utilizados partem do mesmo objetivo, identificação dos efeitos causados pelas DPs.

2.1. Método elétrico

A norma IEC 60270 (2001) estabelece diferentes configurações que possibilitam a medição de DPs. Os circuitos são compostos por basicamente uma fonte de alta tensão livre de DPs, um capacitor de acoplamento em paralelo com o equipamento em teste, tendo este a finalidade de indicar a real magnitude da DP, uma impedância de medição sendo este o local onde o instrumento é conectado, e ainda um filtro em série com a fonte de alta tensão com a finalidade de dissipar as correntes na frequência da rede.

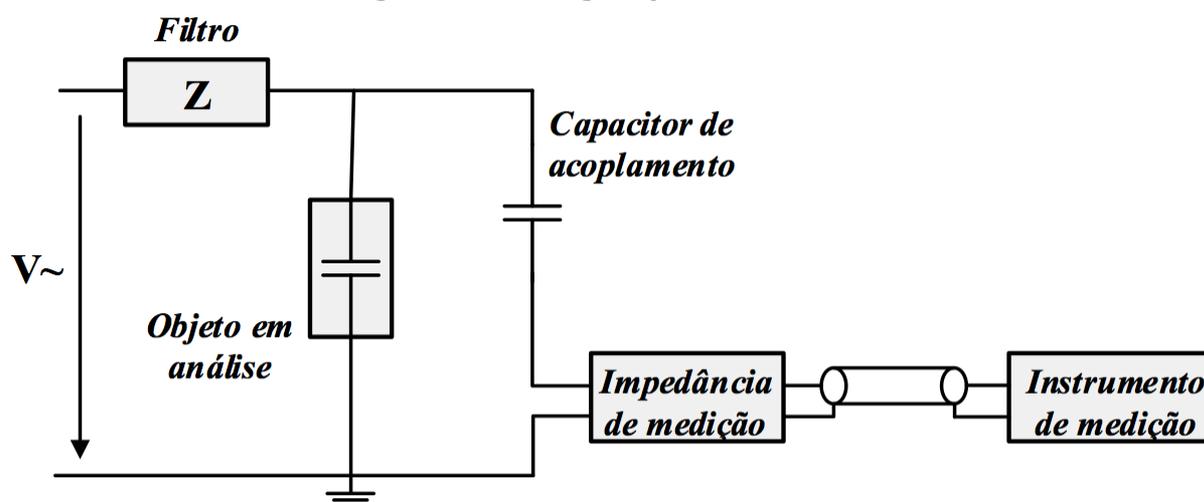
A IEC 60270 estabelece três configurações de ensaio, sendo que estas variações consistem na detecção da queda de tensão sobre a impedância de medição. A primeira configuração, apresentada na figura 2, baseia-se na impedância de medição em série com o objeto em análise. Esta configuração possui uma maior sensibilidade na medição, sendo adequada para casos em que a baixa tensão do objeto sobre ensaio fica isolado do referencial de terra.



Fonte: Editado de IEC 60270

A segunda configuração, ilustrada pela figura 3 utiliza a impedância de medição em série com o capacitor de acoplamento, indicando para os casos em que o objeto de ensaio possua uma extremidade aterrada. Esta configuração protege o equipamento de medição de eventuais falhas em teste.

