



**XXIII SNTPEE  
SEMINÁRIO NACIONAL  
DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA**

FI/GTM/21  
18 a 21 de Outubro de 2015  
Foz do Iguaçu - PR

**GRUPO – XIII**

**GRUPO DE ESTUDO DE TRANSFORMADORES, REATORES, MATERIAIS E TECNOLOGIAS EMERGENTES -  
GTM**

**ANÁLISE DE DESCARGAS PARCIAIS EM TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA EM INSTALAÇÕES  
ENERGIZADAS DE ALTA TENSÃO**

**Marcelo E. de C. Paulino(\*)  
Braga**

**Adimarco**

**Leonardo B. Giacchetta**

**Adimarco**

**Guilherme S. Penariol**

**Adimarco**

**Mauro**

**Adimarco**

**RESUMO**

Esse trabalho mostra um sistema de aquisição síncrono multicanal de descargas parciais, onde é possível obter dados a partir de fontes separadas descargas parciais, a fim de fazer medições mais confiáveis. No teste de descargas parciais, a separação de múltiplas fontes de ruídos é importante para uma análise adequada de descargas parciais. Sistemas de medição de múltiplos canais sincronizados fornecem técnicas novas e avançadas de avaliação de descargas parciais como 3CFRD, 3PTRD e 3PARD. São mostrados resultados de teste em transformadores de potência.

**PALAVRAS-CHAVE**

Transformador de potência, diagnóstico, descargas parciais, sincronização, testes e ensaios.

**1.0 - INTRODUÇÃO**

A verificação regular das condições de transformadores de potência torna-se cada vez mais importante, seja no comissionamento, nas atividades de manutenção preventiva ou processos de reparo. Torna-se imperativo a busca de procedimentos e ferramentas que possibilitem a obtenção de dados das instalações de forma rápida e precisa.

A norma IEC 60270 define descargas parciais como descargas elétricas localizadas na união entre dois condutores, através do isolamento, que pode ou não ocorrer próximo de um condutor. Descarga Parcial é, em geral, a consequência de uma concentração de estresses elétricos em isolamentos ou em superfície de isolamentos. A medição síncrona de múltiplos canais é uma poderosa ferramenta na detecção, localização e separação de sinais de descargas parciais de ruídos de fundo quando da realização de testes em transformadores trifásicos, motores, geradores e cabos. Tal método permite que o mesmo sinal seja detectado em mais de um medidor simultaneamente. Isto é fundamental para o processo de localização e diferenciação das diversas fontes geradoras de descargas internas que podem ser provenientes do efeito corona, descargas do tipo superficiais, descargas geradas em gaps que são comuns principalmente em geradores e motores e descargas provenientes dos próprios elementos do circuito de medição como a fonte de tensão que alimenta o circuito, filtros, transformadores elevadores, buchas capacitivas e capacitores de acoplamento.

Neste trabalho são apresentadas definições de descargas parciais internas que são geradas devido a contaminação do isolante, defeito de fabricação de resinas e até mesmo deterioração de componentes. Os requisitos de hardware para o teste para a realização de medidas adequadas são observados. As características como taxas de amostragens e imunidade a ruídos são especialmente tratadas na concepção do sistema de teste descrito. Esse trabalho apresenta um novo método que trata a separação entre o sinal medido e o ruído provocado por interferências externas. Assim é possível separar ruídos de diferentes fontes de descargas parciais localizadas no mesmo objeto sob teste. Os sinais de descargas parciais são frequentemente sobrepostos por pulsos de ruído, fato que faz uma análise dos dados de DP mais difícil para os especialistas e sistemas de software especializados.

(\*) Av das Américas, n° 500 – sala 202 - Bloco 10 – CEP 22.640-100 Rio de Janeiro, RJ – Brasil  
Tel: (+55 21) 24947140 – Cel: (+55 21) 993741232 – Email: mec paulino@yahoo.com.br

Com o desenvolvimento contínuo de unidades de teste e monitoramento de descargas parciais, os sistemas de análise precisam se tornar mais eficazes e automáticos. Esse trabalho mostra um sistema de aquisição síncrono multicanal de descargas parciais, onde é possível obter dados a partir de fontes separadas de descargas parciais, a fim de fazer medições mais confiáveis. No teste de descargas parciais, a separação de múltiplas fontes de ruídos é importante para uma análise adequada de descargas parciais. Sistemas de medição de múltiplos canais sincronizados fornecem técnicas novas e avançadas de avaliação de descargas parciais como 3CFRD, 3PTRD e 3PARD.

O trabalho ainda mostra exemplos de testes de aplicação da técnica descrita em transformador de potência desenergizados em subestações de 500kV e 345kV, dentre outros resultados.

