



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

FI/GGH/19
18 a 21 de Outubro de 2015
Foz do Iguaçu - PR

GRUPO - I

GRUPO DE ESTUDO GERAÇÃO HIDRAULICA - GGH

CORRELAÇÃO DAS MEDIÇÕES DE DESCARGAS PARCIAIS E VIBRAÇÕES MECÂNICAS PARA UMA DADA CONDIÇÃO OPERACIONAL DE HIDROGERADORES

**Paulo Roberto Moutinho de Vilhena(*)
ELETRONORTE**

**Fernando de Souza Brasil
ELETRONORTE**

**Camila J. Sampaio dos Santos
UNIFAP**

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo geral correlacionar vibrações mecânicas com as ocorrências de descargas parciais (DPs) nos hidrogeradores sob uma determinada condição de operação.

Desde 2009 vem se trabalhando para implantar a monitoração de DPs nas unidades geradoras da usina de Coaracy Nunes - UHCN, os primeiros trabalhos tiveram início através de medições esporádicas realizadas em conjunto com Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - Eletrobrás Cepel até a instalação definitiva em todas as máquinas, em 2013, de todo o sistema de monitoração de DPs, o software utilizado para medição foi o IMA-DP, desenvolvido em parceria Eletronorte e Cepel. Em paralelo, existe o Sistema de Monitoramento de Máquinas Elétricas – SIMME, destinado a monitorar grandezas mecânicas como vibração e pressão.

Para uma dada condição operacional das unidades geradoras CNUHG-01 e 02, pode-se perceber que a magnitude das DPs, assim como seu número de ocorrências e consequentemente seu padrão apresentam uma correlação positiva com o aumento das vibrações mecânicas, fato este que deve ser levado em consideração durante a análise do especialista para o melhor diagnóstico da máquina.

PALAVRAS-CHAVE

Medições On-line, Descargas Parciais, Vibração, Hidrogeradores

1.0 - INTRODUÇÃO

Inaugurada na década de 1970, a UHE Coaracy Nunes foi construída no Rio Araguay, município de Ferreira Gomes (Amapá, Brasil), previa originalmente duas unidades geradoras projetadas para gerar 20 MW cada uma. Posteriormente este potencial foi aumentado com a inserção de mais uma unidade geradora de 30 MW e a repotenciação das unidades de 20 MW para 24 MW cada, passando a somar 78 MW.

No modelo atual do setor elétrico a manutenção preditiva tornou-se grande ferramenta para as concessionárias de energia elétrica na gestão dos seus ativos de produção, pois está cada vez mais difícil desligar um equipamento para realizar manutenção, as concessionárias devem arcar com energia elétrica disponível para atender as demandas da sociedade. Neste modelo os desligamentos devem ser realizados de maneira programada de forma a eliminar ou minimizar as perdas, a realização de manutenção preditiva, minimizando as preventivas, busca migrar da condição de manutenção baseada no tempo para a manutenção baseada nas condições do equipamento (1).

Paradas de máquinas não planejadas devido à falta de confiabilidade e falhas de equipamentos fizeram com que os mantenedores dessem um passo fundamental na estratégia de manutenção de geradores, a fim de solucionar esse problema, vários pesquisadores e estudiosos da área de grandes máquinas rotativas descobriram que estas

(*) Rua Paraná, n° 1350 – Divisão de Eng. de Oper. e Manutenção – CEP 68.901-260, Macapá, AP – Brasil
Tel: (+55 96) 3198-4490 – Fax: (+55 96) 3198-4453 – Email: paulo.vilhena@eln.gov.br

falhas, na grande maioria das vezes, estavam relacionadas com o aumento do nível de descargas parciais (DPs) da isolamento elétrica da máquina. A ocorrência das DPs nos sistemas isolante dos equipamentos de alta tensão é um sintoma de fragilidade na sua suportabilidade dielétrica e cuja evolução pode vir a acarretar graves consequências para o equipamento (1).

Vibrações mecânicas estão presentes em hidrogeradores e sua influência sobre as DP deve ser estudada, de modo a melhorar a confiabilidade da monitoração, uma vez que podem provocar a variação do comprimento do gap das ranhuras e, assim, mudar o padrão das DPs.

Pelo exposto, justifica-se a necessidade de se avaliar a influência das vibrações mecânicas sobre o fenômeno das DPs que ocorrem nos enrolamentos estatóricos de máquinas rotativas, que na maioria das vezes são sintomas de defeitos elétricos e antecipações de falhas, que são originadas por diversas causas.