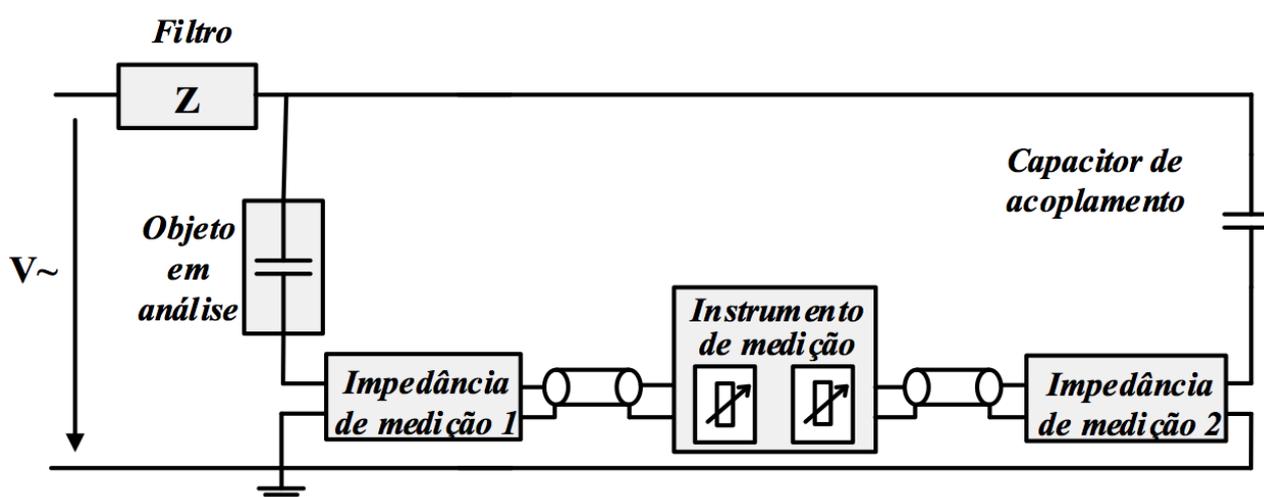
Figura 3 - Configurações de ensaio 2



Fonte: Editado de IEC 60270

Por fim, a terceira configuração demonstrada pela figura 4, tem o lado de baixa tensão do objeto sob ensaio e do capacitor de acoplamento isolado do referencial terra através das impedâncias de medição 1 e 2. Este circuito apresenta vantagens no que se refere aos problemas de interferências externas.

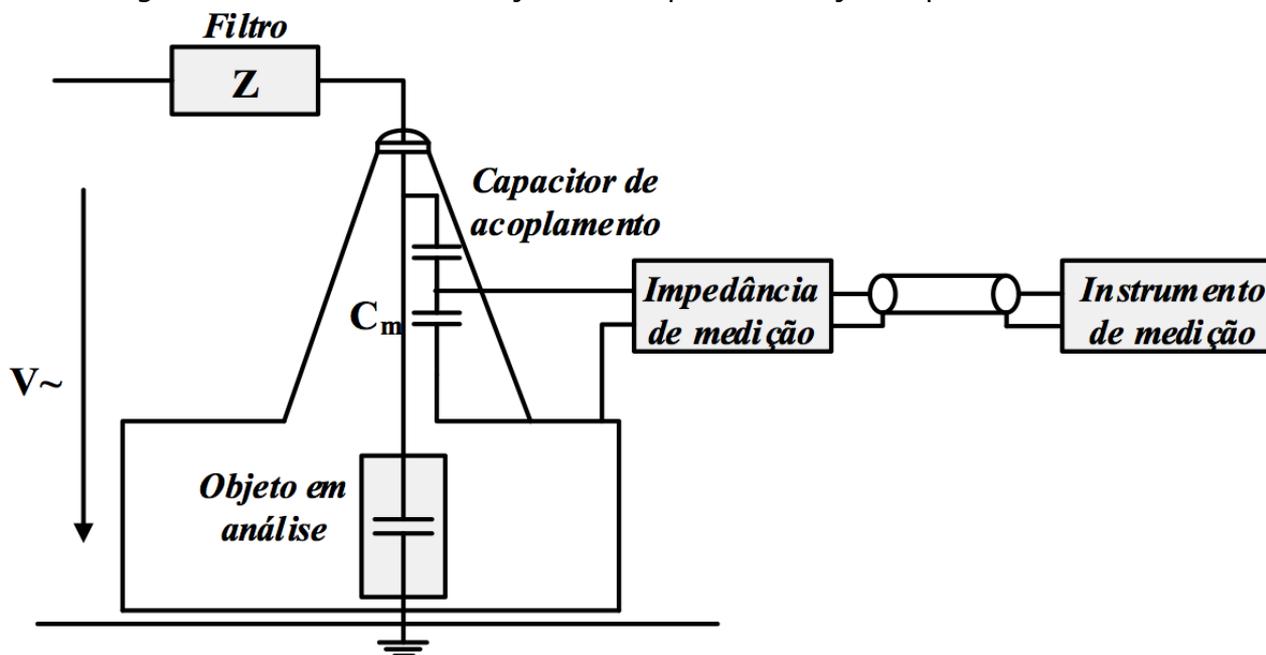
Figura 4 - Configurações de ensaio 3



Fonte: Editado de IEC 60270

Quando o equipamento em análise é um transformador, a medição de DPs é dificultada devido a complexidade e inacessibilidade aos circuitos internos altamente indutivos (Huáman Cuenca, 2005). A fim de solucionar este problema, a conexão do transformador ao sistema de medição é feita por meio da derivação capacitiva de suas buchas, conforme ilustrado pela figura 5. Contudo, essa conexão só pode ser efetuada com o desligamento do equipamento, o que gera empecilhos quanto à utilização desse método em transformadores que estão em operação. Sendo assim, esse método é mais utilizado no recebimento de transformadores de fábrica, não sendo apropriado para uso em campo.

