



SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA

GGH - 13
16 a 21 Outubro de 2005
Curitiba - Paraná

GRUPO I
GRUPO DE ESTUDO DE GERAÇÃO HIDRÁULICA - GGH

SISTEMA PARA MEDIÇÃO, ANÁLISE E DIAGNÓSTICO DE DESCARGAS PARCIAIS - UMA PROPOSTA DE ARQUITETURA ECONÔMICA VERSÁTIL E INTEGRADA

CARVALHO, André Tomaz *

CEPEL-RJ

AMORIM, Hélio Paiva

CEPEL-RJ

LEVY, Alain François Sanson

CEPEL-RJ

ROCHA, Renato Oliveira

CEPEL-RJ

SANS, Jacques Philippe

Eletronorte

NASCIMENTO, Lidio Francisco A.

Eletronorte

NASCIMENTO, Wilson Geraldo

Eletronorte

REBELO, Jorge Augusto

Eletronorte

FERREIRA, Marco Antônio Portella

Eletronorte

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo descrever o sistema de medição de Descargas Parciais (DP), desenvolvido pelo CEPEL em parceria com a ELETRONORTE, para a monitoração de DP em hidrogeradores. O Sistema proposto utiliza, como hardware de medição, cartões digitalizadores de alta velocidade em um computador industrial PXI e foi concebido para operar on-line, registrando remotamente mapas estatísticos de DP, consolidando um banco de dados de medições ao longo do tempo. O sistema atualmente está em fase de testes, monitorando as unidades geradoras 1 e 2 da usina de Tucuruí – Eletronorte.

PALAVRAS-CHAVE

Sistema de Medição, Monitoramento, Descargas Parciais, Hidrogeradores

1.0 - INTRODUÇÃO

O CEPEL há muitos anos vem se dedicando à pesquisa de sistemas de monitoramento que têm por objetivo o desenvolvimento de ferramentas computacionais para fins de medição, armazenamento e análise, bem como de modelos para fins de avaliação operativa e diagnóstico de máquinas rotativas. Além das grandezas mecânicas e térmicas tradicionais, vêm sendo incorporados mais recentemente aspectos de desempenho dielétrico do isolamento estatórico traduzido pela medição e avaliação das descargas parciais pela metodologia elétrica.

Nesse trabalho, tem-se por objetivo apresentar o estado atual desse desenvolvimento voltado para o monitoramento das descargas parciais, descrever as principais condições de contorno onde tal técnica pode ser utilizada, exemplificar como é sua integração com sistemas de monitoramento de outras grandezas e apresentar os principais resultados práticos obtidos até o momento.

A medição de descargas parciais em máquinas rotativas de grande porte sempre apresenta discussões intensas e opiniões divergentes nos grupos técnicos especializados. Esse estado da arte, que tem evoluído pouco nos últimos anos em termos de diagnóstico efetivo das máquinas, não permitiu que fossem elaboradas recomendações e procedimentos normativos universais. Essa estabilização tecnológica acarreta uma diversidade de encaminhamentos de soluções de monitoramento e diagnóstico conforme a filosofia de manutenção e conhecimento técnico de cada empresa. Existe, no entanto, um ponto em comum dentre os especialistas nessa

* Av. Um s/nº - Cidade Universitária CEP: 21941-590 – Rio de Janeiro - RJ
Tel.: (021) 2598-6423 - Fax: (021) 2270-4189 - e-mail: tomaz@cepel.br

área: a consideração da medição de descargas parciais como uma ferramenta fundamental para estabelecer uma avaliação consistente do desempenho elétrico do enrolamento estático.

Assim, procurou-se descrever, numa primeira fase, os principais fatores que afetam a qualidade da análise e diagnóstico do estado operativo das máquinas baseado numa coletânea de aquisições de descargas parciais. Entre esses fatores citam-se as características elétricas dos acopladores, sua quantidade e sua localização bem como as faixas de frequência de medição, a forma de armazenamento dos sinais adquiridos, etc. A combinação dos sinais adquiridos com as condições de operação da máquina, tais como potência de operação e distribuição de temperatura das barras, são outros fatores a serem considerados.