2.0 - DESCARGAS PARCIAIS NOS ENROLAMENTOS DO ESTATOR

Uma falha no isolamento do estator é um caminho de baixa impedância entre os condutores que devem ser isolados uns dos outros, tais como entre espiras, barras, fases ou entre fase e núcleo. Esta seção indica o potencial da manutenção preditiva no isolamento do estator e lista alguns modos comuns de falha.

2.1 Falhas no Isolamento do Estator

De acordo com (2) existem duas formas de classificar as falhas em máquinas rotativas de alta tensão, uma é a condição em que a máquina foi encontrada após a falha; a outra é pela suspeita da causa raiz que originou a falha. Estudar a causa raiz pode ser muito mais interessante, mas para fins de diagnóstico o mais importante é se o desenvolvimento da falha seria previsível a partir do componente estudado. A distribuição das falhas e causas sobre os componentes varia entre os diferentes tipos de máquinas, porém uma indicação aproximada é apresentada a seguir.

Um estudo internacional do CIGRE (3) sobre causas de falhas em hidrogeradores examinou 69 incidentes em detalhes e concluiu que as principais causas de falhas podem ser categorizadas na seguinte ordem: falhas no sistema de isolamento, defeitos mecânicos, problemas térmicos e por último, falhas devido nos mancais de rolamento. A Figura 1 ilustra essa classificação.

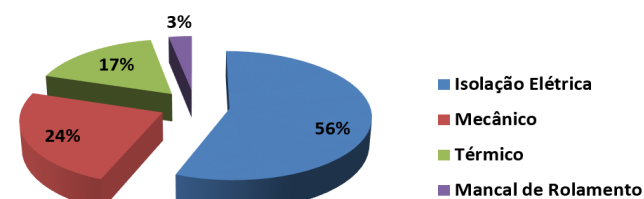


FIGURA 1 – Causas raízes de falhas em hidrogeradores (3).

As falhas no sistema de isolamento elétrica foram investigadas com mais detalhes e os resultados são ilustrados na Figura 2.

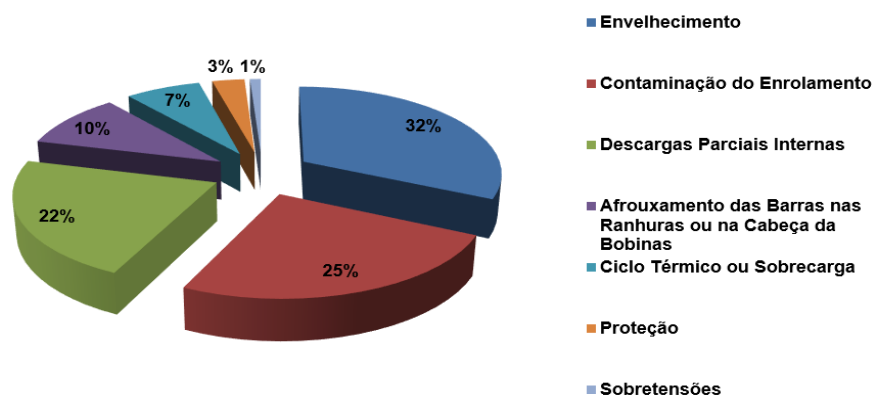


FIGURA 2 – Causas de falhas no sistema de isolamento elétrica (3).

As causas mais frequentes de falhas são relativas ao envelhecimento e à contaminação do enrolamento por poeira e umidade. As falhas elétricas foram causadas pelas descargas parciais internas, proteção e sobretensões. Devido à vibração é possível que as barras sofram afrouxamento na sua posição dentro da ranhura na cabeça da bobina.

2.2 Causas de Falhas no Isolamento do Estator

Na pesquisa de (4), foram descritas as falhas nos enrolamentos do estator que ocorrem por estresses elétricos (em função da tensão), mecânicos (vibração), térmicos (sobreaquecimento), químicos e ambientais (contaminação e umidade), que ocasionam a deterioração do isolamento e que apresentam como sintoma a presença de descargas parciais com maiores magnitude e frequências. Na Tabela 1, são apresentados os mecanismo de falha, sintomas, teste de detecção e o tipo da máquina, conforme descrito por (4).

Tabela 1 – Tipos de Falhas nos Enrolamentos Estatóricos (4).

