

ANÁLISE DE DESCARGAS PARCIAIS (PDA) APLICAÇÃO EM PCH – CASOS BRASILEIROS DE SUCESSO

Marcus Eugênio Santos de Almeida
Polux Tecnologia em Equipamentos Ltda.

RESUMO

A Análise de Descargas Parciais (PDA), já há algum tempo, está consolidada como uma das principais ferramentas da manutenção preditiva com respeito aos geradores das usinas hidrelétricas (UHE) brasileiras e mundiais. É praticamente consenso na manutenção de usinas que a análise PDA fornece informações preciosas para se detectar diversos tipos de problemas acontecendo nos enrolamentos do estator do gerador, e com isso, a possibilidade de se providenciar um gerenciamento adequado das falhas evidenciadas – o quê e como fazer – para se evitar danos custosos a tempo.

Entretanto, até muito recentemente, havia uma quase unanimidade de que aplicar essa tecnologia em geradores de menor potência, utilizados em pequenas centrais hidrelétricas (PCH), era inviável ou proibitivo. A principal razão estava relacionada ao custo da instalação do conjunto de acopladores capacitivos, os “sensores” que possibilitam a aquisição dos pulsos de alta frequência e posterior análise das descargas parciais. Com a nova tecnologia digital, que dispensa a utilização de um acoplador por circuito paralelo de cada fase para uma rejeição analógica de ruídos, modernos sistemas PDA utilizam apenas três acopladores por gerador, um por fase, independente do tamanho físico e potência do mesmo. Assim, esses custos tornaram-se muito viáveis para instalação permanente em qualquer gerador.

Recentemente, usando esse conceito, medições foram efetuadas em diversos geradores de PCH de uma grande empresa no Brasil, através da instalação provisória dos acopladores capacitivos, permitindo assim a montagem de um banco de dados inicial, e a descoberta de diversos problemas, de menor ou maior gravidade, em praticamente todos os geradores. Tais problemas descobertos não eram esperados pelo usuário, uma vez que os testes que normalmente aplicava nos programas de manutenção se limitavam a apenas testes off-line, ou seja, com a máquina parada, desligada do sistema. Tais testes, como sabemos, levam em conta apenas os estresses elétricos e, portanto, são extremamente limitados, uma vez que não consideram os diversos outros estresses a que a máquina é submetida durante sua operação nominal, como corrente, temperatura, forças eletromagnéticas e mecânicas, contaminações químicas, umidade, erros de projeto e de montagem, etc.

Os resultados repercutiram internamente, e diversas melhorias estão sendo discutidas para incrementar os procedimentos de manutenção e operação. O presente estudo detalha a aplicação da montagem provisória dos acopladores capacitivos em geradores em PCH, e exhibe os resultados de alguns casos analisados nas máquinas desse usuário.

1. A Medição das Descargas Parciais

O sistema de isolamento de toda máquina rotativa de alta tensão está sujeito a diversos processos de degradação, como o envelhecimento, erros de fabricação e montagem, procedimentos inadequados de manutenção e operação, e outros. Esses processos causam falhas ao longo do tempo, que podem levar a uma ruptura dielétrica (curto-circuito) inesperada e tempos dispendiosos de parada para correção e reparos, além da perda de produção. Para evitar falhas, é importante conhecer as condições do isolamento ao longo de toda a vida útil de serviço da máquina. A análise PD (do inglês Partial Discharges) é reconhecida como um dos indicadores mais confiáveis dessa degradação do isolamento nos ativos de alta tensão.

De acordo com a definição da IEC 60270 ⁽¹⁾, PD é uma descarga elétrica localizada que apenas parcialmente rompe o isolamento entre os condutores e que pode ou não ocorrer adjacente a um condutor. São chamadas “parciais” uma vez que ainda não há uma ruptura completa (uma descarga total, ou curto-circuito), e ocorrem porque a rigidez dielétrica do ar (3 kV/mm) é menor que a da mica (aproximadamente 300 kV/mm) que compõe a isolação dos enrolamentos.

As PD criam pequenos pulsos de tensão em alta frequência que viajam pelos enrolamentos e que podem ser medidos e analisados por um sistema de monitoramento PD. Além da característica dielétrica, as PD também são o resultado de danos causados por outras forças agindo nos enrolamentos, como as de características térmicas, mecânicas, eletromagnéticas, químicas ou do meio ambiente. O desenvolvimento progressivo das atividades PD é o maior sintoma da deterioração da isolação. Quando se iniciam, também contribuem para o envelhecimento do sistema dielétrico da máquina pela erosão do sistema de isolação.

A falha da isolação (curto-circuito) não é possível de ser prevista, uma vez que diversos fatores podem contribuir mais ou menos para essa falha. Assim, o monitoramento PD permite ao usuário acompanhar a degradação da isolação ao longo do tempo, fornecendo subsídios para a melhor tomada de decisão. O importante é detectar um mecanismo de falha em andamento e o quão ruim e urgente o problema é. Como nas isolações aplicadas em grandes máquinas rotativas há um material de excelente resistência às descargas – a mica – a degradação da isolação é geralmente lenta. Por causa desse relativamente lento processo de envelhecimento e considerando que 27% das falhas relatadas em motores e geradores são devidas ao estator ⁽²⁾, é que a análise PD faz sentido.

Os pulsos PD em alta frequência são caracterizados por um rápido tempo de rampa e duração extremamente curta, quando comparados à forma de onda senoidal em 60 Hz. Já os ruídos e/ou interferências são um problema, pois possuem características similares aos pulsos PD. A posição do pulso com respeito à tensão CA, espectro de frequência e taxa de repetição são alguns dos principais atributos que distinguem pulsos PD dos ruídos. Os ruídos surgem de “fontes de ruídos” tais como corona de linhas de transmissão, centelhamento de conexões elétricas e anéis coletores, excitatrizes estáticas, seccionadoras, transformadores, etc.

