

Diagnóstico e Monitoramento de Cabos Isolados através da Análise de Descargas Parciais: O Estado da Arte

Guilherme Fernandes Ribeiro*
Hélder de Paula**

*Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

**Faculdade de Engenharia Elétrica

Universidade Federal de Uberlândia

*guilhermeribeiro97@hotmail.com; **drhelderdepaula@gmail.com

Abstract: This paper presents a broad and detailed literature review on the use of partial discharges measurement and analysis for the diagnosis and condition monitoring of medium and high voltage cable insulation. All the methods for detection of partial discharges activity have been discussed, along with the appropriate sensors to be employed in every one of them, highlighting the advantages, limitations and applications. It is also presented a discussion on the methods and parameters for the measured data processing and how they influence the distinction among signals actually related to partial discharges and external noises. Finally, in order to illustrate the use of such techniques, case studies reported in the literature have been selected, where monitoring methodologies based on the partial discharges level control have been adopted to derive maintenance strategies for the company.

Resumo: Este trabalho apresenta uma ampla e minuciosa revisão bibliográfica sobre a avaliação de descargas parciais para o diagnóstico e monitoramento do estado da isolação de cabos de média e alta tensão. Todos os possíveis métodos de detecção da atividade de descargas parciais, com os respectivos sensores adequados para cada situação, são discutidos de forma a explicitar suas vantagens, limitações e aplicações. É apresentada também uma avaliação dos métodos e parâmetros utilizados no tratamento dos dados de medição e discutido como os mesmos influenciam na distinção entre os sinais associados a descargas parciais e ruídos externos do sistema. Por fim, de forma ilustrar a aplicação das técnicas discutidas, são apresentados relatos de casos encontrados na literatura nos quais foram empregadas metodologias de monitoramento baseadas no controle dos níveis de descargas parciais em cabos isolados e adotadas estratégias de manutenção baseadas nesse princípio.

Keywords: Partial discharges; Insulated cables; Condition monitoring; Reliability; Maintenance.

Palavras-chaves: Descargas Parciais; Cabos Isolados; Monitoramento de condição; Confiabilidade; Manutenção.

1. INTRODUÇÃO

O aumento da concentração de unidades comerciais e industriais em áreas urbanas, juntamente ao aumento da densidade populacional, acarretou na elevação do consumo de energia elétrica. Com isso, além da necessidade de investimentos na expansão dos sistemas elétricos, mostra-se necessário, também, um maior acompanhamento da condição dos equipamentos que o compõem, de forma a incrementar a sua confiabilidade. Embora as linhas aéreas ainda sejam as mais comuns, em situações de áreas com espaço restrito, as linhas compostas por cabos subterrâneos representam a melhor alternativa para a rede de distribuição, além de apresentarem outras vantagens (Lanz et al 2016).

No que diz respeito a falhas, tem-se que a quebra de isolamento dos cabos de média tensão é a causa da maioria das interrupções em sistemas de distribuição subterrânea (Wester. 2004). Cerca de 60% destas falhas ocorrem devido a defeitos internos do isolamento dos cabos, sendo que o

restante está relacionado a influencias externas, como por exemplo, atividades de escavação em regiões próximas as instalações dos cabos (Batalović et al. 2019).

No que tange seus aspectos construtivos, os cabos de média tensão fabricados atualmente possuem isolações sólidas fabricadas a partir de materiais termofixos, como o polietileno reticulado (XLPE), o qual é bastante sensível ao fenômeno de descargas parciais (DP), sendo as conexões dos cabos a parte mais vulnerável e suscetível a falhas, seja devido a defeitos de fabricação, mau manuseio durante o processo de instalação (capa de contaminar ou danificar o isolamento), e o próprio envelhecimento da isolação devido a estresse elétrico e térmico (Batalović et al. 2019).

Por tais motivos, e também devido aos elevados custos associados à renovação de cabos em redes subterrâneas, é necessário monitorar e diagnosticar as condições da isolação de cabos elétricos, com objetivo de prever e prevenir falhas intempestivas, além de interrupções dispendiosas no sistema.

Tendo em vista que a maioria das falhas e interrupções de redes de distribuição subterrâneas ocorrem devido a defeitos na isolação dos cabos, e sendo a presença de descargas parciais o maior indicador de defeitos na isolação, o monitoramento e a detecção deste efeito é o foco de diagnósticos de cabos elétricos e outros equipamentos de média e alta tensão, como transformadores e geradores (Fuhr and Aschwanden. 2017).

Descargas parciais são descargas que ocorrem localmente numa porção da isolação entre dois condutores, sem completamente rompe-la, causando sua progressiva e cumulativa deterioração e que, em algum momento, pode resultar em sua falha completa. Devido às particularidades e variedade de tipos de sistemas isolantes, existem diferentes tipos de DPs e, portanto, diversos métodos de medição e detecção aplicáveis; porém, o foco do presente trabalho concentra-se em métodos e equipamentos relacionados à medição de DPs em cabos elétricos. A devida medição e análise de tais sinais possibilita gerar diagnósticos e programar ações de manutenção de forma controlada, aumentando a disponibilidade do sistema e reduzindo o tempo e o custo das intervenções.

