

Aplicação Prática da Ferramenta *T-F Map* na Separação de Descargas Parciais em Máquinas Rotativas e Cabos de Média Tensão

J. P. Villibor*, B. P. Marques*, G. P. Lopes*, R. Arregalo **, R. G. O. Junior***, P. H. Caixeta***,

* *LAT-EFEI – Laboratório de Alta Tensão Prof. Manuel Luiz Barreira Martinez - UNIFEI, Itajubá, MG Brasil (Tel.: 35 3622-3546; e-mail: jansen@lat-efei.org.br).*

** *Altanova Group, Bologna, Itália (e-mail: RArregalo@doble.com)*

*** *PSI – Process Soluções Inteligentes, Jundiaí, SP, Brasil (e-mail: ricardo.guedes@process.eng.br)*

Abstract: This work aims to encourage the application of partial discharge measurements in electrical equipment in Brazil through the practical utilization of the T-F Map (Time-Frequency Map) tool, applied in the separation of multiple sources of partial discharge. Partial discharge measurements were performed on rotating machines and medium voltage cables. The measurements on rotating machines were made with a stator and a 5000 hp three-phase induction motor, while the measurements on the medium voltage cable were carried out during an artificial aging process. The PRPD (Phase Resolved Partial Discharge) patterns obtained with their respective T-F Map are shown in the article, highlighting the potential of the T-F Map utilization, whether during the development of new equipment or in the evaluation of the equipment insulation in the field.

Resumo: Este trabalho busca incentivar a aplicação de medições de descargas parciais em equipamentos elétricos no Brasil, através da utilização prática da ferramenta *T-F-Map (Time-Frequency Map)*, aplicada na separação de múltiplas fontes de descarga parcial. Foram realizadas medições de descargas parciais em máquinas rotativas e cabos de média tensão. As medições em máquinas rotativas foram realizadas em um estator e um motor de indução trifásico de 5000 hp, enquanto as medições realizadas no cabo de média tensão foram realizadas ao longo de um processo de envelhecimento artificial. São apresentados os padrões PRPD (*Phase Resolved Partial Discharge*) e *T-F Map* obtidos, evidenciando o potencial de utilização do *T-F Map* seja durante o desenvolvimento de novos equipamentos ou na avaliação da isolação de equipamentos em campo.

Keywords: Partial Discharges; T-F Map; PRPD Pattern; Rotating Machines; Medium Voltage Cables.

Palavras-chaves: Descargas Parciais; *T-F Map*; Padrão PRPD; Máquinas Rotativas; Cabos de Média Tensão.

1. INTRODUÇÃO

A *International Electrotechnical Commission* (2015) em sua norma IEC 60270 *High-voltage test techniques - Partial discharge measurements*, define como descarga parcial, uma descarga elétrica localizada que curto-circuita parcialmente apenas o material isolante entre condutores e pode ou não ocorrer nas adjacências de um condutor.

Em geral, as descargas parciais (DP) são consequências da concentração de solitação elétrica localizada dentro da isolação ou em sua superfície (Ryan 2013).

Nas décadas de 1950 e 1960, houve uma necessidade emergencial em desenvolver técnicas de medição de DP, que culminou no estabelecimento de correlações existentes entre a atividade de descarga parcial e as formas específicas de degradação. Estas décadas também testemunharam o desenvolvimento do conhecimento relacionado a este tema, baseado fortemente nos princípios físicos envolvidos nos mecanismos de degradação e ruptura conforme descrito por Haddad & Warne (2004).

Desde a década de 1960, o método elétrico de medição de descargas parciais tem sido amplamente aceito como ferramenta de garantia da qualidade de equipamentos de alta tensão após sua fabricação (Hauschild & Lemke 2019).

Mundialmente reconhecida como um mecanismo de diagnóstico da isolação, as medições de descargas parciais no ambiente industrial de fabricação de equipamentos, são usualmente requeridas como parte dos ensaios de aceitação para grande maioria dos ativos de média e alta tensão (CIGRE 2016).

Nos dias atuais, o papel dos estudos de descarga parcial permanece duplo: permitir o desenvolvimento de novos sistemas isolantes, resistentes às solitações impostas pelas descargas parciais e prever a vida útil remanescente dos equipamentos em operação (Haddad & Warne 2004).

A medição de descargas parciais é tipicamente não-destrutiva e pode ser utilizada para avaliar o desempenho da isolação de um equipamento elétrico desde à sua entrada em operação. Em serviço, a redução do desempenho da isolação está intimamente ligada a diversos parâmetros como solitação

elétrica, térmica, mecânica, química e do ambiente onde o equipamento se encontra (Ryan 2013).

Alguns sistemas isolantes possuem maior capacidade de suportar descargas parciais, como os sistemas isolantes à base de mica, enquanto sistemas baseados em polímeros orgânicos se degradam rapidamente (Culbert, Dhirani & Stone, 1989; Boggs & Densley, 2000; CIGRE, 1992).

A identificação das fontes de DP não é uma tarefa trivial, porém, recursos como a técnica *T-F Map*, podem ser valiosas ferramentas, seja durante o desenvolvimento de produtos e sua validação após fabricação, quanto na sua aplicação em equipamentos em operação no sistema elétrico, como geradores, motores, cabos, transformadores, entre outros.

