



SEMINÁRIO DO ESTADO DA ARTE EM SISTEMAS DE MONITORAMENTO APLICADOS A MÁQUINAS ROTATIVAS

Versão 1.4
24 e 25 de Novembro de 2008
Brasília - DF

MONITORAÇÃO PERMANENTE DE GERADORES: ABORDAGEM PARA O DIAGNÓSTICO PREDITIVO

Fabrizio Leal Freitas
Waldemar Tralli Jr.
Tiago César Busatta

Mauro Pacheco Ferreira
Ernesto Barbosa Garcia Neves
Tiago Kaoru Matsuo

Ilson Martins Ribeiro

AQX Instrumentação Eletrônica S.A.

CELESC Geração S.A.

RESUMO

O problema do sistema elétrico brasileiro operando próximo aos limites de geração e transmissão é abordado como assunto introdutório deste artigo. Com os investimentos já comprometidos com o crescimento da demanda, destaca-se a preocupação dos gestores da geração de energia com a operação e a manutenção dos sistemas que compõem o processo produtivo das plantas, visando a redução de indisponibilidade e dos custos. A monitoração permanente de unidades geradoras de energia e o diagnóstico preditivo de problemas são apresentados como um caminho eficiente de solução. Um breve estado da arte seguindo a cronologia recente de publicações é explorado para sustentação científica. É sugerida uma proposta de arquitetura funcional, assim como linhas evolutivas em um modelo de pesquisa e desenvolvimento para a melhoria da monitoração permanente e diagnose preditiva de geradores de energia. O caso do "RD-CELESC - Registrador Digital Aplicado ao Monitoramento de Unidades Geradoras de Energia" é apresentado como aplicação da arquitetura funcional em um projeto do Programa CELESC de P&D - Ciclo 2004-2005 da ANEEL. Na conclusão é abordada a necessidade de estudos formais de viabilidade custo/benefício e destacados benefícios de difícil mensuração.

PALAVRAS-CHAVE

Monitoração de geradores de energia, Diagnóstico preditivo, Aquisição de dados, Sistemas geradores de energia, Diagnóstico de geradores.

1.0 - INTRODUÇÃO

Atualmente a área de geração de energia elétrica é um importante centro de discussões no cenário nacional e internacional, principalmente devido ao aumento do consumo gerado pelo desenvolvimento econômico dos países. A criação de novas áreas residenciais, indústrias, hospitais, instituições de ensino e outros empreendimentos decorrentes do crescimento da sociedade resultam em um acelerado aumento da demanda de energia elétrica.

No Brasil, o setor elétrico passa por uma crise de investimentos que já persiste por longo período. Apesar dos grandes esforços e investimentos em geração e transmissão realizados nos últimos anos pelo governo e pela iniciativa privada, o sistema elétrico nacional vem operando com níveis de demanda que são muito próximos da capacidade máxima de transmissão e geração. Como o consumo nacional continua crescendo com um aumento médio de cerca de 5% ao ano (1), os novos investimentos que estão hoje sendo realizados em geração e transmissão já se encontram totalmente comprometidos para cobrir o crescimento da demanda.

Preocupados com a evolução deste cenário, os órgãos regulamentadores do mercado de energia elétrica cada vez mais têm exigido dos agentes de geração níveis mínimos de disponibilidade das unidades geradoras para garantir o suprimento de energia necessário (2). Além disso, em função da necessidade de manter a sustentabilidade financeira das empresas de geração, os investidores do setor têm buscado a otimização de suas plantas com o objetivo de maximizar os ganhos financeiros e reduzir o tempo de retorno de investimento.

Neste contexto, observa-se que é crescente a preocupação dos gestores de geração com a operação e a manutenção dos sistemas que compõem o processo produtivo das plantas geradoras de energia.

Este artigo visa descrever a abordagem da monitoração permanente de unidades geradoras de energia e as atuais tendências para o diagnóstico preditivo como um caminho eficiente para o aumento da disponibilidade e redução de custos de operação e manutenção dos sistemas geradores. São discutidos trabalhos desenvolvidos na área que englobam o estado da arte e são identificadas barreiras e vantagens para a expansão destas práticas. Também é apresentada uma arquitetura funcional para monitoramento de geradores de energia, assim como alguns caminhos que viabilizam o diagnóstico e predição de problemas. Um caso de aplicação experimental de monitoração em uma pequena usina hidrelétrica é exemplificado como uma solução gerada em atividades de pesquisa e desenvolvimento atendendo a arquitetura funcional apresentada.

2.0 - MONITORAMENTO E DIAGNÓSTICO DA GERAÇÃO

As unidades geradoras de energia elétrica são sistemas complexos, formados por um amplo conjunto de mecanismos que interagem no processo de geração. Além do próprio grupo turbina/gerador, destacam-se os sistemas de controle – reguladores de tensão e de velocidade, os mecanismos de automatismo e proteção, e alguns diferentes subsistemas eletromecânicos. Todos são foco de observação permanente das equipes de operação e manutenção das usinas.

Os principais elementos das unidades geradoras são verificados através dos estados e/ou das dinâmicas de suas variáveis, normalmente expressas por sinais elétricos provenientes dos próprios equipamentos envolvidos no processo ou dos sensores e transdutores disponíveis que interpretam o comportamento das grandezas físicas associadas (16, 17). Em condições de falhas, registros detalhados dos sinais elétricos permitem uma análise precisa dos problemas ocorridos e até mesmo a reprodução simulada da ocorrência para a definição de uma solução adequada. Em situações normais de operação, as informações sobre estas variáveis permitem o acompanhamento das condições operativas e a validação da performance do sistema gerador.

Desta forma, a monitoração permanente dos sistemas envolvidos no processo de geração de energia elétrica torna-se extremamente importante para as equipes de operação e manutenção. A disponibilização de dados em tempo real e o registro detalhado de sinais que traduzam o estado e a dinâmica dos sistemas de campo são ferramentas essenciais para se extrair o máximo da capacidade das usinas de geração. Permite diagnosticar e solucionar os problemas no processo de geração de forma rápida, precisa e eficaz, aumentando os níveis de disponibilidade e reduzindo os custos associados ao sistema de geração de energia.

3.0 - EVOLUÇÃO TECNOLÓGICA

A monitoração permanente de geradores é um assunto que surgiu na literatura na década de 80 e que desde então tem sido desenvolvido de forma expressiva, principalmente devido à evolução das tecnologias computacionais.