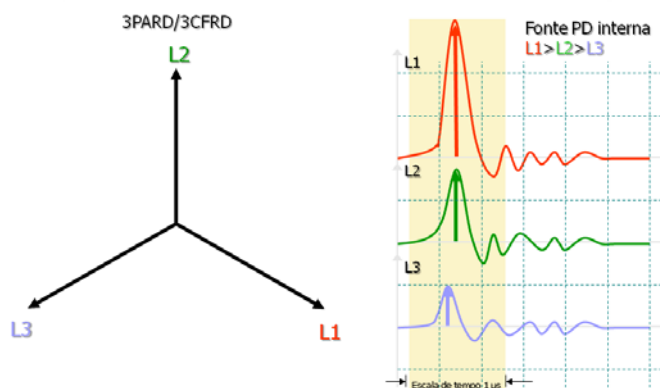
Assim, ruídos são sinais similares aos sinais PD, registrados pela unidade de aquisição de dados PDA, porém vindos de uma fonte externa à máquina. O ruído, se não separado adequadamente, pode mascarar leituras PD do estator

causando falsas indicações. Ou seja, com o ruído não separado, o teste é totalmente subjetivo. Com o ruído adequadamente separado, o teste é objetivo.

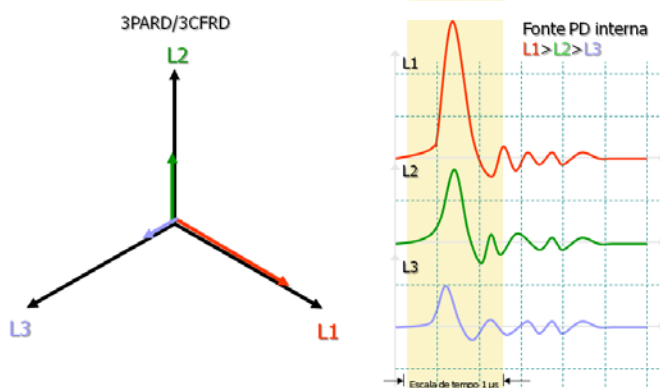
Para as análises aqui relatadas, foi utilizado um instrumento portátil, ou unidade de aquisição de dados PD modelo OMS 605 OMICRON, descrito como “Sistema Digital” pela norma IEC-60034-27-2 ⁽³⁾, que possui três canais para a aquisição das atividades PD das três fases do gerador. Cada canal contém filtros digitais, e as atividades PD são medidas sincrônica e simultaneamente em todas as fases, permitindo visualizar quaisquer influências entre fases (diretas ou indiretas) e efetuar comparações de modo objetivo.

Para detectar os eventos PD, as saídas de três acopladores capacitivos de 2 nF são conectadas às entradas do instrumento através de cabos triaxiais (blindagem dupla) de modo a minimizar o impacto das interferências externas.

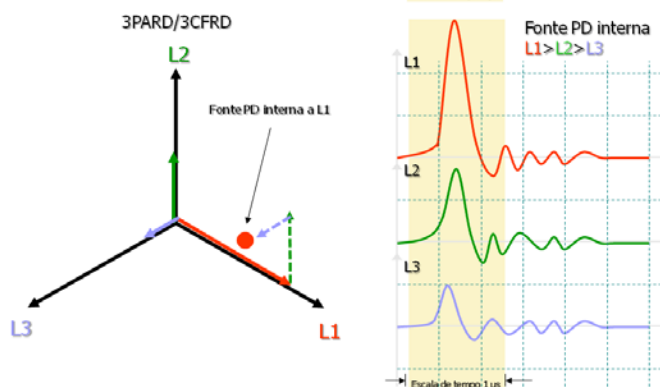
O instrumento possui excelente capacidade de minimizar ou remover ruídos externos para obter alta sensibilidade nas medições, separando os diferentes tipos de fontes PD agindo nos enrolamentos através de avançada tecnologia digital denominada 3PARD (do original 3 Phase Amplitude Relation Diagram). A técnica visualiza a relação entre as amplitudes de um único pulso em uma fase e os sinais gerados por interferência no acoplamento das outras fases.



Para melhor entendimento da técnica 3PARD, consideremos o seguinte pulso PD, e as amplitudes que apresentou na sua fase de origem (L1) e a interferência (radiação ou acoplamento capacitivo) nas outras duas fases.