O emprego de medições de DP tem sido utilizado amplamente nos EUA e Europa, mas ainda encontra certa resistência no Brasil, principalmente, devido aos custos envolvidos e o desconhecimento dos benefícios proporcionados pela sua utilização.

Porém, é preciso considerar que em determinados casos, os custos com a realização de medições de DP com frequência pré-determinada e até mesmo os custos para implementar um sistema de medição de descargas parciais on-line (monitoramento contínuo), pode ser menor que os custos provenientes de uma interrupção no fornecimento de energia e dos custos de substituição do ativo.

Neste contexto este trabalho busca promover uma maior utilização das medições de descargas parciais e apresentar aplicações práticas da utilização da técnica *T-F Map*, que é uma poderosa ferramenta para separação de fontes de DP, na presença de ruído e de múltiplas fontes de descargas parciais.

2. SISTEMA DE MEDIÇÃO DE DESCARGAS PARCIAIS, PADRÃO PRPD E A TÉCNICA *T-F MAP*.

2.1 Sistema de medição de descargas parciais

Os sistemas de medição de descargas parciais convencionais podem ser divididos em subsistemas: dispositivo de acoplamento, sistema de transmissão (cabos de conexão) e instrumento de medição (*International Electrotechnical Commission*, 2015).

O dispositivo de acoplamento é parte integral do sistema de medição do circuito de ensaio, e seus componentes são projetados para obter uma ótima sensibilidade em um circuito de ensaio específico. Usualmente é uma rede de quatro terminais (quadripolo) que realiza a conversão dos sinais de corrente da entrada para sinais de tensão na saída.

Os sinais captados através do dispositivo de acoplamento são levados ao instrumento de medição através do sistema de transmissão.

A Figura 1 mostra o circuito de medição com dispositivo de acoplamento (CD) em série com o capacitor de acoplamento (C_k), onde U é a tensão aplicada, Z é um filtro, C_a é a capacitância do equipamento sob ensaio, CC o cabo de conexão e MI é o instrumento de medição.

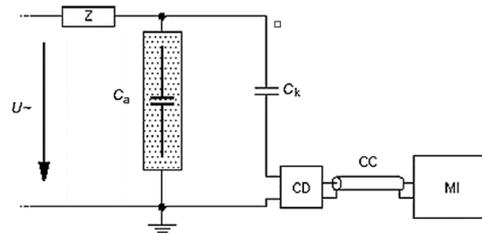


Fig. 1 Circuito de medição de descargas parciais de acordo com a IEC 60270. Adaptada de (*International Electrotechnical Commission*, 2015).

O sistema de medição utilizado neste trabalho é produzido pela empresa italiana *TechImp*, e conta com capacitor de acoplamento, dispositivo de acoplamento (impedância de medição), sistema de transmissão (cabos) e o equipamento de medição *Aquila*, que é um dispositivo de medição portátil de alto desempenho, que permite realizar medições trifásicas com 100 MA/s por canal.

O *Aquila* possui uma rede *wifi* própria que permite sua conexão com o software analisador de descargas parciais *PDPPro*. O *PDPPro* permite a realização de medições trifásicas e possui uma interface simples, de fácil utilização, que conta com recursos como o *T-F-Map* para realizar a separação de diferentes fontes de DP na mesma medição.

Além disso, conta com inteligência artificial própria que permite realizar a identificação do tipo da descarga parcial em diversos tipos de ativos, tais como máquinas rotativas, cabos, transformadores, subestações isoladas a gás e chaves seccionadoras.

2.2 O padrão PRPD

Uma das técnicas mundialmente utilizadas para avaliar a provável fonte de descargas parciais em equipamentos é através da análise do padrão PRPD (Cavallini et al. 2005).

O padrão PRPD é um gráfico bidimensional, que relaciona a amplitude dos pulsos de DP medidos, geralmente em Coulombs, mas que também pode ser apresentado em Volts, em relação ao ângulo de fase da tensão alternada de excitação, conforme ilustrado na Figura 2.

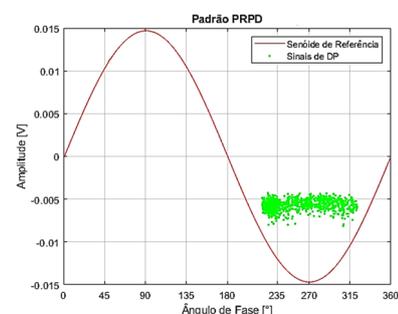


Fig. 2 Padrão PRPD típico de uma descarga parcial do tipo corona com eletrodos tipo ponta (alta tensão) e plano (terra).

O padrão PRPD da Figura 2 foi obtido com um simulador de descargas parciais, que fornece eletricamente o fenômeno de

descargas parciais do tipo corona, com eletrodos do tipo ponta (alta tensão) e plano (terra). Descargas do tipo corona são geralmente caracterizadas por estarem, em relação tensão de excitação (senóide de referência), concentradas próximas ao maior valor de tensão de excitação (região dos picos), tanto positivo, como negativa, dependendo da configuração dos eletrodos.