Figura 5 - Circuito de medição de DP pela derivação capacitiva da bucha



Fonte: Editado de IEC 60270

O monitoramento *online* de DPs em transformadores é dificultado pelos ruídos intensos quando o equipamento está carregado, podendo ainda existir interferências de outros equipamentos próximos. Para contornar estes inconvenientes, tem sido desenvolvido, cada vez mais, estudos a respeito de filtros, com tecnologias recentes e técnicas mais avançadas no processamento de sinais, tanto em *hardware* como em *software* (Huáman Cuenca, 2005).

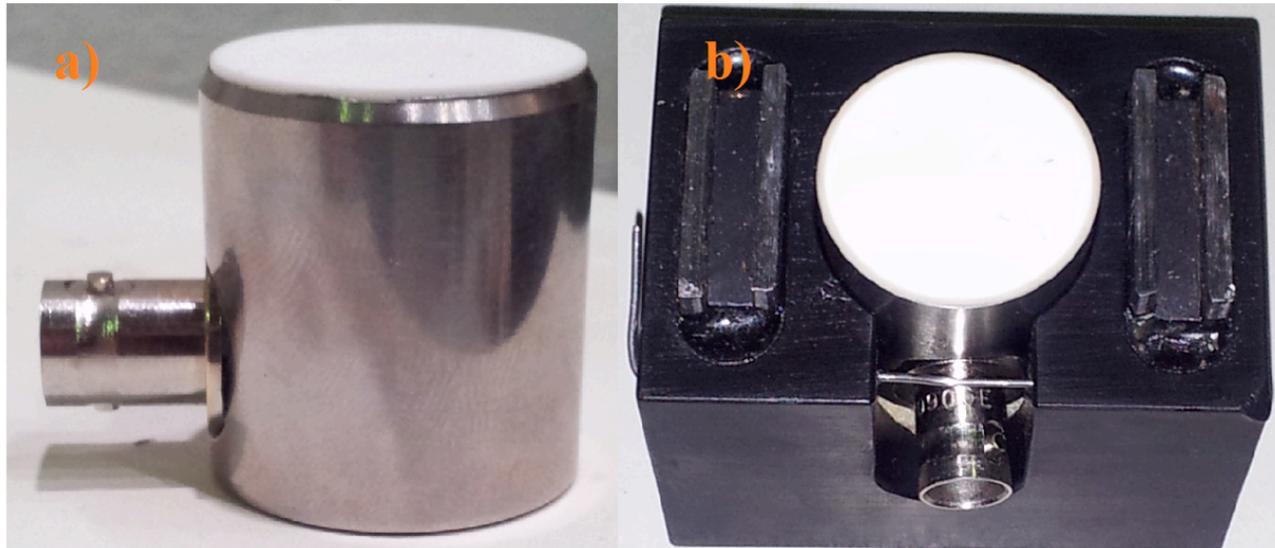
A NBR 5356-3 (2007) impõe o limite de 300 pC para a formação de DPs em transformadores de potência quando energizado a uma tensão $U_2 = 1,5 U_m / \sqrt{3}$, sendo U_m a tensão máxima de operação do equipamento e U_2 a tensão de ensaio. O transformador é considerado aprovado no ensaio se não ocorrerem descargas cujas intensidades medidas não ultrapassem o limite de 300 pC e ainda se, durante o ensaio, não for constatado o crescimento acentuado das DPs.

Sendo assim, a detecção e a medição de DPs pelo método elétrico têm a vantagem de quantificar a intensidade das descargas detectadas. Porém, possui a desvantagem de não permitir a localização da ocorrência. Além do mais, devido a sua grande susceptibilidade a ruídos externos, torna-se um método ideal para instalações onde os ruídos de seu entorno são controlados, como, por exemplo, em laboratórios. Não sendo, portanto conveniente para a aplicação em transformadores em operação no campo (Std C57.127, 2007).