## 2.0 - MEDIDAS DE DESCARGAS PARCIAIS

Uma Descarga Parcial (DP) é caracterizada como uma descarga elétrica de pequena intensidade que ocorre em uma região de imperfeição em um meio dielétrico sujeito a um campo elétrico. O caminho formado pela descarga não une as duas extremidades dessa região de isolamento de forma completa. A ocorrência de descarga parcial depende da intensidade do campo aplicado nas extremidades desse espaço, além do tipo de tensão de teste aplicada (tensão alternada, tensão contínua, sinal transitório ou impulso).

A norma IEC 60270 faz referência à medida de descargas parciais em sistemas e equipamentos elétricos com tensões alternadas de até 400 Hz. Nos isolamentos desses equipamentos ocorre o fenômeno de avalanche de elétrons nos espaços vazios. Desta forma as descargas em dielétricos podem ocorrer somente em espaços gasosos ou fissuras nos materiais sólidos ou bolhas no dielétrico líquido.

Portanto, descargas parciais são iniciadas geralmente se a intensidade do campo elétrico dentro do espaço vazio exceder a intensidade do campo do gás contido nesse espaço. O pulso de carga criado geralmente tem valores em torno de alguns pC até na ordem de nC, dependendo do equipamento que está sendo analisado.

A norma IEC 60270 define Descarga Parcial como: “Descargas elétricas localizadas que simplesmente faz a ligação parcial entre dois condutores através do isolamento. Descarga Parcial é, em geral, a consequência de uma concentração de tensão elétrica local no isolamento ou sobre uma superfície de isolamento. Geralmente, tais descargas aparecem como pulsos com a duração menor que 1  $\mu$ s”.

As descargas parciais podem ser classificadas de acordo com a natureza da sua origem. Podem ser do tipo superficial, corona, buraco interno, contaminante em resinas, bolhas de gases em dielétricos líquidos entre outros.

A norma IEC 60270 também define três circuitos básicos para que se tenha o melhor desempenho possível para um circuito acoplador. Isto é realizado para garantir a repetibilidade das medidas. Eles se diferenciam pelo arranjo físico fazendo com que cada um tenha características específicas. Seu uso é recomendado de acordo com características do objeto medido, do comportamento do ruído ambiente, da viabilidade de desconexão do objeto medido, entre outros. Este trabalho trata apenas do circuito com acoplamento capacitivo utilizado nas medições apresentadas. Esse acoplamento é o mais utilizado devido sua alta eficiência, sendo mais indicado para a realização das medidas.

O acoplamento capacitivo forma um divisor de tensão que reduz o valor de tensão aplicado no objeto testado. A figura 1 mostra o circuito com acoplamento capacitivo onde o capacitor de acoplamento  $C_k$  deve ser dimensionado para transferir todos os sinais com espectro de frequência superior a frequência de corte que ocorram nos terminais da capacitância em teste  $C_a$  para o quadripolo  $D_c$ .

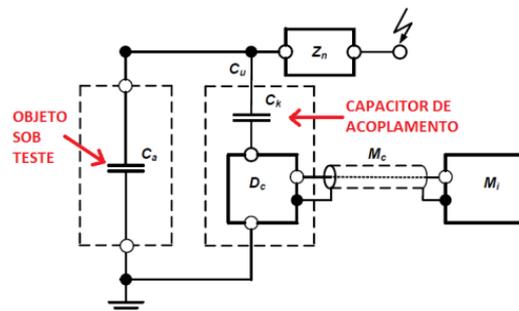


Figura 1 – Circuito com acoplamento capacitivo.

### 2.1 Utilização de Sistemas Digitais para Medida de Descargas Parciais

O uso de sistemas digitais de medida de descargas parciais melhorou a sensibilidade e possibilitou a repetibilidade das medidas. Sua principal característica é a aplicação de processamento síncrono de sinais dessas descargas em múltiplos canais em uma larga banda de frequências. Isto torna possível e mais eficaz a discriminação entre os eventos, sejam descargas parciais ou ruídos. Capacita também o sistema de teste para identificação dos tipos de falhas e sua localização.

Os instrumentos digitais possuem larga faixa de frequência, com ajuste das frequências de corte inferior e superior realizadas de acordo com a escolha do usuário. Em comparação com os instrumentos convencionais analógicos de banda estreita, a resolução para medida dos pulsos de descargas parciais foi significativamente aperfeiçoada. Geralmente os instrumentos analógicos consistiam em um filtro de passagem de banda e um indicador de nível de pico, não possibilitando a separação de eventos. A figura 2 mostra um exemplo de projeto para um sistema de

medição digital. O projeto desse sistema é modular, constituído de mais de uma unidade de aquisição de dados. Essas unidades podem ser conectadas a um computador. A conexão de fibra ótica permite grandes distâncias entre a unidade de aquisição e o computador, inclusive entre as outras unidades conectadas ao sistema em teste. A figura 3 mostra o esquema dos componentes do sistema de teste utilizado neste trabalho.