Os padrões PRPD de referência estão amplamente disponíveis para diferentes tipos de defeitos relacionados a descargas parciais e também para diferentes tipos de equipamentos, principalmente para o método convencional (IEC 60270) de medição de descargas parciais.

O documento técnico *Partial Discharges in Transformers*, de número 676, produzido pelo grupo de trabalho D1.29 do Cigré, apresenta em seu Anexo 10 uma coletânea de variações de padrões PRPD medidos (CIGRE 2017).

Em uma abordagem mais atual o padrão PRPD também pode agregar informações relativas a frequência de repetição dos pulsos medidos, tornando-se assim, um gráfico tridimensional, conhecido como gráfico $\varphi-q-n$ (Haddad & Warne 2004). Um exemplo de gráfico $\varphi-q-n$ é mostrado na Figura 3.

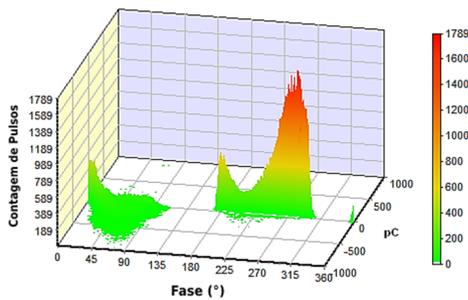


Fig. 3 Exemplo de gráfico $\varphi-q-n$.

Porém, a identificação de diferentes fenômenos relacionados a descargas parciais pode ficar prejudicada na presença de múltiplas fontes de DP, onde diferentes fenômenos podem estar sobrepostos no padrão PRPD.

2.3 A Técnica T-F Map

O *T-F Map* é uma abordagem utilizada para separar múltiplas fontes de descargas parciais que utiliza o tempo de duração equivalente e a largura de banda dos pulsos de DP (Cavallini et al. 2010; Cavallini & Montanari, 2005; Contin et al. 2002; Cavallini et al. 2003). O método é baseado na premissa de que diferentes formas de pulsos de DP são caracterizadas pela presença de diferentes fontes de DP (Cavallini & Montanari, 2005; Contin et al. 2002; Bartnikas & Novak, 1993)

Para um pulso de DP (p), com N amostras, a referência de tempo, t_0 , é definida de acordo com (1), onde t_i representa o instante de tempo de aquisição da amostra de pulso i .

$$t_0 = \frac{\sum_{i=0}^N t_i p_i(t_i)^2}{\sum_{i=0}^N p_i(t_i)^2} \quad (1)$$

O tempo de duração equivalente de um pulso de descarga parcial é definido por (2):

$$T^2 = \frac{\sum_{i=0}^N (t_i - t_0)^2 p_i(t_i)^2}{\sum_{i=0}^N p_i(t_i)^2} \quad (2)$$

A transformada de Fourier transforma sinais entre o domínio do tempo e o domínio da frequência, representando o sinal através da utilização de combinações das funções seno e cosseno. Para um sinal (p), sua transformada de Fourier é definida por (3), onde t e ξ denotam o tempo e a frequência, respectivamente:

$$\mathcal{F}\{p(t)\} = P(\xi) = \int_{-\infty}^{+\infty} p(t) e^{-i2\pi\xi t} dt \quad (3)$$

Se P é a frequência obtida da transformada de Fourier, a largura de banda equivalente de um pulso de descarga parcial pode ser encontrada através de (4), onde f_i representa a frequência na amostra de pulso i :

$$F^2 = \frac{\sum_{i=0}^{N/2} (f_i)^2 |P_i(f_i)|^2}{\sum_{i=0}^{N/2} |P_i(f_i)|^2} \quad (4)$$

O *T-F Map* é construído projetando T^2 e F^2 de cada pulso de DP em um plano bidimensional. Neste plano, os pontos projetados que pertencem aos pulsos DP de padrão semelhante, se fundirão para formar um grupo (*cluster*) distinto. Assim, vários grupos podem ser formados e cada grupo deverá corresponder a uma única fonte de descarga parcial. A Figura 4 apresenta o respectivo *T-F Map* do padrão PRPD da Figura 2.

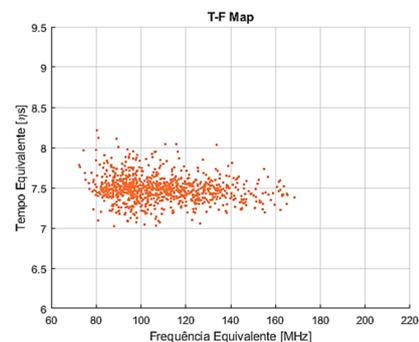


Fig. 4 *T-F Map* do padrão PRPD da Figura 2.

Este método fornece um mecanismo que descreve individualmente um pulso de DP em termos de sua representação de tempo e frequência. No entanto, existem algumas limitações, pois de acordo com as equações (2) e (4), a forma dos pulsos nem sempre pode ser representada com precisão, já que apenas a amplitude geral nos domínios do tempo e da frequência são consideradas.