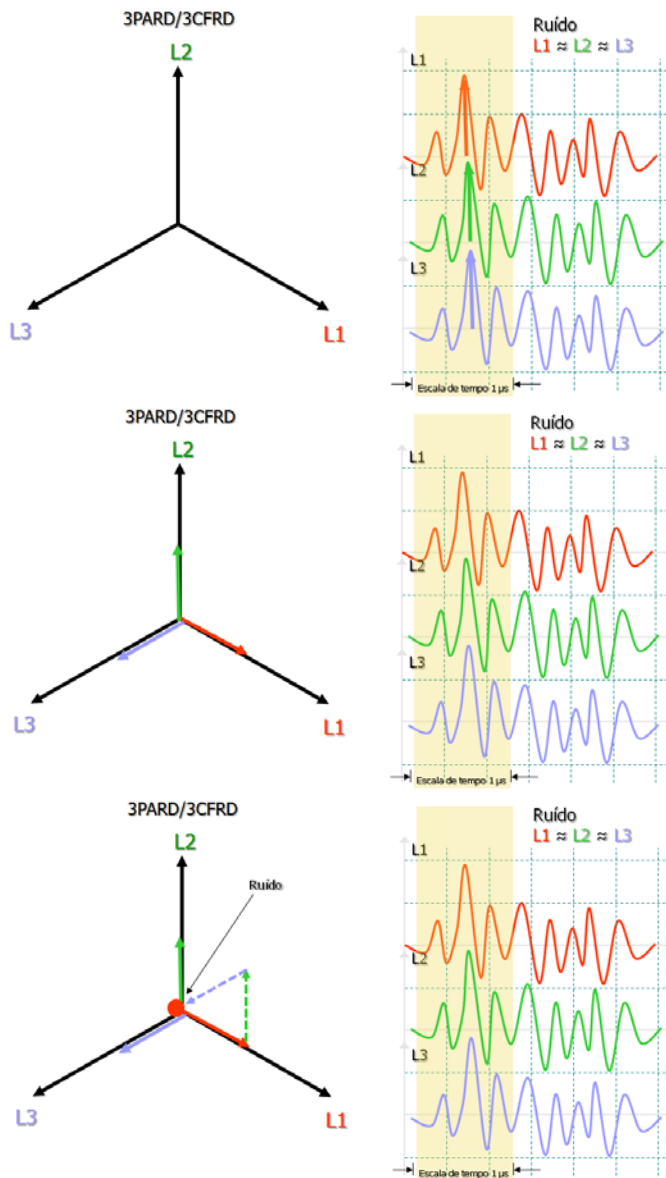


As ferramentas de análise 3PARD transferem as amplitudes das três fases para um diagrama estrela que facilita a visualização da localização de cada pulso PD.



Para o pulso em análise, como sua amplitude é maior próxima ao ramo L1 da estrela, fica bastante fácil verificarmos que sua origem está na Fase L1, porém refletindo-se ou influenciando de algum modo também as Fases L2 e L3.

Isso é extremamente importante, pois fornece inclusive informações diretas do tipo das atividades PD (fase-terra ou fase-fase). Devido à propagação complexa e às características de acoplamento dos pulsos, cada fonte PD, ou cada interferência externa (ruído), possui uma característica única na análise 3PARD.



Consideremos agora o seguinte pulso de alta frequência, e as amplitudes que apresentou nas três fases.

Do mesmo modo, transferindo as amplitudes para o diagrama estrela, é fácil verificar que as amplitudes são muito similares nas três fases, ou seja, sem predominância de alguma fase sobre outras.

Para o pulso em análise, a sobreposição praticamente sobre o zero indica que sua amplitude foi registrada igual e simultaneamente nas três fases e que, portanto trata-se de um ruído externo.

Isto é, interferências elétricas e/ou ruídos externos geralmente possuem pulsos similares aos PD, porém ocorrem com quase a mesma amplitude nas três fases da máquina. Repetindo-se instantaneamente o procedimento para um grande número de pulsos, as fontes PD dentro da máquina, assim como os ruídos externos, aparecem como concentrações bastante claras e distintas de pontos em diagramas 3PARD, chamados de *clusters*.

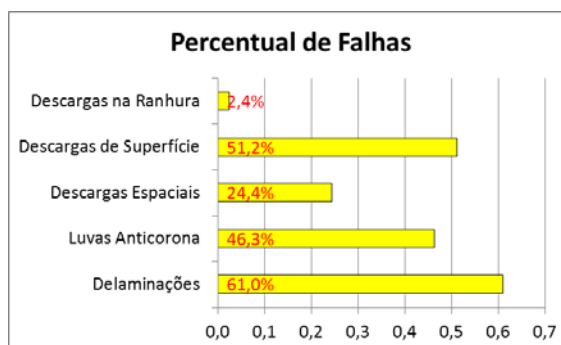
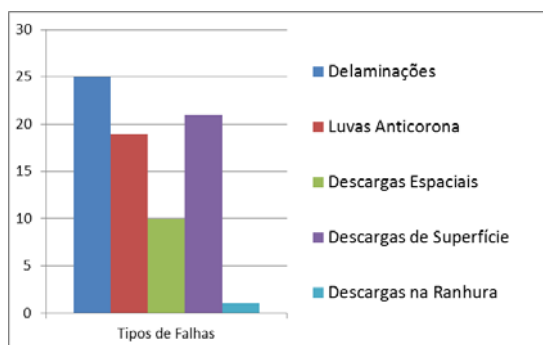
Cada cluster pode ser selecionado individualmente, e através das ferramentas gráficas do software, seu perfil (tipo de curva) pode ser exibido em um gráfico PRPD (fase resolvida), facilitando a análise dos dados PD e a identificação do tipo de problema. Essa habilidade faz com que nenhuma outra fonte seja incluída no mesmo perfil, facilitando a análise final.

2. Aplicação e Resultados

Considerando que os geradores de PCH podem ser retirados da rede interligada do Sistema Nacional, sem que sejam necessários trâmites ou autorizações junto ao ONS, medições e análises PDA puderam ser fácil e rapidamente efetuadas em um conjunto de 41 geradores de PCH de uma grande empresa no Brasil. Os acopladores capacitivos foram instalados de forma provisória nos terminais de saída dos geradores ou nos cubículos de surto, não tomando para isso mais do que uma hora por máquina.

Os resultados das análises dos dados PD nesses 41 geradores identificaram cinco tipos de falhas, sendo quatro principais e uma residual: delaminações (incluindo os dois subtipos: no interior da isolação e entre cobre e isolação principal), descargas nas luvas anticorona, descargas de superfície, descargas espaciais e descargas dentro da ranhura.