Mecanismo de Falha	Sintomas	Teste de Detecção	Tipo de Máquina
Impregnação Inadequada	DPs	Medição de DPs, $\tan \delta$, fator de Potência	Impregnação a vácuo e fita com resina
Falhas na camada semicondutora	DPs, descarga na ranhura, ozônio	Medição de DPs, inspeção visual e monitorar ozônio	Refrigeradas a ar
Enrolamento frouxo	DPs, ozônio, cunhas soltas	Medição de DPs, inspeção visual, monitorar ozônio e testes da cunhagem	Sistemas com isolamento termorrígida (epóxi e poliéster)
Centelhamento por Vibração	DPs, ozônio, cunhas soltas	Medição de DPs, inspeção visual, monitorar ozônio e testes da cunhagem	Com isolações à base de fita com resina ou Impregnação a vácuo
Interface de alívio de Tensão	DPs, pó branco (ácido nítrico), ozônio	Medição de DPs, $\tan \delta$, fator de potência, inspeção visual e monitorar ozônio	Refrigeradas a ar e com pintura na interface de alívio de tensão
Espaçamento Inadequado	DPs, pó branco, descoloração da isolamento e ozônio	Medição de DPs, inspeção visual, monitorar ozônio	Refrigeradas a ar, seccionadoras e conexões de motores
Vibração das cabeças de bobina	Perda do sistema de bloqueio e amarração, pó branco disperso ou graxa	Inspeção visual, acelerômetro de fibra ótica	Alta tensão, alta velocidade com grandes cabeças de bobinas
Má conexão elétrica	DPs, pó branco e descoloração das conexões	Medição de DPs, inspeção visual, temperatura com infravermelho	Qualquer conexão
Deterioração térmica	DPs, descoloração da isolamento	Medição de DPs, $\tan \delta$, fator de potência, inspeção visual	Todos os tipos de máquina
Ciclos de carga	DPs, ruptura da isolamento na saída da barra	Medição de DPs, $\tan \delta$, fator de potência, inspeção visual, Surge Test, Hipot	Todos os tipos de máquina (com barras longas)

2.3 Tipos de Falhas no Isolamento do Estator

De acordo com (5) as fontes de DPs em hidrogeradores são classificadas em quatro grupos: descargas internas, descargas de ranhura, descargas na cabeça da bobina e descargas por partículas condutivas.

A norma (6) dividiu as principais fontes de descargas parciais em três níveis de risco, que são apresentados a seguir:

- Cavidades internas são de baixo risco, normalmente não levam ao envelhecimento;
- Descargas na cabeça da bobina e de superfície, por exemplo, devido a contaminação ou partículas condutivas, são de risco médio;
- Descargas de ranhura e de delaminação no condutor ou internas a isolamento são de alto risco.

A Figura 3 ilustra as principais fontes de DPs no isolamento do estator.

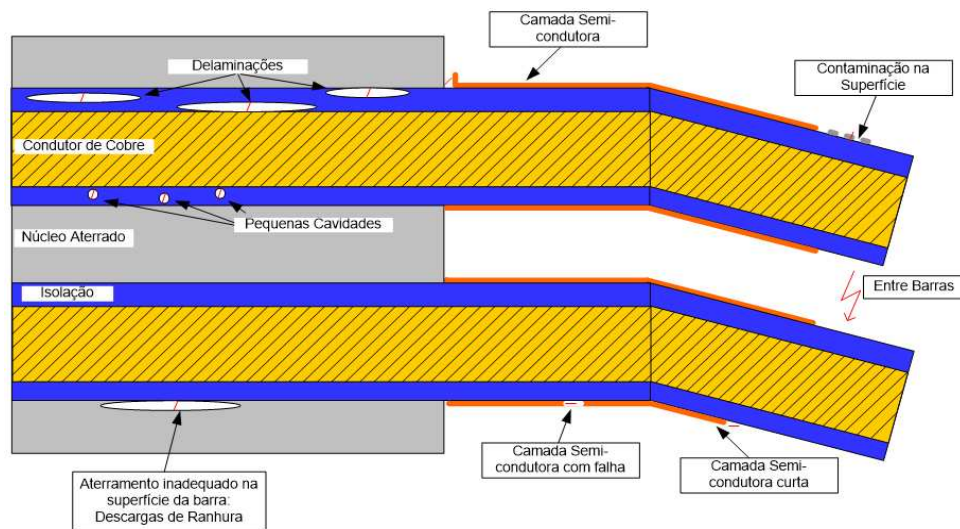


FIGURA 3 – Fonte de descargas parciais no isolamento do estator (2).

2.4 Descargas Parciais Associadas a Fase

Segundo (6) a análise de associação à fase das descargas parciais atualmente é considerada uma das metodologias mais eficientes para a identificação das fontes de DPs e foi incorporada aos mais modernos instrumentos de medição de DPs.