3. APLICAÇÃO PRÁTICA EM EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS

3.1 Máquinas Rotativas

As medições de descargas parciais em máquinas rotativas foram realizadas em dois diferentes ativos, o primeiro, um

estator de um gerador de tensão nominal 11 kV e o segundo, um motor de indução trifásico de 5000 hp e tensão fase-fase de 13,8 kV.

Em ambos os ativos as descargas parciais foram medidas de maneira indireta através de um capacitor de acoplamento em paralelo com o equipamento sob ensaio.

A Figura 5 apresenta o estator de tensão nominal 11 kV e a Figura 6 mostra o conjunto de medição da *TechImp* composto por um sistema portátil de aquisição de DP (*Aquila*) (1), capacitor de acoplamento (2) e dispositivo de acoplamento (3).

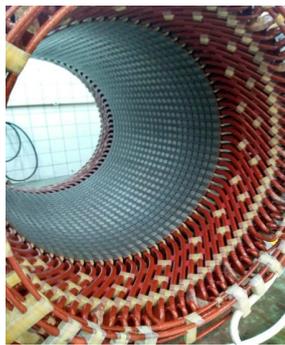


Fig. 5 Visão parcial do estator de tensão nominal 11 kV.

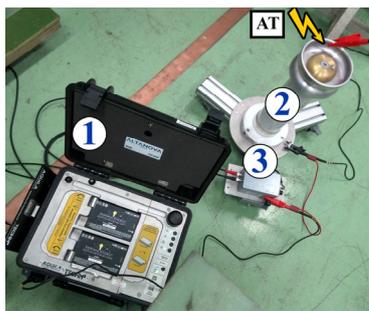


Fig. 6 Sistema de medição *TechImp*: (1) Sistema portátil de aquisição de descargas parciais (*Aquila*); (2) Capacitor de acoplamento; (3) Dispositivo de acoplamento.

As Figuras 7 e 8 apresentam o padrão PRPD completo e o respectivo *T-F Map* da medição realizada no estator, ambos fornecidos pelo software *PDPro*. Na Fig. 8 a representação dos pulsos, já apresenta a separação em *clusters* diferenciados através das cores em vermelho, azul e verde.

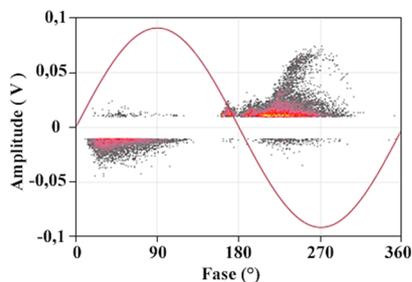


Fig. 7 Padrão PRPD completo obtido da medição no estator.

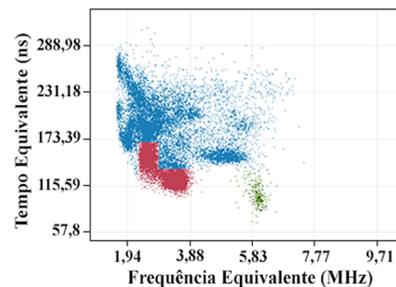


Fig. 8 *T-F Map* obtido da medição no estator, com separação de *clusters* (vermelho, azul e verde).

A Figura 9 mostra o padrão PRPD do *cluster* vermelho da Figura 8. Este *cluster* de descargas parciais foi identificado como 100% produzido por delaminação no condutor.

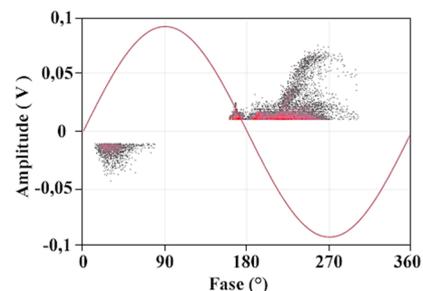


Fig. 9 Padrão PRPD do *cluster* vermelho.

A Figura 10 apresenta o padrão PRPD do *cluster* azul da Figura 8. O *cluster* foi identificado como 100% de descargas produzidas por micro cavidades distribuídas pela isolamento.

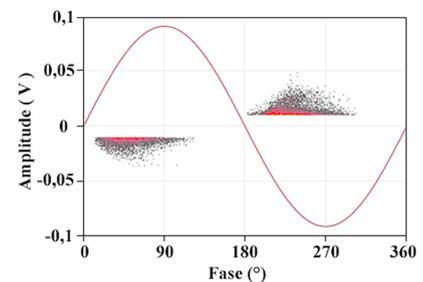


Fig. 10 Padrão PRPD para o *cluster* azul.

A Figura 11 traz o padrão PRPD do *cluster* verde da Figura 8. Este *cluster* foi identificado como 100 % produzido por descargas do tipo corona.

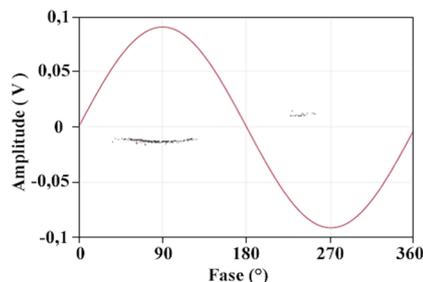


Fig. 11 Padrão PRPD para o *cluster* verde.