2.2. Método acústico

A detecção de DPs pelo método acústico baseia-se no ruído audível ou ultrassônico gerado pelas DPs, isto é, o ruído que se propaga no ar ou através de vibrações em materiais adjacentes à fonte de descarga. Esta técnica consiste na utilização de sensores piezelétricos ou transdutores, ilustrados pela figura 6, que podem ser dispostos dentro ou fora do equipamento, tendo como finalidade a detecção destas propagações acústicas (Harrold, 1986).

Figura 6 - a) Sensor acústico. b) Base de fixação

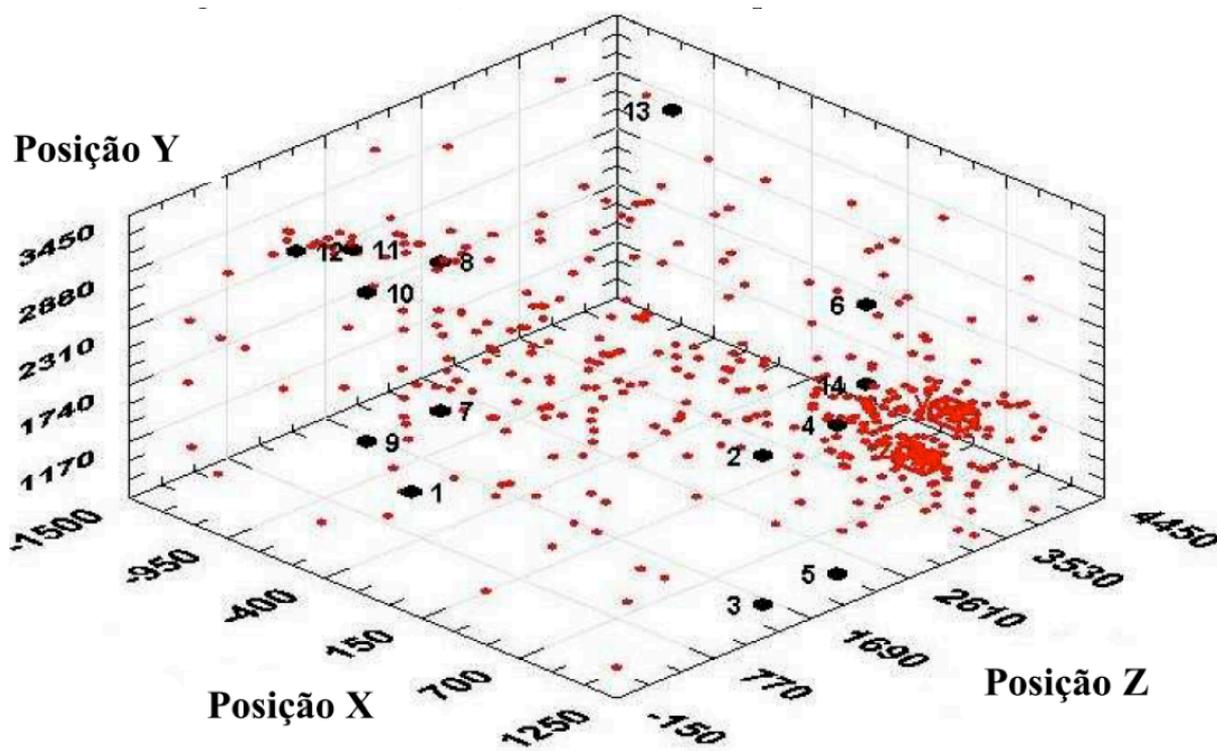


Fonte: Autoria própria

O método acústico fornece uma forma não destrutiva de observar as propriedades isolantes dos materiais, podendo-se identificar pequenas falhas em meios isolantes através dos ruídos decorrentes da formação de DPs. No entanto, a propagação destes sinais acústicos gerados dentro do transformador sofrem reflexões e refrações devido aos diferentes tipos de materiais que estão presentes no interior do equipamento em análise, podendo assim, distorcer o tempo de propagação da onda ser equivocado. Em face deste problema, utiliza-se vários sensores dispostos no transformador, podendo então, através da leitura de vários sensores, determinar o ponto de origem da DP (Std C57.127, 2007).