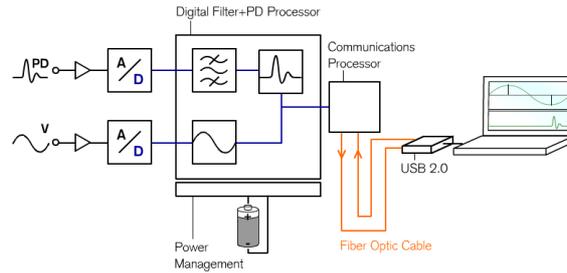


Figura 2 – Representação de esquema microprocessado de medida de descargas parciais.

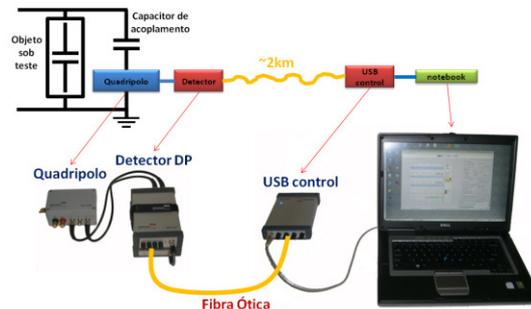


Figura 3 – Representação esquema de componentes do sistema de teste de descargas parciais.

## 2.2 Diagrama de Relação de Amplitude em 3 Fases (3PAR D)

A aquisição síncrona de dados de descargas parciais para diversos pontos de medida em um cabo ou em um equipamento de alta tensão permite uma comparação da amplitude de cada pulso aquisitado. As relações das amplitudes dos pulsos são constantes para diferentes fontes de descargas parciais e para diferentes fontes de ruído. Isto ocorre devido o caminho original de propagação dos pulsos. Para ocorrências internas específicas os pulsos aquisitados apresentam diferenças. Assim, a primeira etapa para a localização de descargas parciais é a separação das fontes. Durante a medição de descarga parcial, em tempo real, são criados Diagramas Trifásicos de Relação de Amplitude (do inglês 3-Phase-Amplitude-Relation-Diagram - 3PAR D). Vale ressaltar que a aquisição de dados síncrona de descarga parcial é imprescindível para avaliação dos dados com 3PAR D.

O sistema utilizado neste trabalho possui um método de medição sequencial de três canais múltiplos. A primeira etapa é calcular o logaritmo do valor absoluto de todos os três pulsos das descargas. Na segunda, cada pulso é transformado em um fasor relacionado à sua fase de origem. A figura 4 mostra o mecanismo de geração do 3PAR D. À direita os sinais de tensão de cada fase são observados.

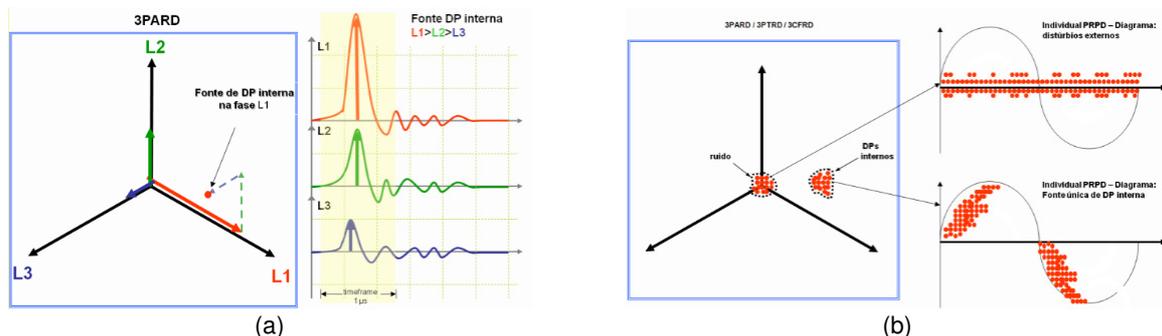


Figura 4 – Criação de 3PAR D usando sinais de tensão de descargas parciais

Quando os fasores relativos a cada fase medida são transportados para o diagrama, é obtida a localização da fonte de descarga parcial interna pela soma vetorial, conforme mostrado no quadro a esquerda. Um único sinal de descarga parcial é representado por um ponto. Cada agregação de pontos calculados (clusters) representa a única fonte de descarga parcial. Posteriormente, cada grupo pode ser facilmente separado e mostrado sem efeitos de sobreposição, transformado em uma PRPD clássica ou de qualquer outro diagrama de pulso para avaliação em tempo real. O sistema de teste utilizado fornece a ferramenta de criação de cluster, ou seja, áreas determinadas no 3PAR D de onde são separados os sinais que, a priori, aparecem sobrepostos.

### 2.3 Diagrama de Relação de Frequências em 3 Canais (3CFRD)

O diagrama da relação de frequências correlaciona a medida de descarga parcial realizada em três frequências simultaneamente. As amplitudes do sinal são medidas em cada frequência. Assim, o sinal de saída de três filtros com diferentes frequências centrais e/ou larguras de banda permite análise do pulso em cada um dos três pontos de medida. Isto se deve ao fato de que, devido à descarga física, diferentes tipos de descargas parciais ou pulsos de ruído têm espectros de energia diferentes. Em contraposição aos métodos 3PARD e 3PTRD, a avaliação pelo 3CFRD não exige necessariamente três unidades independentes de aquisição, pois pode ser usado com uma única unidade de aquisição. Em geral, o primeiro filtro de passagem de banda deve ser sintonizado para uma frequência central baixa, para possibilitar o atendimento às normas técnicas IEC ou IEEE.

