

Avaliação De Diagnósticos por Descargas Parciais Para Máquinas Elétricas

Igor de S. M. Torres*. Fernando A. Moreira**
Edson G. Costa***

*Universidade Federal da Bahia, Salvador - BA
(Tel: 71 99273-7201; e-mail: igorsmt@gmail.com).

** Universidade Federal da Bahia, Salvador – BA – Departamento de Engenharia Elétrica - PPGEE (e-mail: moreiraf@ufba.br)

*** Universidade Federal de Campina Grande (edson@dee.ufcg.edu.br)

Abstract: Insulation diagnostics of large electrical machinery through its partial discharge activity has proven to be an important tool of predictive maintenance, assuring higher operational predictability of companies' assets. To be able to extract this entire tool's potential, the acquisition and filtering process of partial discharge signals is a fundamental step. This paper's objective is to present three models of data treatment and compare its results with a real turbogenerator of a gas-fired powerplant.

Resumo: O diagnóstico do isolamento de máquinas elétricas de grande porte por meio de sua atividade de descargas parciais vem se provando como uma importante ferramenta de manutenção preditiva, garantindo maior previsibilidade operacional dos ativos das empresas. Para conseguir extrair todo o potencial da ferramenta, o processo de aquisição e filtragem dos sinais de descargas parciais é uma etapa fundamental. O objetivo desse artigo é apresentar três modalidades de tratamento desses dados e comparando com um diagnóstico real de um turbogerador em uma usina termelétrica.

Keywords: Partial Discharges; Data treatment; Generator; winding insulation; diagnostics

Palavras-chaves: Descargas Parciais; Tratamento de dados; isolamento dos enrolamentos; geradores; diagnóstico;

1. INTRODUÇÃO

A operação confiável de um gerador depende diretamente da integridade da isolação do seu enrolamento estatórico, que é envelhecido por exposição a uma combinação de solicitações térmicas, elétricas, mecânicas e ambientais. A deterioração contínua do isolamento do estator pode vir a resultar em uma falha que implica indisponibilidade indesejada do gerador por um longo período de tempo (Mauro, 2015).

Dada sua relevância para os processos produtivos, utilizam-se hoje diversas ferramentas de manutenção preditiva buscando antecipar-se a eventuais defeitos que esses equipamentos venham a apresentar, possibilitando uma intervenção preventiva planejada e sem impactos operacionais.

Dentre essas ferramentas, o monitoramento de Descargas Parciais (DPs) destaca-se como um mecanismo de diagnóstico capaz de quantificar o estágio do envelhecimento do isolamento elétrico dessas máquinas, provendo informações suficientes para as áreas de manutenção das empresas sobre o estado de desgaste desse isolamento e prevendo até que ponto podem existir contaminantes ou defeitos incipientes onde uma intervenção mais urgente pode ser necessária.

No entanto o processo de coleta e tratamento dos dados de descargas parciais ainda é um campo com bastante oportunidades de estudo onde diversos provedores de serviços

de coleta e análise dos dados utilizam-se de variados mecanismos de tratamento das informações para obtenção de um diagnóstico.

O presente artigo tem por objetivo apresentar e discutir alguns desses mecanismos de tratamento e separação das informações relevantes dos sinais de descargas parciais mediante diferentes metodologias de filtragem dos dados e busca comparar resultados provenientes de uma coleta de sinais de descargas parciais, a aplicação dos filtros e sua aderência em termos de diagnóstico com o estado real de uma máquina elétrica após sua parada para manutenção.

Faz-se então uma revisão bibliográfica sobre os mecanismos de ocorrência das descargas parciais, seguido dos processos de tratamento dos dados mediante aplicação de filtros aos sinais obtidos experimentalmente. Por conseguinte, apresentam-se os equipamentos que foram objeto de teste bem como a instrumentação utilizada na coleta de dados, com uma apresentação sobre a metodologia de tratamento das informações. Por fim, apresentam-se os resultados obtidos e discutem-se as conclusões do trabalho.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para garantia de compreensão dos temas tratados nesse artigo, é digno de nota uma breve discussão sobre o fenômeno das

descargas parciais e seus mecanismos de filtragem, além da análise comparativa.