Este método tem como objetivo localizar, em três dimensões, as atividades de DPs por meio da medição dos sinais acústicos. A figura 7 ilustra a localização de uma DP pelo método acústico, na qual as posições de XYZ são as dimensões do transformador e os pontos de 1 a 14 representam as posições dos sensores (Azevedo, 2009).

Figura 7 - Localização da fonte de DP pelo método acústico



Fonte: Azevedo, 2009

2.3. Método químico

Este método baseia-se na Análise de Gases Dissolvidos (AGD) em óleo isolante, através de cromatografia. A degradação da isolação de transformadores imersos em óleo isolante pode resultar em arcos elétricos ou DPs, que geram gases devido a decomposição da isolação.

Os gases formados pela decomposição da isolação de um transformador são dissolvidos total ou parcialmente no óleo e após um período de homogeneização, estarão presentes em todo os locais onde há existência deste isolante (Myers, Kelly & Perrish, 1981).

Os gases mais significativos resultantes de arcos elétricos, DP ou aquecimento são o hidrogênio (H₂), o metano (CH₄), o etano (C₂H₆), o etileno (C₂H₄) e o acetileno (C₂H₂). Quando há degradação de materiais celulósicos, outros gases, principalmente, o monóxido de carbono (CO) e o dióxido de carbono (CO₂), também podem ser produzidos (NBR-7274, 2012).

No entanto, o método de AGD em óleo isolante é de baixa sensibilidade para detecção de DPs, já que este método necessita de concentração de gases suficientes para permitir sua correta identificação, o que pode não ser uma ferramenta viável para o caso de fontes iniciais de DPs (Cavallini, Montanari & Ciani, 2008).