Os resultados mostram a capacidade da técnica *T-F Map* em separar diferentes fontes de descargas parciais, ao introduzir uma nova visão de como os pulsos de descargas parciais estão

intrinsecamente ligados às suas características de tempo x frequência.

Ao analisar a separação de diferentes fontes de DP proporcionada pelo *T-F Map* nas medições realizadas no estator, é preciso destacar que as três fontes de DP estavam completamente sobrepostas no PRPD completo da Figura 7, evidenciando os enormes benefícios proporcionados por esta ferramenta, quando da presença de múltiplas fontes de descarga parcial.

Para o motor de 5000 hp, a tensão aplicada foi equivalente a tensão fase-terra (7967 V). Basicamente, o procedimento consiste em aplicar a tensão em uma fase, com as fases sobressalentes em curto-circuito e aterradas. Uma foto parcial do motor é mostrada na Figura 12.



Fig. 12 Visão parcial do motor de 5000 hp.

Os resultados obtidos nas medições do motor, correspondem às medições de DP obtidas na fase B. Três diferentes tipos de DP foram identificados: delaminação embutida na isolação, descargas da barra para o terra e descargas do tipo corona.

A Figura 13, apresenta o padrão PRPD completo da medição e Figura 14 o respectivo *T-F Map*, com separação em três *clusters* vermelho (descarga barra/terra), verde (delaminação embutida na isolação) e azul (corona).

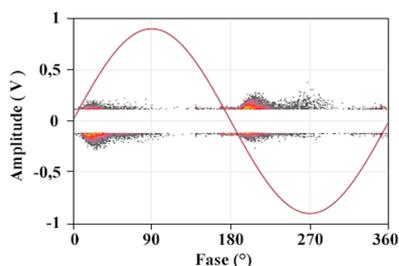


Fig. 13 PRPD completo obtido da medição no motor de 5000 hp.

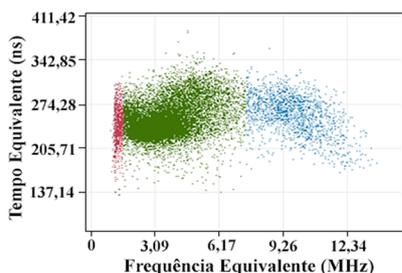


Fig. 14 *T-F Map* referente ao PRPD da Figura 13, com separação de *clusters* (vermelho, azul e verde).

Os padrões PRPD dos *clusters* vermelho, azul e verde, estão nas Figuras 15, 16 e 17, respectivamente.

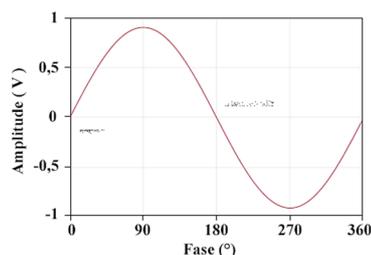


Fig. 15 Padrão PRPD do *cluster* vermelho, identificado como descarga barra/terra.

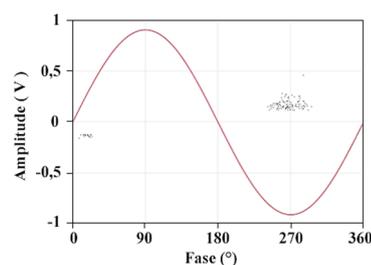


Fig. 16 Padrão PRPD para o *cluster* azul, identificado como descarga do tipo corona.

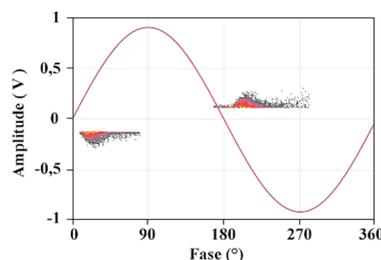


Fig. 17 Padrão PRPD para o *cluster* verde, identificado como descarga produzida por delaminação embutida na isolação.

3.2 Cabos de Média Tensão

O cabo de média tensão utilizado possui seção de 630 mm², com sua isolação constituída por XLPE (polietileno reticulado), alumínio como material condutor e 8 metros de comprimento.

Para o cabo de média tensão, realizou-se um envelhecimento artificial com sobrecorrente durante aproximadamente 4 semanas, com uma corrente de aproximadamente 1430 A. Durante todo o envelhecimento, a tensão de 34 kV permaneceu aplicada no cabo. O envelhecimento foi realizado no LAT-EFEI e as medições foram realizadas seguindo as recomendações de normas técnicas pertinentes como a ABNT NBR 7287 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (2019).

Para as medições no cabo, serão apresentados resultados correspondentes a três diferentes momentos durante o processo de envelhecimento artificial: no início do processo, no meio e no final.

As Figuras 18 e 19 mostram uma representação do circuito de medição e uma visão geral do *setup* aplicado nas medições de descargas parciais no cabo de média tensão, respectivamente.

