



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

Versão 1.0  
23 a 26 de Outubro de 2011  
Florianópolis - SC

**GRUPO - 01**

**GRUPO DE ESTUDO DE GERAÇÃO HIDRÁULICA - GGH**

**VALIDAÇÃO DO SISTEMA IMA-DP EM LABORATÓRIO E NA UHE SAMUEL – ELETRONORTE**

**Hélio Amorim(\*)**  
**Cepel**

**Alain Levy**  
**Cepel**

**André Tomaz**  
**Cepel**

**Thiago Baptista**  
**Cepel**

**Paulo Vilhena**  
**Eletronorte**

**Fernando Brasil**  
**Eletronorte**

**Marcos Moreira**  
**Eletronorte**

**RESUMO**

O sistema IMA-DP (Instrumentação para Monitoramento e Análise de Descargas Parciais), projetado e desenvolvido pelo Cepel e com participação da Eletronorte, já vem sendo utilizado para o monitoramento dos geradores 1 e 2 da UHE Tucuruí. É interesse da Eletronorte utilizar as informações do histórico de suas máquinas, bem como utilizar o conhecimento adquirido ao longo da utilização de sistemas de medição tradicionais para analisar os sinais de DP que poderão ser agora coletados pelo IMA-DP.

Este IT descreve os procedimentos realizados em laboratório e também na Usina Hidrelétrica Samuel, que validam o sistema IMA-DP considerando como base os resultados de outros dois sistemas de medição amplamente difundidos no meio técnico. A validação foi feita através de comparação de medições em amplitude medida em mV e na discriminação de pulsos de acordo com a fase (phase resolved PD).

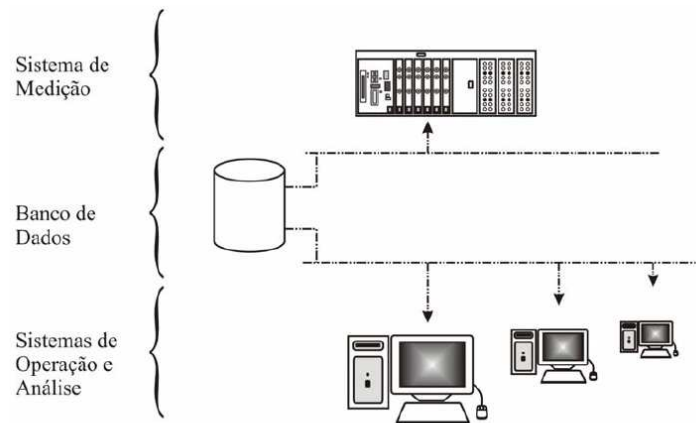
**PALAVRAS-CHAVE**

Descargas Parciais, Monitoramento, IMA-DP

**1.0 - INTRODUÇÃO**

O IMA-DP possui uma plataforma bastante diferente dos sistemas tradicionais de medição de DP. Ele utiliza arquitetura modular de hardware e instrumentação virtual, alocando todas as informações e parâmetros de operação em um banco de dados corporativo. O sistema original, desenvolvido pelo Cepel, denominado IMA-DP, que pode ser aplicável a qualquer equipamento de alta tensão, possui três subsistemas integrados, são eles: sistema de medição, sistema de operação e sistema de análise.

O sistema de medição é responsável pelas funções de aquisição e registro dos sinais de DP na forma de mapas estatísticos. O sistema de operação é responsável pela configuração e pelo ajuste do hardware de medição, bem como pela solicitação de medições. O sistema de análise inclui ferramentas para visualização dos dados adquiridos e tratamento das informações consolidadas no banco ao longo do tempo, com vistas ao diagnóstico dos equipamentos monitorados. Os três sistemas comunicam-se através de uma rede ethernet, acessando um banco de dados comum, como ilustra a Figura 1.



O sistema foi concebido de forma que, virtualmente, não houvesse quaisquer limitações no número de sinais monitorados. Todo o hardware de medição pode, portanto, ser redimensionado pelo sistema de operação, de modo que o número de canais de medição possa ser expandido indefinidamente.

O hardware de medição será constituído por uma ou mais unidades independentes de medição: computadores industriais padrão Extended PCI ou PXI. Cada chassis PXI possui um módulo controlador, e diversos cartões digitalizadores de alta velocidade, e alguns módulos de chaves comutadoras, como mostra a Figura 2.