Neste contexto, como resultado de uma ampla e criteriosa revisão bibliográfica, este trabalho apresenta uma grande compilação dos tópicos mais relevantes no que tange as descargas parciais como instrumento de avaliação do estado da isolação de cabos elétricos. Primeiramente, disserta-se sobre o fenômeno propriamente dito das descargas parciais, discutindo os mecanismos envolvidos, fatores que influenciam e a sua classificação. Posteriormente, são analisados os métodos aplicáveis para a detecção dos sinais associados às DPs e para o processamento e avaliação dos dados correspondentes. Por fim, com o intuito de ilustrar a aplicação da técnica como uma ferramenta de análise e diagnóstico de eventuais falhas em cabos, empregando-a como um elemento útil para incrementar a confiabilidade do sistema e orientar os planos de manutenção da empresa, são apresentados relatos de caso obtidos na literatura, provenientes tanto de consumidores industriais quanto de concessionárias de energia. Dessa forma, o trabalho exposto, agrega valor ao tema em questão por reunir, apresentar e discutir uma grande gama de informações relevantes sobre este importante tópico, facilitando o trabalho do engenheiro/pesquisador que busca por informações detalhadas sobre o mesmo, apresentadas através de uma abordagem bastante completa, mas simples e didática.

2. O FENÔMENO DAS DESCARGAS PARCIAS

Descargas parciais podem ser definidas como sendo sinais elétricos pulsantes incompletos, intermitentes e rápidos, da ordem de nano segundos, que ocorrem pela proximidade entre duas partes condutoras de eletricidade e o meio isolante, através do efeito de ionização em cavidades gasosas, no interior dos materiais isolantes e nas interfaces condutor-isolante ou isolante-isolante (Bartnikas. 2002).

Uma outra maneira de se caracterizar uma descarga parcial é como uma descarga elétrica que ocorre numa região sujeita a um campo elétrico, o qual influencia diretamente na ionização do material dielétrico, podendo dar origem a DPs nos pontos de maior intensidade de campo elétrico. A relação entre a intensidade do campo elétrico, o valor de tensão e o meio onde se encontra gera o conceito de gradiente de tensão (Cuenca. 2005).

Conforme já mencionado, a ocorrência de DPs é favorecida em cavidades gasosas no interior de materiais isolantes. Essas cavidades são as responsáveis pelas falhas mais comuns no material dielétrico, sendo geralmente introduzidas durante as várias etapas de fabricação dos materiais isolantes e outras solicitações durante a sua operação e envelhecimento. Para cabos de média e alta tensão, DPs ocorrem devido à falta de homogeneidade da distribuição do campo elétrico como resultado da presença do defeitos no isolamento (Setyawan. 2009).

De forma geral, as DPs podem ser classificadas de acordo com a sua origem, podendo ser do tipo interna, superficial ou externa. As descargas internas ocorrem devido a imperfeições do material dielétrico, o qual pode ser líquido, sólido ou gás enclausurado. As descargas superficiais ocorrem em gases, líquidos ou na superfície de um material dielétrico e são comuns em cabos protegidos, terminações de cabos isolados e saias de isoladores. Já as descargas externas ocorrem em ar ambiente e são geralmente referidas como descarga “corona”.

No caso das descargas superficiais, tem-se que estas partem do eletrodo em direção à superfície do material dielétrico. Este tipo de DP pode causar alterações na superfície do dielétrico, fenômeno conhecido como trilhamento (Mason. 1995), podendo causar a ruptura completa do material dielétrico. Este fenômeno é comum em cabos protegidos, terminações de cabos isolados e saias de isoladores.

Já as descargas externas são comuns em eletrodos do tipo ponto ou que possuam raio de curvaturas pequenos na extremidade. As descargas corona desencadeiam processos químicos que podem gerar subprodutos prejudiciais ao material isolante dependendo da forma que o mesmo reage com o dielétrico, como, por exemplo, a produção de ozônio, a qual pode causar fissuras nas isolações poliméricas.

Dentre os diversos motivos causadores de DPs em isolantes estão o dimensionamento inadequado da isolação e blindagens, a inclusão de bolhas de ar em materiais sólidos e a má instalação de condutores – a qual levou a ser obrigatório o teste de pós-instalação de cabos subterrâneos em alguns países – (Koltunowicz et al. 2016), além da deterioração natural do material dielétrico ao longo da sua vida útil.

Por fim, vale ressaltar alguns outros efeitos decorrentes da presença das DPs, como a elevação de temperatura do material dielétrico, perdas nas cavidades do material isolante e interferência em comunicações de rádio e TV, dentre outros.

3. MÉTODOS DE DETECÇÃO E MEDIÇÃO

Diagnosticar a presença de descargas parciais em um equipamento é uma forma de verificar a condição de seu isolamento, visto que as mesmas são causadas por imperfeições no dielétrico e intensificam-se à medida que o mesmo se degrada, progressivamente.