2.1 Descargas Parciais

Descargas Parciais (DPs) são pequenas centelhas elétricas resultantes de ruptura dielétrica de um gás (por exemplo o ar) contido em uma cavidade ou em um campo elétrico altamente não-uniforme. Caso a cavidade esteja em um sólido orgânico ou líquido, a DP irá degradar o material orgânico e pode eventualmente causar falha na isolamento elétrica (Stone, 2005).



Fig 1. Representação da migração de cargas positivas e negativas quando submetidas a campo elétrico externo em uma cavidade interna a um material isolante.

Ao ser polarizada pela presença de um campo elétrico, as cargas presentes nas cavidades existentes nos isolamentos elétricos, oriundas inicialmente das imperfeições próprias do processo fabril, acabam por intensificar esse campo com a segregação de cargas positivas e negativas internas ao gás contido na cavidade, conforme demonstrado na Fig. 1.

Eventualmente o campo elétrico pode se tornar forte o suficiente para que ocorra um mecanismo disruptivo de migração das cargas através do gás pela ruptura do meio dielétrico, causando carbonização do material isolante (plásticos, vernizes, papel, madeira, e demais compósitos orgânicos), podendo expandir o tamanho da cavidade, intensificando as próximas descargas até a sustentação do defeito em um curto circuito.

De forma generalista, as descargas parciais podem evoluir em localidades onde as propriedades dielétricas do material isolante são não-homogêneas. Nesses pontos, o gradiente do campo elétrico local pode ser reforçado. Em razão do estresse elétrico, esse fato pode levar a uma ruptura local de forma parcial. Essa ruptura parcial não ocorre de forma total no sistema de isolamento. Descargas parciais, de forma geral, necessitam de um volume de gás para ocorrer, ou seja, em vazios preenchidos com gás dentro da isolamento adjacente a condutores ou interfaces de isolamento (IEC 60034-27-2, 2012).

Como a ocorrência dessas descargas se intensifica com o tempo, a avaliação de descargas parciais pode fornecer um excelente prognóstico sobre o grau de envelhecimento da isolamento elétrica de um equipamento. Ademais, dadas as características construtivas de cada máquina, e o tipo de isolamento empregado, em alguns casos, é possível até mesmo determinar a localidade de ocorrência do fenômeno conforme disposto na norma IEC 60034-27-2 (2012) apenas pelo padrão

de descargas parciais. A figura 2 apresenta um padrão típico de descargas parciais presentes no sinal.

Em função da alta estabilidade contra descargas parciais que os compostos de epoxy-mica, usados atualmente na maioria das máquinas rotativas de média e alta tensão, oferecem, geralmente estas atividades de descargas não ocasionam um imediato rompimento da isolamento, mas claramente identificam o surgimento e o avanço dos problemas. Em função disso, a análise da atividade das descargas parciais proporciona uma avaliação de possíveis falhas elétricas, mecânicas e ambientais (umidade, poluição, etc) que afetam a integridade do sistema de isolamento (Freitas, 2008).

2.2 Tratamento dos Dados

O processo de aquisição dos sinais de descargas parciais possui algumas normas orientativas, como a IEC 60034-27-2 (2012) e a IEEE 1434 (2014). Deve-se instalar ao objeto de teste um sistema de capacitores padrão para atuarem como filtro nos sinais de alta frequência proveniente das DPs. Nesse contexto, os sinais apresentam-se como pulsos rápidos e de amplitude significativa sobre a frequência fundamental.

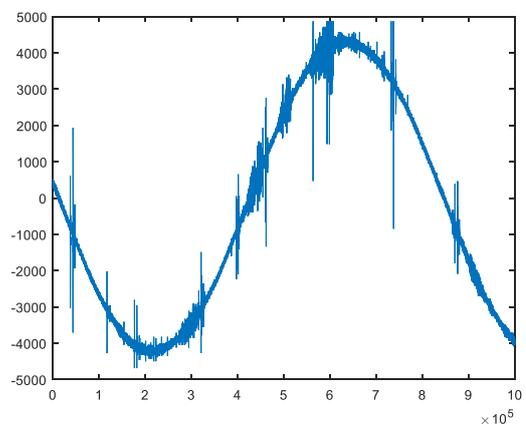


Fig 2: Exemplo de sinal bruto sem tratamento

Ainda assim, usualmente o sinal obtido é contaminado com um elevado nível de ruído, como mostrado na Fig. 2, e é importante separá-lo também da frequência fundamental do sistema de sorte que a análise seja possível. Para isso, algumas técnicas estão disponíveis.