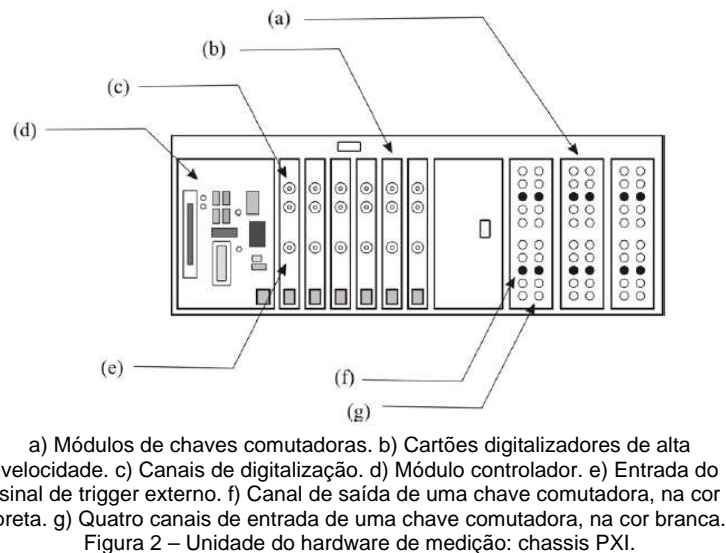


Figura 2 – Unidade do hardware de medição: chassis PXI.

Os cartões digitalizadores utilizados possuem 8 bits de resolução, com taxa de amostragem de até 100 MHz. Ao lado dos cartões digitalizadores, o chassis da Figura 2 contém ainda alguns módulos de chaves comutadoras. A função destes módulos é expandir o número de canais de aquisição. Assim, em cada chave comutadora entram quatro sinais de DP, que serão sucessivamente aquirados por um único canal em uma placa de aquisição. Os sinais de sincronismo dos diversos circuitos de medição de DP alimentam as entradas de trigger externo das placas de aquisição.

O processo de medição é regido pelo módulo controlador, que roda sobre um sistema operacional um software de aquisição e processamento de sinais. Ao realizar uma medição, o PXI inicialmente busca na rede todos os parâmetros necessários, e, após posicionar a chave comutadora para o canal correto, realiza o número especificado de aquisições e processamentos na placa de aquisição correspondente. O resultado de cada medição é registrado no banco de dados do sistema e poderá ser analisado pelo sub-sistema de análise.

O sistema de análise foi, a princípio, concebido para trabalhar de maneira desacoplada ao sistema de medição, de forma que seja possível realizar análises sem a necessidade de instalação do software de medição, mas somente com o acesso ao banco de dados gerados pelo sistema de medição.

Neste sistema podem-se destacar dois tipos de análise, a pontual e a histórica. A pontual trata da avaliação momentânea e atual, isto é, se o nível de DP de uma medição está acima ou abaixo do nível pré-estabelecido na tela de Setup. Três sinais de alarme podem ser gerados: Normal, Alerta e Preocupante. Intuitivamente pode-se

definir o Normal como condições normais de ocorrências de DP, o Alerta como um nível de ocorrência de DP em sinal de alerta, o que pode servir como um indicativo de anormalidade e o Preocupante que, conforme a definição, é uma condição que está acima da que foi ajustada no Setup e, portanto, deve ser investigada com um maior aprofundamento.

A segunda forma de análise é a que denominamos de histórica. Pretende-se avaliar de forma evolutiva os níveis de ocorrência de Descargas Parciais no sistema de isolamento da máquina elétrica. Há também a possibilidade de analisar essas curvas de maneira individual, ou seja, cada medição individualmente. Isto pode servir para observar medição anômala e que por esta razão não deva ser considerada na análise final.

A proposta original do sistema IMA-DP é a instalação permanente do sistema de monitoramento ligado de maneira on-line ao sistema corporativo da empresa, sendo armazenado em um banco de dados confiável, podendo ser analisado por diversos agentes da empresa. Além disto, estas informações podem estar disponíveis no sistema DIANE, através de um plug-in destinado a esta função. Sendo, assim, há um esforço concentrado do Cepel em fornecer soluções integradas com desenvolvimento nacional que atenda a demanda das empresas do setor elétrico com confiabilidade, suporte técnico dedicado e custos reduzidos. A seguir um exemplo de uma configuração em estágio conclusivo é demonstrado, onde pode-se verificar os acopladores capacitivos, as impedâncias de medição, os cabos coaxiais de conexão, o sistema de aquisição, o banco de dados e os clientes.