Estudos iniciais datados de 1982 utilizaram a monitoração de sinais com o objetivo de levantar parâmetros elétricos de máquinas síncronas em condições de operação, visando a modelagem do sistema para estudos de estabilidade (3). Outro estudo da mesma época enfocou a detecção de falhas com base na monitoração de variáveis mecânicas e elétricas do gerador (4). Este último inclusive demonstrou, já na época e com base em dados reais, os benefícios da monitoração permanente para o aumento da disponibilidade de geração.

No início da década de 90 o IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) publicou a norma 1129, estabelecendo as melhores práticas para monitoração de geradores síncronos (5). Este documento apresentou uma visão dos principais componentes a serem monitorados: Estrutura e núcleo do estator; enrolamento do estator; entreferro e rotor; enrolamento do rotor; componentes diversos (refrigeradores, mancais, etc) e sistemas auxiliares externos. Além disso, o documento define as variáveis relacionadas com estes componentes e cita os potenciais problemas a serem evitados. A norma do IEEE também estabelece a diferença entre instrumentação para monitoração e instrumentação para proteção. Enquanto a primeira deve ser utilizada somente para informar o operador, a segunda efetua ações automáticas com base nas medições. Ressalta, porém, que o operador não deve ser sujeito ao excesso de informações. Este detalhe indicou as primeiras necessidades de sistemas de diagnóstico automático para a interpretação de grandes quantidades de dados.

Estudos de 1994 tiveram como foco o desenvolvimento de métodos on-line (6, 7) e off-line (8) para o levantamento de parâmetros de geradores síncronos com base em variáveis elétricas (tensões terminais, correntes de armadura, velocidade, ângulo de potência, tensão de campo e corrente de campo).

A partir de 1997 começaram a surgir no mundo os primeiros estudos sobre a aplicação de técnicas inteligentes especificamente para a monitoração condicional em plantas de geração elétrica (9, 10). Os seguintes métodos podem ser aplicados para o diagnóstico (9):

- 1) Sistemas baseados em conhecimento: Aplicam conhecimentos extraídos da experiência de especialistas, normalmente em áreas com foco estreito de aplicação. Possuem a desvantagem de só detectar falhas que já acontecerem previamente;
- 2) Raciocínio baseado em modelos: Busca a detecção de anomalias através da monitoração do comportamento atual dos sistemas de campo em comparação com modelos previamente estabelecidos como referência. A desvantagem reside no fato de que a modelagem de sistemas complexos requer um considerável esforço;
- 3) Raciocínio baseado em casos: Utiliza a solução de problemas anteriores como base para resolver problemas atuais dos sistemas;
- 4) Redes neurais artificiais: Simulam o funcionamento do cérebro humano para capturar relacionamentos entre variáveis e comportamentos anormais da planta.

Ainda em 1997 surgiram no Brasil trabalhos sobre a monitoração permanente com foco principal em variáveis mecânicas de geradores (11) que obtiveram resultados no aumento da disponibilidade de geradores em usinas brasileiras.

Em 1998 foram apresentadas duas técnicas de diagnóstico de problemas em geradores: uma com base em modelos de referência (12) – que visava a detecção de falhas de funcionamento através do desvio da resposta do sistema em comparação com simulações; e outra através da medição de descargas parciais (13). Esta última obteve grande disseminação posteriormente no mercado. Nesta mesma época surgiram estudos mais aprofundados sobre a aplicação genérica de técnicas de monitoração condicional (14), onde são apresentados métodos baseados em princípios básicos, extração de características e reconhecimento de padrões e redes neurais.

No final da década de 90, a IEEE publicou um documento mapeando os potenciais benefícios da utilização da monitoração permanente com sistemas de diagnóstico preditivo em usinas geradoras de energia elétrica (15):

- a) Redução na frequência de parada para inspeção;
- b) Redução na frequência de parada para manutenção;
- c) Redução na frequência de parada para reparo;
- d) Redução na frequência de parada forçada;
- e) Redução no derramamento de água;
- f) Redução homem-hora de manutenção;
- g) Aumento da eficiência operativa da unidade geradora;
- h) Aumento da capacidade da unidade geradora;
- i) Aumento da segurança dos equipamentos;
- j) Aumento da segurança pessoal;
- k) Redução do estoque de peças sobressalentes;
- l) Aumento da habilidade de operação e manutenção;
- m) Aumento da vida útil da planta;
- n) Operação desassistida de geradores.

Ainda na década de 90, surgiram os primeiros sistemas de monitoração desenvolvidos com tecnologia nacional (16, 17). Estes sistemas tiveram como finalidade a monitoração de amortecimentos do sistema elétrico nos modos de oscilações inter-áreas, bem como o estado de operação do sistema antes e depois de distúrbios.

O início do século 21 foi marcado pelas primeiras aplicações de manutenção condicional específicas em plantas de geração de energia elétrica. Estudos focados na detecção de falhas no sistema de circulação de água (18), de isolamento em enrolamentos (19, 20) e para identificação on-line de parâmetros (21) utilizando técnicas de inteligência artificial foram os principais, demonstrando a aplicabilidade das técnicas e os resultados obtidos.

A partir de 2001, técnicas de diagnóstico através da monitoração de variáveis mecânicas e de descargas parciais foram amplamente desenvolvidas e difundidas (22, 23, 24, 25, 26, 27), incluindo experiências em empresas brasileiras de geração na aplicação de tecnologia internacional (28, 29). Discute-se com detalhes os métodos de diagnóstico por descargas parciais (22, 25, 27), incluindo detalhes sobre sensores, hardware de aquisição de dados necessário, os cálculos computacionais envolvidos e as regras de interpretação dos resultados. Estudos ressaltam a necessidade de se utilizar múltiplas técnicas computacionais inteligentes para gerar resultados significativos a partir da interpretação de dados das plantas de geração (23). Também são discutidos os principais métodos de identificação de falhas no isolamento dos enrolamentos do rotor (monitoração da temperatura e do fluxo magnético) e do estator (monitoração da temperatura, de partículas, de ozônio, de descargas parciais e da vibração) de geradores e motores (24, 26).

Nos anos subseqüentes foram publicados outros estudos apresentando o desenvolvimento de soluções de monitoração e diagnóstico com tecnologia nacional. Sistemas desenvolvidos através de parcerias entre instituições de pesquisa com empresas estatais (30, 31, 32, 33, 34), entre multinacionais privadas e instituições de pesquisa (35), entre empresas privadas e estatais (36) ou mesmo resultantes somente da iniciativa privada (37, 38) comprovam a evolução do campo do conhecimento dentro do Brasil.

Nota-se, entretanto, que o desenvolvimento de soluções brasileiras para o monitoramento e diagnóstico se restringiu basicamente a componentes de software, com poucas exceções apresentadas em publicações que englobaram o desenvolvimento tanto de software quanto de hardware (16, 17, 37 e 38).