Baseado nessas informações iniciais, optou-se por desenvolver um sistema que pudesse ser flexível ao ponto de propiciar um certo grau de adaptação às características de cada máquina ou parte desta. Notadamente, as faixas de frequência de medição e a consideração de valores limites de descargas parciais, são exemplos de parâmetros que podem ser diferentes para diferentes enrolamentos estáticos.

Do ponto de vista da análise da informação, foi desenvolvido um procedimento que facilitasse a visualização da evolução das descargas parciais em vários níveis tais como pela média global em um determinado período, por ponto de medição, por grupos de acopladores, etc. A formulação de um banco de dados único unindo grandezas elétricas, térmicas e mecânicas propiciou uma maior versatilidade de análise conforme o interesse específico de cada usuário. A visualização de mapas, curvas e tendências pode ser flexibilizada e alterada conforme o interesse dos usuários do sistema.

Outra meta importante foi a utilização de equipamentos modulares comerciais de fácil aquisição no mercado e que tornaram o custo final do sistema muito reduzido, facilitando os processos de manutenção e barateando os reparos e futuras atualizações do sistema. Foram ainda acrescentados ao sistema processos matriciais de multiplexação dos sinais de descargas parciais, que permitem estabelecer diferentes configurações combinando o custo do sistema em função do tempo total pretendido para a varredura de todos os acopladores de um determinado conjunto de máquinas.

2.0 - CARACTERÍSTICAS DOS CIRCUITOS DE MEDIÇÃO

A ocorrência de DP no isolamento de um equipamento elétrico manifesta-se na forma de um trem de pulsos de alta frequência, da ordem de milivolts, superpostos à tensão aplicada no equipamento.

A Figura 1 mostra, à esquerda, um pulso elétrico de uma descarga parcial no isolamento de uma barra de gerador, e à direita, o trem de pulsos de DP adquiridos ao longo de um ciclo da rede.

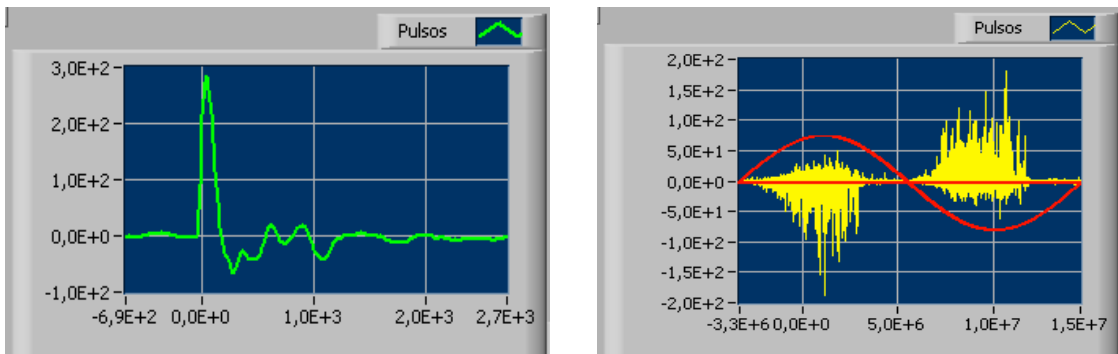


FIGURA 1 - À esquerda: pulso de descarga parcial. À direita: trem de pulsos ao longo de um ciclo da senóide. Em ambos os gráficos, a escala vertical é dada em mV, e a horizontal em nano-segundos.

Tratando-se de um sinal de alta frequência, o sinal de DP pode ser adquirido através do circuito de medição mostrado na Figura 1. O fenômeno de DP é captado através do capacitor de acoplamento C1 e medido sobre a impedância de medição Z (tipicamente da ordem de algumas dezenas ou centenas de Ohms). Note que C1 e Z constituem um filtro passa altas, que elimina as componentes de baixa frequência do sinal, possibilitando a aquisição do sinal de DP pelo equipamento de medição.

