

SISTEMA INTELIGENTE DE MANUTENÇÃO BASEADA EM CONDIÇÃO PARA USINA HIDRELÉTRICA DE BALBINA

A. J. Álvares, R. Q. Souza, E. J. Amaya, R. Tonaco e A. A. Lima

Resumo- A reestruturação do setor elétrico no Brasil, o recente avanço tecnológico e as crescentes exigências do mercado consumidor impuseram às empresas de geração de energia elétrica padrões mais rigorosos de qualidade, continuidade e segurança. Tornou-se imperativo para a área de manutenção, principal responsável pela qualidade da energia e pela disponibilidade dos equipamentos, conhecer os recursos disponíveis, dominar técnicas avançadas, realizar o inter-relacionamento entre sistemas, utilizar sistemas informatizados para histórico e análise dos dados dos equipamentos e para o planejamento dos trabalhos de manutenção, e utilizar de índices para comparação e controle. O presente trabalho foi realizado no contexto do projeto de pesquisa ANEEL-Eletronorte, intitulado “Modernização da Área de Automação de Processos da Usina Hidrelétrica de Balbina e Samuel”. Surgiu da necessidade de desenvolver um sistema computacional de manutenção preditiva capaz de gerar diagnósticos e prognósticos de falhas visando auxiliar os funcionários da usina hidrelétrica de Balbina na tomada de decisão com relação às ações de manutenção. Tem como objetivo desenvolver uma metodologia para construção de um sistema de manutenção baseada em condição visando dar suporte às atividades de manutenção de ativos de usinas hidrelétricas e melhorar a confiabilidade destes ativos. A metodologia proposta apresenta conceitos de manutenção centrada em confiabilidade e técnicas de sistemas especialistas reunidas num sistema inteligente de apoio à tomada de decisão. Esta metodologia baseia-se no modelo de referência OSA-CBM (Open System Architecture for Condition-Based Maintenance) adaptado a uma arquitetura computacional cliente/servidor. Para a validação da metodologia foi implementado um sistema computacional que ficou designado como SIMPREBAL. Realizou-se um estudo de caso do sistema SIMPREBAL na usina hidrelétrica de Balbina. Os resultados deste estudo sugerem que a metodologia proposta possui um enorme potencial na detecção de falhas e sugestões de ações de manutenção, mas a implementação computacional tem muito a evoluir. O prognóstico de falhas e a análise da confiabilidade dos equipamentos são propostos na metodologia, mas não conduziram a resultados completamente conclusivos no estudo de caso em função do pouco tempo em que o sistema

SIMPREBAL esteve em funcionamento e das poucas variáveis que puderam ser monitoradas.

Palavras-chave— Manutenção Preditiva, Sistemas Especialistas, Redes Neurais, Lógica Fuzzy, Fieldbus Foundation.

I. INTRODUÇÃO

Desde a reestruturação do setor elétrico, no início da década de 90, as empresas do setor enfrentam o desafio da sobrevivência com as novas regras impostas de relacionamento e de mercado, bem como o desafio da obsolescência tecnológica e gerencial. Por outro lado, devido à sofisticação dos equipamentos elétricos e eletrônicos utilizados pelos consumidores, a exigência em termos da confiabilidade do suprimento de energia elétrica tem aumentado consideravelmente.

A fim de reduzir a probabilidade, frequência, duração e os efeitos dos eventos de falha, é necessário realizar investimentos financeiros no sentido de aumentar a confiabilidade dos sistemas e equipamentos de geração e transmissão de energia elétrica. A integridade dos equipamentos passou a ser uma questão estratégica, visto que atualmente uma indisponibilidade operativa pode representar, em termos de custos, muitas vezes mais do que custaria reparar a própria falha. Assim sendo, a área de manutenção sofre mais desafios do que qualquer outra área de gerenciamento. As técnicas de manutenção condicional¹ – em que o equipamento é monitorado durante o seu funcionamento e as paradas são realizadas somente se forem identificados indícios que conduzem a uma possível falha – tornaram-se absolutamente necessárias.

Este problema foi bastante estudado na comunidade de engenharia, levando à criação do padrão OSA-CBM [1, 2, 3 e 4], que uma vez implantado deve contemplar essa demanda por qualidade e confiabilidade. O padrão OSA-CBM (*Open System Architecture for Condition-Based Maintenance*) é um conjunto de especificações de uma arquitetura padronizada para manipulação de informações em sistemas de manutenção baseada em condição (MBC). Estas especificações propõem desenvolver um sistema MBC

Esta pesquisa foi financiada com recursos da Eletronorte-Aneel.