A segunda e terceira passagens de banda são sintonizadas para frequências mais elevadas, determinadas pelo usuário. Mediante a escolha correta das frequências para passagem de banda, torna-se possível efetuar medições de descargas parciais em conformidade com as normas técnicas. Ao mesmo tempo se remove praticamente toda a interferência sobreposta. O 3CFRD correlaciona a saída dos três filtros de passagem de banda de uma maneira semelhante ao 3PARD com a utilização das amplitudes de pulso de 3 canais de descarga parcial. A figura 5 mostra um exemplo de representação FFT de pulsos de descarga parcial com a determinação de três filtros de passagem de banda.

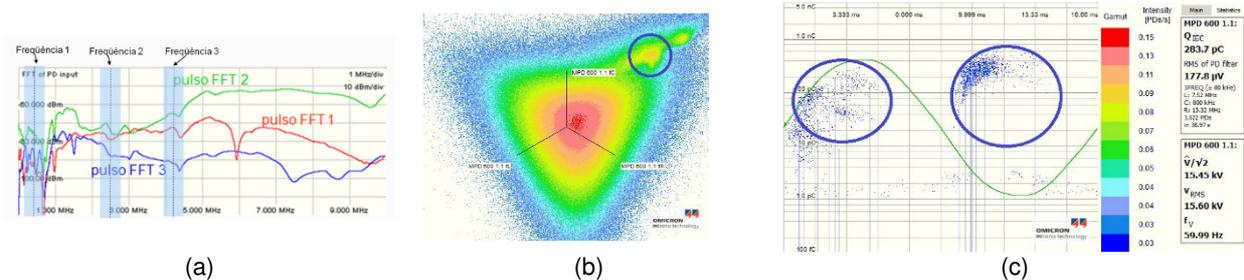


Figura 5 – Diagrama de Relação de Frequências em 3 Canais (3CFRD). (a) Exemplo de representação FFT para classificação dos pulsos de descargas parciais com a determinação de três filtros de passagem de banda; (b) 3CFRD com marcação de um cluster; (c) PRPD com aplicação de filtro mostrando descarga parcial interna.

### 3.0 - ESTUDO DE CASO: TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA TRIFÁSICO 14,4 / 400 KV – 170 MVA – COEMSA

O sistema de medição utilizado, MPD600 da OMICRON, é composto de três canais de medidas simultâneas e sincronizadas permitindo medir, separar e avaliar as descargas provenientes de cada fase do transformador.

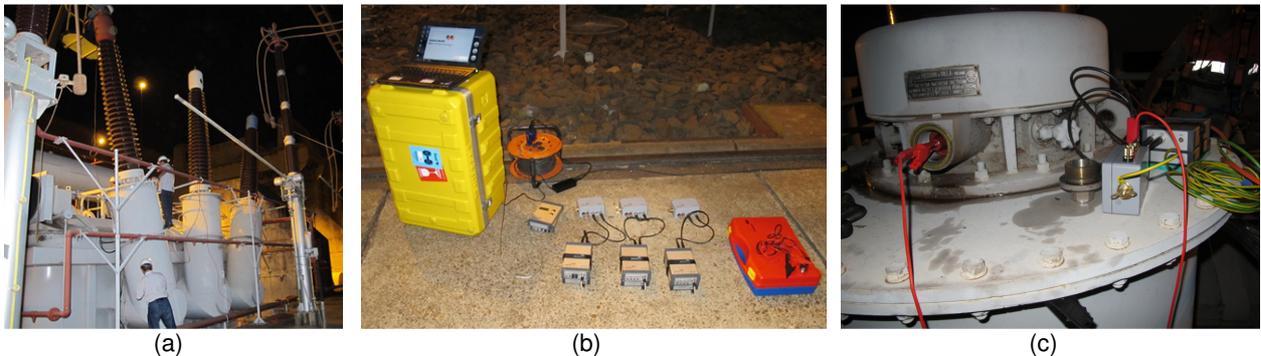


Figura 6 – Equipamento em teste: (a) Transformadores sob teste sendo preparados; (b) Equipamento de Teste MPD600; (c) Conexões no tampo da bucha.

### 3.1 Medições e Análise dos Resultados

#### 3.1.1. Resultados de Medida Fase A

A seguir são apresentadas o diagrama PRPD inicial da fase A. Pode-se notar que sem a separação das fontes de descargas, ruídos e outras ocorrências fica difícil a definição do tipo de ocorrência e sua respectiva quantificação. A figura 7a mostra a medida sem separação dos eventos e a figura 7b mostra o mesmo diagrama após a separação. Adiante temos as figuras mostrando as etapas de filtragem e separação das fontes de descargas na Fase A.