No entanto, para a caracterização do defeito no isolamento, é conveniente registrar os pulsos de DP em função da fase da senóide em que estes ocorreram. Para tanto, utiliza-se o divisor capacitivo formado por C2 e C3, de modo a obtermos um sinal de sincronismo pela fase de alimentação.

Ambos os sinais, de DP e de sincronismo, seguem para o equipamento de medição, onde serão adquiridos e processados.

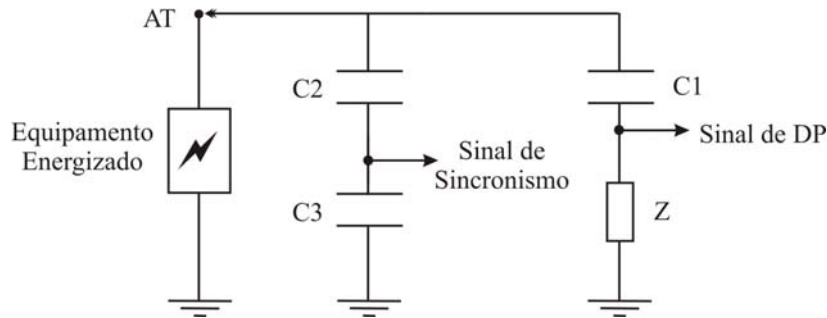


FIGURA 2 - Circuito de Medição de Descargas Parciais.

Os sinais de descargas parciais são portanto medidos a partir de capacitores de acoplamento conectados em pontos pré-definidos ao longo dos circuitos das fases do enrolamento estatórico. Conforme as características do gerador e a filosofia de medição, podem ser instalados diversos acopladores por circuito. Não existe uma forma precisa de se definir um número mínimo necessário de acopladores, dado que, independentemente do possível critério adotado, não seria possível nem quantificar com precisão o nível das descargas nem estabelecer sua posição relativa dentro do estator. Isso ocorre porque o conjunto de enrolamentos do estator se comporta em alta frequência como um circuito distribuído, com indutâncias em série e capacitâncias em paralelo, tal qual uma linha de transmissão. Esse comportamento faz com que os sinais correspondentes às descargas tenham diferentes amplitudes em função de seu local de ocorrência e da posição relativa do acoplador onde está sendo realizada a medição. A conclusão a que se chega é que a medição de DP deve buscar estabelecer um comportamento estatístico do enrolamento como um todo, e identificar a evolução dos níveis de descarga ao longo do tempo. Conforme a técnica de análise utilizada, é possível também estimar o tipo de defeito ocorrendo no estator.

Com essas premissas, algumas flexibilizações podem ser consideradas no processo de medição das DP's: um maior número de acopladores não necessariamente vai introduzir maior confiança e eficiência no diagnóstico nem propiciar a localização de alguma região mais crítica em termos de ocorrência de descarga; o valor da capacitância do acoplador não é muito importante (podem ser utilizados acopladores com 500 pF, 145 pF, 80 pF, entre outros); A calibração do circuito de ensaio também não é muito importante, posto que descargas em diferentes pontos do enrolamento se traduzem em diferentes amplitudes de descarga nos pontos de medição, e que o mais importante é acompanhar a evolução das descargas em uma mesma posição geométrica; podem ser feitos diferentes ajustes do circuito de medição e da instrumentação para diferentes acopladores instalados nos diversos pontos ao longo do enrolamento, ou seja, os ajustes de sensibilidade da medição podem ser definidos para cada acoplador; basta que se distribua acopladores nas regiões onde há maior concentração de campo elétrico no enrolamento (lado de alta tensão) e, se for o caso, em posições de forte acoplamento entre barras de diferentes fases.

A diversidade de montagens possíveis dos circuitos de ensaio permite a realização de medições em diversas faixas de frequência. Assim, conforme a instalação a ser considerada, é possível ajustar as faixas de frequência mais sensíveis para cada tipo de enrolamento e, se for o caso, para cada acoplador instalado.