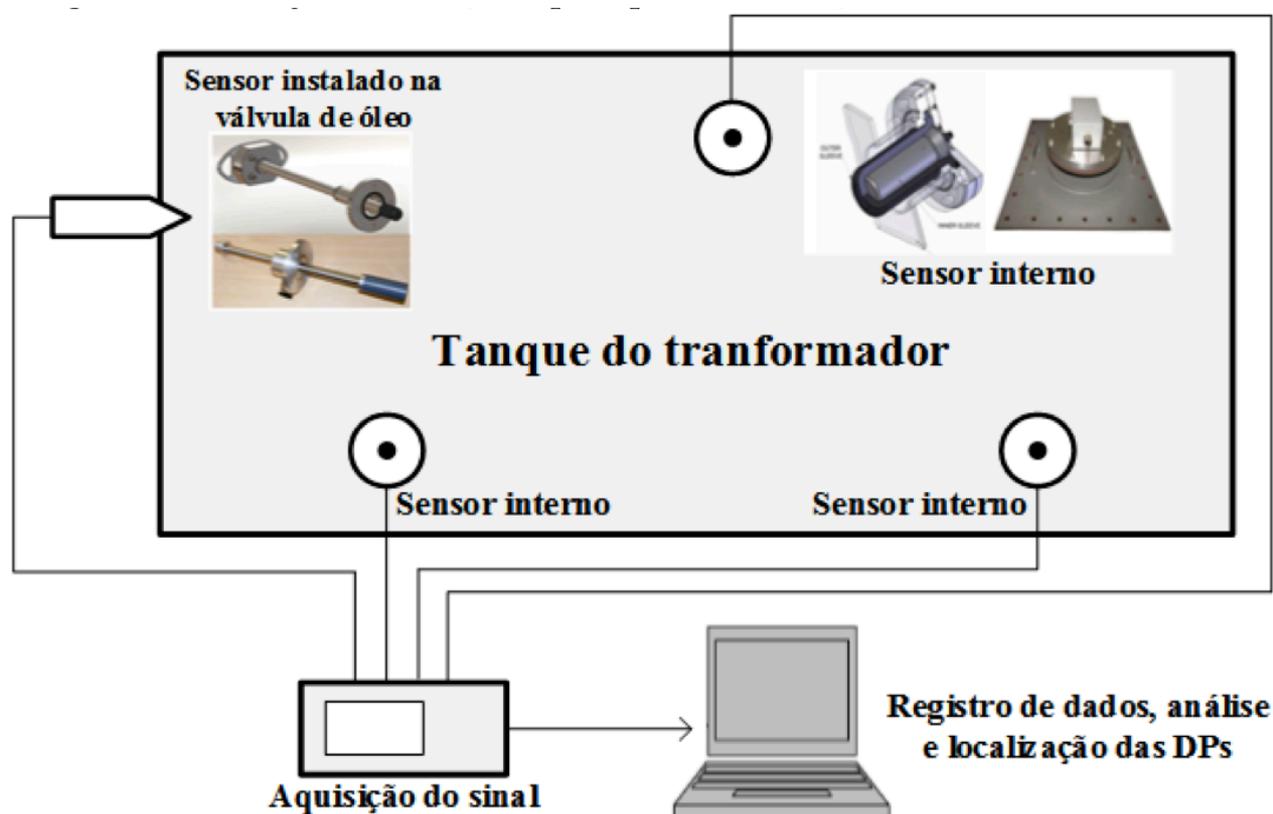
2.4. Método UHF

O método UHF (*Ultra High Frequency*) é usado para detectar ondas eletromagnéticas que são emitidas pelas DPs. Para a utilização deste método em transformadores, é necessário determinar três coordenadas espaciais desconhecidas. Deste modo, geralmente quatro sensores são necessários, sendo estes instalados em torno do tanque. Um sensor fornece uma referência de tempo e os demais fornecem variáveis independentes para o algoritmo de localização de DP através da diferença de tempo das ondas eletromagnéticas (Judd, 2011).

A triangulação convencional não é apropriada quando o equipamento em análise contém uma grande quantidade de metais internos, tal como o transformador, através do qual as ondas eletromagnéticas não podem passar. Com isso, uma abordagem alternativa tem sido adotada, na qual a estrutura básica do transformador (núcleo e os enrolamentos) é pré-processada, levando em conta os efeitos de propagação e as variações de velocidade do sinal. Através desta análise, o conjunto de diferenças de tempo obtido pode ser associado com o conjunto de pontos (localização dos sensores) no tanque do transformador (Coenen & Tenbohlen, 2012).

A figura 8 ilustra um arranjo típico para localização de DPs através de UHF. Os sensores são ligados por meio de um pré-amplificador e um multiplexador a um analisador de espectro e um osciloscópio.

Figura 8 - Arranjo de medição típico para localização de DPs através de UHF



3. Conclusões

O diagnóstico dos equipamentos do sistema de alta tensão, principalmente o transformador de potência vem crescendo ao decorrer dos anos. Neste artigo foram citados vários métodos de diagnóstico de DPs, tendo como objetivo o transformador de potência imerso em óleo isolante. Alguns métodos se destacam, sendo eles o método elétrico, a análise de gases dissolvidos no óleo isolante (AGD) por cromatografia e o método acústico (EA).

A detecção pelo método elétrico é a mais utilizada, possuindo uma ampla aplicação em transformadores. Porém, este método possui algumas desvantagens como, por exemplo, não possibilitar a localização exata da fonte de DPs e também necessitar o desligamento do equipamento para realizar as medições. Contudo, para fabricantes de transformadores, este método é ideal, visto que fornece as magnitudes das DPs e com isso possibilita identificar possíveis falhas no processo fabril.

Por sua vez, a AGD tal como o método elétrico, não proporciona a localização da fonte da DP. A AGD é de baixa sensibilidade para detecção de DPs e necessita uma concentração de gases suficientes para permitir sua correta identificação, podendo não ser um método viável para o caso de fontes iniciais de DPs. Portanto, a AGD apesar de ser um método amplamente utilizado pelas empresas do setor elétrico brasileiro, não permite tomar uma decisão segura quanto ao momento de se realizar uma manutenção em um transformador.

Finalmente, a EA é o método que possibilita a localização da fonte da DP. Este método possui a vantagem de ser imune às interferências eletromagnéticas, permitindo assim o monitoramento em tempo real. Contudo, a imunidade a interferências eletromagnéticas não significa imunidade a ruídos mecânicos, uma vez que as vibrações mecânicas no núcleo de transformadores são as principais fontes de ruídos acústicos. Porém, atualmente já se conhece bem os padrões acústicos gerados pelos componentes do transformador como, por exemplo, bomba de óleo e ventilação, sendo estes prontamente identificados e separados na realização da medição acústica. Sendo assim, a EA se mostra mais adequada para ensaios realizados em campo, com transformadores em serviço. Principalmente, pelo fato de não requerer quaisquer registros de corrente ou tensão, nem o desligamento do equipamento a ser investigado.