Nota-se que a medida sem a separação de eventos mostra grande imprecisão. Isto ocorre porque não é possível identificar com clareza os pulsos referentes apenas às descargas parciais referentes a defeitos internos no transformador. Desta forma é possível, apenas, obter uma imagem geral com todas as ocorrências e com alto nível de interferência. Assim, utilizando a técnica de análise incorporada ao sistema de teste MPD600, criando um diagrama 3PARD. A seguir podem-se observar as várias etapas de geração até a total eliminação do ruído de

fundo e outras descargas indesejadas. Após a separação dos eventos, foi encontrada uma fonte de descarga parcial de aproximadamente 9 [nC] na fase A.

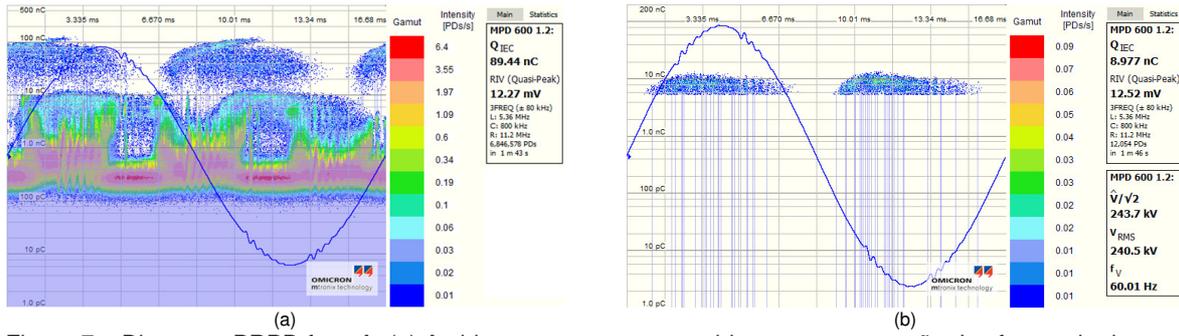


Figura 7 – Diagrama PRPD fase A: (a) Ambiente extremamente ruidoso sem separação das fontes de descargas parciais; (b) Diagrama PRPD após filtragem – Descargas parciais de cerca de 9 nC

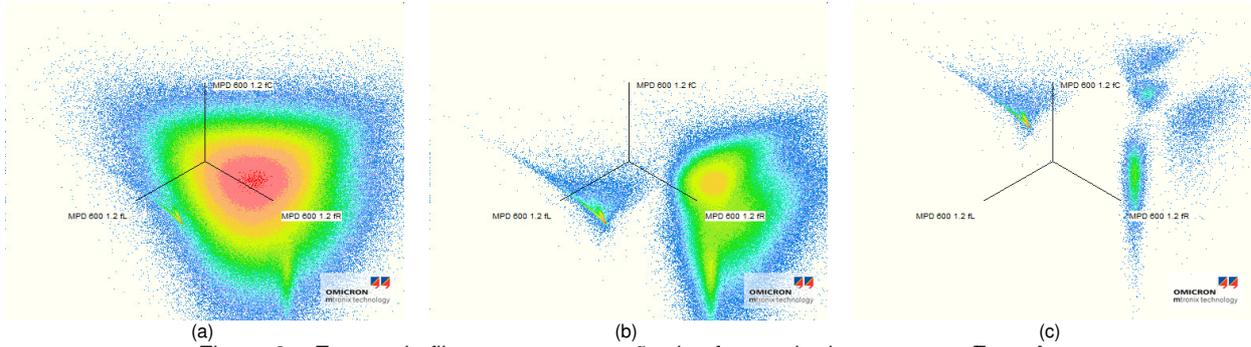


Figura 8 – Etapas de filtragem e separação das fontes de descargas na Fase A.

### 3.1.1. Resultados de Medida Fase B

Com a repetição do procedimento na fase B, foi realizada a separação de descargas parciais, identificando descargas do tipo superficial, descarga do tipo corona e descarga parcial interna. A seguir é mostrado o histograma inicial sem a separação dos eventos.

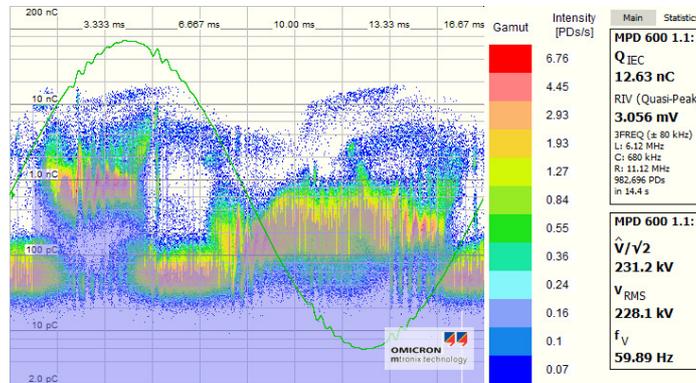


Figura 9 – Diagrama PRPD inicial fase B – Ambiente extremamente ruidoso sem separação das fontes de descargas parciais.