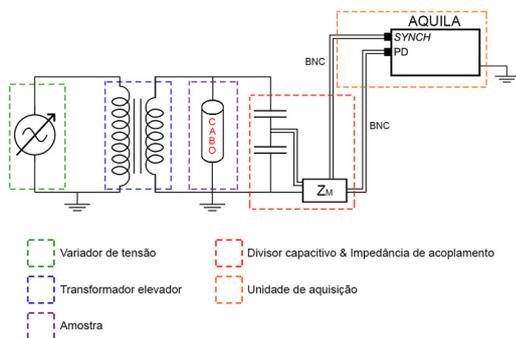


Fig. 18 Representação do circuito de medição aplicado durante as medições de descargas parciais no cabo de média tensão.

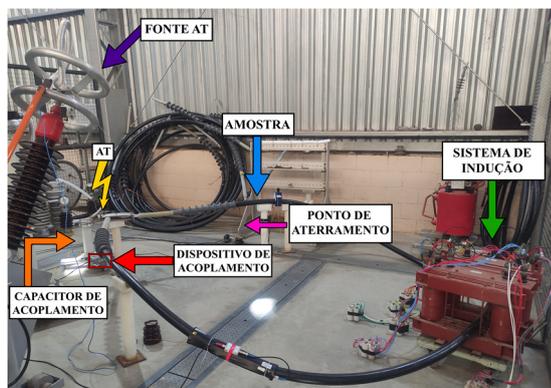


Fig. 19 Visão geral do *setup* aplicado nas medições de descargas parciais no cabo de média tensão.

As Figuras 20 e 21 apresentam o padrão PRPD completo e o *T-F Map* da medição no início do processo de envelhecimento artificial.

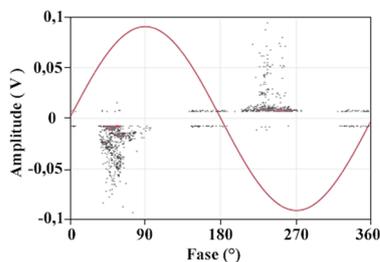


Fig. 20 Padrão PRPD completo do cabo de média tensão no início do processo de envelhecimento artificial.

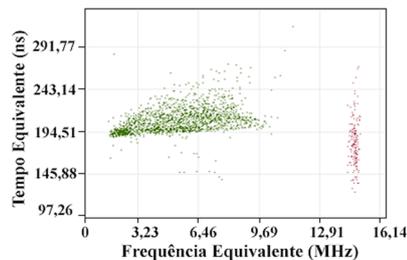


Fig. 21 *T-F Map* equivalente ao padrão PRPD da Figura 20 com separação de clusters (verde e vermelho).

Com a aplicação da técnica *T-F Map*, foi possível separar o padrão PRPD completo (Figura 20) em dois outros padrões PRPD, um para o *cluster* verde (Figura 22) e outro para o *cluster* vermelho (Figura 23).

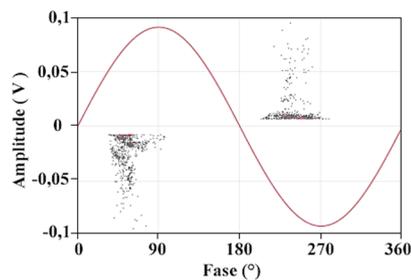


Fig. 22 Padrão PRPD para o *cluster* verde.

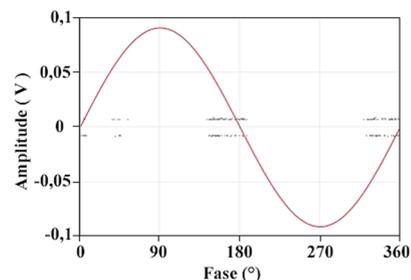


Fig. 23 Padrão PRPD para o *cluster* vermelho.

O *cluster* verde foi identificado como descarga de superfície externa. Já o *cluster* vermelho não foi identificado como descarga parcial.

As Figuras 24 e 25 apresentam o padrão PRPD completo e o *T-F Map* da medição intermediária do processo de envelhecimento artificial.

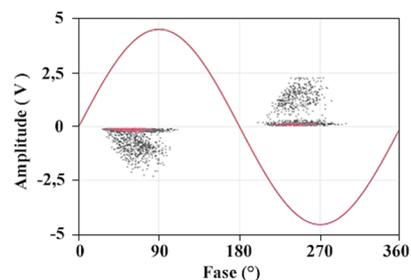


Fig. 24 Padrão PRPD completo do cabo de média tensão na medição intermediária do processo de envelhecimento.

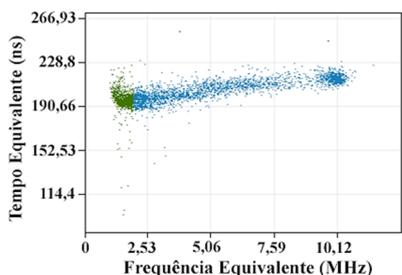


Fig. 25 T-F Map equivalente ao padrão PRPD da Figura 24 com separação de *clusters* (azul e verde).