Diante das vantagens e desvantagens de cada método, sua utilização em conjunto, poderia ser abordada no intuito de realizar um diagnóstico mais preciso do real nível de degradação de um sistema de isolamento, podendo assim, fundamentar a tomada de decisão sobre uma eventual retirada de operação ou não do equipamento.

Bibliografia

Americo, J. P. (2013). *Estudo de técnicas de medição de descargas parciais em transformadores de potência* (Dissertação de Mestrado). Universidade Regional de Blumenau.

Azevedo, C. H. B. (2009). *Metodologia para a eficácia da detecção de descargas parciais por emissão acústica como técnica preditiva de manutenção em transformadores de potência imersos em óleo isolante* (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal de Goiás.

Bartnikas, R. (2002, Outubro). Partial discharges their mechanism, detection and measurement. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 9(5), 763-808.

Cavallini, A., Montanari, G. C. & Ciani, F. (2008). Diagnosis of EHV and HV transformers through an innovative technique: perspectives for asset management. *IEEE-International Symposium*, 287-290.

Coenen, S. & Tenbohlen, S. (2012). Location of PD Sources in Power Transformers by UHF and Acoustic. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 19(6).

Harrold, R. T. (1986, Outubro). Acoustic theory applied to the physics of electrical breakdown in dielectrics. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, 21(5).

- Huáman Cuenca, W. (2005). *Caracterização dos Sinais de Descargas Parciais em Equipamentos de Alta Tensão a Partir dos Modelos Experimentais* (Tese de Doutorado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- IEC 60270. (2001). *High voltage test techniques: partial discharge measurements*. International Electrotechnical Commission, (3).
- Judd, M. D. (2011). Experience with UHF partial discharge detection and location in power transformers. *IEEE Electrical Insulation Conference*.
- Kbawaja, R. H., Ariastina, W.G. & Blackburn, T. R (2003). Partial discharge behaviour in oil-impregnated insulation. *International Conference On Properties And Applications Of Dielectric Materials*, (3), 1166-1169.
- Lundgaard, L. E., Poittevin, J., Schmidt, J., Allen, D., Blackburn, T. R., Borsi, H., Foulon, N., Fuhr, J., Hosokawa, N., James, R.E., Kemp, I.J., Lesaint, O. & Phung, B.T. (2000). Partial discharges in transformer insulation. *International Conference on Large High-Voltage Electric Systems*.
- Myers, S. D., Kelly, J. J. & Perrish, R. H. (1981). *A guide to transformer maintenance*. Akron: S. D. 1st ed.
- NBR 5356-3. (2007). *Transformadores de potência. Parte 3: Níveis de isolamento, ensaios dielétricos e espaçamentos externos em ar*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- NBR-7274 (2012). *Interpretação da análise dos gases de transformadores em serviço*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- Schwab, A. J. (1972). *High-voltage measurement techniques*. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology.
- Std C57.127. (2007). *Guide for the detection and location of acoustic emissions from partial discharges in oil-immersed power transformers and reactor*. Institute of Electrical and Electronics Engineers.

-
1. Mestre em Engenharia Elétrica (FURB), professor do curso de Engenharia Elétrica da UTFPR. jonatasamerico@utfpr.edu.br
 2. Sérgio Henrique Lopes CABRAL. Doutor em Engenharia Elétrica (UFSC), professor e pesquisador em tempo integral da FURB.
 3. Stéfano Frizzo STEFENON. Mestre em Engenharia Elétrica (FURB), professor e coordenador do curso de Engenharia Elétrica da UNIPLAC
 4. Doutorando em Engenharia Elétrica (UFSC), bolsista do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).
 5. Mestre em Engenharia Elétrica (FURB), professor do Instituto Federal Catarinense (IFC).
 6. Mestre em Engenharia Elétrica (FURB), professor do Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC).

Revista ESPACIOS. ISSN 0798 1015
Vol. 38 (Nº 34) Año 2017

[Índice]

[En caso de encontrar algún error en este website favor enviar email a [webmaster](#)]