Na análise de associação à fase inicialmente supõe-se que a tensão de ensaio ou sistema é constante e os ângulos de fase desta onda são discretizados em faixas. O instrumento de medição de DPs mede as amplitudes da carga aparente (q), relacionadas ao ângulo de fase (φ) da tensão de ensaio ou do sistema, durante certo intervalo de tempo. Durante esse intervalo de tempo, os valores das amplitudes são acumulados e podem ser expressos pela razão da taxa de ocorrência (n), esses dados de DPs são classificados como mapas estatísticos das DPs.

A Tabela 2, a seguir, apresenta alguns padrões de mapas estatísticos de descargas parciais extraídos da literatura.

Tabela 2 – Padrões de mapas estatísticos de descargas parciais (6)

Tipos de Descargas			
Descargas Internas	Descargas de Superfície	Descargas de Ranhura	Delaminação

3.0 - MONITORAÇÃO ON-LINE DAS DESCARGAS PARCIAIS EM HIDROGERADORES

De acordo com (7) as descargas parciais são acompanhadas por várias manifestações físicas, tais como: pulsos elétricos e pulsos de rádio frequências, perturbações acústicas, luz, assim como reações químicas em gases de resfriamento que podem ser o ar ou o hidrogênio. No entanto, este trabalho tratará apenas dos métodos elétricos de medição de DPs, pois estes métodos são os mais utilizados para avaliação da condição do isolamento dos enrolamentos de máquinas rotativas. A medição elétrica pode ser realizada utilizando sensores de DPs que detecte

as componentes dos sinais dos pulsos que se deslocam através dos enrolamentos do estator (5).

3.1 Acoplamento Capacitivo

Conforme (8) o capacitor de acoplamento tem a função de transferir o espectro de alta frequência dos sinais de DPs do enrolamento até o dispositivo de acoplamento, simultaneamente atenua a tensão do sistema para baixas magnitudes. O capacitor de acoplamento deve ser livre de DPs na tensão do sistema e deve possuir baixa indutância para poder transmitir os pulsos de DPs sem oscilações.

O capacitor de acoplamento funciona como um filtro passa alta quando conectado ao enrolamento do estator, e fazendo uma terminação com um resistor, que pode variar de 500 até 2000 Ω . A configuração utilizada na UHE Coaracy Nunes consiste em um acoplador de 220 pF com uma resistência de 2000 Ω . Esta configuração apresenta uma frequência de corte inferior aproximada de 362 Hz, o que significa que sinais abaixo desta frequência serão significativamente atenuados. A Figura 4, a seguir, apresenta os acopladores instalados no barramento de saída do gerador.

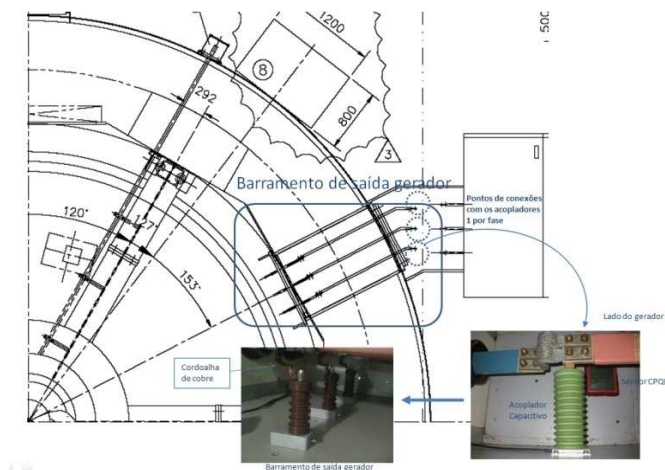


FIGURA 4 – Instalação do acoplador no barramento de saída do gerador.

3.2 Sistema de Monitoração de Descargas Parciais (IMA-DP)

A Figura 5, a seguir, apresenta o diagrama do sistema de monitoração instalado na UHE Coaracy Nunes. A instrumentação que compõe o sistema de monitoramento foi desenvolvida numa plataforma comercial de computador industrial padrão PXI, onde está instalado o IMA-DP. Terminal Server é um serviço de computação remota utilizando terminais disseminados pela rede. Neste sistema há um computador servidor para o processamento centralizado, sendo que os computadores desktops conectados a rede funcionam como terminais de acesso. Assim, é possível fazer acesso remoto ao sistema IMA-DP pela rede interna da Eletronorte.