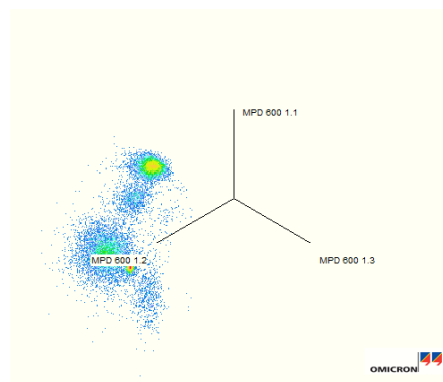
Alguns geradores apresentaram mais de um tipo de falha e, portanto os gráficos abaixo refletem a quantidade de geradores onde a falha está presente. Por exemplo, dos 41 geradores, 25 apresentam problemas relacionados às delaminações, ou seja, 61% deles, em maior ou menor grau de deterioração, e assim por diante.



Alguns dos resultados mais marcantes estão descritos abaixo:

Caso 1:

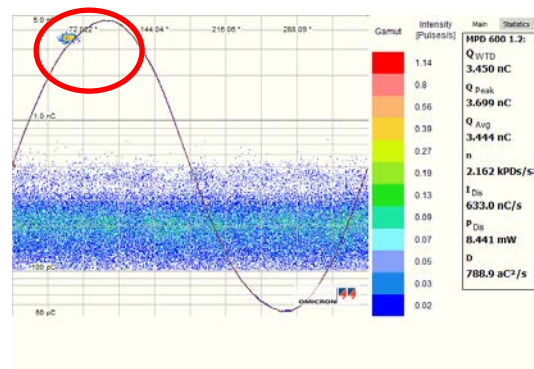
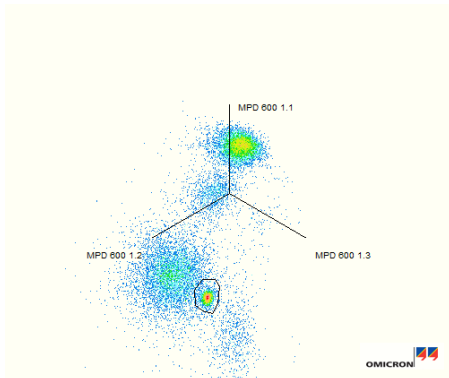
- Ano de fabricação / instalação = 2009
- Potência nominal = 15,465 MVA
- Tensão nominal = 13,8 kV



A foto acima exibe a conexão provisória dos acopladores capacitivos nos cabos de saída do gerador, dentro do cubículo de surtos, e diagrama 3PART.

O usuário já havia detectado atividades corona através de inspeções visuais, porém ainda tinha dúvidas sobre a profundidade do problema. Na análise do cluster marcado, podemos verificar um resultado típico de descargas espaciais nas cabeças de bobinas (como indicado), característico de corona entre fases

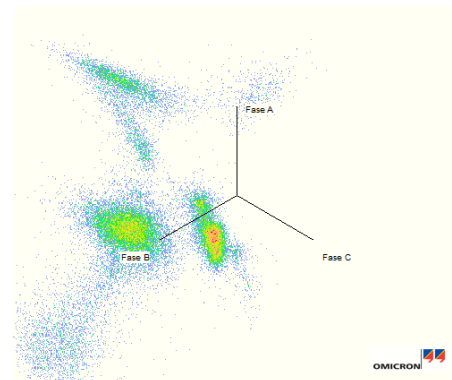
ou por contato com pontas afiadas. Também podemos verificar a existência de pulsos provenientes de ruídos assíncronos de fundo, que não são indicativos de problemas no enrolamento.



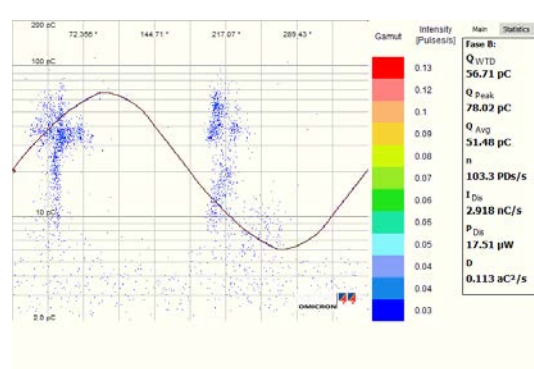
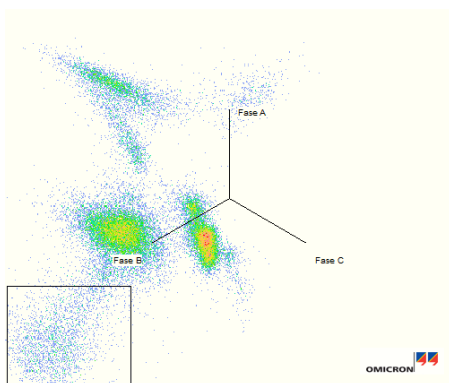
A análise dos dados obtidos no ensaio confirmou a dúvida do usuário quanto às fortes atividades PD de descargas espaciais nas cabeças de bobinas, principalmente entre as Fases B e C, e indicou a necessidade de uma inspeção visual detalhada para se tentar localizar e isolar tais pontos de falha.