Separando com o *T-F Map* os diferentes fenômenos de DP, o padrão PRPD completo (Figura 24) foi separado em dois outros padrões PRPD, um para o *cluster* azul (Figura 26) e outro para o *cluster* verde (Figura 27).

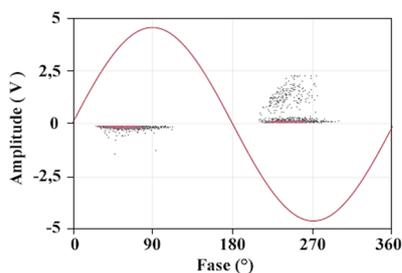


Fig. 26 Padrão PRPD para o *cluster* azul.

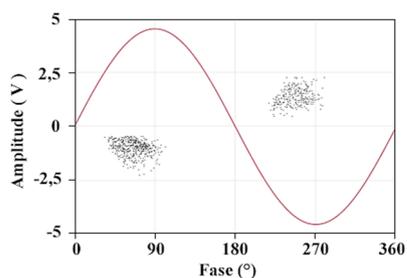


Fig. 27 Padrão PRPD para o *cluster* verde.

O *cluster* azul foi identificado como descarga de superfície externa, já o *cluster* verde foi identificado como descarga de superfície interna. Nesta medição intermediária é possível observar os efeitos da degradação na isolamento ocasionada pela sobrecorrente aplicada, através do aumento da amplitude dos pulsos de descarga parcial.

As Figuras 28 e 29 apresentam o padrão PRPD completo e o *T-F Map* da medição realizada no encerramento do processo de envelhecimento artificial.

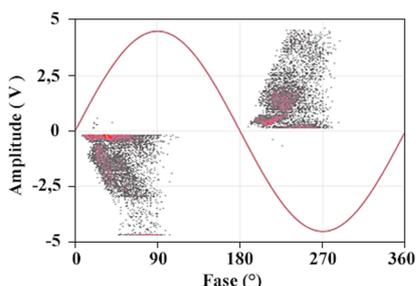


Fig. 28 Padrão PRPD completo do cabo de média tensão no encerramento do processo de envelhecimento artificial.

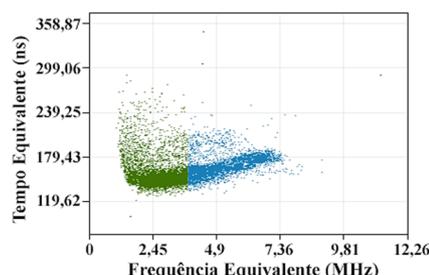


Fig. 29 *T-F Map* equivalente ao padrão PRPD da Figura 28 com separação de *clusters* (azul e verde).

Assim como anteriormente, nas etapas inicial e intermediária, o *T-F Map*, permitiu a separação do PRPD em dois outros padrões PRPD, um para o *cluster* azul (Figura 30) e outro para o *cluster* verde (Figura 31).

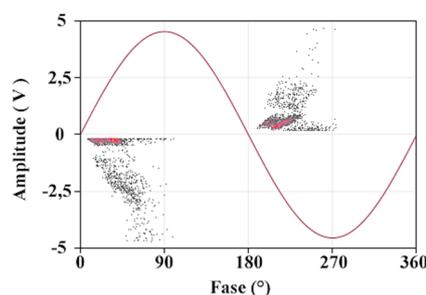


Fig. 30 Padrão PRPD para o *cluster* azul.

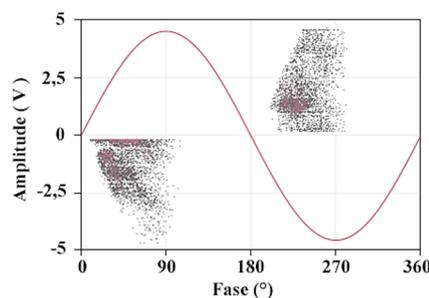


Fig. 31 Padrão PRPD para o *cluster* verde.

O *cluster* azul foi identificado como descarga de superfície externa, e o *cluster* verde foi identificado como descarga de superfície interna, reforçando os resultados da medição intermediária realizada.

As Tabelas 1 e 2 apresentam um resumo de alguns parâmetros medidos durante o envelhecimento artificial, onde Q_{\max} é o valor máximo da amplitude dos pulsos de descargas parciais medidos, em volts, $Q_{\max_{95\%}}$ é o valor máximo da amplitude dos pulsos de descargas parciais medidos, em volts, com um intervalo de confiança de 95% para uma distribuição do tipo Weibull.

Tabela 1. Resumo de parâmetros medidos durante o processo de envelhecimento artificial – Descarga de superfície externa.

	Medição					
	Início		Meio		Fim	
Polaridade	+	-	+	-	+	-
Q_{\max} [V]	0,09	0,09	2,27	1,37	4,69	4,53
$Q_{\max_{95\%}}$ [V]	0,03	0,05	1,41	0,19	1,84	2,81

Tabela 2. Resumo de parâmetros medidos durante o processo de envelhecimento artificial – Descarga de superfície interna.