A. J. Álvares é professor da Universidade de Brasília (e-mail: alvares@alvarestech.com). Os demais pesquisadores são alunos de mestrados da UnB. A. A. Lima é Engenheiro da Eletronorte.

¹No presente trabalho, os termos “manutenção condicional” e “manutenção baseada em condição” são utilizados indistintamente.

estabelecido por sete camadas/módulos funcionais os quais possuem uma interface bem definida entre si. Tais módulos são: aquisição de dados, processamento de sinais, monitoração de condição, diagnóstico, prognóstico, tomada de decisão e apresentação (figura 1).

Entretanto, o padrão OSA-CBM não especifica a maneira com que deve ser implementado cada um dos módulos, além disso, não define quais tecnologias utilizar nem quais algoritmos desenvolver, tampouco especifica os detalhes sobre o tratamento das informações. Em outras palavras, este padrão não define procedimentos específicos para monitoração de condição, diagnóstico de defeitos e o prognóstico de falhas. A norma em questão apenas define os tipos de dados recebidos na entrada e produzidos na saída de cada módulo funcional, e sua forma de tramitação, de modo a prover independência entre os módulos.

Diante das lacunas apresentadas no padrão OSA-CBM, a motivação para este trabalho foi conceber uma metodologia que instância o referido padrão, em sua estrutura organizada em sete camadas – mantendo as concepções gerais de cada camada, e propõe a elaboração de sistemas computacionais para manutenção preditiva de instalações automatizadas. A metodologia apresentada neste trabalho não trata simplesmente da descrição de um *framework* ou uma plataforma para desenvolvimento de sistemas de manutenção baseada em condição (MBC), como é o caso da norma OSA-CBM, mas descreve detalhadamente todos os procedimentos necessários para a concepção de sistemas MBC completos, isto é, cujas funcionalidades se estendem desde a aquisição de dados até a tomada de decisão e apresentação dos resultados, explicitando todas as técnicas envolvidas e preenchendo as lacunas verificadas no modelo OSA-CBM. A metodologia proposta destaca-se por:

- integrar ao modelo OSA-CBM técnicas de inteligência artificial – sistema especialista baseado em regras de produção – garantindo um processamento rápido e eficiente dos dados;
- utilizar a ferramenta FMEA (Failure Mode and Effect Analysis) para elaborar a base de conhecimento do sistema especialista;
- agregar ao sistema indicadores de desempenho relacionados à política de manutenção centrada em confiabilidade (MCC) direcionando os esforços de manutenção para o aumento da disponibilidade e confiabilidade dos ativos de produção;
- adaptar o modelo OSA-CBM a uma arquitetura cliente/servidor de modo que os parâmetros monitorados, bem como os diagnósticos, prognósticos e tomadas de decisão possam ser acessados remotamente através de um web browser.

Conforme apresentado, a contribuição deste trabalho está em unir diferentes vertentes tecnológicas de tal forma que permita monitorar as condições de um sistema, avaliar suas tendências evolutivas, diagnosticar e prognosticar falhas potenciais e funcionais, adquirir e armazenar experiências práticas em manutenção e disponibilizá-las de forma padronizada para futuro uso organizacional. Constituinte assim um sistema completo de manutenção baseada em

condição e de apoio à tomada de decisão.

O modelo OSA-CBM que consiste em sete camadas (Figura 1) será utilizado como referência para o desenvolvimento do sistema de manutenção inteligente baseado em condição, maiores detalhes sobre o modelo, podem ser encontrados no site <http://www.mimosa.org/downloads/39/specifications/index.aspx>. As camadas hierárquicas representam uma transição lógica ou um fluxo da saída dos sensores para a camada de tomada de decisão, através das camadas intermediárias até chegar à camada de apresentação.

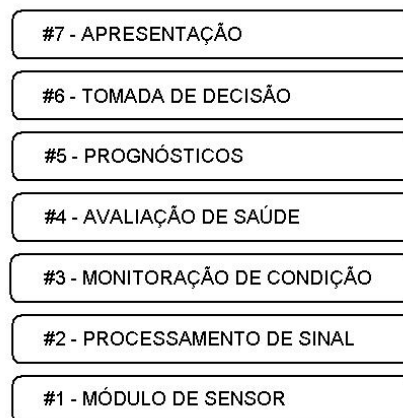


Figura1. Arquitetura OSA-CBM e suas 7 camadas.