Tipicamente, um sistema de monitoramento de DPs é dividido em dois componentes: um módulo que coleta o sinal associado à ocorrência da DP e outro módulo para a análise dos dados coletados. Os sinais provenientes da atividade de descargas parciais podem ser medidos de diferentes formas, como, por exemplo, através da corrente elétrica, radiação eletromagnética, luz, calor e ondas acústicas, dentre outros. O módulo responsável pela captura do sinal é composto por sensores, ao passo que o módulo de análise de dados é comumente equipado com técnicas avançadas de reconhecimento de padrões que ajudam a diferenciar o sinal advindo das DPs de ruídos externos, além de especificar a possível fonte destes sinais (Wu et al. 2015).

Dentre os métodos de detecção das DPs, o mais comum é o elétrico, sendo os outros métodos (acústico, óptico e químico), utilizados como complemento da detecção elétrica.

O método elétrico baseia-se em utilizar um instrumento de detecção no circuito elétrico, por meio de uma impedância de acoplamento RLC ou RC, dependendo da frequência de detecção. Normalmente medindo as descargas em pico ou nano Coulombs, este é a técnica mais utilizada em cabos de alta tensão, geradores, transformadores, capacitores e outros.

Por outro lado, sensores acústicos são comumente utilizados para localizar as fontes das DPs por meio da detecção das ondas de som geradas pelas mesmas (Koltunowicz et al. 2016). Este método apresenta duas grandes vantagens, que são a sua fácil instalação e imunidade a interferência eletromagnética; no entanto, são menos sensíveis, pois são mais susceptíveis a uma possível interferência de ruídos acústicos externos.

O método químico de detecção de DP é comumente utilizado para equipamentos com isolamento a óleo, visto que a presença de DPs pode gerar novos componentes químicos por meio de reações. Este método é baseado na análise dos gases dissolvidos no óleo isolante, sendo, portanto, limitado a equipamentos que empregam este tipo de material isolante.

As formas de medição de DPs podem ser da forma *on-line*, com sistema energizado, ou de maneira *offline*, com o sistema desligado. As técnicas *on-line* apresentam a vantagem de não requererem a interrupção da operação do sistema e de poderem monitorá-lo constantemente. Porém, as técnicas *on-line* são mais susceptíveis a ruídos externos, necessitando, desta forma, de uma filtragem de sinal mais avançada.

A medição contínua *on-line* permite uma segurança mais direta nas instalações, por proporcionar o constante controle dos níveis de DP, minimizando desta forma, possíveis interrupções não planejadas. Dentre os sensores mais comuns para este tipo de medição, aplicados em instalações de cabos

de média e alta tensão, pode-se citar os Transformadores de Corrente de Alta Frequência (HFCT) (Gillie et al 2014).

Os HFCTs são sensores indutivos que envolvem um condutor, e, quando ocorre um pulso de corrente elétrica, este induz uma tensão no sensor proporcional à variação da corrente. Existem no mercado sensores HFCT com núcleos separados, permitindo assim a sua instalação sem a interrupção do sistema. No que diz respeito à sua faixa de frequências de medição, existem aqueles classificados como de alta frequência (HF), operando de 0,3 a 30 MHz, e os de extra alta frequência (VHF), com banda de medição entre 30 a 300 MHz.

4. LOCALIZAÇÃO DAS DESCARGAS PARCIAIS

A possibilidade de localizar a origem de DPs é de grande importância para o planejamento e execução das intervenções de manutenção. Dentre os métodos de detecção já apresentados, o método acústico é conhecido por localizar a origem de DPs de forma precisa em cabos isolados a gás Hexafluoreto de enxofre (SF₆) (Bartnikas. 2002) e transformadores (Fuhr and Aschwanden. 2017). Vale ressaltar que a evolução dos sensores acústicos por meio de fibra óptica possibilitam uma detecção de sinal ainda mais sensível (Wu et al. 2015).

Sensores de ultra alta frequência (UHF) também podem ser utilizados para a localização de DPs, mas apresentam desempenho inferior aos sensores acústicos. Para o caso de cabos de alta tensão, os sensores HFCT podem ser utilizados para localizar a fonte de origem de DPs quando utilizado o método da reflectometria no domínio do tempo (TDR) (Keränen et al. 2019), a qual necessita de sensores instalados em ambas pontas do cabo.

Para a localização de DPs nas pontas de cabos é possível utilizar sensores de DP capacitivamente acoplados, ao invés de HFCTs. A utilização de tais sensores, juntamente com o método TDR, permite uma localização precisa de DPs em testes realizados *offline*, como apresentado por Mor, et al. (2016).

Outro possível método utilizado envolve métodos estatísticos, como demonstrado por Zhu et al. (2017), onde foram utilizadas antenas de UHF e algoritmos de probabilidade para encontrar a diferença do tempo de chegada entre os sinais e, assim, localizar a fonte das DPs em uma subestação isolada a ar.

Em muitos casos, a localização da fonte de origem das DPs pode ser realizada por meio de inspeções, para quando o defeito é visível no equipamento, embora métodos inteligentes de localização permitam uma estratégia de manutenção mais eficaz.

5. FILTRAGEM E ANÁLISE DE DADOS DE DPs

Sinais de alta frequência, como aqueles associados às DPs, normalmente passam por um processamento para uma melhor análise dos dados obtidos. Como as DPs podem ser medidas tanto no domínio do tempo como no domínio da frequência, é

comum utilizar a Transformada de Fourier (FFT) para processamento dos dados.