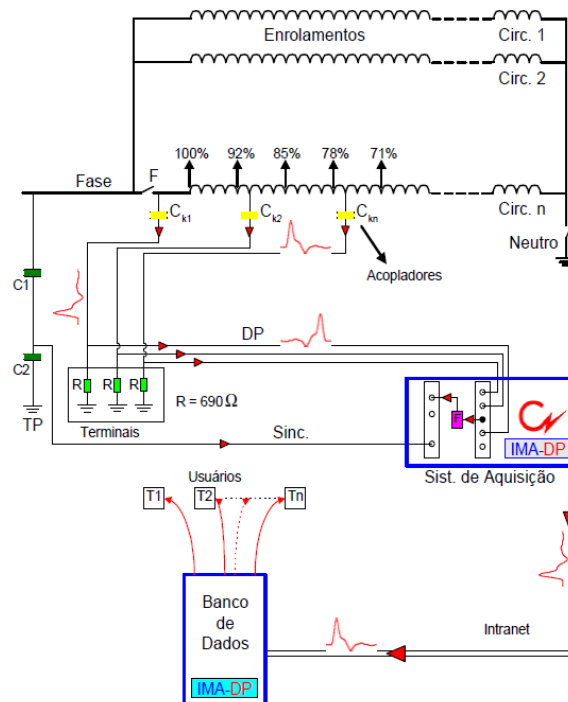


Figura 3 – Configuração Básica do Sistema IMA-DP numa Instalação Real

## 2.0 - REPRESENTAÇÃO DAS DESCARGAS PARCIAIS

Para caracterização satisfatória da ocorrência de DP, tratando-se de um fenômeno estatístico, faz-se necessária a aquisição do sinal durante vários ciclos da rede. Entretanto, como o sinal é de alta frequência (tipicamente até algumas dezenas de MHz), pelo teorema de Nyquist, para não incorrerem em erros de *aliasing*, o sinal deve ser digitalizado com uma taxa de aquisição pelo menos igual ao dobro de sua maior componente de frequência. Estes dois fatos conduzem-nos a um problema de espaço de armazenamento da informação, demonstrado a seguir.

Suponha que um sinal de DP seja digitalizado com uma taxa de aquisição de 100MHz. Para registrar este sinal por 16,6 ms, seria necessário armazenar um vetor de 1.660.000 pontos, que corresponderia a apenas um ciclo da senóide de 60Hz. Como vemos, o registro do sinal ao longo de vários ciclos requereria uma grande quantidade de memória e de espaço de armazenamento em disco, o que sobrecarregaria todo o sistema de medição, tornando cada vez mais lento o processo de aquisição, principalmente pela paginação de memória e pelos tempos de acesso às unidades de armazenamento.

Para contornar o problema, a forma universalmente adotada para registrar a ocorrência de DP foi a construção do **mapa estatístico** de DP, representado na Figura 4, que é comumente utilizado como forma de representação de DP em instrumentos digitais de medição. Dada a impossibilidade de registrar vários trens de pulsos ao longo de

vários ciclos da rede, o sistema de aquisição, a cada ciclo, captura um trem de pulsos e registra-os num gráfico de superfície. Neste gráfico, o eixo horizontal representa fase da tensão aplicada, o eixo vertical representa amplitude, e a cor indica o número de ocorrências de DP (com determinada amplitude e em determinada fase) ao longo de vários ciclos de aquisição. Note que, na construção do mapa estatístico, cada vetor com um trem de pulsos é processado e descartado logo em seguida, de modo que a informação da ocorrência de DP é extraída e condensada, com economia de memória e espaço de armazenamento.