A. Objetivos Gerais

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver uma metodologia para a concepção de um sistema de manutenção baseada em condição para dar suporte às atividades de manutenção de ativos de usinas hidrelétricas visando à melhoria da confiabilidade dos ativos. Será apresentado também o sistema computacional SIMPREBAL, gerado a partir da implementação da metodologia proposta.

B. Objetivos Específicos

Podem-se listar os seguintes objetivos específicos do projeto:

- ✓ Apresentar os conceitos, modalidades, metodologias e técnicas de manutenção e análise de falhas que contextualizam o estado-da-arte do sistema apresentado neste trabalho;
- ✓ Apresentar técnicas e ferramentas de inteligência artificial, para representação do conhecimento, apropriadas a este trabalho;
- ✓ Apresentar a metodologia de manutenção centrada na confiabilidade e as ferramentas da qualidade, como análise dos modos e feitos de falhas (FMEA);
- ✓ Apresentar as principais tecnologias de sensoriamento, aquisição e transmissão de dados em sistemas de automação industrial, destacando-se a instrumentação inteligente Foundation Fieldbus, as redes de comunicação Fieldbus H1 e HSE, e o padrão OPC (OLE for Process Control).
- ✓ Desenvolver uma análise FMEA para os equipamentos da usina hidrelétrica de Balbina;
- ✓ Especificar, modelar e desenvolver, a partir da metodologia proposta, um protótipo de sistema especialista

baseado em regras de produção para apoio à manutenção de ativos de usinas hidrelétricas que seja monitorado via web disponibilizando informações para toda a empresa;

✓ Desenvolver uma base de conhecimento para o sistema especialista a partir da análise FMEA;

✓ Realizar um estudo de caso aplicado à usina hidrelétrica de Balbina para validar a metodologia e o sistema computacional desenvolvido;

✓ Apresentar resultados qualitativos e quantitativos considerando-se a adequação dos métodos empregados e a análise dos diagnósticos e tomadas de decisão fornecidos pelo sistema.

✓ Propor o desenvolvimento de indicadores de desempenho e prognósticos de falhas objetivando estimar a confiabilidade e estabelecer metas para melhorar a gestão dos ativos.

C. Delimitações do Trabalho

Embora a metodologia proposta seja aplicável a qualquer sistema automatizado dotado de um método padronizado para aquisição de dados a partir de sensores ou de dispositivos concentradores, sua implementação computacional apresentada neste trabalho foi direcionada para manutenção de ativos de usinas hidrelétricas. Mais especificamente, para as unidades geradoras hidráulicas (UGHs) da usina hidrelétrica de Balbina. A referida usina, localizada no estado do Amazonas, é dotada de cinco unidades geradoras com capacidade total de geração de 250MW.

Foram monitorados parâmetros de temperatura e densidade a partir de sensores distribuídos entre os equipamentos de todas as cinco UGHs de Balbina. Tais parâmetros são:

- Temperatura do óleo contido na cuba do mancal guia da turbina, do mancal guia do gerador e do mancal combinado (gua e escora);
- Temperatura do metal dos mancais supracitados;
- Temperatura e densidade do óleo na tubulação do sistema de resfriamento do mancal combinado;
- Temperatura do óleo no tanque de resfriamento do sistema de regulação de velocidade;
- Temperatura da água nos trocadores de calor do sistema de regulação de velocidade;
- Temperatura do enrolamento e do núcleo do estator do gerador;
- Temperatura do ar na entrada e saída dos radiadores do sistema de resfriamento do gerador.

II. ABORDAGEM DO MODELO DE REFERÊNCIA OSA-CBM

Baseando-se no estudo de metodologias de desenvolvimento de sistemas adotou-se o modelo de referência OSA-CBM (*Open System Architecture for Condition-Based Maintenance*). Com relação a este modelo, podem-se listar algumas vantagens:

✓ Trata-se de uma metodologia que busca ser genérica o bastante para satisfazer o desenvolvimento tanto de soluções de software como de hardware;

✓ Por ser definida em camadas, permite modularização,

ou seja, é possível modificar funções lógicas ou elementos de hardware de forma independente de sua relação com os outros elementos pertencentes a outros módulos, facilitando, portanto, a futura manutenção e evolução do sistema e garantindo flexibilidade.

✓ Permite construir um sistema aberto de acordo com a definição proposta pela IEEE (1996). Segundo a referida instituição, um sistema aberto fornece as potencialidades que permitem aplicações corretamente desenvolvidas funcionarem em uma variedade de vendedores múltiplos, além disso, interoperarem com outras aplicações do sistema e ainda mais, apresentam um estilo consistente de interação com o usuário.