Caso 2:

- Ano de fabricação / instalação = 2010
- Potência nominal = 5,42 MVA
- Tensão nominal = 6,9 kV



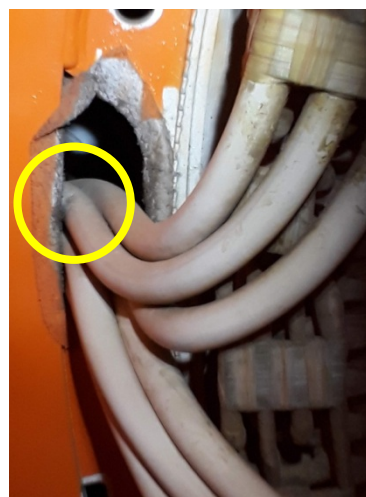
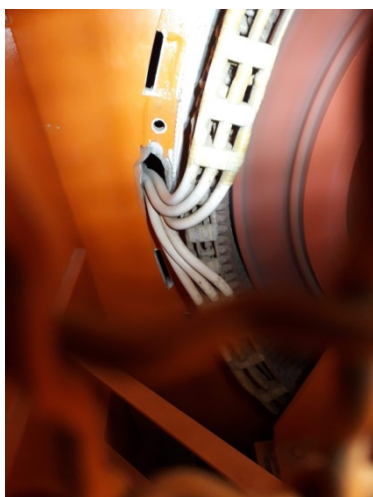
A foto acima exibe a conexão provisória dos acopladores capacitivos nos cabos de saída do gerador, dentro da caixa de conexões dos cabos, e diagrama 3PARD



Na análise do cluster marcado, os pulsos apresentam-se simétricos, com igual densidade e magnitude em ambos os semiciclos, resultado típico de descargas espaciais nas cabeças de bobinas, característico de corona entre enrolamentos ou por contato com pontas afiadas, na Fase B.

A análise dos dados corroborou uma preocupação da equipe de manutenção quanto ao encaminhamento dos cabos das fases (três) e de neutro (três) saindo do estator da UG, até a parte posterior do painel de conexões. O problema é exibido nas fotos abaixo, tomadas através da grade de entrada de ar de refrigeração.

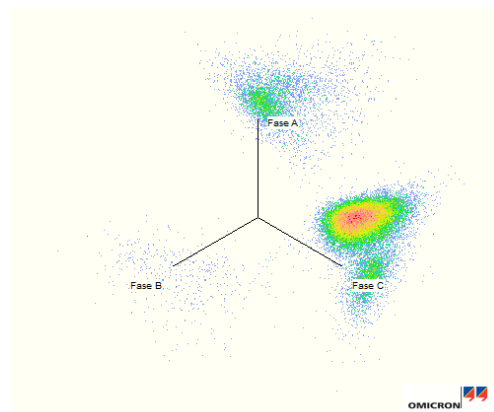
Como é possível verificar, houve negligência no encaminhamento dos cabos de fase (superiores) e de neutro (inferiores) por furação na carcaça. Por não respeitar o espaçamento que até então estava sendo utilizado na circunferência do estator, os seis cabos foram simplesmente apoiados uns sobre os outros aleatoriamente, fazendo com que estivessem em contato não só entre eles, mas também contra outros pontos da carcaça. O ponto marcado é exatamente na Fase B. Independentemente da capacidade de isolamento de tais cabos, os espaçamentos mostram-se insuficientes, gerando corona e centelhamento, com conseqüente deterioração da isolação. O problema só não é mais bem visualizado porque o fabricante utilizou cabos com isolação de cor branca, que "mascaram" as marcas de corona.



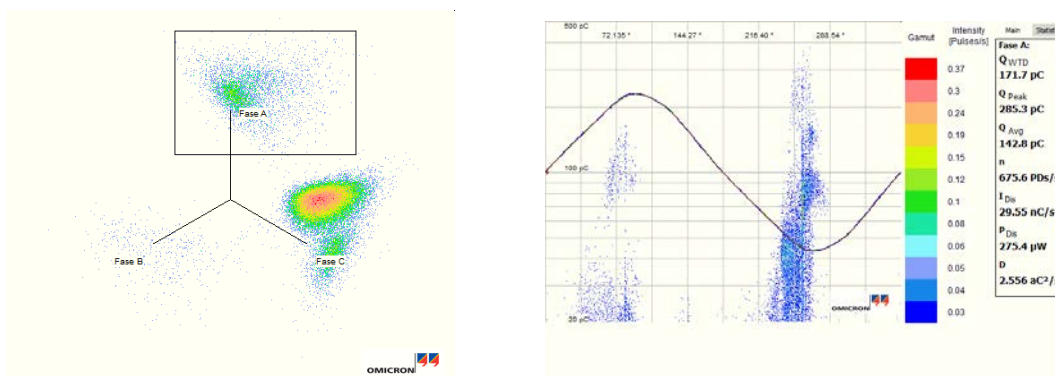
Foi sugerido à equipe de manutenção providenciar, o mais rápido possível, uma correção para o problema, isolando os cabos uns dos outros e todos da carcaça através de espaçadores de fibra de vidro (e/ou epóxi) e amarração adequada, também com fitas de fibra de vidro (a considerar que isso seja possível em função dos comprimentos dos cabos).

Caso 3:

- Ano de fabricação / instalação = 2007
- Potência nominal = 10,84 MVA
- Tensão nominal = 6,9 kV

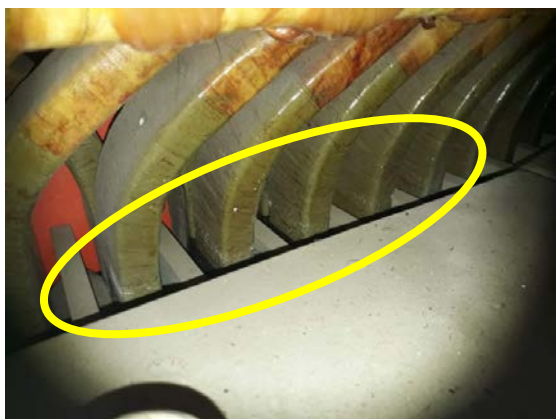


A foto acima exibe a conexão provisória dos acopladores capacitivos nos cabos de saída do gerador, e diagrama 3PARD.