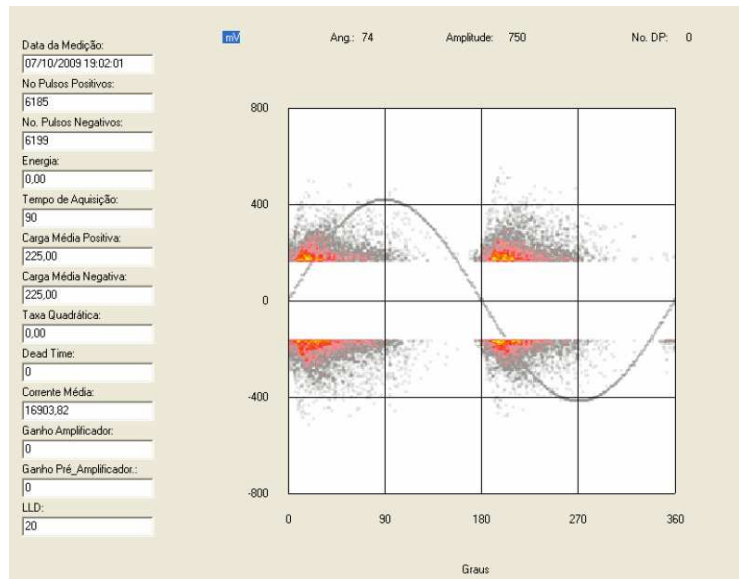


Figura 4 – Mapa Estatístico representativo das DP

A aquisição de um mapa estatístico de DP comporta, logo após a digitalização dos pulsos, uma segunda discretização dos valores de fase e amplitude, de acordo com as dimensões da matriz de representação do mapa. Embora este processo implique em uma certa perda de informação, o mapa estatístico de DP é uma forma de representação bastante próxima do fenômeno medido, e dele pode-se extrair muitas outras informações usualmente registradas pelos sistemas digitais de medição de DP.

Para a realização do estudo que o trabalho se propõe foi necessário à definição de algumas grandezas oriundas dos mapas estatísticos mostrados anteriormente. Essas quantidades relacionadas aos pulsos de DP podem ser encontradas na Norma Internacional IEC, definida em [5] e transcritas aqui. Outras foram estabelecidas pelo grupo de pesquisadores do CEPEL, que evidenciaram razões significativas para a elaboração destas. São elas:

**Carga Aparente  $q$**  → a carga aparente de um pulso de corrente DP é a carga unipolar que, se injetada em um curto espaço de tempo entre os terminais do objeto de teste em um circuito específico, dará a mesma leitura no instrumento de medição quando for realmente o pulso de corrente de DP. A carga aparente é usualmente expressa em picoCoulombs [pC].

**Taxa de Repetição  $n$**  → a taxa de repetição dos pulsos de descargas parciais é geralmente expressa em pulsos por segundo. Ela é a relação entre o número total de pulsos de DP registrados em um intervalo de tempo e a duração deste intervalo. Na prática, somente pulsos acima de uma amplitude especificada, ou dentro de um range de amplitudes especificadas são considerados. A especificação da amplitude é estabelecida através do índice denominado LLD (Low Level Discriminator), que estabelece a percentagem da amplitude máxima que será considerada. Considere, por exemplo, a amplitude máxima dos pulsos definida como 100 pC e um LLD de 5%, neste caso só serão considerados pulsos com amplitude superior a 5 pC. Essa prática é importante posto que evita que sejam considerados pulsos que estão relacionados à ruídos de baixa amplitude, que são bastante comuns em ambientes fora das condições de laboratório, otimizando, de certa forma, o tempo de processamento do sistema de aquisição, pois a taxa de ocorrência de pulsos de baixa amplitude é muito elevada.

**Ângulo de fase  $\varphi_i$  e tempo  $t_i$  de ocorrência de um pulso DP** → o ângulo de fase de um pulso individual de DP é definido como:

$$\varphi_i = 360 \cdot (t_i / T)$$

Onde  $t_i$  é o tempo medido da transição positiva do zero de tensão e  $T$  é o período da tensão de teste. O ângulo de fase é geralmente expresso em graus. Note que o ângulo de fase é importante para o diagnóstico e monitoramento.

### 3.0 - ESTUDO DE CASOS

Foram realizados três estudos de casos: dois deles em laboratório, utilizando como parâmetro de comparação dois diferentes sistemas tradicionais de medição, e um em campo, na Usina Hidrelétrica Samuel, da Eletronorte, em Porto Velho, Rondônia.