A interação entre as sete camadas da arquitetura OSA-CBM orientaram os procedimentos metodológicos propostos no presente trabalho e resultaram na arquitetura conceitual mostrada na figura 2.

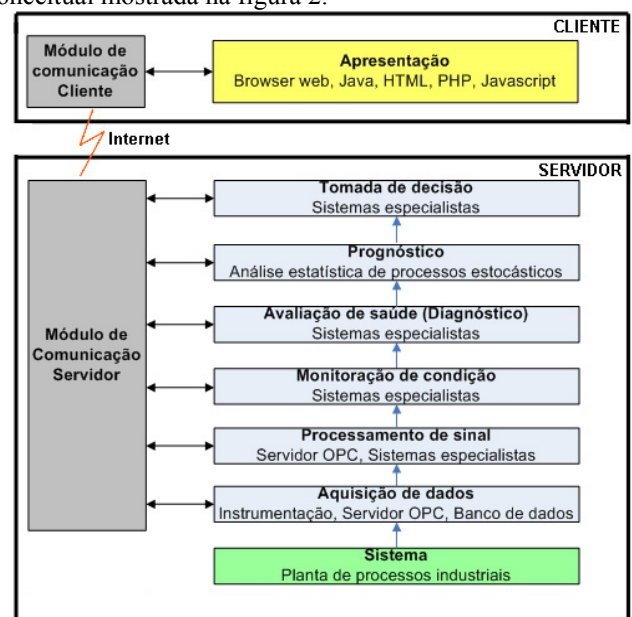


Figura 2. Arquitetura Conceitual do sistema [4, 5 e 6].

A arquitetura conceitual (figura 2) divide o sistema em duas aplicações claramente diferenciadas: a aplicação servidor e a aplicação cliente. Tais aplicações estão conectadas entre si mediante uma rede de comunicação através da qual compartilham informações. O servidor é responsável pelo processamento das seis primeiras camadas do modelo OSA-CBM, ou seja, captura de dados e processamento inteligente (que inclui processamento de sinal, monitoração de condição, diagnóstico, prognóstico e tomada de decisão). E o cliente é responsável pela camada de apresentação, isto é, por apresentar os resultados do processamento inteligente ao usuário através de uma interface gráfica. As seções subsequentes apresentam as contribuições de cada camada do modelo OSA-CBM à metodologia proposta.

A. Aquisição de Dados

O módulo de aquisição de dados, aplicado à metodologia proposta, consiste no recolhimento de informações do processo de forma padronizada e interoperável, isto é, a obtenção de dados deve ser independente dos fabricantes de

dispositivos de campo. Informações adicionais do processo podem ser obtidas a partir de bancos de dados. Para tanto, é importante que estes bancos estejam constantemente atualizados.

B. Processamento de sinal

Na camada de processamento de sinal é avaliada a qualidade e confiabilidade do sinal recebido. São realizadas análises das informações obtidas da camada de aquisição de dados, além de testes de conectividade entre o sistema desenvolvido e a rede de instrumentação. Estas análises relacionadas à qualidade do sinal são processadas pelas regras de produção do sistema especialista e conduzidas às camadas subseqüentes do modelo OSA-CBM.

C. Monitoração de condição

Basicamente, a camada de monitoração de condição recebe os dados provenientes da camada de processamento de sinal e os compara com valores previamente estabelecidos de modo a atribuir às variáveis monitoradas uma condição específica. Os valores previamente estabelecidos são faixas de operação previamente especificadas pelo fabricante ou pelas condições operacionais do sistema.

D. Avaliação de saúde

Analisando-se as condições específicas de cada variável monitorada é possível estabelecer correlações e inferências entre as diferentes variáveis e detectar eventuais anormalidades nos equipamentos ou em seus sistemas auxiliares. A camada de avaliação de saúde trata da identificação e diagnóstico de defeitos incipientes ou falhas repentinas nos equipamentos a partir das informações recebidas da camada de monitoração de condição.

As relações entre as condições de operação das variáveis monitoradas e as falhas provocadas por anormalidades nos equipamentos são estabelecidas a partir de um estudo sistemático de todas as falhas conhecidas bem como de suas causas e efeitos. Segundo a metodologia proposta, este estudo deve ser realizado utilizando-se a ferramenta FMEA (Failure Mode and Effects Analysis). De acordo com a abordagem do FMEA, deve-se desenvolver uma descrição de cada equipamento e de suas funções, e, para cada função, identificar os possíveis modos de falha, seus efeitos e suas prováveis causas. Este é um trabalho que deve ser realizado junto à equipe de operação e manutenção da planta industrial por meio de reuniões, entrevistas, análises de documentos e visitas técnicas para conhecer detalhadamente os equipamentos.