Com o advento de computadores e conversores A/D velozes, a medição digital das DPs tornou-se uma realidade, e em breve, muitos métodos digitais de supressão de ruído evoluíram, como as médias móveis, limitação por FFT, filtros digitais (resposta infinita ao impulso, IIR e resposta finita ao impulso, FIR), filtros adaptativos e, mais recentemente, as wavelets também (Satish et al., 2003). Esse trabalho aborda alguns desses métodos.

2.2.1 Filtro por Hard-Threshold

Técnica simples, o *threshold* (relativo à limitação) consiste em avaliar o sinal obtido e estabelecer um fator limitante obtido da média dos pontos onde todos os dados serão zerados abaixo desse limite estabelecido. A atenuação de ruído é realizada

submetendo cada coeficiente do sinal a um valor limitante (Macedo et al., 2012).

2.2.2 Filtro por Transformada Wavelet

Transformada Wavelet (TW) tem sido uma ferramenta poderosa no processamento de sinais nos anos recentes. A TW pode prover informações tanto no domínio do tempo quanto no domínio da frequência em níveis customizáveis de profundidade da transformada. Por sua característica multiresolução, a TW torna-se mais adequada do que a tradicional transformada de Fourier em análise de sinais com informações interessantes de transitórios como os sinais de DP (Vidya et al., 2007).

2.2.3 Filtros de Resposta a Frequência (FRF)

Os filtros *Finite Impulse Response* (FIR) e *Infinite Impulse Response* (IIR) são basicamente filtros de resposta à frequência que buscam separar espectros de frequência onde não há conteúdo de informação relevante para a análise de DPs e então eliminá-los. Esse método envolve análise de um sinal no domínio da frequência e requer um filtro de ordem bastante elevada, dessa forma, fazendo-o também computacionalmente exigente (Satish et al., 2003).

3. MATERIAIS

Para que seja possível a análise de resposta dos diferentes modelos de filtros, foi realizada a coleta de dados de um sistema de coleta de sinais de descarga parciais on-line instalado em um turbogerador de uma usina termelétrica de capacidade de 300 MVA e tensão de 21 kV, ilustrado na Fig. 3. A máquina possui quatro capacitores padrão de 9 nF instalados nos terminais de conexão do equipamento com o duto de barras da máquina conforme o destaque no esquema abaixo. Por razões operacionais, somente foi possível coletar dados de dois capacitores.

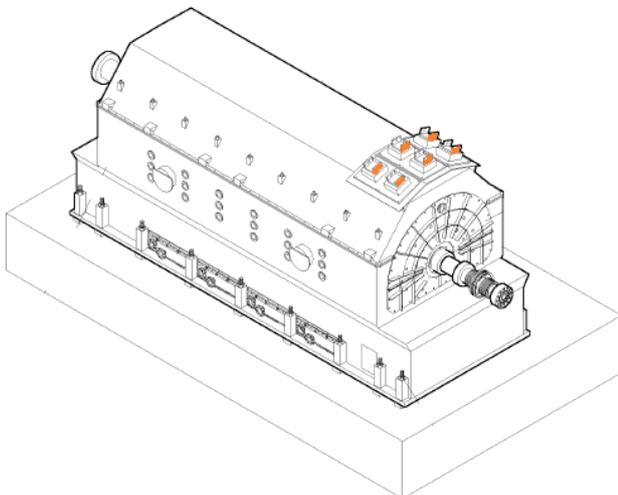


Fig. 3: Desenho do Turbogenerador com destaque para os pontos de conexão onde estão instalados os capacitores (Alstom, 2003).