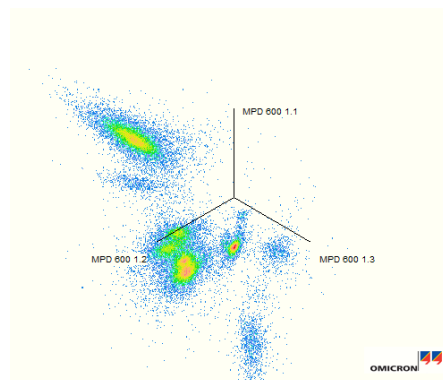
Na análise do primeiro cluster, os pulsos apresentam-se assimétricos, com maior densidade e magnitude no semiciclo negativo, típico de descargas na luva anticorona, na Fase A. O mesmo se repetiu para as outras fases.

Devido a falhas na luva anticorona, como mau contato, projeto ou fabricação inadequada, contaminação, porosidade, efeito térmico, etc., descargas de superfície acontecem, e vão gradualmente erodindo os materiais. Normalmente é um mecanismo de falha lento, embora o comportamento dos pulsos PD possa estar sujeito a rápidas variações devido a efeitos de superfície. Esse problema foi constatado visualmente em diversos pontos do enrolamento por inspeção através de janelas de refrigeração, como abaixo. O usuário deve acompanhar atentamente a progressão, e providenciar estudos para reparo.

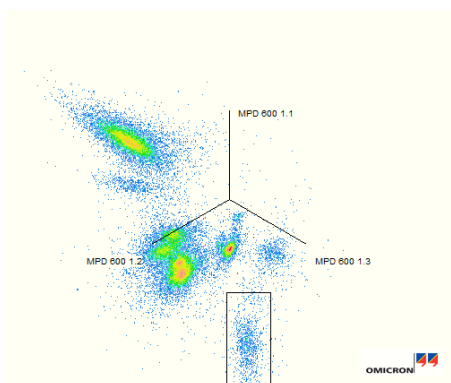


Caso 4:

- Ano de fabricação / instalação = 2002
- Potência nominal = 13,5 MVA
- Tensão nominal = 6,9 kV

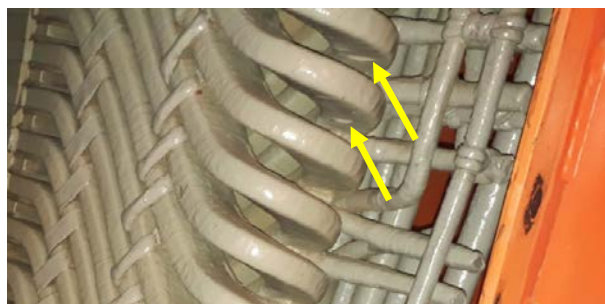
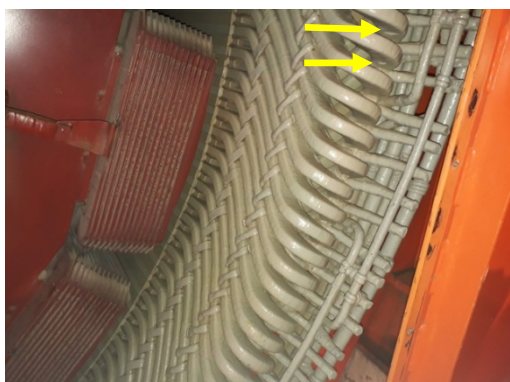


A foto acima exibe a conexão provisória dos acopladores capacitivos nos cabos de saída do gerador, dentro do cubículo de surtos, e diagrama 3PARD.



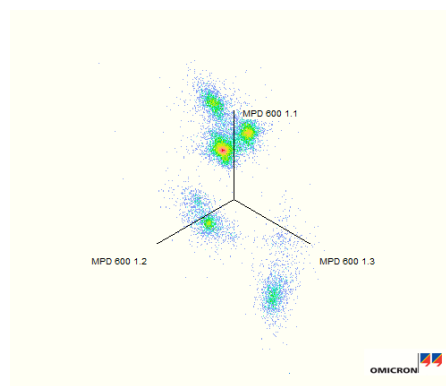
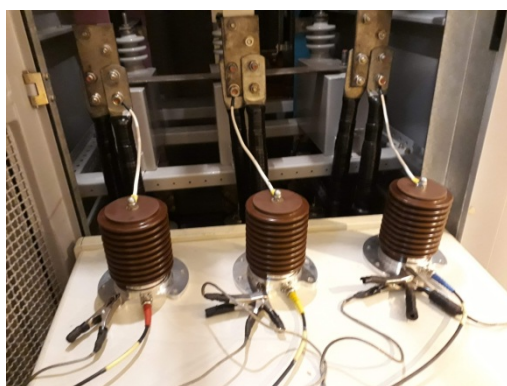
Na análise do terceiro cluster, os pulsos apresentam-se simétricos, com igual densidade e magnitude em ambos os semiciclos, típico de descargas de superfície nas cabeças de bobina, com valores expressivos entre as Fases B e C.