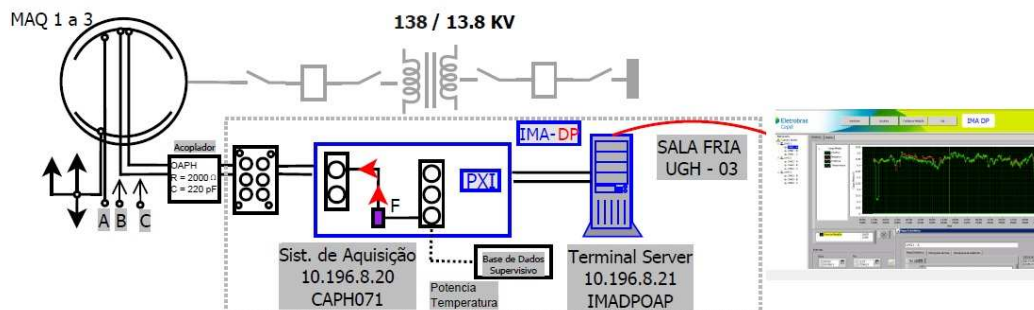


FIGURA 5 – Diagrama o sistema de monitoração de descargas parciais.

4.0 - RESULTADOS

Para uma dada condição operacional, da unidade CNUGH-02, em que aumentou-se a potência nominal gerada em 3,75%, de 24 MW para 24,9MW, analisou-se as curvas de tendências dos sistemas de monitoramento, podendo-se observar que o aumento de potência gerada em 3,75% foi suficiente para quase dobrar o nível de DPs na fase A e aumentar nas demais fases, aumentar a vibração relativa no mancal guia da turbina em 19%, a vibração no mancal guia do gerador também aumentou, porém de forma menos significativa. Outras variáveis também foram observadas como temperatura do estator, com cerca de 4% de aumento. Pode-se observar o mesmo comportamento na CNUGH-01, porém com menor intensidade do nível de DP, mas com o mesmo comportamento.

A figura 6 apresenta a curva de tendência das Descargas Parciais da Máquina 2, fase A, ao longo do dia 30/06/2014. É possível verificar que ocorreu um aumento nos níveis das descargas parciais no período de 15:00 as 22:00 horas, e, após uma análise deste caso, observando as condições operacionais da máquina, pode-se concluir que esta ocorrência resultou do aumento de 3,75% da potência nominal gerada pela Máquina, passando de 24 MW para 24,9MW, ver Figura 7.