#### 3.1 Validação em Laboratório – Comparação com o Sistema PDA-H

No laboratório de alta tensão do Cepel, IMA-e, foi montado um circuito de medição utilizando como objeto de ensaio barras estatóricas envelhecidas. Foram então realizados testes simultâneos utilizando o sistema comercial PDA e o sistema desenvolvido pelo Cepel, IMA-DP. A representação padrão do PDA é uma curva, ou histograma, com amplitude das DP (mV) e o número de pulsos (figura 5 – a esquerda) com as duas polaridades. O IMA-DP, além de representar o mapa estatístico também é capaz de representar conforme o padrão do PDA (figura 5 – a direita). A diferença de resolução entre os gráficos decorre da resolução do IMA-DP ser 16 vezes maior que a do PDA tomado como referência.

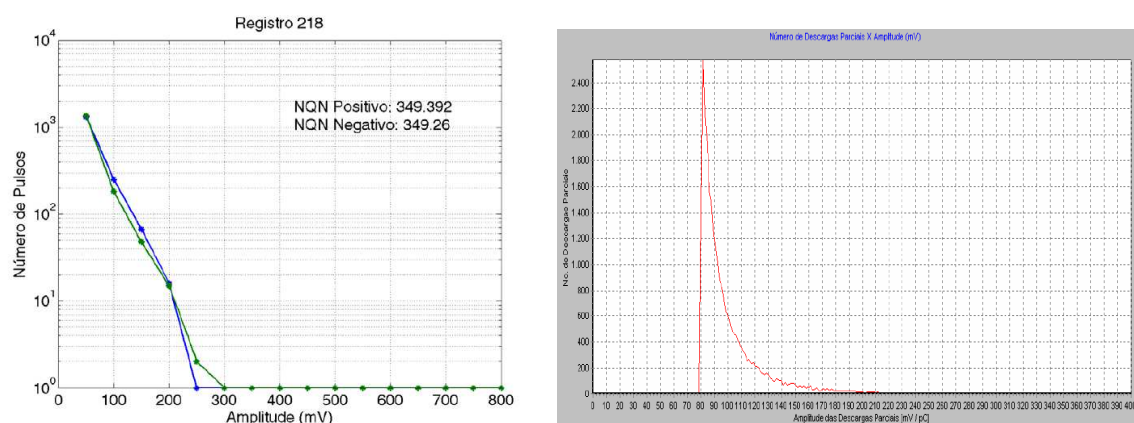


Figura 5 – Histograma de Amplitude de DP ( PDA à esquerda e IMA-DP à direita)

#### 3.2 Validação em Campo – Usina Hidrelétrica Samuel - Eletronorte

Inicialmente foram levantados os valores de impedância de medição das caixas terminais dos acopladores. Todos os 30 pontos apresentaram valores condizentes com especificado, ou seja, aproximadamente 690 ohms.

Foram utilizados os seguintes equipamentos para medição:

- Osciloscópio para medição dos sinais no domínio do tempo;
- Analisador de Espectro para medição dos sinais no domínio da frequência;
- IMA-DP para medição dos sinais ao longo do tempo, especificamente 60 seg., formalizando um mapa estatístico característico dos sinais, bem como gráficos similares ao produzido pelo PDA-H;
- Notebook para armazenamento dos sinais de forma digital para futuros estudos e processamento.
- PDA-H para medição dos sinais de DP conforme procedimento já consolidado pela UHE Samuel

Houve uma avaliação preliminar das condições do isolamento das máquinas. Todas as máquinas apresentaram poucas atividades de DP, excetuando a fase V da máquina 1. Esta fase apresentou sinais elevados quando comparados com as outras fases, em torno de 700mV, quando nos outros pontos as amplitudes medidas permaneceram inferiores a 300mV. Houve um consenso de que os sinais desta fase devem ser monitorados através de medições em intervalo de tempo menor do que nas outras máquinas;

Os sinais registrados tanto pelo IMA-DP, quanto pelo PDA-H apresentaram coerência entre si, inclusive no ponto onde reconhecidamente havia sinais de DP (a fase V da máquina 1). Esta etapa serviu como referência para a validação do sistema IMA-DP no campo, o que já havia sido feito no laboratório do Cepel em outubro de 2009.