Para coleta dos sinais foi empregado um Osciloscópio com amostragem de até 4 GSa/s e largura de banda de 1 GHz do

fabricante Agilent Technologies. Os dados foram capturados mediante integração do aparelho com notebook e a plataforma Matlab mediante cabo coaxial conectado à saída do capacitor padrão, conforme demonstrado na Fig. 4.

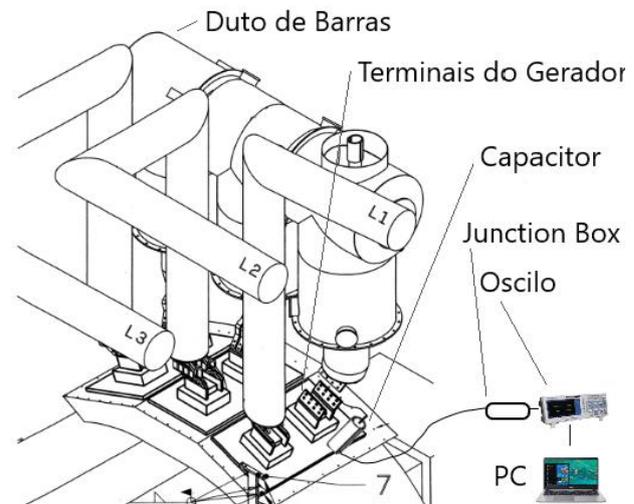


Fig. 4: Esquema de Coleta de dados

4. MÉTODOS

Para que fosse possível comparação com resultados anteriores, a coleta de descargas parciais foi realizada em carga parcial da ordem de 160 MW e com variação da geração de potência reativa em dois patamares: 4 MVar e 84 MVar, que foi o valor máximo admissível pelo sistema em face à queda de tensão na rede proporcionada pela variação. Esses dois patamares de carga representam modos diferentes de operação. Com a geração de reativos próximo à capacidade máxima, o stress térmico é maior em função dos valores de corrente maiores. Dessa forma, é possível observar o comportamento das descargas parciais em diferentes níveis de potência aparente. Ademais, esses valores foram buscados em ensaios anteriores realizados pelo fabricante, portanto para que se possa observar eventual evolução de diagnósticos passados, a adoção desses patamares de potência reativa é relevante para o histórico da máquina.

Foram então coletadas 100 amostras de 100.000 pontos por 10 vezes nas fases A e C em cada um dos patamares de carga. O conjunto de dados totalizou mais de 2 GB de informação.

O processo de tratamento dos dados foi realizado utilizando-se inicialmente um filtro passa altas para remoção da frequência fundamental de 60Hz do sistema.

Os demais filtros foram aplicados utilizando-se comparação de valores para o fator limitante do *Threshold*, com eliminação de variáveis menores que o triplo do valor da média absoluta de todos os pontos. Mediante experimentação, esse foi o ponto de equilíbrio encontrado ao se filtrar os dados e manter os pulsos com as amplitudes mais próximas ao valor original.

Já a transformada Wavelet foi empregada utilizando-se as funções já existentes no Matlab, com o módulo Haar Nível 3 obtendo o melhor resultado comparativamente, anulando-se as componentes de baixa frequência da transformada e

reagrupando os valores com transformada inversa. Essa escolha ocorreu dado que mostrou possuir o melhor equilíbrio entre remoção de ruído e esforço computacional.

Por fim, o filtro de resposta em frequência necessitou de sintonia para eliminação das componentes de baixa frequência usando-se a ferramenta do Matlab para resposta ao impulso, com ordem 34 (obtido experimentalmente) e a característica de resposta infinita ao impulso de Chebyshev, sendo o que apresentou melhor desempenho computacional dentre as opções do software. Após a obtenção do sinal sem ruídos, aplicou-se ainda limitadores de valor, semelhante ao fator dos pontos anteriores, com anulação dos pontos inferiores ao triplo da média absoluta de cada conjunto de pontos.