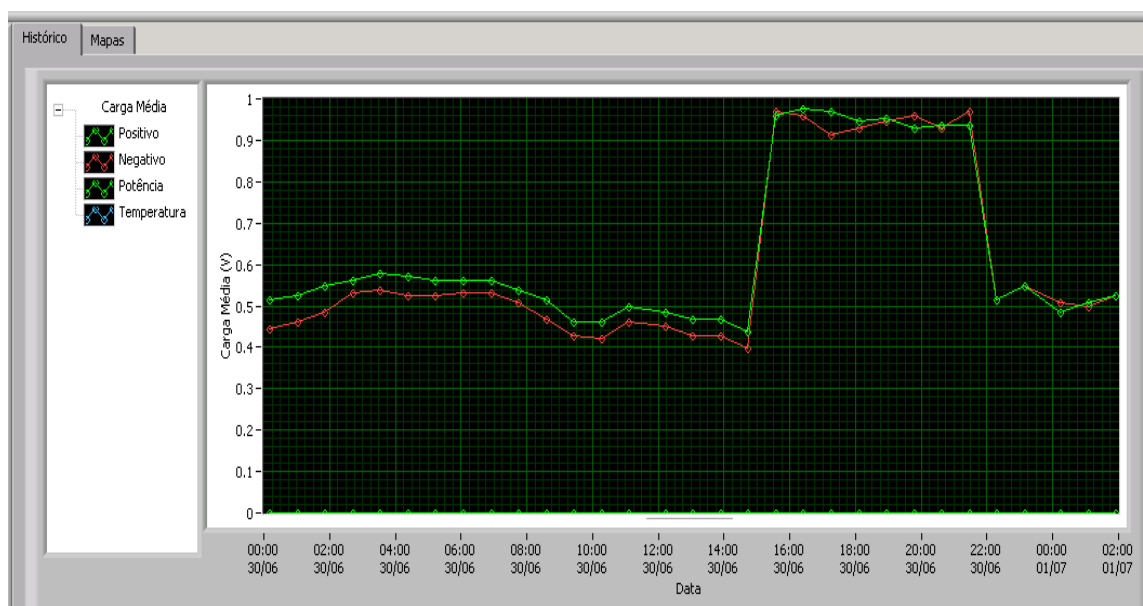


FIGURA 6 – Curva de tendência das Descargas Parciais CNUGH-02

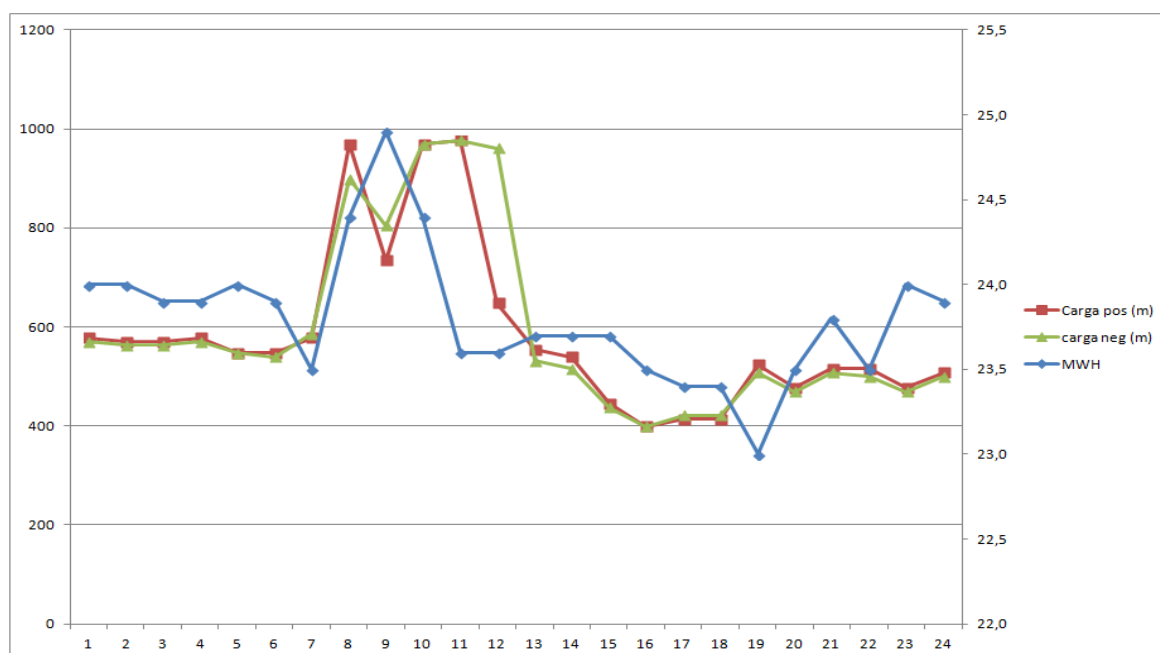


FIGURA 7- Potência Nominal Gerada x Curva de Tendência das DPs

Após uma análise dos sistemas de monitoramento, verificou-se que além do aumento do nível de DPs na fase A, houve o aumento da vibração relativa no mancal guia da turbina em 19% (Figura 8), a vibração no mancal guia do gerador também aumentou, porém de forma menos significativa. Outras variáveis também foram observadas como temperatura do estator, cerca de 4% de aumento (Figura 9).