Figura 6 – Medição de DP na usina de Samuel

### 3.3 Validação em Laboratório –Comparação com o ICM System

Após a validação da medição de acordo com os níveis de amplitude em mV registrados pelo PDA-H, um novo estudo foi realizado no sentido de avaliar o desempenho do IMA-DP na aquisição de sinais com discriminação de fase (phase resolved partial discharge measurement - PRPD).

Para tal, foi utilizado o ICM System como referência na medição dos sinais de DP em barras de gerador. As figuras de 7 a 9 demonstram um comparativo entre a resposta dos dois sistemas, no mapa estatístico e nos histogramas de fase e de amplitude.

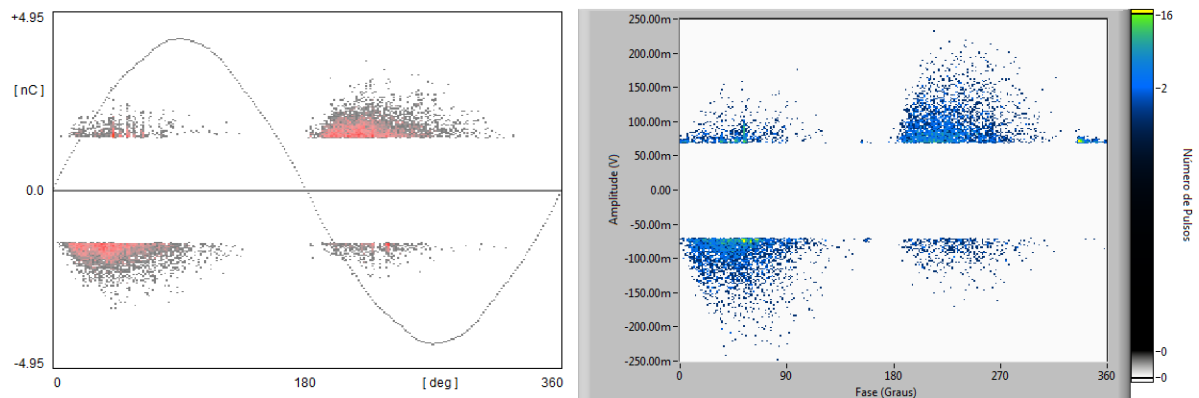


Figura 7 – Mapas estatísticos de DP: IMA-DP (a direita) e ICM system (a esquerda)

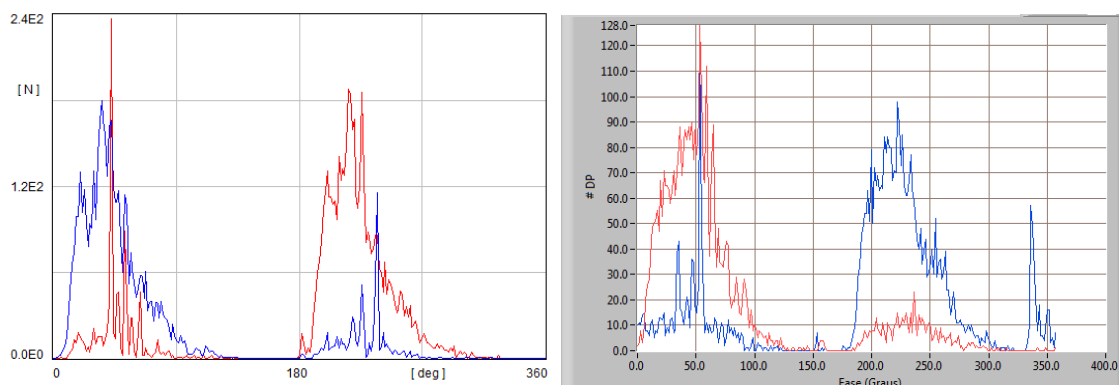


Figura 8 –Histogramas de Fase de DP: IMA-DP (a direita) e ICM system (a esquerda)