Um osciloscópio digital com a função FFT integrada geralmente é suficiente para analisar sinais de DP no domínio da frequência, porém, como mencionado por Fuhr and Aschwanden. (2017), a utilização de um analisador de espectro em conjunto com o osciloscópio se mostra uma alternativa mais vantajosa.

Outro método comum para processamentos de sinais é a Transformada de Wavelet (Mor et al. 2020), por ser adequada para a análise de sinais irregulares e não periódicos. Devido à complexidade e a dimensão dos dados, podem ser utilizadas técnicas estatísticas para a redução e extração dos dados, como as técnicas *Principal Component Analysis* (PCA), e *t-SNE* (Wu et al. 2015).

O método PCA é uma das técnicas de análise multivariável e mineração de dados mais conhecidas e utilizadas, sendo aplicada para descobrir quais subconjuntos de variáveis, dentro do conjunto, formam grupos coerentes que são ortogonais entre si. Os componentes expressos pela técnica são uma compactação significativa dos dados originais, sem perda da informação original. Em (Cuenca. 2005), pode ser encontrada uma revisão da técnica PCA como compactador de dados de descargas parciais.

O t-SNE representa uma outra alternativa para a redução da dimensionalidade de dados, desenvolvida para visualização de dados de grande dimensão (Van der Maaten and Hinton, 2008). Esta técnica busca projetar os dados em um espaço de baixa dimensão e reter suas distâncias ou similaridades aos pares.

Destas ou de outras formas, o processamento e análise de dados são etapas importantes para a obtenção de resultados realmente úteis e aplicáveis, permitindo, assim, uma caracterização do estado da instalação e a definição das ações a serem tomadas no âmbito do plano de manutenção e investimentos da empresa.

6. RECONHECIMENTO DE PADRÕES

A técnica de análise dos impulsos de DPs no domínio do tempo é uma técnica simples que auxilia a reconhecer se a atividade de DP é externa ou interna, visto que, cada tipo de descarga parcial possui posições na fase e taxa de repetições características.

O Sistema *Phase Resolving Partial Discharge Analyser* (PRPDA) de análise, baseia-se na análise estatística da magnitude da suposta descarga como função da posição da fase de uma tensão aplicada por um determinado período de tempo (Fuhr and Aschwanden. 2017). Este sistema possui a fácil discriminação entre ruídos externos e o sinal DP, já que os ruídos externos não correlacionam com a fase da tensão aplicada, possibilitando a identificação de DP internas com magnitudes menores que o nível de ruídos externos.

Esta técnica sofre apenas com a localização da DP, já que mesmo sendo possível identificar o tipo de DP e sua origem,

a localização do sinal necessita da análise em domínio do tempo e domínio da frequência pelos métodos mencionados anteriormente. Em (Fuhr and Aschwanden. 2017), é mostrado como esta técnica é eficaz para detecção e identificação de DP em geradores e transformadores de potência.

Outras técnicas de reconhecimento de padrões para DP, conhecidas como reconhecimento de padrões inteligentes, podem ser separadas em dois tipos: não supervisionada ou supervisionada.

As técnicas não supervisionadas, também chamadas de agrupadores ou algoritmos de agrupamento de DP, são algoritmos que dividem os objetos em grupos por similaridades. Em DP, pulsos de mesma origem tendem a ter características similares (forma de onda e padrões de distribuição pela fase), por esta causa, os algoritmos de agrupamento são utilizados para separação de sinais com múltiplas fontes de DP.

Uma técnica simples e eficiente de agrupamento de dados utilizada para supressão de ruídos em DPs é o método K-means (Lin. 2011). O método segue uma estrutura de processos iterativos, o que também abre espaço para suas principais limitações, como a possibilidade do resultado convergir para o mínimo local de sua equação e o número inicial de interações e de agrupamentos são dificilmente corretamente determinados, como não se tem ideia no número de fontes de sinais de DP.

O método Fuzzy C-means também é recorrente quanto as técnicas não supervisionadas. A lógica deste método assemelha-se bastante ao método K-means, com a diferença que cada objeto possui um grau difuso de pertencer a cada agrupamento (Wu et al. 2015).

O algoritmo DBSCAN (Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise) é bem conhecido para agrupamento baseado em densidade dos dados, e segue um princípio de agrupamento por distância de pontos vizinhos, já utilizado para agrupamento de sinais DP. Quando comparado com o método K-means, o algoritmo DBSCAN possui as seguintes vantagens: não necessita de especificar o número de agrupamentos e seus agrupamentos podem ser de diversas formas, não necessariamente linear, o que não ocorre para agrupamentos por K-means.

Entre outros métodos de agrupamento baseados em densidade de dados, a técnica DPC chama atenção por sua simplicidade e custo computacional moderado, permitindo facilmente sua implementação. Segundo Heredia and Mor. (2019), tal método foi implementado para separação de DPs.

Técnicas de agrupamento são aplicadas em situações em que não se conhece as origens das descargas parciais e a escolha do método utilizado pode ser baseado em suas vantagens e limitações ou validação dos resultados obtidos.