5. RESULTADOS

Dado o elevado volume de informações processadas e produzidas com os ensaios, serão apresentados os dados referentes à leitura em 4 MVar na fase C para discussões. Dado que nesse cenário, a amplitude das DPs é menor, o desafio apresentado ao mecanismo de filtro é mais significativo. A imagem bruta obtida na leitura desses pontos produziu o gráfico exibido na fig. 5.

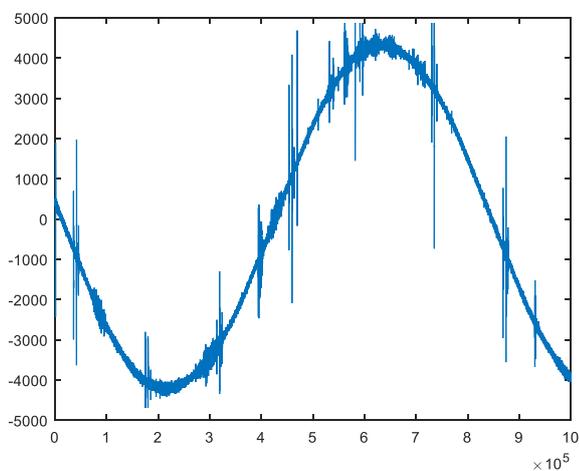


Fig. 5: Leitura de 1 amostra: Fase C em 4 MVar

Cada um dos conjuntos de dados é tratado com a junção de todas as 100 amostras realizadas e agregado ao resultado de todas as outras coletas (10 no total), gerando imagens sobrepostas filtradas de 1000 ciclos ou mais de 16s de gravação, por fase, por patamar de carga. Cada gráfico resultou em esforço computacional de aproximadamente 10 minutos em dedicação integral.

Nesse cenário, o processo de Filtros por FRF apresentou o resultado da Fig. 6.

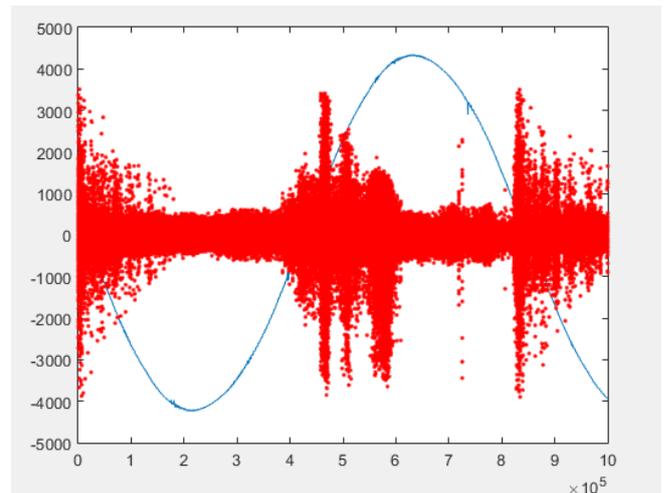


Fig. 6: FRF em 4 MVar na Fase C

O filtro de *Threshold* apresentou, para essa carga, o gráfico da Fig. 7.

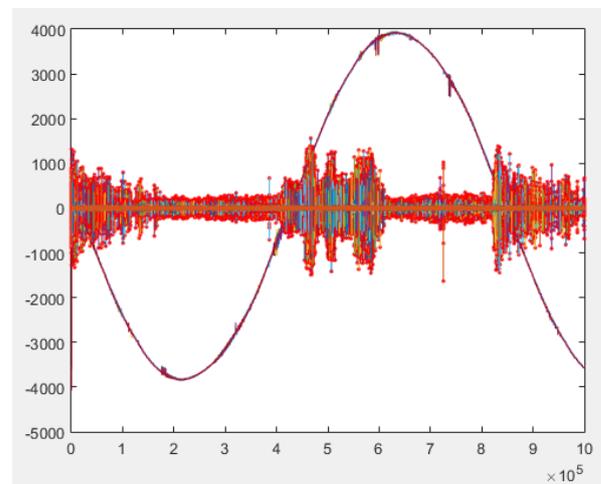


Fig. 7: Filtro *Threshold* em 4 MVar na Fase C

Por fim a Transformada Wavelet resultou no gráfico da Fig. 8.