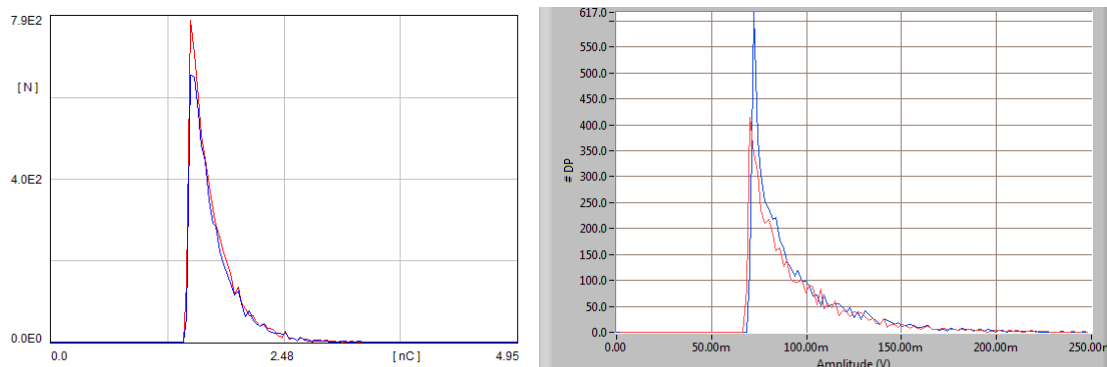


Figura 9 – Histogramas de Amplitude de DP: IMA-DP (a direita) e ICM system (a esquerda)

#### 4.0 - CONCLUSÃO

Entre os sistemas de monitoramento existentes, a medição de Descargas Parciais é a única capaz de dar algum indicativo sobre o isolamento elétrico das barras estatóricas e enrolamentos de motores de alta tensão sem a necessidade de intervir na máquina quando esta estiver em operação, ou seja, uma medição on-line. Mesmo sabendo da inexistência de critérios consensuais mundiais para a execução deste tipo de monitoramento, isto não constitui razão suficiente para não se realizar tal procedimento. A favor da medição de Descargas Parciais está a sua característica de poder fornecer informações sobre estado de deterioração elétrica em condições muito iniciais propiciando o planejamento de intervenções bem antes de chegar a uma condição de falha operacional das máquinas.

Sendo assim, pretende-se com este trabalho informar aos profissionais da área de manutenção e operação que ela pode ser uma ferramenta importante na prevenção, apresentando resultados diretos e com fácil implementação no campo. A parte elétrica, vital ao bom funcionamento da máquina, ainda carece de ferramentas adequadas para avaliação e de pessoal especializado.

O CEPEL, como centro de pesquisa, tem se mostrado disposto a liderar tal esforço, quer seja por meio de cursos específicos, quer seja por medições no campo nas empresas, especialmente as do Sistema Eletrobrás. Pretende-se assim, de certa maneira, estimular o debate sobre o tema e descrever os mecanismos envolvidos na execução deste monitoramento.

O Sistema de medição IMA-DP surge nesse contexto como uma ferramenta eficiente e de baixo custo, agora validada em laboratório e no campo, ao alcance das empresas da Eletrobrás e do setor elétrico.

Houve consenso entre os profissionais participantes do trabalho que o IMA-DP e os demais sistemas apresentaram resultados bastante similares. Foram feitos diversos arranjos e sob diversos níveis de tensão, o que ocasionou níveis de DP de várias intensidades e com níveis de repetição variados. Enfim, buscou-se simular as diversas possibilidades existentes encontradas no campo. Em todas elas, os três sistemas apresentaram resultados similares, sendo considerado satisfatório o resultado de validação do sistema IMA-DP.

#### 5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Carvalho, A. T., Levy, A. F. S., Amorim, H. P. Jr, Rocha, R. O., Sans, J. e Nascimento, L. - Sistema para Medição e Análise e Diagnóstico de Descargas Parciais - Uma Proposta de Arquitetura Econômica Versátil e Integrada – II ENAM – 2004 – Belém - PA – Brasil
- [2] Bartnikas, R., and MacMahon, E. J., Engineering Dielectrics, Vol. 1, Corona Measurement and Interpretation, STP 699, ASTM, Philadelphia, 1979.
- [3] C. Hudon, and M. Belec, The Importance of Phase Resolved Partial Discharge Pattern Recognition for On-Line Generator Monitoring, IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Arlington, Virginia, USA, June 7-10, 1998
- [4] D. Gross, On-Line partial discharge diagnosis on Large Motors, Conference on Electrical Insulation and