3.0 - MAPAS ESTATÍSTICOS DE DP

Tratando-se de um fenômeno estatístico, para caracterizar satisfatoriamente a ocorrência de DP, 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 a um problema de espaço de armazenamento da informação, como mostraremos 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 adotada para registrar a ocorrência de DP foi a construção do mapa estatístico de descargas parciais, representado na Figura 3, 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, 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.

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 certa perda de informação, o mapa estatístico de DP é uma forma de representação bastante próxima do fenômeno medido, e dele se pode extrair muitas outras informações usualmente registradas pelos sistemas digitais de medição de DP.

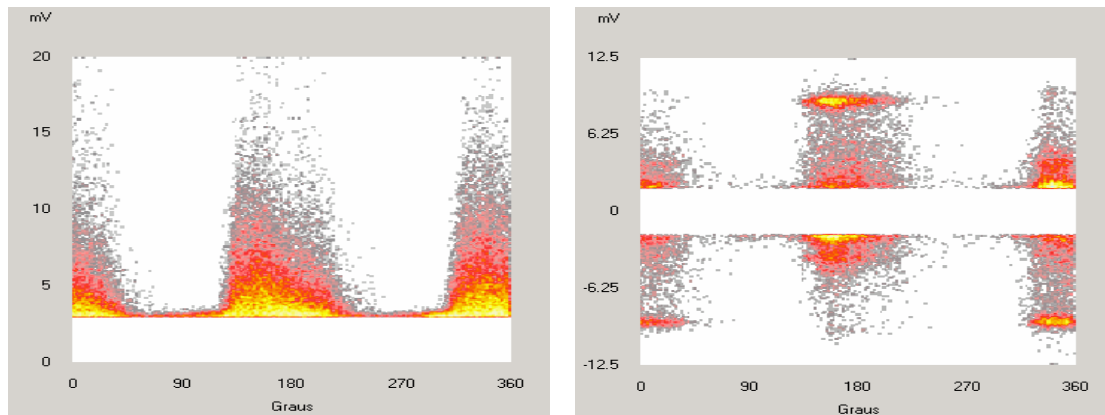


FIGURA 3 - Mapas estatísticos de DP. À esquerda é mostrado um mapa unipolar, e à direita um mapa bipolar.

4.0 - ARQUITETURA DO SISTEMA

O sistema completo está constituído por três subsistemas integrados: o sistema de medição e os sistemas de operação e 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, acessando um banco de dados comum, como ilustra a Figura 4. A seguir, detalharemos cada um desses três subsistemas.

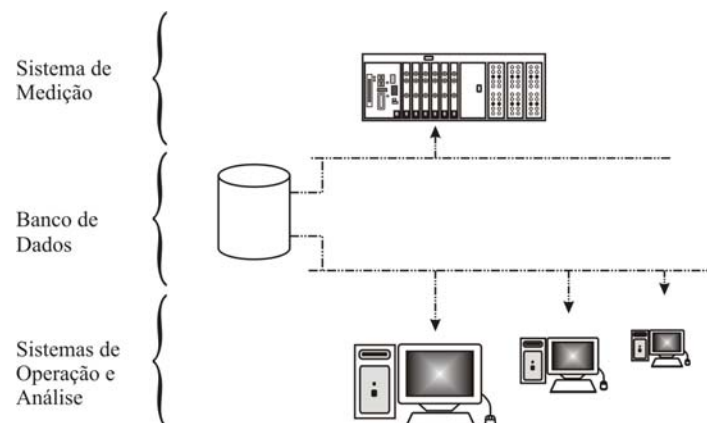


FIGURA 4 - Arquitetura do sistema de medição.

4.1 Sistema de Medição

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 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 5.

Os cartões digitalizadores utilizados possuem 8 bits de resolução, com potencial de amostragem de dezenas de MHz. Ao lado dos cartões digitalizadores, o chassis da Figura 5 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 adquiridos 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 OS Windows 2000 um software de aquisição e processamento de sinais desenvolvido em linguagem C++.