Quanto aos métodos supervisionados, ou classificadores de DP, são geralmente processos de aprendizado supervisionado em sinais já rotulados, envolvendo a separação entre o sinal DP de ruídos, a discriminação entre múltiplas fontes de DP,

análise do estado da isolação e outros diagnósticos que sejam necessários.

Segundo Wu et al. (2015), diversas técnicas utilizadas para classificadores de DP, as Redes Neurais e Árvores de decisões estão entre as mais populares.

As Redes Neurais Artificiais (RNA) são técnicas de inteligência artificial inspiradas no sistema nervoso central de animais e que adquirem conhecimento por meio da experiência (Cuenca. 2005). Uma RNA é composta por várias unidades de processamento de funcionamento bastante simples. Geralmente dividida em uma camada de entrada, uma camada de saída e uma ou mais camadas internas que fazem operações sobre os dados locais recebidos pelas suas conexões.

RNA seguem uma regra de treinamento, onde os pesos das conexões são ajustados de acordo com os padrões apresentados. Particularmente, o algoritmo de retropropagação é o mais comum para ajustar os pesos das conexões.

Quanto as técnicas baseadas em Árvores de decisões (DT), esses são construídas em uma estrutura como a de um fluxograma. São amplamente utilizados para classificação de DP e diferentemente das RNA, fornece regras visíveis para classificação, sendo assim, mais fácil de entender e interpretar. Entretanto, possui diversas desvantagens, como por exemplo, pobres capacidades de generalização e anti-interferência. Em ordem de melhorar a performance desta técnica, tem-se utilizado algoritmos de aprendizagem conjuntos baseados em DT, sendo os mais típicos os algoritmos: *Gradient Boosting Decision Tree* (GBDT) e *Random Forest* (RF) (Jinshu et al. 2018).

Ressalta-se por fim, que o agrupamento e a classificação de DP são processos diferentes, mas que em certas circunstâncias podem ser utilizados de forma conjunta para um melhor entendimento do dados DP a serem analisados.

7. DIAGNÓSTICO E MONITORAMENTO

Devido a vida útil média estimada de 25 anos dos cabos de média e alta tensão, redes de distribuição tendem a ter altos investimentos em renovações e substituições de seus condutores. Porém, como redes em diferentes áreas não operam sobre condições de estresse consistentes, estas não envelhecem uniformemente, permitindo assim, que boa proporção dos cabos e acessórios que operam em níveis de estresse abaixo do definido forneçam serviços por tempo além de sua vida útil esperada (Zhou et al. 2017).

Neste contexto, existe a necessidade de um diagnóstico que permita prever a confiabilidade e taxas de falhas futuras, além de identificar ações apropriadas a se seguir para componentes degradados, de forma que minimize o risco operacional, devido à falha de componentes relativamente novos colocados em condições adversas de trabalho; e investimentos desnecessários, através da substituição de ativos envelhecidos, mas ainda em boa condição. Tal desafio, abre espaço para utilização do monitoramento contínuo de

descargas parciais online (OLPD CM) no monitoramento de plantas de alta tensão (Renforth et al. 2019).

OLPD CM tende a excluir algumas das limitações das medições online periódicas e medições de DPs off-line, pelo fato de aglomerar dados em ambas condições normais e anormais de operação, para períodos de dias, semanas, meses e até anos, por este motivo, OLPD CM é considerado o meio mais eficiente de identificar a elevação de DP em aparatos elétricos ao decorrer do tempo.

Embora muito eficiente, o método de monitoramento contínuo de OLPD é sensível a atividades externas, o acrônimo “TEAM” é bastante utilizado para identificar os possíveis estresses externos que podem influenciar o monitoramento de OLPD (Renforth et al. 2019). O acrônimo TEAM está relacionado com os estresses operacionais: Térmico, Elétrico, Ambiental e Mecânico. Com isto, nesta seção serão apresentados relatos de casos encontrados na literatura que aplicam a metodologia de monitoramento contínuo e a vantagens encontradas na prática do método.

7.1 Estudo de Caso da Aplicação do Monitoramento Contínuo de DPs em uma Indústria de Papel

Em Dodd et al. (2017), apresenta-se dois estudos de casos de OLPD CM em uma indústria de papel, a qual sofre perdas significantes devido a falhas e interrupções inesperadas. A utilização da tecnologia OLPD CM comprovou ser vantajosa para evitar interrupções e diagnosticar falhas de todo o sistema de média e alta tensão na indústria.

O primeiro estudo de caso apresentado, foi a inserção de sensores HFCT em determinados cubículos de distribuição da instalação. O monitoramento destes quadros teve como resultado a detecção de altos sinais de descargas parciais em um dos circuitos inspecionados.

Após análise do sinal e inspeção externa do cubículo foi notado uma descarga audível presente no cubículo, a qual foi gravada utilizando equipamento ultrassônico portátil. Baseado nos resultados obtidos, foi realizada uma inspeção no cubículo durante uma interrupção de manutenção planejada, onde foi encontrado problemas físicos em certos equipamentos do circuito.

Desta forma, segundo ao autor, a implementação do sistema de monitoramento contínuo se provou essencial para evitar uma interrupção não planejada dispendiosa.