4.0 - LACUNAS NAS SOLUÇÕES

Na abordagem teórica e prática das soluções de monitoramento das unidades geradoras de energia em busca de um eficiente diagnóstico de problemas, são observadas diversas lacunas. Sem a preocupação com a associação de causas e efeitos, ou mesmo de interrelacionamentos, a seguir são apresentados aspectos considerados relevantes no que tange a abrangência das soluções disponíveis e aplicadas no mercado:

- Atualmente, na maioria das plantas de geração, os sinais monitorados invariavelmente se encontram distribuídos entre vários sistemas (relés digitais, oscilógrafos, remotas, controladores programáveis, sistemas de controle, etc), o que prejudica o relacionamento das variáveis de uma forma concatenada tanto pelo pessoal técnico e de engenharia quanto por sistemas de diagnóstico automático. Em muitos casos as organizações concentram esforços para a integração das informações destes diversos sistemas (39), o que demanda considerável esforço devido às suas características distintas, grande heterogeneidade, e à utilização de tecnologias fechadas e proprietárias.
- No caso das usinas que possuem tecnologia digital, nota-se que ainda existem restrições quanto a disponibilização dos dados para as equipes de operação e manutenção. Observam-se situações em que as equipes ainda preferem analisar problemas com base em dados adquiridos *in loco*, utilizando instrumentos de aquisição de dados portáteis no campo. No caso de ocorrências mais graves surge até a situação de redundância no registro de informações. Suspeita-se da falta de detalhamento das informações, da falta de conhecimento das informações já disponíveis, e dos aspectos anteriormente mencionados sobre os dados estarem dispersos em diversos sistemas.
- A aplicação dos sistemas permanentes de monitoração e diagnóstico de usinas é incipiente devido muitas vezes ao pensamento de que o alto custo dos equipamentos em relação ao benefício gerado inviabiliza a sua aplicação. Entretanto, nota-se que existem poucos estudos avaliando o tema com profundidade, tanto em pequenas quanto em grandes usinas geradoras de energia. Aparentemente a evolução tecnológica já reduziu o custo de soluções a patamares baixos o suficiente para contradizer esta percepção.
- Existem dinâmicas tipicamente não atendidas pelos equipamentos disponíveis e aplicados no mercado – sistemas de oscilografia e supervisórios. O primeiro está focado em fenômenos associados principalmente à parte de transmissão de energia (dinâmicas rápidas) e o segundo ao atendimento das necessidades de supervisão e comando das unidades geradoras (dinâmicas lentas). Observa-se a falta de registros detalhados de dinâmicas intermediárias, como por exemplo, a dinâmica dos reguladores de tensão e velocidade. O monitoramento de um gerador implica em tempos de registros e taxas de aquisição distintas para cada variável de interesse.
- Nos mais modernos sistemas de geração, onde um grande número de parâmetros mecânicos (níveis de vibração, velocidades de giro, temperaturas, etc.) e elétricos (sinais provenientes dos sistemas de controle de regulação do gerado, corrente, tensão e potências de saída do gerador, etc.) são monitorados, não existe uma "inteligência" centralizadora que reúna todos os dados de operação disponíveis e emita de forma automática e em tempo real um diagnóstico completo sobre a operação do gerador e permita a detecção preditiva de problemas de operação.
- Dificuldades com as técnicas de diagnóstico e predição de problemas também são facilmente verificadas na implementação prática nas usinas geradoras de energia. Além dos complexos processos e sistemas envolvidos, o conhecimento especializado aparece de forma tácita, estando confinado entre poucos especialistas e profissionais experientes. Capturar este conhecimento, automatizá-lo e disponibilizar em uma solução computacional capaz de diagnosticar e prever problemas ainda é um desafio.
- Uma outra dificuldade observada no setor é a perda da memória técnica das empresas. Atualmente as empresas de geração brasileiras – estatais em sua maioria – sofrem severas perdas de conhecimento em virtude da aposentadoria de profissionais experientes, lacuna que não está sendo atendida de forma eficiente já que não existe tempo hábil para a transferência de conhecimento para os novos técnicos e engenheiros que entram no mercado de trabalho. A formação de novos profissionais especializados nesta área sofre a concorrência de mercados emergentes e promissores, como o da Tecnologia da Informação. A

monitoração permanente aliada a sistemas inteligentes de diagnóstico preditivo pode amenizar este problema (40), assim como a automação e informatização de testes e ensaios (41).

Observa-se assim que a ampliação das práticas de monitoração permanente dos geradores de energia, a organização dos registros e dados, e a concepção de soluções para diagnóstico e predição de problemas ainda define um longo percurso de pesquisa e desenvolvimento e de transferência tecnológica para o mercado.

Considerado um agravante, no cenário interno percebe-se que na grande maioria dos casos são raros os sistemas de monitoração e diagnóstico formados totalmente por tecnologia nacional. As aplicações em empresas brasileiras, quando não são dependentes totalmente de soluções estrangeiras, se limitam à integração de hardware (sensores, computadores industriais e instrumentação) importado com componentes de software desenvolvidos e integrado por profissionais brasileiros. Este fato em muitos casos potencializa limites na aplicação e restringe a utilização das soluções de forma sistemática e por um prazo mais longo.

5.0 - ARQUITETURA GENÉRICA

Buscando uma melhoria do contexto de monitoramento e diagnóstico de unidades geradoras de energia, uma proposta de solução é apresentada. Toma como base informações obtidas através de visitas a companhias de geração de energia elétrica, usinas de geração e órgãos reguladores, além das referências presentes na literatura. Também abrange a análise de equipamentos atualmente presentes nas plantas e a observação do uso específico das áreas de operação, manutenção e regulação (engenheiros e técnicos de campo). É proposto um sistema genérico concebido conceitualmente.