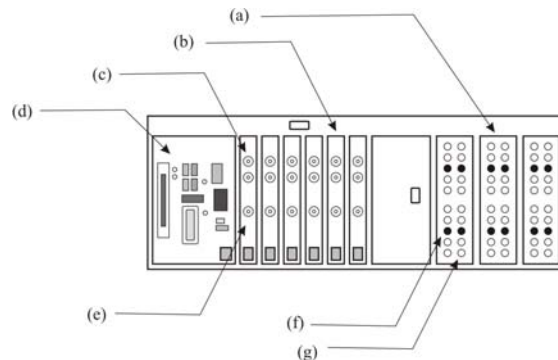


Figura 5 – Unidade do hardware de medição: (a) Módulos de chaves comutadoras. (b) Cartões digitalizadores de alta velocidade. (c) Canais de digitalização. (d) Módulo controlador. (e) Entrada do sinal de sincronismo. (f) Canal de saída de uma chave comutadora, na cor preta. (g) Quatro canais de entrada de uma chave comutadora, na cor branca.

Ao realizar uma medição, o sistema 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.

4.2 Sistema de Operação

O sistema de operação contém duas camadas distintas: uma camada de configuração do hardware de medição e uma camada de solicitação de medições.

4.2.1 Configuração do Hardware

A configuração do hardware de medição é totalmente remota, registrada pelo sistema de operação no banco de dados. Cada unidade de hardware, ao iniciar o controle dos seus instrumentos, o faz com base nas configurações previamente especificadas e registradas no banco.

Nesta camada do sistema de operação, o administrador do sistema configura parâmetros de aquisição das placas de aquisição de dados e das chaves comutadoras, especificando que canal irá monitorar cada sinal disponível de DP.

Uma das principais funções da camada de configuração do hardware é tornar a instrumentação absolutamente transparente para o usuário que posteriormente solicitará as medições. Assim, uma vez configurado o hardware, este usuário se limitará a especificar o ponto da máquina que quer medir e as características desta medição, sem se preocupar com a configuração detalhada do hardware, das placas de aquisição e das chaves comutadoras. Em outras palavras, este recurso torna a instrumentação do sistema totalmente virtual.

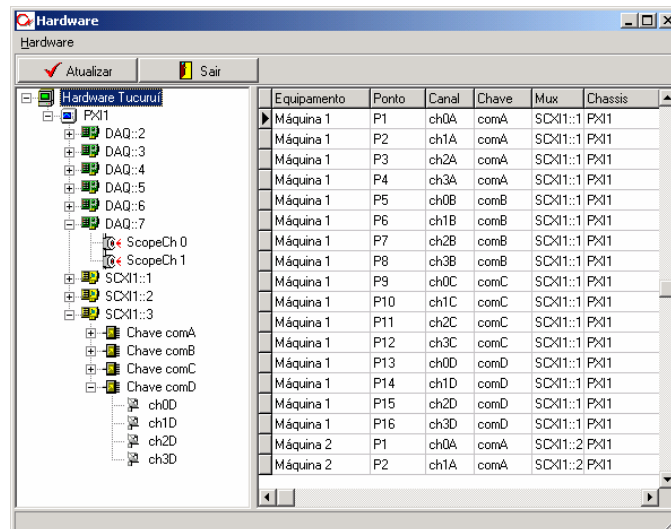


FIGURA 6 - Janela de configuração do hardware.

4.2.2 Solicitação de Medições

Após a configuração do hardware, o sistema estará apto a receber solicitações de medições. Nesta camada, o usuário possui uma visão de todos os pontos de medição das máquinas monitoradas pelo sistema. As máquinas podem eventualmente pertencer a uma única unidade geográfica (uma usina, fábrica, etc.) ou mesmo pertencer a diferentes unidades dentro da mesma empresa.

Selecionados os pontos de medição desejados, o usuário programará livremente o disparo das medições desejadas. Uma medição poderá ser disparada de três formas distintas: por agendamento prévio, em resposta a um evento (tipicamente uma determinada condição de temperatura e potência da máquina) ou de acordo com um determinado período, para a consolidação de um histórico de medições.