O segundo estudo de caso realizado na indústria, foi a integração do sistema de monitoramento contínuo OLPD com o sistema supervisório SCADA (Supervisory control and data acquisition) da indústria, criando assim, um sistema abrangente de monitoramento que inclui as medições de DP.

O dados extraídos a partir do sistema supervisório permite que os engenheiros tenham uma visão de todo estado da instalação, incluído atividades de descargas parciais e aparatos de média tensão, o que amplia as possibilidades de estratégias de manutenção da instalação.

Um fator a se considerar quanto ao diagnóstico de cabos subterrâneos de alta tensão, é a associação das falhas destes cabos com defeitos na isolamento elétrica, por esta causa, o monitoramento contínuo de descargas parciais nas articulações e terminais por meio de sensores HFCT pode ser utilizado para verificar a condição do sistema (Gieselbrecht et al. 2012), (Koltunowicz et al. 2016).

7.2 Exemplo da Aplicação de Diagnóstico de Cabos de Média Tensão por DPs em uma Unidade de Usina Siderúrgica

Além do monitoramento contínuo, testes periódicos são uma alternativa para verificar as mudanças nas tendências da DP em cabos. Uma estratégia de manutenção apresentada em (Grossi et al. 2014), inclui a presença de monitoramento permanente, testes periódicos online e um plano de manutenção após análise dos testes realizados.

O método adotado busca realizar medições repetitivas de modo a avaliar a real condição do isolamento do cabo, identificando os defeitos e suas taxas de degradação. É proposto um critério de avaliação com formato “semáforo”, o qual seleciona a gravidade da falha, sendo a luz verde a indicação de níveis normais de descargas parciais sem necessidade de alguma ação corretiva, a luz amarela indica a detecção de descargas parciais e requer repetição da medição em um período de seis meses para avaliar as tendências da DP, por último, a luz vermelha indica níveis elevados de DP e sugere intervenção imediata o trecho de cabo de origem das descargas.

A avaliação da evolução das DP é feito pela Taxa de Incremento, com relação ao intervalo de medição e tipo de descarga detectada (interna, superficial ou corona), conforme a Tabela 1. Porém, a manutenção pode ser efetuada sem avaliar a Taxa de Incremento, caso seja de interesse da equipe de manutenção.

Tabela 1. Avaliação de tendências após segunda medição

Tendência de Aumento (TI)	Repetir dentro de 6 meses	Repetir dentro de 3 meses	Inspeção / Manutenção
DP Interna	TI < 10%	10% < TI < 50%	TI > 50%
DP Superficial	TI < 20%	20% < TI < 70%	TI > 70%
DP Corona	TI < 50%	TI < 50%	TI > 50%

A técnica foi aplicada em uma rede de alimentação de uma indústria siderúrgica, analisando os principais cabos alimentadores dos painéis de média tensão de 4,16kV da instalação. As medições realizadas detectaram DP internas de alarme amarelo em um dos cabos de um alimentador e descargas corona nos cabos do mesmo alimentador e outro mais. Desta forma foi orientado que estendesse as medições com objetivo de localizar a origem do fenômeno e que se realiza-se outra medição no período de seis meses para o cabo diagnosticado com alarme amarelo.

7.3 Estudo do Conceito de Monitoramento Contínuo em Média Tensão para o Secundário de uma Subestação de Distribuição

De acordo com Siddiqui et al. (2017), foi utilizado sensores HFCT, instalados para medições online no lado de média tensão de uma subestação, com objetivo de monitorar descargas parciais, além do monitoramento de qualidade de energia, gravação de distúrbios e localização de faltas. Este tipo de sensor foi escolhido devido ao fato de não necessitar da instalação de uma isolamento de alta tensão, sendo assim uma solução econômica e confiável.

No estudo realizado, a performance dos sensores HFCT se mostrou adequada para o monitoramento da qualidade da energia, mostrando resultados parecidos quando comparados com outro sensor comercial para monitoramento da qualidade de energia quanto a análise harmônica da corrente captada pelos sensores. A utilização da filtragem de dados, permitiu extrair informações importantes quanto a DP e outros distúrbios de alta frequência.

Foi concluído que os sensores HFCT instalados no lado de média tensão da subestação são uma alternativa de alto custo benefício no conceito de monitoramento online, devido ao fato de permitir o monitoramento de DP nos cabos de média tensão e monitoramento da qualidade de energia da rede, além de possibilitar a localização de faltas à terra, aumentando desta forma a confiabilidade do sistema, antecipando e prevenindo faltas e interrupções em subestações secundárias e alimentadores conectados ao sistema.

7.4 Estudo do Efeito de DP em Cabos e acessórios de Média Tensão em Laboratório

Embora o método de monitoramento contínuo online possua a visível vantagem da avaliação de DP ao decorrer do tempo, a análise em laboratório pode trazer conclusões importantes sobre o efeito de DP no âmbito de confiabilidade de cabos elétricos.