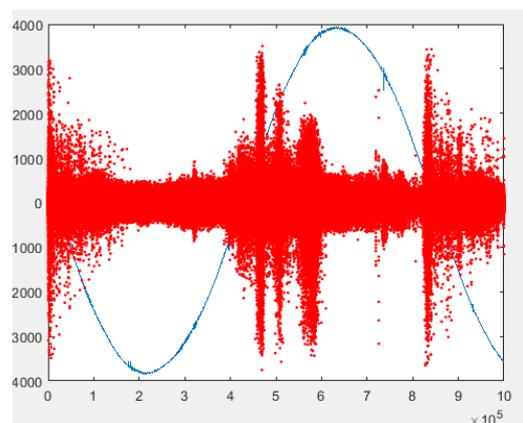


Fig. 8: Filtro com Wavelet em 4 MVar na Fase C

Comparativamente, as figuras 6, 7 e 8 mostram, para um mesmo conjunto de medições, os gráficos de distribuição das descargas parciais ocorridas em todos os 1000 ciclos analisados, após a resposta dos filtros para eliminação de ruídos. Percebe-se semelhança entre as figuras 6 e 8 pois o mecanismo de separação das componentes de baixa frequência, em razão da TW, acaba sendo similar ao FRF. No entanto, o FRF foi visivelmente mais eficaz. Já a figura 7 apresenta a maior diferença entre os gráficos. A amplitude dos sinais de DP foi afetada e os valores de pico próximo ao zero estão representados em amplitude bastante inferior às demais figuras.

6. CONCLUSÕES

A análise comparativa das figuras 6, 7 e 8 permite extrair informações relevantes a respeito do comportamento dos diferentes filtros aplicados. É possível perceber que, apesar da facilidade de implementação e reduzido esforço computacional, o filtro de *Threshold* simples acaba por eliminar informações sobre o nível de amplitude dos sinais onde os sinais de DPs, próximos à passagem por zero, ocorrem. Tal fato pode levar a conclusões precipitadas, uma vez que pelo comparativo de características de DPs apresentado pela IEC 60034-27-2 (2012) (Fig. 9), uma descarga em cavidade, como apresentado nas características dos gráficos 6 e 8 poderia ser confundido com descargas internas decorrentes do simples envelhecimento do isolamento, sendo considerado normal para um gerador com mais de 80.000h de operação.

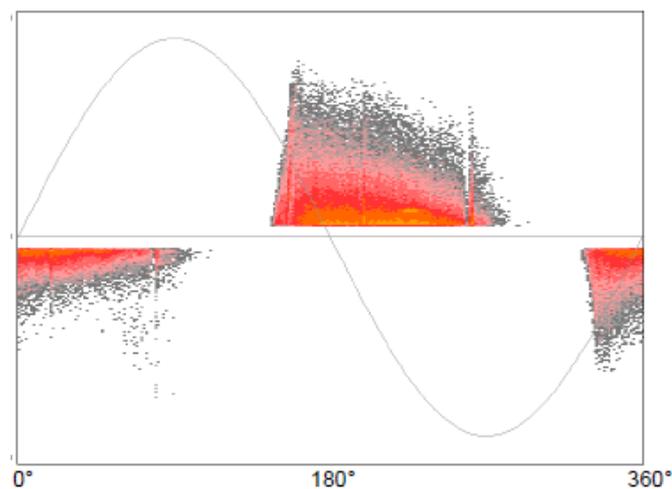


Fig. 9: Descargas tipo *Slot* (relativo a cavidade) ocorrem entre o ponto energizado (bobinado ou barra) e a trechos do núcleo aterrado. (IEC 60034-27-2, 2012)

De fato, o gerador foi aberto após alguns meses para inspeção de manutenção preventiva e verificou-se que um vazamento de óleo no mancal provocou um certo grau de contaminação superficial nas ranhuras do equipamento, sendo extremamente provável essa a causa raiz do elevado nível de descargas em cavidades, uma vez que o óleo lubrificante acaba agregando partículas contaminantes do ar que favorecem a ocorrência de DPs.