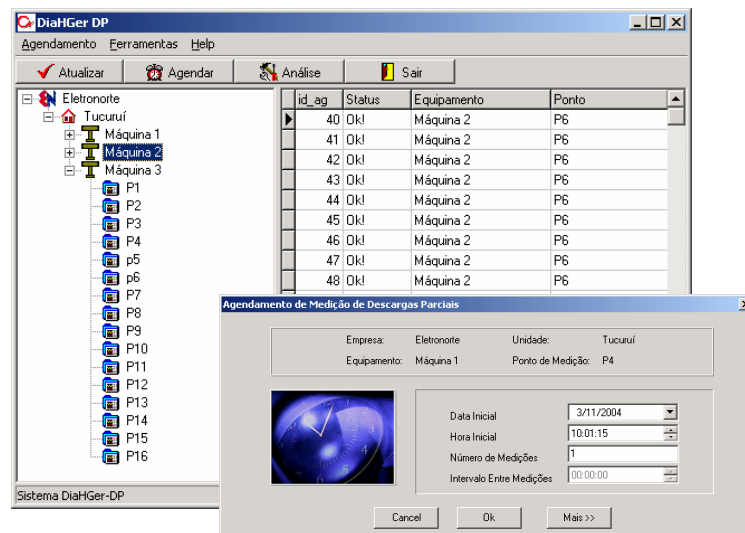


FIGURA 7 - Interface para solicitação de medições.

5.0 - SISTEMA DE ANÁLISE

O sistema de análise permite visualizar e tratar o banco de dados de medições realizadas pelo sistema. As medições podem ser tratadas isoladamente ou em conjunto.

A Figura 8 mostra o resultado de uma medição realizada na fase C da UHG 1 da usina de Tucuruí em dezembro de 2004. O mapa estatístico medido pode ser visualizado em um gráfico de superfície, como mostra a figura. A partir da representação do mapa estatístico, outras informações podem ser extraídas, tais como o número total de DP registradas na medição, e os gráficos de número de pulsos registrados em função da fase e da amplitude.

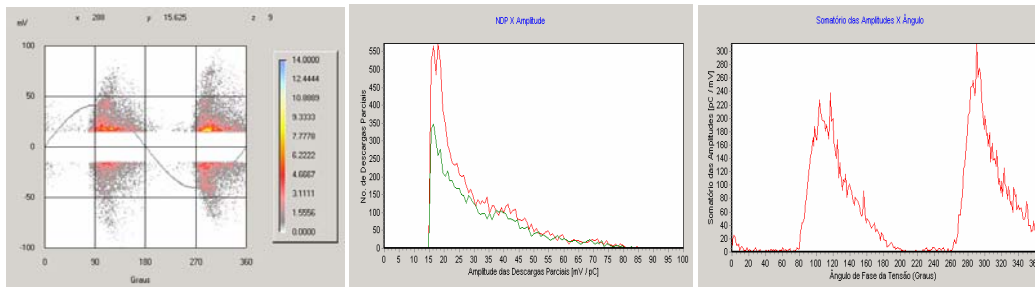


FIGURA 8 – Resultado de uma medição na fase C da UHG 1 da usina de Tucuruí. Da esquerda para a direita: mapa estatístico, histograma do número de descargas em função da amplitude, e histograma do número de descargas em função do

Além das ferramentas de visualização das medições, um sofisticado sistema especialista permite traçar o perfil evolutivo das DP ao longo do tempo, baseado em algoritmos de inteligência computacional aplicados ao banco de informações disponível, como ilustra a Figura 9.

Desta forma, é possível compilar a base de conhecimento dos especialistas de cada empresa e, de acordo com os procedimentos usualmente adotados em cada âmbito, configurar o sistema especialista de modo a realizar análises evolutivas a partir da extração de parâmetros dos mapas estatísticos adquiridos ao longo do tempo.