A partir da análise FMEA são desenvolvidas regras de produção relacionando as grandezas físicas monitoradas a diagnósticos de falha. Além disso, devem ser estabelecidos fatores de criticidade para as falhas diagnosticadas, agregando assim informações sobre os riscos oferecidos por cada falha potencial.

E. Prognóstico

Obtidos os diagnósticos de falhas potenciais e informações sobre os riscos potenciais associados a cada

falha, a metodologia em estudo propõe estabelecer prognósticos para estas falhas. O prognóstico trata da previsão de falhas objetivando determinar o momento em que uma falha provavelmente irá ocorrer.

As técnicas de prognóstico propostas no presente trabalho estão baseadas na teoria da decisão aplicada à Manutenção Centrada na Confiabilidade (através de métricas de taxas de falha, tempo médio entre falhas, confiabilidade, disponibilidade, tempos de reparo, entre outras) para estimar quando uma falha provavelmente irá ocorrer segundo certas condições e decidir o instante de realização da manutenção. Neste caso, tanto os dados de operação ao longo de uma campanha como os dados de eventos no mesmo período, devem ser coletados e devidamente armazenados para que possam ser derivados os modelos de previsão de falhas. A metodologia em estudo, portanto, preconiza que os sistemas sejam dotados da capacidade de armazenar automaticamente em banco de dados todas as ocorrências de falhas funcionais e defeitos (falhas potenciais), bem como os valores, de tempos em tempos, das grandezas físicas monitoradas.

A aplicação das técnicas de previsão de falhas requer o desenvolvimento de modelos matemáticos que representem o comportamento estatístico dos modos de falha dos equipamentos. Os modelos devem ser capazes de simular a influência das diversas atividades de manutenção sobre os mecanismos de falhas e sobre as funções da instalação. Dentre os modelos matemáticos utilizados para predição de falhas propõe-se adotar a abordagem markoviana por ser um método amplamente difundido, facilmente encontrado na literatura, capaz de modelar vários fenômenos naturais e artificiais. A modelagem markoviana que representa a aplicação da política de manutenção centrada em confiabilidade está descrita em [4].

F. Tomada de decisão

A tomada de decisão consiste em definir especificamente a atividade de manutenção que necessita ser realizada (baseando-se no diagnóstico de falha) e o período ideal para a realização da atividade (baseando-se no prognóstico).

As regras de produção do sistema especialista descrito no presente trabalho geram diagnósticos de falhas potenciais ou funcionais eventualmente detectadas. Cada diagnóstico produzido é armazenado em um banco de dados e relacionado a uma determinada tomada de decisão. As tomadas de decisão advêm de uma continuação da análise FMEA e consiste em, uma vez identificados os modos de falha, suas causas e efeitos, estabelecer procedimentos padronizados para eliminar ou impedir cada falha funcional. Tais decisões são apresentadas pelo sistema inteligente como sugestões de ordens de serviço de manutenção, e podem ser acatadas ou não pela equipe de manutenção.

G. Apresentação

A camada de apresentação, última camada do modelo OSA-CBM, é responsável pela interface com o usuário, apresentando ao mesmo uma série de informações provenientes de todas as outras camadas do modelo de referência. A camada de apresentação deve ser desenvolvida para ser acessada via web. Esta camada consiste num

sistema supervisorio dotado telas de sinótico cujas funcionalidades são listadas a seguir:

- ✓ **Monitoração online** de todas as condições operacionais da planta. O sinótico recebe, em tempo real, dados das variáveis do processo obtidas na camada de aquisição de dados, além de informações sobre a qualidade do sinal recebido através da camada de processamento de sinal, e as apresenta ao usuário;

- ✓ **Visualização gráfica** das variáveis monitoradas. O supervisorio desenvolvido deve ser capaz de gerar gráficos os quais mostram a evolução do valor das variáveis, ou tags, monitoradas. A amostragem dos dados pode ser tanto em tempo real, a partir de dados obtidos diretamente dos dispositivos de campo a cada instante, quanto histórica, a partir da recuperação de dados armazenados no banco de dados;