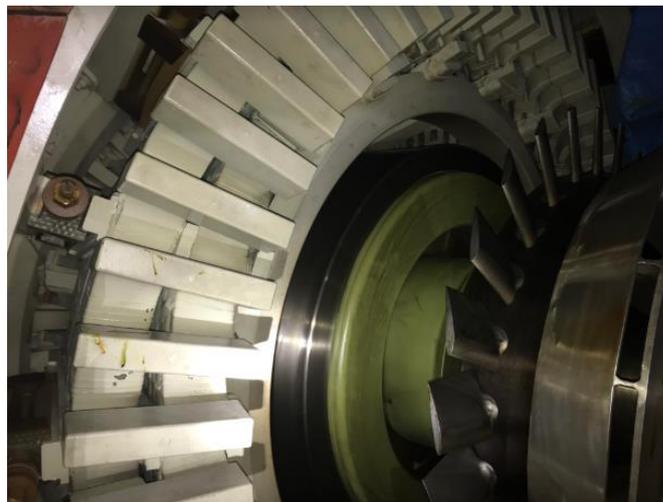


Fig. 10: Cabeças de Bobina do Gerador. A presença de óleo é notável.

Verifica-se portanto a importância do diagnóstico utilizando-se a análise de descargas parciais online como ferramenta preditiva absolutamente relevante. No entanto, o diagnóstico deve ser prontamente observado com a escolha correta de filtros de sinais para evitar a perda de informações levando o analista a um diagnóstico incorreto. O filtro comum do tipo *Threshold* é, de fato, um dos mais utilizados na indústria dado sua fácil compreensão e pouca necessidade de ajustes e sintonia em campo. Porém, existem ferramentas melhores como a transformada Wavelet ou FRF que exigem resposta computacional mais robusta porém fornecem resultados mais confiáveis.

AGRADECIMENTOS

Expressamos nossos sinceros agradecimentos à gerência da Usina Termelétrica Celso Furtado que cedeu todo apoio à coleta e tratamento dos dados para possibilitar esse trabalho. Agradecemos também ao Laboratório de Microeletrônica da UFBA pelo empréstimo do equipamento utilizado para a coleta de dados.

REFERÊNCIAS

- Alstom (2003). *Introduction to Generator Block*. Manual Operacional. Pg 8. Baden, Suíça;
- Freitas, A. P. (2008). *Novas Técnicas de Manutenção Preditiva em Máquinas Elétricas de Médio e Grande Porte*. Monografia de Especialização. 76 pgs. UNIFEI, Itajubá;
- Vidya, H.A., Krishnan, V. & Mallikarjunappa (2007). *A Wavelet Transform Technique for De-noising Partial Discharge Signals*. International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis. pg. 1-4. Pequim, China;
- IEC 60034-27-2 (2012). - *On-line partial discharge measurements on the stator winding insulation of*

electric machinery. International Eletrotechnical Commission. Pg 13. Genebra, Suíça;

IEEE 1434 (2014). *IEEE Guide for the Measurement of Partial Discharges in AC Electric Machinery*. Institute for Electrical and Electronics Engineers. IEEE. Nova Iorque, EUA;

Macedo, E. C. T., Araújo D. B., Costa, E. G. , Freire, R. C. S., Lopes, W. T. A., Torres, I. S. M., Neto, J. M. R. S., Bhatti, S. A. e Glover, I. A. (2012). *Wavelet transform processing applied to partial discharge evaluation*. 25th International Congress on Condition Monitoring and Diagnostic Engineering. pg 1-16. Hadersfield, Reino Unido;

Mauro, M. A. S. (2015). *Análise da Vida Útil de Isolamento de Geradores Com Enrolamento de Armadura Refrigerado a Água*. Dissertação de Mestrado. 98 pgs. Unifei. Itajubá;

Satish, L., Nazneen, B. (2003). Wavelet-based Denoising of Partial Discharge Signals Buried in Excessive Noise and Interference. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. vol. 10, no. 2, pg. 354-367;

Stone, G. (2005). *Partial Discharge Diagnostics and Electrical Equipment Insulation Condition Assessment*. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. vol. 12, no. 5, pg. 891-904.