No estudo realizado por Batalović et al. (2019), foi analisado um cabo XLPE de 35 kV, com cerca de 5 metros de comprimento, por meio de simulações computacionais via métodos de elementos finitos, além do teste convencional off-line de medição de DPs a partir de uma fonte secundária de tensão. Em ambas situações foram analisadas a influência da presença de partículas condutoras que possam contaminar a isolamento do cabo e acessórios, gerando consequentemente degradação do material devido a descargas superficiais, visto que ocorre um incremento do campo elétrico no local de defeito.

Desta forma, foi concluído que a instalação e montagem imprópria de cabos de média tensão podem criar defeitos que possivelmente resultarão na falha de isolamento em longo ou até curto prazo, devido ao acréscimo do valor numérico de estresse elétrico no interior dos acessórios do cabo, como por exemplos suas conexões.

Outro fator a se considerar tanto para cabos quanto outros equipamentos de alta tensão, é o fato que na prática, estes não são apenas submetidos a tensão alternada de operação, mas também a tensões transitórias como descargas atmosféricas e impulsos devido a chaveamentos. Pensando neste critério, Wu et al. (2020) implementou um método de medição de DP para cabos de alta tensão em sujeitos a impulsos e tensões sobrepostas em laboratório.

O sistema utilizado no estudo é um cabo de 150 kV, com comprimento de 16 metros, e que possui uma conexão posicionada a cinco metros de distância de uma das pontas do cabo. Ambas terminações do cabo foram aterradas e o defeito artificial foi criado pela manipulação da conexão presente no cabo. O sistema de medição de DP utilizado, consiste de dois sensores HFCT, instalados um em cada ponta do cabo, filtros de passa-banda, supressores de tensão transitórias e um osciloscópio digital.

A escolha de instalar os sensores HFCT em cada ponta do cabo, foi pelo fato que este método permite diferenciar as DPs proveniente do defeito artificial da conexão dos demais sinais de distúrbios por meio da análise da polaridade dos pulsos. Os dados coletados foram então analisados via software que possui o sistema de reconhecimento de padrões PRPD e reconhecimento de parâmetros típicos de DP (TRPD), além de métodos de agrupamento de DP para separar o sinal DP de outros ruídos e distúrbios.

Segundo Wu et al. (2020), o método apresentado se mostrou fundamental para investigação de efeitos transitórios em cabos de alta tensão em laboratório, além de possibilitar a detecção de DP durante impulsos e tensões sobrepostas à tensão de operação.

Por fim, estudos relacionados a DP em espaço laboratorial agregam informações importantes no que se refere aos possíveis defeitos e suas origens em cabos de alta e média tensão, embora a aplicação do monitoramento contínuo favorece a avaliação de tendências de DP e a consolidação de um registro histórico mais rico e detalhado.

8. CONCLUSÃO

Conforme dissertado ao longo deste trabalho, pode-se afirmar que a detecção e análise de descargas parciais fornecem uma ferramenta importante para verificar a condição da isolação de equipamentos elétricos, tendo sido os cabos isolados o foco deste artigo.

Neste contexto, foi apresentada uma discussão bastante abrangente do fenômeno das descargas parciais e seus principais aspectos, como os seus fundamentos, medição, análise de dados e localização da origem. Tais aspectos foram discutidos sob a perspectiva de sua aplicação no monitoramento e diagnóstico de cabos de média e alta tensão, como potencial ferramenta a ser empregada em estratégias de manutenção preditiva de empresas.

Embora tal abordagem ainda não forneça resultados quantitativos definitivos e/ou conclusivos em absoluto, tal como observado na apresentação do estudo de casos, a

mesma fornece elementos de análise importantes que auxiliam tomadas de decisão estratégias relativas a intervenções de manutenção no sistema ou investimentos para a aquisição e substituição de itens.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de financiamento 001.

REFERÊNCIAS

- Ahmed Z., Kluss J. V. and Wallace, D. A. (2018). "Partial discharge measurements and techniques for pattern recognition and life prediction of medium voltage XLPE cables". *2018 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE), ATHENS, Greece, 2018*, pp. 1-4.
- Bartnikas, R. (2002). Partial Discharges: Their Mechanism, Detection and Measurement. *IEEE TDEI*, v. 9, n. 5, p. 763-808, Oct. 2002.
- Batalović, M., Matoruga, H., Berberovic, S. and Matoruga, M. (2019). "Investigation on Partial Discharge Activity inside the Cable Accessories due to Improper Installation of Power Cable Joints". *IEEE EUROCON 2019 -18th International Conference on Smart Technologies*, Novi Sad, Serbia, 2019, pp. 1-6.
- Cuenca, W. M. H. (2005). Caracterização dos Sinais de Descargas Parciais em Equipamentos de Alta Tensão a partir de Modelos Experimentais. Tese de doutorado, UFRJ, Rio de Janeiro.
- Dodd, L., Giussani, R., McPhee, A. and Burgess, A. (2017). "On-line partial discharge condition monitoring of complete networks for the pulp and paper industry: Challenges and solutions explained through case studies" *2017, Annual Pulp, Paper And Forest Industries Technical Conference (PPFIC)*, Tacoma, WA, 2017, pp. 1-8.
- Fuhr, J. e Aschwanden, T. (2017). "Identification and localization of PD-sources in power-transformers and power-generators". *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 24, no. 1, pp. 17-30, Feb. 2017.
- Gieselbrecht, D. et al. (2012). "Monitoring of 420 kV XLPE cable system in underground tunnel". *2012 IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis*, Bali, 2012, pp. 917-920.
- Gillie, R., Nesbitt, A., Ramirez-Iniguez, R., Stewart, B. G. and Kerr, G. (2014). "Analysis of HV cable faults based on correlated HFCT and IEC60270 measurements". *2014 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)*, Des Moines, IA, 2014, pp. 168-171
- Grossi, A.; Lana, G.; Lima, D.; Okumtoto, P. (2014). Diagnóstico em Cabos de Média Tensão Utilizando o Método de Descargas Parciais. *Anais do XX Congresso Brasileiro de Automática*, Belo Horizonte, MG, Set. 2014, pp. 2862-2866.
- Gutnik, Y. (2014). Estudo dos Piezoeletros na Detecção de Descargas Parciais em Transformadores. Dissertação de mestrado, USP, São Carlos.