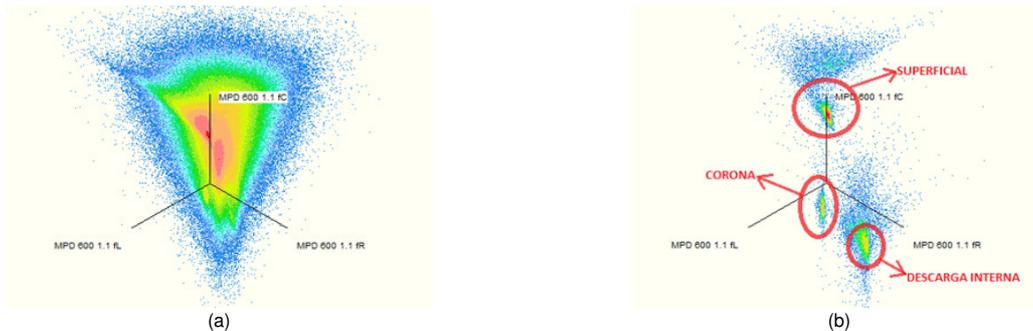


Figura 10 – Etapas de filtragem e separação das fontes de descargas na Fase A.

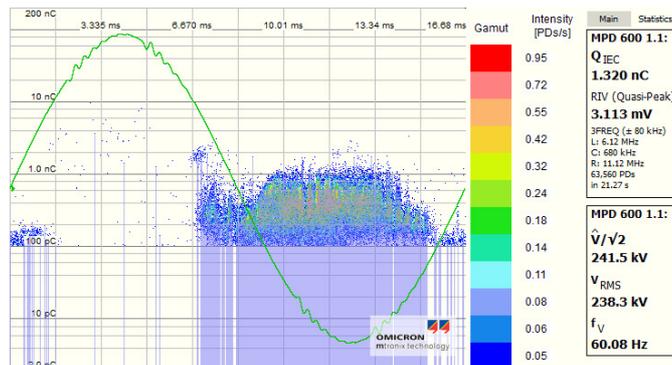


Figura 11 – Diagrama PRPD após filtragem e separação das fontes de descargas na Fase B - Descargas tipo Corona

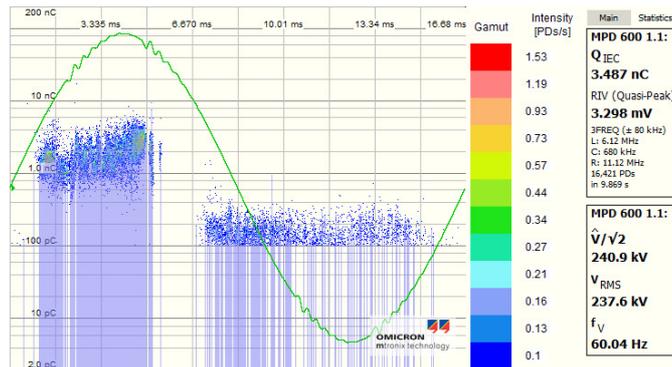


Figura 12 – Diagrama PRPD após filtragem e separação das fontes de descargas na Fase B - Descargas tipo Superficial

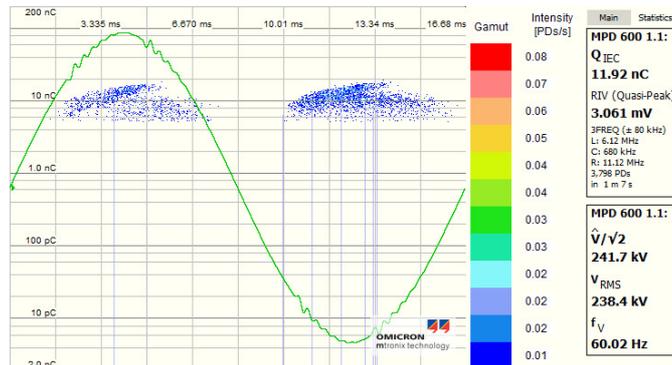


Figura 13 – Diagrama PRPD após filtragem e separação das fontes de descargas na Fase B - Descargas internas

#### 4.0 - ESTUDO DE CASO: AUTOTRANSFORMADOR 345 KV - 50 MVA

Utilizando-se o mesmo sistema de medição e procedimentos descritos anteriormente foram encontradas duas fontes de descargas parciais com superposição de descargas por cavidade e descargas parciais do tipo superficial. A ocorrência dos dois tipos de descargas associadas (juntas no mesmo cluster) remete diretamente às descargas originadas por excesso de umidade no dielétrico e/ou impregnação do dielétrico pobre ou envelhecida.