A proposta pode ser melhor entendida como um sistema de informações formado por camadas, cada qual responsável por uma função específica. Nesta visão denominada "arquitetura funcional", a informação flui de baixo para cima, de camada para camada. Tem-se a seguir uma ilustração desta arquitetura:

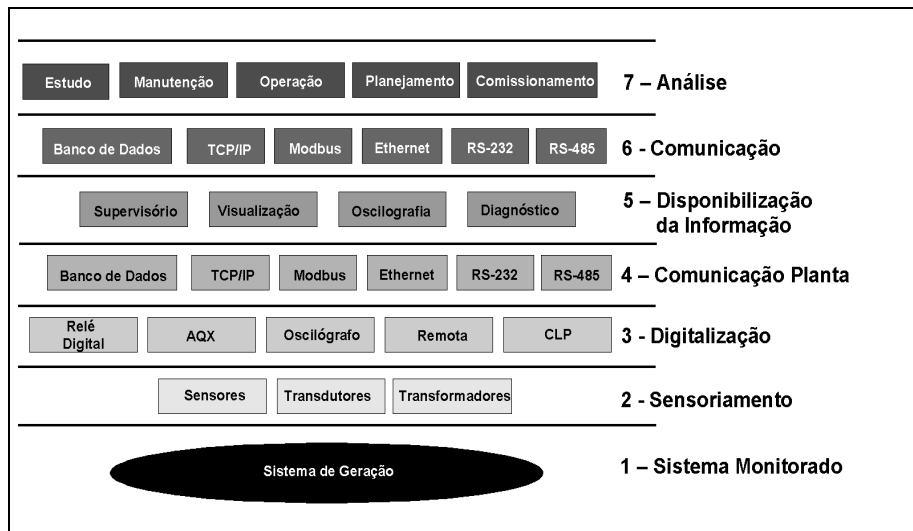


Figura 1: Arquitetura funcional

Uma descrição rápida de cada camada e do fluxo de informação será dada nos itens a seguir.

1- Sistema Monitorado: O Sistema Monitorado corresponde ao sistema de geração, seus subsistemas e às grandezas de interesse associadas a eles. A monitoração tem início na camada imediatamente superior, o Sensoriamento.

2- Sensoriamento: A camada de Sensoriamento é a responsável por captar as grandezas de interesse através de sensores, transdutores e/ou qualquer dispositivo para transformá-las em sinais elétricos. Nesta etapa, tudo o que se tem ainda são sinais analógicos sem nenhum tratamento especial, mas que constituem a informação mais essencial sobre o sistema gerador - o estado das várias grandezas de interesse em cada instante de tempo determinado. Considera-se que todos os mecanismos que formam a camada de Sensoriamento são *commodities* no mercado.

3- Digitalização: Na Digitalização, os sinais provenientes do Sensoriamento, que são sinais analógicos, são convertidos em sinais digitais pelos diversos equipamentos de aquisição de dados. Para isso, geralmente o sinal analógico precisa receber tratamento adequado e são armazenados em diversas formas.

4- Comunicação Planta: Esta camada suporta a comunicação entre os diversos equipamentos da planta (que pode envolver uma usina inteira, ou parte dela). Compreende diversos protocolos, como por exemplo TCP/IP e Modbus, e é compatível com interfaces já estabelecidas no mercado como RS232, RS485 e Ethernet. É através dela que as informações digitais provenientes dos diversos equipamentos da camada de Digitalização podem chegar à camada superior de Disponibilização da Informação, que as formatará e publicará os dados de forma amigável.

5- Disponibilização da Informação: A Disponibilização da Informação concentra informações provenientes da camada de Digitalização através das interfaces de Comunicação da Planta e as formata e publica tanto para operadores locais quanto para as camadas superiores do sistema de informações através de uma camada de Comunicação. Contém módulos responsáveis pelo tratamento e formatação da informação digitalizada.

6- Comunicação: Esta camada é a responsável pela interface entre a camada de Disponibilização da Informação e a camada de Análise. Ela se interpõe entre estas duas camadas justamente para abstrair questões de interfaces de conexão e protocolos de comunicação. É ela que permite que a monitoração de um determinado sistema seja feito em uma região isolada geograficamente do mesmo.

7- Análise: É a camada responsável pela interface final com o usuário de nível mais alto. Contém módulos para atendimento das necessidades de gestão, manutenção e operação da unidade geradora de energia elétrica. Pode tanto replicar a camada de Disponibilização da Informação quanto agregar novas funcionalidades buscando uma informação gerencial e estratégica.

A arquitetura funcional não prega uma homogeneidade de tecnologias. A heterogeneidade das tecnologias pode ser trabalhada com a concepção de *gateways* de comunicação de dados ou de repositórios de dados persistentes (bancos de dados), que possibilitarão o acesso e a troca de informações entre as diferentes tecnologias envolvidas. Ressalta-se a importância de se dispor de sistemas com informações abertas ou com protocolos padronizados, propiciando o intercâmbio de informações. Os limites impostos por sistemas fechados e proprietários podem ser tratados através de redundâncias com sistemas abertos ou simplesmente pela aceitação das restrições impostas.

Tomando como base esta arquitetura funcional, mesmo que genérica e conceitual, pode-se caminhar para a formação de um grande sistema de informações que possibilite a redução e/ou o atendimento das diversas lacunas identificadas, principalmente no escopo da operação, manutenção e da gestão das unidades geradoras de energia. Defende-se também o domínio tecnológico mais amplo e o desenvolvimento de soluções nacionais capazes de aproveitar os atuais sistemas instalados no campo, evitando perdas no caminho da evolução.

6.0 - O CAMINHO PARA A PREDIÇÃO

Gerenciar uma arquitetura funcional de monitoramento das unidades geradoras de energia é considerado o passo inicial para a concepção de soluções duradouras e evolutivas. O entendimento da formação de um grande sistema de informações abre perspectivas para a criação de soluções baseadas em diagnóstico e predição. É uma forma de apoio aos engenheiros e técnicos para a resolução mais rápida de problemas e a conseqüente redução da indisponibilidade e dos custos dos processos geradores de energia.

Sem desconsiderar as diversas linhas de pesquisa e desenvolvimento apresentadas na literatura, toma-se um posicionamento quanto aos principais caminhos a serem tomados e evoluídos para a obtenção de sistemas de diagnóstico e predição de problemas nas unidades geradoras de energia:

Modelo de referência: É a implementação de uma solução para diagnóstico do sistema gerador baseada na comparação em tempo real do desempenho do sistema com um modelo matemático de referência. É necessária a modelagem por diagramas de blocos do sistema gerador, aplicando técnicas de identificação de sistemas, e a sua alimentação por sinais reais adquiridos diretamente da planta. Uma unidade de aquisição de dados específica para este propósito é instalada em uma planta geradora para verificação de desvios entre o sistema gerador real e o calculado. Avalia-se o desempenho e o potencial de diagnóstico deste tipo de abordagem para a predição de problemas no sistema gerador.

Identificação de parâmetros: Envolve o levantamento de procedimentos de ensaios de campo para identificação de parâmetros do sistema gerador e a sua automatização através de um sistema de aquisição de dados. Na rotina das equipes técnicas e de engenharia das usinas são realizados ensaios e testes para o levantamento de modelos

matemáticos, simulações e estudos dos sistemas de geração visando a identificação e solução de problemas, bem como a validação de suas condições operativas. Esta abordagem também visa atendimento de exigências dos agentes regulamentadores, na solicitação de informações sobre os modelos do sistema gerador conectado ao sistema elétrico interligado.