- Heredia, L. C. C. e Mor, A. R.. (2019). Density-based clustering methods for unsupervised separation of partial discharge sources. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 107, 224-230.
- Jinshu, L., Yijiang, W., Ganjun, W., Xiaoasheng, P., Taiwei, L., & Yuhang, J. (2018). Gradient Boosting Decision Tree and Random Forest Based Partial Discharge Pattern Recognition of HV Cable. *2018 China International Conference on Electricity Distribution (CICED)*.
- Keränen, J., Hämäläinen, A. and Vepsäläinen, J. (2019). "Feasibility Experiences of On-line Partial Discharge Monitoring of Medium Voltage Cables in Helen Electricity Network Ltd". *2019 Electric Power Quality and Supply Reliability Conference (PQ) & 2019 Symposium on Electrical Engineering and Mechatronics (SEEM)*, Kärdla, Estonia, 2019, pp. 1-4.
- Koltunowicz, W., Badicu, L., Broniecki, U. and Belkov, A. (2016). "Increased operation reliability of HV apparatus through PD monitoring". *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 23, no. 3, pp. 1347-1354, June 2016.
- Lanz, B.T., Byrne D., Spalding M. (2016). "Affordable Cable System Reliability and Life Extension Strategy". *2016 IEEE Rural Electric Power Conference (REPC)*, Westminster, CO, pp. 50-56.
- Lin, Y. (2011). Using K-Means Clustering and Parameter Weighting for Partial-Discharge Noise Suppression. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 26, 2380-2390.
- Mason, H. M. (1995). Enhancing the Significance of PD Measurements. *IEEE TDEI*, v. 2, n. 5, p.876-888, Oct. 1995.
- Mor, A. R. , Morshuis, P. H. F., Llovera, P., Fuster, V. and Quijano A. (2016). "Localization techniques of partial discharges at cable ends in off-line single-sided partial discharge cable measurements". in *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 23, no. 1, pp. 428-434, February 2016.
- Mor, A. R., Muñoz, F. A., Wu, J., Heredia, L. C. C. (2020). Automatic partial discharge recognition using the cross wavelet transform in high voltage cable joint measuring systems using two opposite polarity sensors. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 117, 105695.
- Renforth, L. A., Giussani, R., Mendiola, M. T. and Dodd, L. (2019). "Online Partial Discharge Insulation Condition Monitoring of Complete High-Voltage Networks". *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 55, no. 1, pp. 1021-1029, Jan.-Feb. 2019.
- Siddiqui, B. A., Pakonen, P. and Verho, P. (2017). "Field testing of a wideband monitoring concept at MV side of secondary substation". *CIGRE - Open Access Proceedings Journal*, vol. 2017, no. 1, pp. 179-183, 10 2017.
- Setyawan, J. (2009). Investigation of Partial Discharge Occurrence and Detectability in High Voltage Power Cable Accessories. MSc Graduation thesis. Delft University of Technology. November 2009.
- Van der Maaten, L. and Hinton, G. (2008). "Visualizing data using t-SNE". *J. Mach. Learn. Res.*, vol. 9, pp. 2579–2605, 2008.
- Wester, F.J. (2004) "Condition Assessment of Power Cables Using PD Diagnosis at Damped AC Voltages". ISBN 90-8559-019-1, Ph.D. thesis TU Delft, 2004.
- Wu, J., Mor, A.R., Nes, P.V., and Smit, J.J. (2020). Measuring method for partial discharges in a high voltage cable system subjected to impulse and superimposed voltage under laboratory conditions. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 115, 105489.
- Wu, M., Cao, H., Cao, J., Nguyen, H., Gomes, J. B. and Krishnaswamy S. P. (2015). "An overview of state-of-the-art partial discharge analysis techniques for condition monitoring". *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 31, no. 6, pp. 22-35, November-December 2015.
- Zhou, C., Yi, H., & Dong, X. (2017). Review of recent research towards power cable life cycle management. *High Voltage*, 2(3), 179–187.
- Zhu, M. et al. (2017). "Localization of multiple partial discharge sources in air-insulated substation using probability-based algorithm". *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 24, no. 1, pp. 157-166, Feb. 2017