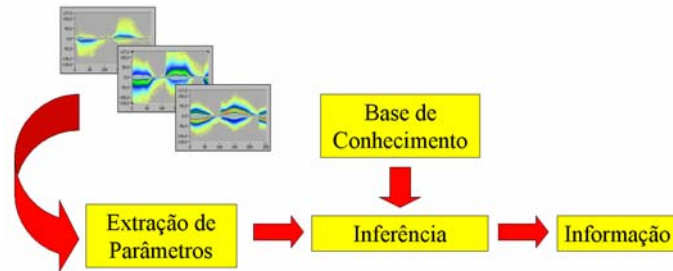


FIGURA 9 – Arquitetura do sistema especialista.

5.0 - CONCLUSÃO

O desenvolvimento desse sistema de monitoramento de descargas parciais aplicado ao enrolamento estático de geradores, e que se encontra atualmente em fase de implantação na ELETRONORTE, tem por motivação os seguintes aspectos:

- Propiciar uma análise mais detalhada do comportamento das descargas parciais em cada instalação de tal modo e se ajustar o sistema de medição para a sensibilidade melhor possível;
- Reduzir os custos dos sistemas de monitoramento de tal forma que seja viável sua instalação em um grande número de unidades geradoras e pontos de acopladores;
- Flexibilizar o custo total do sistema em função do interesse específico em se monitorar mais intensamente algumas unidades em detrimento de outras. A filosofia de sistemas modulares permite de se fazerem arranjos dinâmicos ao longo do tempo sem alterações do software que gerencia os instrumentos e daquele que analisa os dados armazenados. Isso significa que ao longo do tempo pode-se reorganizar os módulos de aquisição entre os diferentes geradores de uma determinada usina;
- Reduzir os custos envolvidos na atualização de software e hardware; Reduzir custos com a manutenção dos sistemas;
- Facilitar a introdução contínua de ferramentas de análise e diagnóstico aproveitando-se de toda estrutura do banco de dados que é obtido ao longo do tempo;
- Nacionalizar os estágios de monitoramento, formatação da informação, análise das DP's e diagnóstico das máquinas criando assim conhecimento e potencial de análise em cada empresa que seja suficiente para decisões de manutenção desse tipo de instalação;
- Facilitar e agilizar os processos de medição de DP's nas usinas pelo pessoal da manutenção e, conseqüentemente, tornar mais dinâmico e rápido o diagnóstico do isolamento estático;
- Relacionar, onde cabível, o comportamento das descargas parciais com outras grandezas monitoradas por diferentes sistemas.

Pelo resultado que se está obtendo com os teste desse sistema realizados na usina de Tucuruí, conclui-se que os objetivos pretendidos estão sendo satisfatoriamente alcançados.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Curdts, E.B., "Fundamentals of Partial-Discharge Detection: System Sensitivity and Calibration", ", Engineering Dielectrics Volume I: Corona Measurement and Interpretation. ASTM Special Publication 699, Philadelphia, 1979, pp. 68-100.
- (2) Dakin, T.W., "Measurements of Partial Discharges in Inductive Apparatus: Transformers and Rotating Machines", Engineering Dielectrics Volume I: Corona Measurement and Interpretation. ASTM Special Publication 699, Philadelphia, 1979, pp. 177-220.
- (3) Krivda, A., Galski, E., Satish, L. and e Zaengl, W., "The use of fractal features for recognition of 3-D discharge patterns", IEEE TDES, vol.2, Oct. 1995
- (4) Perkins, J.R., "Some general remarks on corona discharges", Engineering Dielectrics Volume I: Corona Measurement and Interpretation. ASTM Special Publication 699, Philadelphia, 1979, pp. 03-21.
- (5) Zaengl, "IEC TC 42 WG – CD September 95 – Partial Discharge Measurements"
- (6) Amorim, H. P. Jr., Vellasco, M.M.B.R, Lima, A.G.G. e Levy, A.F.S., " Recognition of Partial Discharge of High Voltage Electrical Equipament Using Neural Network ", ISAP'99, Rio de Janeiro.