Diagnóstico elétrico preditivo (problemas no gerador): O conceito é a implementação de algoritmos de predição de problemas no gerador, principalmente no conceito do diagnóstico elétrico. Busca a definição de métodos aplicáveis, o desenvolvimento de algoritmos específicos, a implementação e validação em um sistema de aquisição de dados específico para este fim. Os algoritmos podem envolver abordagens tipo descargas parciais, evolução de parâmetros do gerador ou desvios de modelos de referência.

Integração com diagnóstico mecânico: Associação de um sistema de aquisição de dados voltado ao diagnóstico elétrico com uma plataforma de software voltada ao diagnóstico mecânico. Visa o desenvolvimento de uma solução de monitoração mais ampla, abrangendo os aspectos elétricos e mecânicos em uma solução de custo mais baixo devido a integração funcional. Busca melhorar a viabilidade da monitoração permanente do gerador em unidades de menor porte.

Integração com sistema supervisório: Busca incorporar uma visão detalhada da dinâmica dos sinais elétricos aos sistemas supervisórios, associando aos eventos do supervisório um registro de aquisição de dados de amostragem superior a atualmente realizada. Permite gerar informações importantes para facilitar e agilizar a identificação de problemas na operação e manutenção da usina geradora de energia.

Acredita-se na necessidade de esforços para a evolução do mercado neste sentido. É necessário reunir entidades e papéis fundamentais conforme descrito a seguir:

- Centro de excelência, que é a entidade de pesquisa de reconhecida excelência na área de geração de energia elétrica. Representa o estado da arte no conhecimento associado e potencializa a pesquisa aplicada para diagnóstico e predição de problemas no gerador.
- Empresa de base tecnológica (EBT), que é a empresa desenvolvedora de produtos de tecnologia atuante no segmento de energia. Representa a garantia de transferência tecnológica, integrando a pesquisa aplicada em produtos para o mercado.
- Agente gerador de energia, que é a empresa geradora de energia elétrica que tem por princípio próprio ou por obrigatoriedade legal a aplicação de recursos em pesquisa e desenvolvimento. É o alvo do desenvolvimento tecnológico e da aplicação dos produtos gerados.

A construção de modelos de pesquisa e desenvolvimento sustentáveis e de resultado para o mercado é entendida como um caminho curto para a evolução dos atuais sistemas de monitoramento permanente e de diagnóstico preditivo das unidades geradoras de energia,

7.0 - CASO EXEMPLO APLICADO

Como exemplo de uma solução própria, de alto índice de nacionalização, o desenvolvimento do “RD-CELESC - Registrador Digital Aplicado ao Monitoramento de Unidades Geradoras de Energia” é apresentado. Consiste na aplicação da “arquitetura funcional” proposta em um projeto de pesquisa e desenvolvimento do Programa CELESC de P&D - Ciclo 2004-2005 da ANEEL.

Localizada no município de Angelina a aproximadamente 90km de Florianópolis a PCH Garcia I possui dois grupos geradores dotados de turbinas tipo Francis com energia assegurada de 7,1MW médios. A PCH Garcia I pertence ao parque gerador das Centrais Elétricas de Santa Catarina (CELESC), que conta ainda com outros 11 empreendimentos de geração de energia elétrica que totalizam 57,7MW médios de energia assegurada (fonte site CELESC - 2007).

Os geradores da usina apresentavam situações de falta de origem desconhecida. Em determinadas situações os sistemas de proteção existentes não tinham atuação contra a falta estabelecida, levando a máquina a perder sincronismo com a rede, sendo necessária sua desconexão. Apesar da usina dispor de sistemas supervisório e de automação instalados durante sua recente modernização, não haviam registros detalhados o suficiente para a identificação das faltas e perturbações, principalmente nas situações de problemas intermitentes.

De fato, havia assim a ausência de informações que possibilitassem a determinação da origem do problema e o seu respectivo diagnóstico. Mesmo com a realização de esforços da equipe de operação e manutenção, e até mesmo com a realização de procedimentos de manutenção preventiva, não houve êxito na solução definitiva do problema.

Como a ocorrência das faltas não podia ser associada a nenhuma condição específica de operação, optou-se pela monitoração permanente de uma das unidades geradora de energia (no caso definido, o gerador com maior frequência de ocorrências), adquirindo continuamente diversos sinais do grupo gerador com o intuito de prover informações associadas as faltas. Em um primeiro momento optou-se pelo monitoramento de um pequeno grupo de variáveis, definidos conforme a importância para a análise e a disponibilidade e/ou facilidade para aquisição na planta. A instalação do equipamento de aquisição de dados foi prevista para a monitoração das seguintes grandezas:

- V_a, V_b, V_c : tensões trifásicas do gerador;
- I_a, I_b e I_c : correntes trifásicas do gerador;
- MVM1 e MVM2: deslocamentos radiais do eixo (horizontal e vertical – centro do eixo);
- V_{exc} : tensão de campo (saída do regulador para medição 4 a 20 mA).

Durante um período de aproximadamente dois meses foram realizados registros dos distúrbios que caracterizavam faltas através de gatilhos programáveis de aquisição de dados. Alguns registros considerados relevantes são apresentados a seguir:

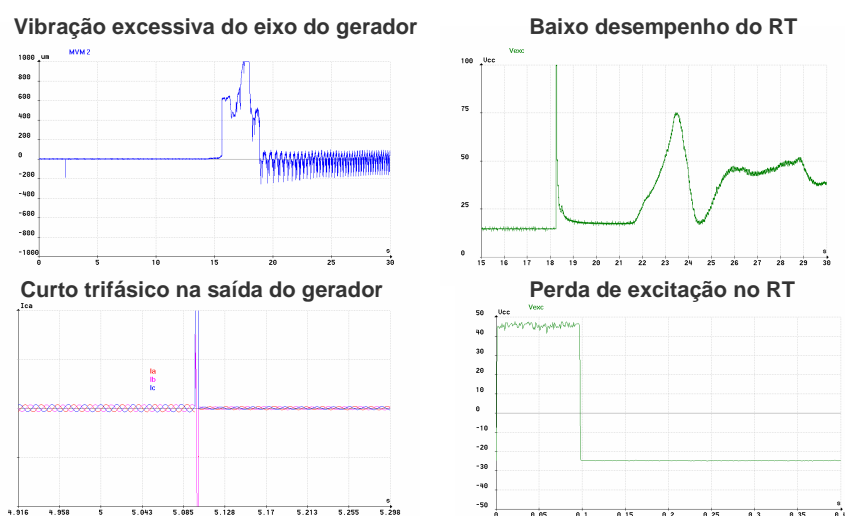


Figura 2: Registros de campo

Através da análise dos registros de perturbações armazenados foram identificadas condições de funcionamento inadequadas e faltas ocorridas no grupo gerador.