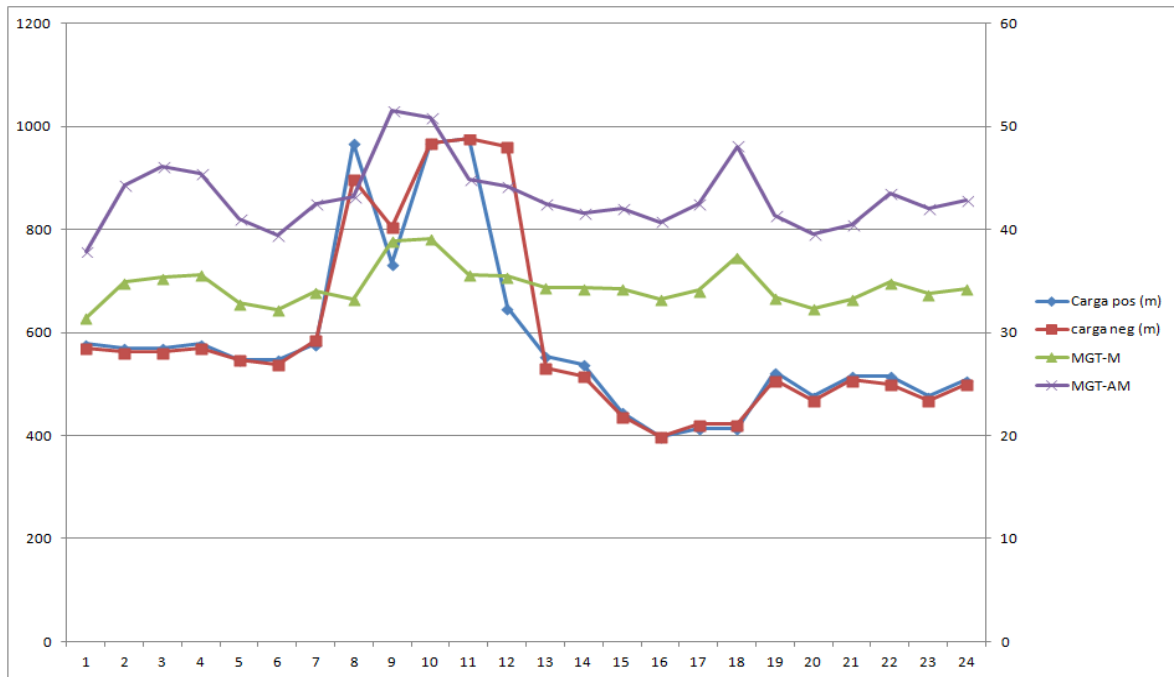


FIGURA 8- Vibração no Mancal Guia da Turbina x Curva de Tendência das DPs

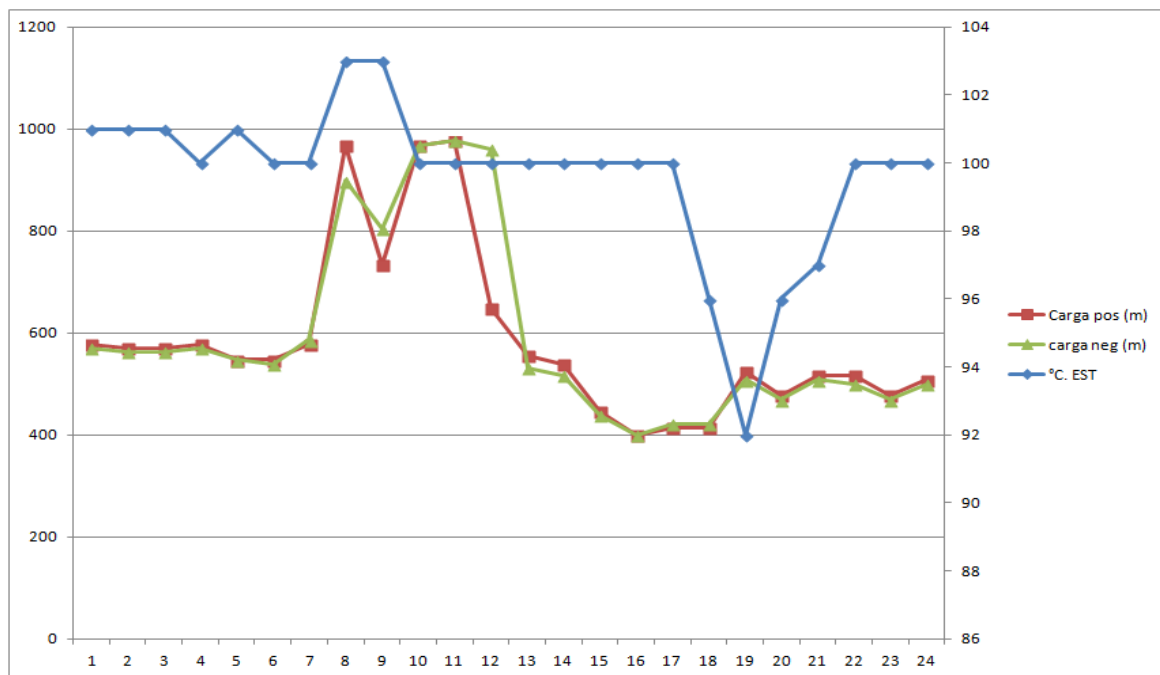


FIGURA 9- Temperatura do Estator x Curva de Tendência das DPs

Por fim, pode-se concluir com este estudo que a magnitude das DPs, assim como seu número de ocorrências, e consequentemente seu padrão apresentaram uma correlação positiva com o aumento das vibrações mecânicas, fato este que deve ser levado em consideração durante a análise do especialista para o melhor diagnóstico da máquina. Vale ressaltar que na literatura recente já existe relatos da relação entre vibrações mecânicas e descargas parciais (9).

5.0 - CONCLUSÃO

Na manutenção preditiva, neste caso, no monitoramento de Descargas Parciais procura-se obter informações contidas das condições de funcionamento do equipamento, relatar um diagnóstico e fazer intervenções antes da ocorrência de falhas, ou ainda, monitorar o início de falhas e intervir no momento adequado. Nota-se assim, a importância da utilização dessas técnicas de manutenção, principalmente as de análise de DPs, pois permite que o analista identifique a causa, faça o diagnóstico, e através de toda metodologia de análise vista, faça a avaliação da severidade e das condições do isolamento do enrolamento do estator, ou seja, as condições atuais e suas devidas falhas.