A figura 14 mostra os diagramas 3CFRD após as etapas de filtragem e a determinação dos clusters, apontando para 3 regiões de ocorrência de descargas parciais.

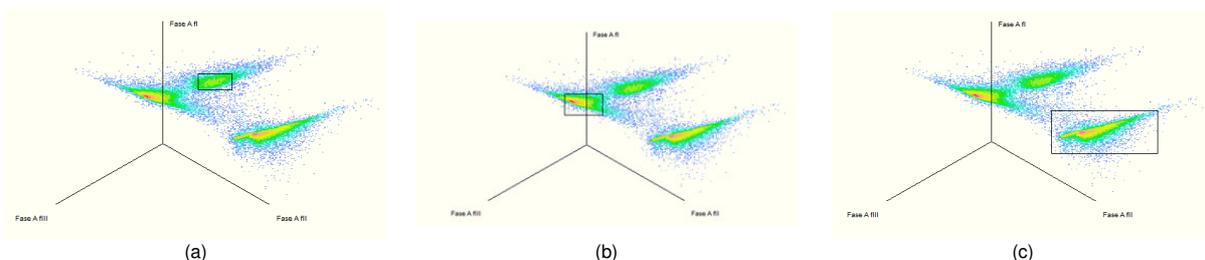


Figura 14 – Etapas de filtragem e separação das fontes de descargas: (a) Descargas parciais superpostas por cavidade e superficial; (b) Descargas parciais superpostas por cavidade e superficial, segunda ocorrência; (c) Descargas internas originadas por partículas livres no óleo.

As figuras 15 a 17 mostram os diagramas PRPD com a separação das fontes relacionadas aos cluster mostrados na figura 14.

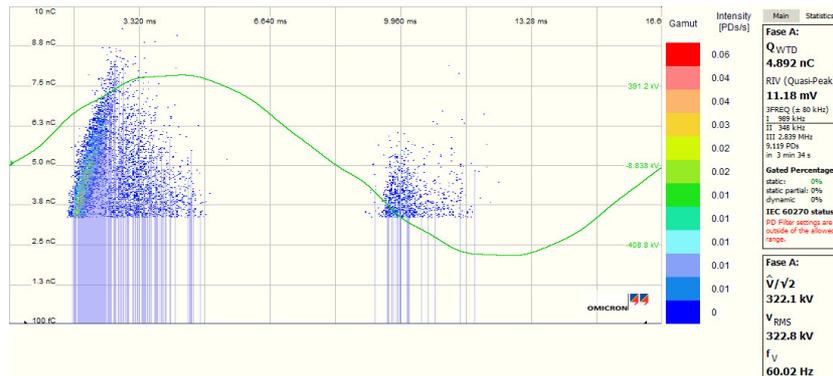


Figura 15 – Diagrama PRPD após filtragem e separação das fontes de descargas – Primeiro cluster com descargas parciais superpostas por cavidade e superficial

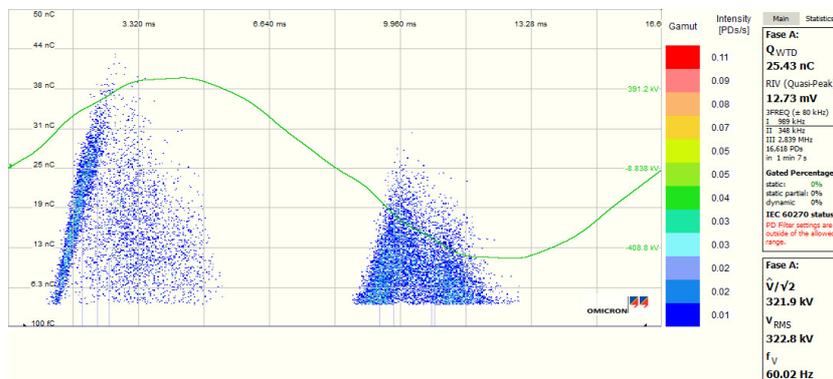


Figura 16 – Diagrama PRPD após filtragem e separação das fontes de descargas – Segundo cluster com descargas parciais superpostas por cavidade e superficial.

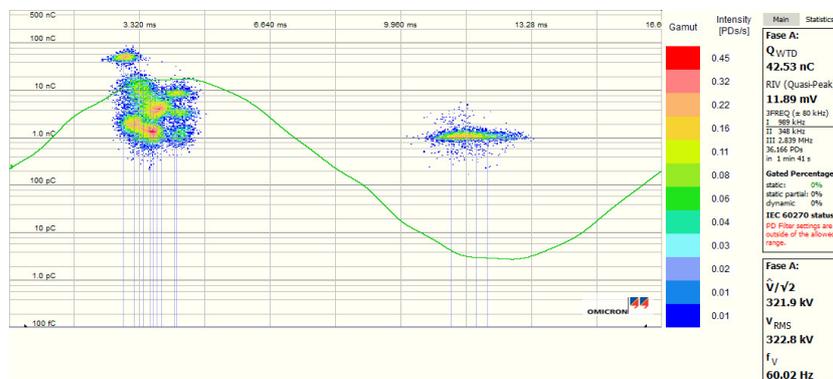


Figura 17 – Diagrama PRPD após filtragem e separação das fontes de descargas – Terceiro cluster com descargas internas originadas por partículas livres no óleo.