No momento de partida do gerador foi verificado um deslocamento excessivo do eixo do gerador, chegando a saturar a leitura do sensor utilizado (proxímetro). Tal condição de mau funcionamento leva a um desgaste mecânico elevado dos mancais de sustentação do gerador. Foi também verificado que a ação de controle do regulador de tensão apresentava um baixo desempenho, indicando um ajuste inadequado dos parâmetros de regulação. Ainda duas faltas graves foram detectadas. A primeira um curto-circuito trifásico nos terminais do gerador, identificado nos registros realizado sobre os sinais de corrente terminal. A segunda uma perda da excitação do gerador, medida através da saída do regulador de tensão. Ambas responsáveis pela indisponibilização freqüente das máquinas para geração.

O emprego do sistema de monitoração permanente viabilizou encontrar os pontos de origem das faltas que eram até então desconhecidos.

Na ocorrência do problema relacionado à perda de excitação do gerador, a análise dos registros realizados tornou possível diagnosticar a causa da perda de sincronismo com a rede, condição registrada imediatamente após a falta. Este registro descartou outros pontos do sistema como responsáveis pela perda de sincronismo e resolveu o impasse entre o agente gerador e o fabricante do regulador de tensão, no qual ambos desconheciam os pontos de origem das faltas. Para agravar a situação, como o problema era intermitente, a situação de falta era mascarada, não sendo presenciada em diversos testes e ensaios realizados. Com o registro definido, o fabricante realizou a assistência técnica necessária no regulador de tensão e o problema de perda da excitação não mais se repetiu.

A cerca do curto-circuito trifásico, o pessoal de manutenção da usina pode mapear o ponto causador da falta, que foi identificado como o transformador de saída do gerador. O curto-circuito ocorria devido à deterioração do óleo

responsável pela isolação entre os enrolamentos do transformador de saída. Ocasionalmente havia a ruptura da isolação e o respectivo curto-circuito trifásico. O problema, também intermitente, foi sanado com a manutenção do transformador.

Os benefícios rapidamente alcançados com uma monitoração de poucas variáveis foram considerados de grande importância, motivando a construção de um sistema mais completo, abrangendo as duas máquinas da usina, conforme arquitetura física aplicada a seguir:

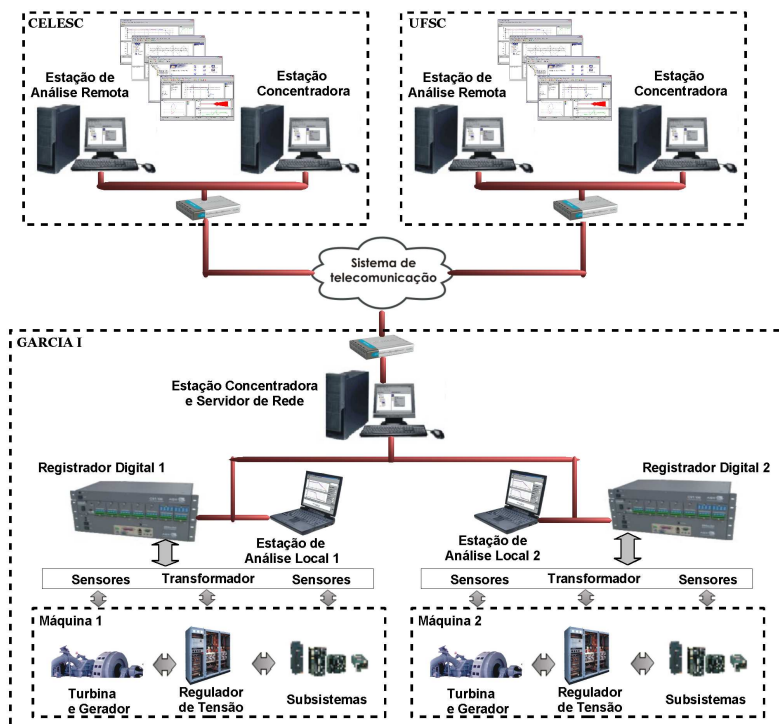


Figura 3: Arquitetura física aplicada

O modelo segue a arquitetura funcional proposta de forma genérica e conceitual. Destaca-se a duplicação das unidades de análise em dois centros distintos, um associado ao agente de geração e outro associado a um centro de pesquisa e desenvolvimento. Esta interação visa uma melhoria na capacidade de análise e diagnóstico dos registros de campo através de uma parceria empresa-centro de pesquisa.

A ampliação dos sinais monitorados permitiu um conjunto maior de informações para diagnóstico, conforme apresentado a seguir:

- V_a, V_b, V_c : tensões trifásicas do gerador;
- I_a, I_b, I_c : correntes trifásicas do gerador;
- MVM1, MVM2, MVM3 e MVM4: deslocamentos radiais do eixo (horizontal e vertical - turbina e gerador).
- MVM5V: deslocamento axial;
- V_{exc} e I_{exc} : tensão e corrente de campo (medição na ponte do regulador de tensão);
- Transdutores P, Q, S, V, I, f, FP: potência ativa, potência reativa, potência aparente, tensão e corrente nominal, frequência, fator de potência;
- FFT: espectro de frequência de uma das tensões ou correntes trifásicas;
- Analisador lógico: conjunto de 8 estados operativos do grupo gerador.