As descargas de superfície ocorrem na interface entre diferentes elementos das cabeças de bobinas e eventualmente podem ocorrer entre fases, como por exemplo, por espaçamento inadequado nos elementos de suporte, ou com descargas fase-terra na superfície, ou geralmente por contaminação. A Fase B apresenta o maior grau de deterioração entre as três fases, porém todas apresentam o mesmo problema nos elementos de suporte das cabeças de bobinas, que foi constatado visualmente em diversos pontos do enrolamento pela inspeção visual através de janelas de refrigeração, como abaixo:



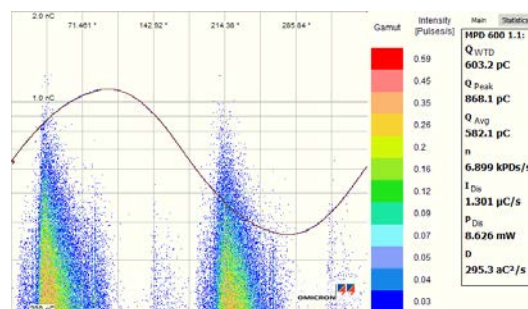
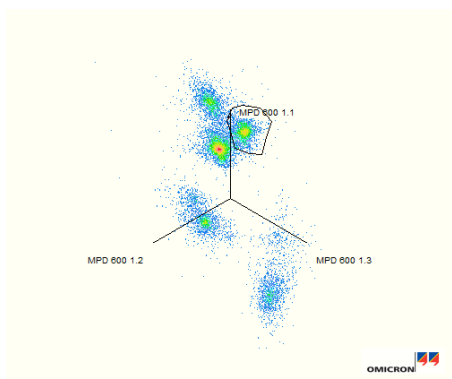
Caso 5:

- Ano de fabricação / instalação = 2002
- Potência nominal = 13,5 MVA
- Tensão nominal = 6,9 kV

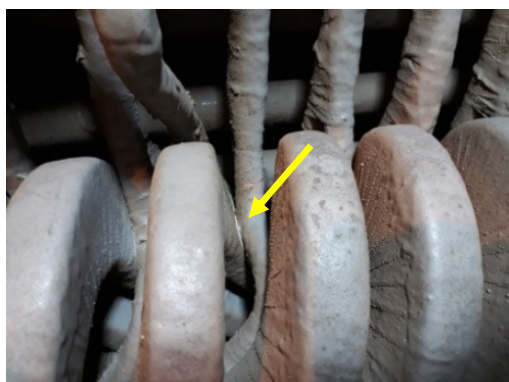


A foto acima exibe a conexão provisória dos acopladores capacitivos nos cabos de saída do gerador, dentro do cubículo de surtos, e diagrama 3PARD.

Na análise do terceiro cluster, os pulsos apresentam-se simétricos, com igual densidade e magnitude em ambos os semiciclos, típico de descargas de superfície nas cabeças de bobina, com valores expressivos na Fase A.

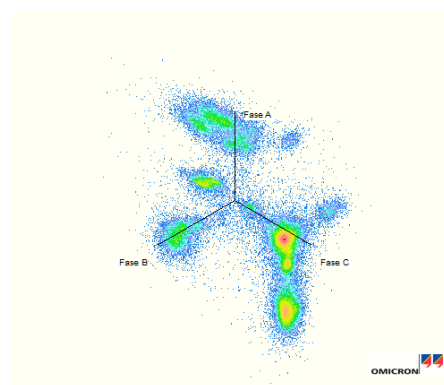


Essas descargas foram constatadas em alguns pontos do enrolamento através da inspeção visual, como abaixo, na foto da esquerda. Adicionalmente, foi possível constatar visualmente grande contaminação nas cabeças de bobinas. A retirada de um painel inferior para acesso aos terminais do gerador resultou em enorme acúmulo de sujidades que estavam fixadas ao mesmo. A foto da direita exibe as condições de um pequeno trecho da grade frontal do gerador, exatamente onde há a entrada do ar frio externo para refrigeração. Certamente, as medições também indicaram descargas de superfície causadas por contaminação.



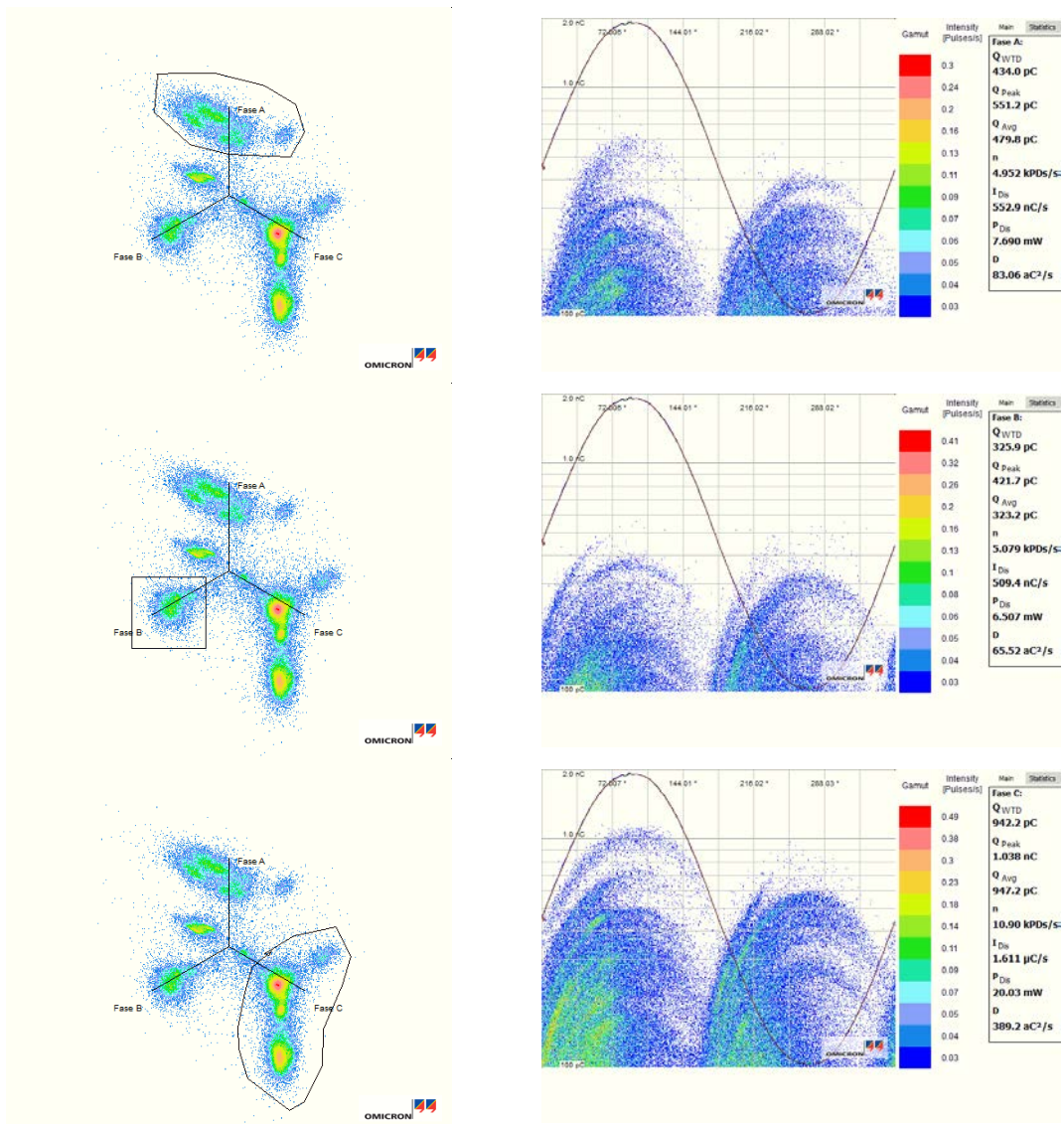
Caso 6:

- Ano de fabricação / instalação = 2016
- Potência nominal = 13,9 MVA
- Tensão nominal = 13,8 kV



A foto acima exibe a conexão provisória dos acopladores capacitivos nos terminais de saída do gerador, dentro da caixa de conexões dos cabos, e diagrama 3PARD.

Considerando a análise dos três principais clusters, podemos verificar abaixo que os pulsos apresentam-se assimétricos, com maior densidade e magnitude no semiciclo positivo, resultado típico de substancial delaminação entre cobre e isolamento principal nas três fases, apesar de ser uma máquina praticamente nova, com pouco mais de um ano de operação.



O problema é característico de cura imperfeita durante processo de fabricação ou, ainda mais importante, de estresses mecânicos e térmicos durante operação. Essa delaminação, além de consumir a isolamento de dentro para fora, ainda reduz a condutividade térmica da mesma (os vazios internos criam uma barreira térmica que impede a transferência de calor entre o cobre e o núcleo), levando ao envelhecimento acelerado ou mesmo a uma ruptura térmica. Os danos à isolamento são cumulativos e irreversíveis.

Foram sugeridas etapas de limpeza completa do estator sempre que possível, de modo a auxiliar no resfriamento da máquina. Sujidades reduzem a dissipação de calor das bobinas, e podem dificultar a correta refrigeração do estator.

Adicionalmente, foi sugerido um estudo do sistema de refrigeração do gerador, para se detectar eventuais falhas do projeto ou da montagem que possam estar causando pontos não servidos (que causam excessivo incremento localizado da temperatura), contaminações, bloqueios, entupimentos, etc. Os

RTDs só medem a temperatura da face da barra, não dos condutores de cobre. Em enrolamentos refrigerados a ar, como é o caso, essas leituras são muito indiretas e imprecisas, pois o que se lê é um amálgama das temperaturas do ar de resfriamento, do núcleo e dos condutores de cobre através de uma cobertura térmica grossa (a isolação da barra).

Importante também é a análise dos procedimentos adotados para os ciclos de partida e parada do gerador. Deve-se ter em mente que os materiais das bobinas possuem diferentes coeficientes de expansão térmica, ou seja, o cobre se expande mais que a isolação a ele fixada. Assim, frequentes ciclos de partida/parada podem contribuir para o enfraquecimento da “cola” (epóxi) da isolação, fazendo com que os condutores de cobre fiquem soltos dentro da barra, propiciando o aparecimento de atividades PD.

3. Conclusões

As medições PD detectaram diversos problemas que não eram esperados pelo usuário, uma vez que os testes que normalmente aplicava nos programas de manutenção se limitavam a testes off-line. Os resultados repercutiram internamente, e diversas melhorias estão sendo discutidas para incrementar os procedimentos de manutenção e operação, incluindo a consolidação da análise das descargas parciais (PDA) como a principal ferramenta para o estudo e acompanhamento das condições da isolação dos estatores desses geradores, e dos outros que ainda estão para ser testados.

Cuidados e metodologias para a limpeza constante dos geradores, uma melhor análise sobre a validade de intensos ciclos de partida e parada e de partida rápida, a introdução da prática da inspeção visual detalhada, o acompanhamento dos processos de fabricação de bobinas de reposição ou para novos geradores dentro das instalações do fornecedor, e melhorias nas especificações dos geradores novos ou a reformar, incluindo documentação técnica, foram algumas das sugestões e observações no direcionamento das novas atividades de manutenção e operação.

4. Referências

- 1) IEC 60270 – High voltage test techniques – Partial discharge measurements – Edition 3.0 – 2000-12
- 2) Motor Reliability Working Group, Report of large motor reliability survey of industrial and commercial installations – Part I, IEEE Transactions on Industrial Application, Vol. 21, July-August 1985
- 3) IEC/TS 60034-27-2 – Rotating electrical machines – On-line partial discharge measurements on the stator winding insulation of rotating electrical machines – Edition 1.0 – 2012-03