	Medição					
	Início		Meio		Fim	
Polaridade	+	-	+	-	+	-
$Q_{\text{máx}}$ [V]	NA	NA	2,27	2,27	4,69	4,64
$Q_{\text{máx } 95\%}$ [V]	NA	NA	2,03	1,60	4,02	2,77

As informações das Tabelas 1 e 2 evidenciam um aumento significativo no nível das descargas parciais das duas diferentes fontes (descarga de superfície externa e interna). Este aumento pode ser percebido em ambas polaridades e fontes de DP. Na Tabela 2, “NA” indica ausência de descargas parciais.

4. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos mostram a capacidade de separação de múltiplas fontes de descargas parciais, proporcionada pela aplicação da técnica *T-F Map*, presente no *software PDPPro* da *Techimp*.

A identificação das fontes de DP proporcionada pelo sistema utilizado, pode ser classificada como generalizada, pois funcionou em diferentes ativos; robusta, pois não foi afetada pelo circuito de medição; e flexível pois a identificação se adaptou a natureza do defeito e permitiu a avaliação temporal da solicitação imposta no cabo de média tensão.

Durante as medições realizadas, o ruído de fundo no ambiente de medição foi eliminado através de ferramentas disponíveis no *PDPPro*, permitindo que apenas os sinais de descargas parciais fossem analisados, com padrões PRPD nítidos, que facilitam a avaliação da fonte de DP.

Nas medições em máquinas rotativas, os padrões PRPD exibidos nas Figuras 7 e 13 continham diferentes fontes de DP sobrepostas, que foram separadas com o *T-F Map*, permitindo a correta identificação do fenômeno e assim um aprimoramento do diagnóstico da isolação do equipamento.

Os resultados das medições realizadas no cabo de média tensão, indicam que a tensão e corrente aplicadas no envelhecimento foram suficientes para degradar a isolação, e as descargas parciais observadas apresentaram padrões PRPD semelhantes aos presentes em literatura (CIGRE, 2016; CIGRE, 2017).

Assim, este trabalho espera ter contribuído praticamente com a comunidade acadêmica e o setor privado no sentido de instigar uma aplicação mais assertiva e frequente de medições de descargas parciais no Brasil, seja no desenvolvimento de equipamentos, comissionamento, ou na avaliação da isolação de equipamentos em operação.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos à PSI Energy por fomentar o desenvolvimento desta pesquisa com equipamentos e recursos financeiros e ao LAT-EFEI por disponibilizar sua estrutura e equipamentos.

REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira de normas Técnicas. (2019). ABNT NBR 7287:2019 - Cabos de potência com isolação extrudada de polietileno reticulado (XLPE) para tensões de 1 kV a 35 kV - Requisitos de desempenho. *ABNT*.
- Bartnikas, R., Novak, J. (1993). On the character of different forms of partial discharges and their related terminology. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 28, pp. 956-968.
- Boggs, S., Densley, J. (2000). Fundamentals of PD in the context of field cable testing. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, Vol. 16, pp. 13-18.
- Cavallini, A., Montanari, G., Puletti F. (2003). A new approach to the diagnosis of solid insulation systems based on PD signal inference. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, Vol. 19, pp. 23-30.
- Cavallini, A., Montanari, G., Puletti F. (2003), Contin A. Advanced PD inference in on-field measurements. Part. 2: defect identification. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 10, pp. 528-538.
- Cavallini, A., Montanari, G. (2005). A new methodology for the identification of PD in electrical apparatus: properties and applications. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 12, pp. 203-215.
- Cavallini, A., Chen, X, Montanari, G., Ciani F. (2010). Diagnosis of EHV and HV transformers through an innovative partial-discharge-based technique. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 25, pp. 814-824.
- Contin, A., Cavallini, A., Montanari, G., Pasini G., Puletti F. (2002). Digital detection and fuzzy classification of partial discharge signals. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 9, pp. 335-348.
- Culbert, I., Dhirani, H., Stone, G.C, (1989). Handbook to assess the insulation condition of large rotating machines. *EPRI Report*, EL.5036, Vol. 16.
- Haddad A., Warne D. (2004). *Advances in High Voltage Engineering*, 1st ed., pp 139–190, Herts, Stevenage, United Kingdom.
- Hauschild W., Lemke E. (2019). *High-Voltage Test and Measuring Techniques*, 2nd ed., pp 169–251, Springer, Radeburg, Germany.
- International Council on Large Electric Systems (CIGRE) Study Committee 23 (now B3). Diagnostic methods for GIS insulation systems. *CIGRE Session*. Paper 15/23-01.
- International Council on Large Electric Systems (CIGRE) Working Group D1.37. (2016). Guidelines for partial discharge detection using conventional (IEC 60270) and unconventional methods. *CIGRE Brochure 662*. CIGRE
- International Council on Large Electric Systems (CIGRE) Working Group D1.29. (2017). Partial Discharges in Transformers. *CIGRE Brochure 676*. CIGRE
- International Electrotechnical Commission. (2015). IEC 60270:2015 - High-voltage test techniques - Partial discharge measurements. *IEC*.
- Ryan H.M., (2013). *High-voltage Engineering and Testing*, 3rd ed., pp 599–614, Herts, Stevenage, United Kingdom.