A implementação é ilustrada a seguir:

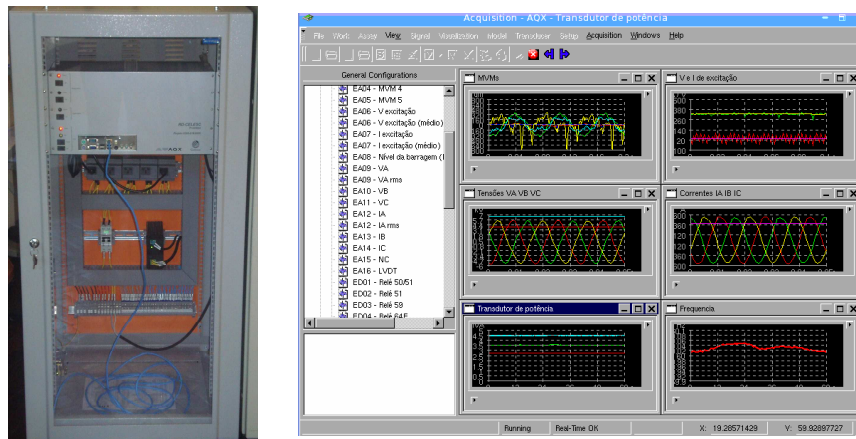


Figura 4: Painel e software de monitoração remota

A monitoração permanente das unidades geradoras de energia baseada na arquitetura funcional proposta possibilita agora a formação de um banco de dados de registros detalhados sobre problemas e faltas. A medida que são alcançados resultados no diagnóstico de problemas e até mesmo nos esforços de predição dos mesmos, o conhecimento tácito pode ser capturado e transformado para conhecimento explícito da operação e manutenção do sistema gerador. Viabiliza a construção de sistemas de inteligência artificial que apóiam técnicos e engenheiros. Uma abordagem útil para a identificação de diversos problemas na planta e verificação de pontos onde se torna possível a realização de melhorias visando melhor desempenho e conservação dos grupos geradores – resultados de impacto direto na disponibilidade e redução de custo da geração.

8.0 - CONCLUSÕES

A monitoração permanente das unidades geradoras de energia e a construção de sistemas de diagnóstico e predição podem contribuir de forma significativa na melhoria do desempenho dos sistemas geradores, porém ainda são temas que demandam uma ampla discussão quanto aos métodos e soluções empregadas.

Estudos de viabilidade econômica ainda precisam se tornar um alvo entre as principais preocupações de técnicos, engenheiros e gestores das plantas. É importante relacionar os custos e benefícios da implantação destes sistemas, bem como as taxas de retorno dos investimentos. Precisa traduzir em cifras (dinheiro) o que representam as reduções de custos obtidas e os aumentos de produtividade ganhos na geração de energia.

São necessários estudos e levantamento de casos de interrupção da geração por faltas ou problemas intermitentes de difícil identificação devido à ausência de informações detalhadas dos problemas. Com base nestes casos, busca-se o desenvolvimento de casos de aplicação de sistemas de monitoramento permanente e de diagnóstico de problemas para facilitar e agilizar a solução dos problemas. A redução da indisponibilidade da máquina e a diminuição do tempo de engenharia (homem-hora) para resolver o problema devem ser tomados como base para a avaliação dos custos e dos respectivos benefícios alcançados. Abordagens também associadas ao aumento de períodos de manutenção e a antecipação de manutenções preventivas também precisam ser contempladas nos estudos de viabilidade econômica.

De forma despreocupada com a relação custo/benefício, se observa benefícios de difícil mensuração. O registro de informações detalhadas das dinâmicas e estados da geração permite uma melhor interface entre os agentes geradores e os fabricantes de equipamentos, entre os diferentes sistemas interligados sobre diferentes responsabilidades – interface entre as empresas do setor, e entre as próprias equipes de operação e manutenção.

Muitos benefícios intangíveis podem ser identificados sem a principal preocupação com a relação custo/benefício. No caminho de continuidade da evolução do estado da arte da monitoração e diagnóstico preditivo de geradores de energia, entende-se que deve existir o alinhamento das melhores práticas do campo de conhecimento com as lacunas identificadas na observação do mercado. Defende-se uma estratégia de desenvolvimento e aplicação de tecnologia nacional em toda amplitude do problema, com ações cooperadas entre centros de pesquisa, empresas de base tecnológicas e agentes de geração brasileiros.

REFERÊNCIAS

- (1) OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO - ONS. Boletim Anual 2007 - Comportamento da carga do Sistema Interligado Nacional – SIN em 2007. Brasil. 2007. Disponível em <http://www.ons.org.br/analise_carga_demanda/boletim_anual_2007.aspx>. Acesso em 11/08/2007.
- (2) AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. Resolução Normativa Nº 310, de 29 de abril de 2008. Estabelece critérios a serem considerados pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS para comprovação da disponibilidade de unidades geradoras de usinas despachadas centralizadamente. Brasil. 2008.
- (3) SUGIYAMA, T.; NISHIWAKI, T.; TAKEDA, S.; ABE, S. Measurements of Synchronous Machine Parameters Under Operating Condition. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Volume PAS-101, 4ª Edição. Abril de 1982. Páginas: 895 – 904.
- (4) TWERDOCHLIB, M. et al. Two recent developments in monitors for large turbine generators. IEEE Transaction on Energy Conversion. Volume 3, 3ª edição, Setembro de 1988. Páginas: 653 – 659.
- (5) INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. IEEE Std 1129-1992 Recommended Practice for Monitoring and Instrumentation of Turbine Generators. Junho de 1998.
- (6) HUANG, C.T. et al. On-line measurement-based model parameter estimation for synchronous generators: model development and identification schemes. IEEE Transaction on Energy Conversion. Volume 9, 2ª Edição, Junho de 1994. Páginas: 330 – 336.
- (7) WANG, J.C. et al. On-line measurement-based model parameter estimation for synchronous generators: solution algorithm and numerical studies. IEEE Transaction on Energy Conversion. Volume 9, 2ª Edição, Junho de 1994. Páginas: 337 – 343.
- (8) TOUHAMI, O.; GUESBAONI, H.; IUNG, C. Synchronous Machine Parameter Identification by a Multitime Scale Technique. IEEE Transactions on Industry Applications. Volume 30, 6ª Edição, Novembro de 1994. Páginas: 1600.
- (9) MOYES, A.; MCDONALD, J.R.; The use of intelligent systems techniques in condition monitoring of electrical plant. IEE Colloquium on Condition Monitoring of Large Machines and Power Transformers (Digest No: 1997/086), 19 de junho de 1997. Páginas: 2/1 - 2/4.
- (10) Nix, K.J.; Powell, A. A common approach to plant condition monitoring. First IEE/IMEchE International Conference on Power Station Maintenance - Profitability Through Reliability, 1998. 30 de março a 1º de Abril de 1998. Páginas: 22 – 27.
- (11) Okada, A.C.T.; TIBA, H.H. Experiência da CESP no monitoramento de vibração. XIV Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Belém, PA. 1997.
- (12) YONGHUI XU; JIN JIANG. Implementation of an observer-based fault detection scheme on a lab-scale power system. IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, 1998. Volume 2, 24 a 28 de Maio de 1998. Páginas: 573 – 576.
- (13) STONE, G.; KAPLER, J. Stator winding monitoring. IEEE Industry Applications Magazine. Volume 4, 5ª Edição, Setembro-Outubro de 1998. Páginas: 15 – 20.
- (14) Grimmelius, H.T. et al. Three state-of-the-art methods for condition monitoring. IEEE Transactions on Industrial Electronics. Volume 46, 2ª Edição, Abril de 1999. Páginas: 407 – 416.
- (15) INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. IEEE draft standard P1438/D1.5 Guide for Applications of Plant Monitoring for Hydroelectric Facilities – Potential cost benefits of Plant Condition Monitoring (PCM). Janeiro de 1999.
- (16) FERREIRA, M.P. et al. Um sistema de monitoração de oscilações: Aplicação no sistema argentino. XIV Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Belém, PA, Out. 1997.
- (17) FERREIRA, M.P. et al. Sistema de monitoração de distúrbios e da dinâmica de sistemas elétricos de potência. XV Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Belém, PA, Out. 1999.
- (18) SHING CHIANG TAN; CHEE PENG LIM. Condition monitoring and fault prediction via an adaptive neural network. TENCON 2000. Proceedings. Volume 1, 2000. Páginas: 13 - 17 vol.1.