Vale destacar que um dos principais problemas na detecção e medida de descargas parciais, além da separação dos eventos e tipo de descargas encontradas, é a eliminação dos ruídos. Um ambiente poluído com alto índice de ruídos podem impossibilitar a medida. E isso frequentemente ocorre em medições em campo e laboratórios de testes pouco estruturados.

Os resultados obtidos nesse estudo de caso mostram:

- Primeira fonte de descargas parciais superpostas por cavidade e superficial: valor medido de 4,89 nC.
- Segunda fonte de descargas parciais superpostas por cavidade e superficial: valor medido de 25,43 nC.
- Descargas internas originadas por partículas livres no óleo: valor medido de 42,53 nC

A figura 16 mostra o diagrama PRPD com o ruído de fundo. A medida indica 19,96 nC. Neste caso, se não fosse possível a separação dos eventos, qualquer ocorrência de descargas parciais abaixo do valor do ruído de fundo não poderia ser detectada.

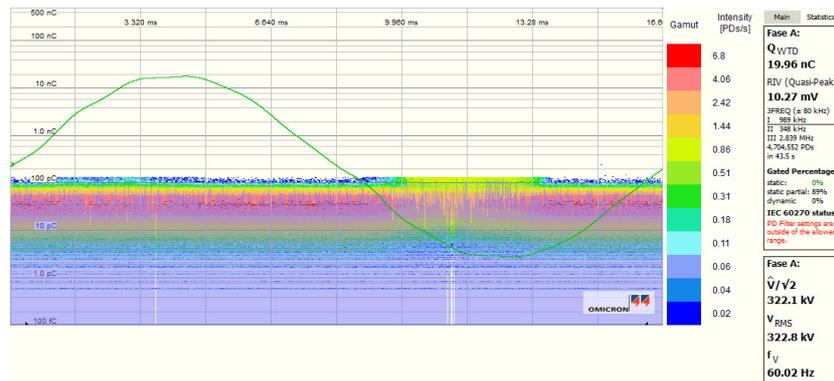


Figura 18 – Diagrama PRPD mostrando o ruído de fundo.

## 5.0 - CONCLUSÃO

O teste de descarga parcial em campo com o equipamento e procedimentos descritos se mostrou extremamente satisfatório. Foi possível constatar e comprovar o correto e eficaz funcionamento dos algoritmos de separação de eventos de descargas que estão presentes em qualquer teste em instalações de alta tensão, tanto em laboratório, quanto em campo, principalmente.

Devido ao fato do equipamento utilizado ser totalmente digital, foi possível escolher a melhor frequência de medição de acordo com o ambiente, pois permitiu a configuração dos filtros digitais de acordo com cada situação. Segundo os resultados obtidos, foram encontradas descargas parciais de toda ordem, com vários níveis de intensidade e diferentes fontes geradoras, conforme descrito anteriormente.

## 6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) F. H. Krueger. "Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment". 1.ed. London: Butterworths, 1989.
- (2) Paulino, M. E. C., Giacchetta, L., "Avaliação de Descargas Parciais com Múltiplos Canais Sincronizados" XXI SNPTTE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Florianópolis, SC, Brasil, 2011.
- (3) Paulino, M. E. C., "Estado da Arte da Medição com Múltiplos Canais Sincronizados para Avaliação de Descargas Parciais" in Proc. 2010 IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conf., São Paulo, SP, Brazil, 2010
- (4) IEC 60270: High-voltage test techniques – Partial discharge measurements, third edition, 2000
- (5) Lemke, E. on behalf of WG D1.33: "Guide for Partial Discharge Measurements in Compliance to IEC 60270" CIGRÉ WG D1.33, Technical Brochure 366, Paris, 2008.
- (6) Cigré WG 21.03: "Recognition of Discharges", Electra magazine, no. 11, Paris, 1969.
- (7) Omicron electronics: "MPD 600 User Manual, Version: MPD600.AE.2", Austria, 2009.

## 7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Marcelo Eduardo de Carvalho Paulino é Engenheiro Eletricista e Especialista em Manutenção de Sistemas Elétricos pela EFEI. Membro ativo de sociedades profissionais nacionais e internacionais. Como Cigré e ABNT/CB-03 – COBEI (Comitê Brasileiro de Eletricidade). Representante brasileiro no TC57 da IEC. Autor e coautor de mais de 100 trabalhos técnicos em eventos no Brasil e no exterior. Professor convidado em diversos cursos de pós-graduação. Atualmente é gerente técnico da Adimarco, no Rio de Janeiro. (marcelo@adimarco.com.br; mecpaulino@yahoo.com.br)