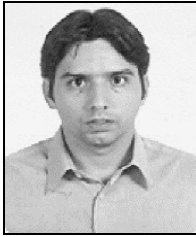
Dessa forma, pode-se concluir com este estudo que a magnitude das DPs, assim como seu número de ocorrências, e consequentemente seu padrão apresentam uma correlação positiva com o aumento das vibrações mecânicas, fato este que deve ser levado em consideração durante a análise do especialista para o melhor diagnóstico da máquina.

Tem-se como planos futuros automatizar o processo de análise e diagnóstico da isolação dos enrolamentos estatóricos através de técnicas de inteligência computacional, pois essa análise ainda é feita de forma manual o que toma muito tempo do especialista. E uma vez que as ocorrências de DPs tiveram correlação com os parâmetros das máquinas, tais como vibrações, temperatura, deseja-se também integralizar os dados do IMA-DP com os sistema supervisório, para que a análise dos dados se torne mais rápida.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) CUENCA, W.M.H., "Caracterização dos Sinais de Descargas Parciais em Equipamentos de Alta Tensão a Partir de Modelos Experimentais". Tese de Doutorado, Programa Pós-Graduação de Engenharias, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2005.
- (2) TAYLOR, N., "Dielectric Response and Partial Discharge Measurements on Stator Insulation at Varied Low Frequency". Tese de Doutorado, School of Electrical Engineering, Suécia, 2010.
- (3) CONSEIL INTERNATIONAL DES GRANDS RÉSEAUX ÉLECTRIQUES, "CIGRÉ 392 Survey of Hydrogenerator Failures", Working Group A1.10, 2009.
- (4) STONE, G.C., SASIC, M., DUNN, D., CULBERT, I., "Recent Problems Experienced With Motor and Generation Windings", Copyright Material IEEE, No. PCIC-2009-6, 2009.
- (5) INTERNACIONAL ELETROTECHNICAL COMMISSION, "IEC 60034-27-2 Rotating Electrical Machines – Part 27-2: On-line Partial Discharges Measurements on the Stator Winding Insulation of Rotating Electrical Machines". Suíça, 2012.
- (6) HUDON, C., BÉLEC, M., "Partial Discharges Signal Interpretation for Generator Diagnostics", IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 12, No. 2, 2005, pp. 297-319.
- (7) INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS, "IEEE Std 1434 Guide to Measurement of Partial Discharge in Rotating Machinery", USA, 2000.
- (8) CONSEIL INTERNATIONAL DES GRANDS RÉSEAUX ÉLECTRIQUES, "CIGRÉ 366 Guide for Partial Discharges Measurements in Compliance to IEC 60270". Working Group D1.33, 2008.
- (9) PENG, X., JIA Z., GAO S., WANG L., GUAN Z., "Study on Stator Winding Degradation under Bar Vibration", IEEE Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, City of Beijing, China, 2009.

7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Paulo Roberto Moutinho de Vilhena, nascido em Macapá-AP, no ano de 1981.

Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Pará (2005), graduação em Tecnologia em Informática pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará (2002), especialização em Engenharia de Sistemas pelo Centro Universitário do Estado do Pará (2005) e mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Pará (2008). Atualmente é Engenheiro de Manutenção Elétrica das Centrais Elétricas do Norte do Brasil. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Sistemas Elétricos de Potência. Atualmente, também é aluno de doutorado em Engenharia Elétrica na Universidade Federal do Pará (UFPA/PPGEE).



Fernando de Souza Brasil, nascido em Belém-PA no ano de 1983.

Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Pará (2005), graduação em Licenciatura Plena em Matemática pela Universidade do Estado do Pará (2004), Especialização em Engenharia de Produção pela Universidade do Estado do Pará (2012) e Mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Pará (2013). Atualmente é engenheiro de manutenção elétrica das Centrais Elétricas do Norte do Brasil - Eletrobras Eletronorte, atuando nas áreas de ensaios com alta tensão em equipamentos elétricos e monitoração e diagnóstico de transformadores e hidrogeradores. Atualmente, também é aluno de doutorado em Engenharia Elétrica na Universidade Federal do Pará (UFPA/PPGEE).



Camila Jéssica Sampaio dos Santos, nascida Macapá-AP, no ano de 1992.

Acadêmica de Engenharia Elétrica na Universidade Federal do Amapá (UNIFAP), estagiou na empresa Centrais Elétricas do Norte do Brasil - Eletrobras Eletronorte, no ano de 2014.