- (19) YU, X.Z. et al; Condition monitoring of a power station. Power International Conference on System Technology, 2000. Proceedings. PowerCon 2000. Volume 2, 4-7 Dezembro de 2000. Páginas: 1029 – 1033, vol.2.
- (20) WETZER, J.M.; CLITEUR, G.J.; RUTGERS, W.R.; VERHAART, H.F.A. Diagnostic- and condition assessment-techniques for condition based maintenance. 2000 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Volume 1, 15-18 Outubro. 2000. Páginas: 47 – 51, vol.1.
- (21) Liu Nian; Teng Fusheng. The new intelligent monitoring method for operating states of large generator units. Power Engineering Society Winter Meeting, 2000. IEEE Volume 1, 23 a 27 de Janeiro de 2000. Páginas: 223 - 227 vol.1.
- (22) DU LIN; SUN CAIXIN; LIAO RUIJIN; LI JIAN; ZHOU QUAN. Digital measurement system for generator on-line PD monitoring system. Proceedings of the Fifth International Conference on Electrical Machines and Systems, 2001. ICEMS 2001. Volume 1, 18 a 20 de agosto de 2001. Páginas: 322 - 325 vol.1.
- (23) MANGINA, E.E.; MCARTHUR, S.D.J.; MCDONALD, J.R. The use of a multi-agent paradigm in electrical plant condition monitoring. Large Engineering Systems Conference on Power Engineering, 2001. LESCOPE '01. 2001. 11 a 13 de Julho de 2001. Páginas: 31 - 36.
- (24) STONE, G.C. Advancements during the past quarter century in on-line monitoring of motor and generator winding insulation. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Volume 9, 5ª Edição, Outubro de 2002. Páginas: 746 - 751.
- (25) BROWN, A. Condition monitoring of HV rotating plant - a strategy for the Asset Manager. Fifth International Conference on Power System Management and Control, 2002. 17 a 19 de abril de 2002. Páginas: 309 - 312.
- (26) HASLIMEIER, R.; FRUTH, B. A. Multiparameter and Web Based Modular On-line Monitoring System for High Voltage Motors and Generators. 8th International Conference on Properties and applications of Dielectric Materials, 2006. Junho de 2006. Páginas: 718 - 721.
- (27) TRINITARIO, W.J.; FEBRES, R.O. Development of an On Line Monitoring System for Partial Discharges on Hydrogenerators. Transmission & Distribution Conference and Exposition: Latin America, 2006. TDC '06. Agosto de 2006. Páginas: 1 - 4.
- (28) FOGAÇA, A.J.N. Manutenção preditiva – a influência de sua implantação na manutenção de geradores. XVII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Uberlândia, MG, Out. 2003.
- (29) SIMAO Filho, J. et al. Descargas parciais em geradores – a experiência em Itaipu. XVIII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Curitiba, PR, Out. 2005.
- (30) CARVALHO, A. T. et al. Sistemas para medição, análise e diagnóstico de Descargas Parciais – uma proposta de arquitetura econômica versátil e integrada. XVIII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Curitiba, PR, Out. 2005.
- (31) SANZ, J. et al. A monitoração e o diagnóstico de Hidrogeradores: projeto MONITHIDRO. XVII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Uberlândia, MG, Out. 2003.
- (32) BATISTA, J.M.C. et al. Ensaio de desempenho e monitoramento eletromecânico de máquinas hidráulicas com software e hardware desenvolvido pela ELETRONORTE. XIX Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Rio de Janeiro, RJ, Out. 2007.
- (33) FILIPPIN, C.G.; PAULA, A.C.; HORBATIUK, B.W.D.; KAPP, W.A. Sistemas de monitoramento robusto com integração operação x manutenção. XIX Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Rio de Janeiro, RJ, Out. 2007.
- (34) YUGUE, E.S. et al. Sistema óptico para monitoramento de entreferro em hidrogeradores. XIX Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Rio de Janeiro, RJ, Out. 2007.
- (35) POLL, H.G.; ZANUTTO, J.C.; PONGE-FERREIRA, W. Diagnóstico dinâmico de máquinas Francis. XVIII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Curitiba, PR, Out. 2005.
- (36) OURA, J.M. et al. Monitoramento remoto de temperatura da unidade geradora da UHE Ilha Solteira. XVIII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Curitiba, PR, Out. 2005.

(37) BUSSATA, T.C. et al. Project of a Fault Recorder System with Database Storage integrated through TCP/IP Network. VI INDUSCON Conferência Internacional de Aplicações Industriais, Joinville, SC, Out. 2004.

(38) ZIMATH, S.L.; NEVES, F.C.; ESPÍNDOLA, T.S. Monitoração de eventos com registro de longa duração – configuração e aplicação. VIII Seminário Técnico de Proteção e Controle, Rio de Janeiro, RJ, 28 de Junho a 10 de Julho de 2005.

(39) MACEDO, R.A. et al. Sistema de controle e diagnóstico da condição operacional de hidrogeradores integrado com a gestão da manutenção. XIX Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Rio de Janeiro, RJ, Out. 2007.

(40) MARTINS, F.R.; AZEVEDO, H.R.T.; SOUZA, S.P.S.; Gestão de conhecimento aplicada à manutenção preditiva de equipamentos. XVIII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Curitiba, PR, Out. 2005.

(41) CUNHA, D.G.; GOMES, J.L.O. Sistema Especialista em manutenção de equipamentos: metodologia informatizada e banco de dados central de nível sistêmico. XIV Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Belém, PA, Out. 1997.