- ✓ **Diagnóstico dos equipamentos.** O diagnóstico proveniente da camada de avaliação de saúde, gerado pelas regras de produção, deve ser transferido às telas do sinótico para que seja visualizado pelos usuários do sistema;

- ✓ **Sinalização de alarmes** identificando alguma falha potencial ou funcional. A sinalização deve ser feita por meio de animações visuais, permitindo ao operador usuário do sistema identificar imediatamente a ocorrência de uma falha potencial ou funcional;

- ✓ **Sugestões de ações de manutenção.** Além de diagnosticar falhas, o sinótico deve apresentar sugestões de ações de reparo ou de prevenção das falhas identificadas. Estas sugestões, provenientes da camada de tomada de decisão, devem ser transmitidas aos campos textuais do supervisorio por meio de conexões com o banco de dados;

- ✓ **Visualização do FMEA atualizado** a cada ocorrência de falha. A análise FMEA dos equipamentos, gerada para a elaboração da base de conhecimento do sistema, deve ser apresentada ao usuário e atualizada dinamicamente a cada nova ocorrência de falha, de modo que o índice de ocorrência e o número de prioridade de risco (NPR) associado a cada falha possam ser recalculados e atualizados;

- ✓ **Visualização de indicadores de desempenho.** Os KPIs (key Performance Indicators) calculados na camada de prognóstico do modelo OSA-CBM e direcionados para avaliação das atividades de manutenção centrada em confiabilidade devem ser mostrados ao usuário na camada de apresentação. Estes KPIs são: tempo médio para falha (MTTF), tempo médio para defeito (MTTD), confiabilidade (R), disponibilidade (D), entre outros.

A figura 3 apresenta um diagrama esquemático do fluxo de informações entre as camadas do modelo OSA-CBM, objetivando esclarecer melhor as bases da metodologia apresentada.

III. PROJETO DO SISTEMA

O projeto de um sistema consiste na descrição de uma seqüência coerente de práticas que objetiva representar todas as atividades envolvidas em seu processo de desenvolvimento [4, 5,6, 7, 8 9]. A análise dos requisitos do sistema consiste na compreensão completa dos domínios do problema e de sua solução, isto é, consiste em determinar todos os objetivos e restrições do problema em estudo e

formular uma solução que atenda efetivamente às suas necessidades. Os requisitos de usuário devem capturar as demandas mais gerais dos usuários do sistema. Normalmente, estes requisitos são descritos em linguagem natural e não devem entrar em detalhes técnicos. Os requisitos de sistema são descrições detalhadas das funções e restrições do sistema. Estes requisitos devem ser precisos e descritos de maneira mais técnica.

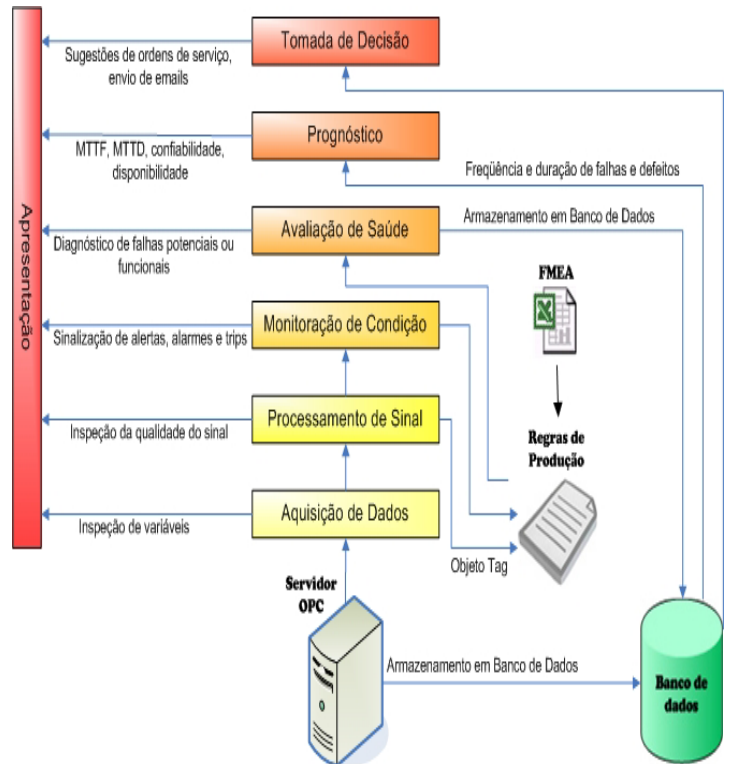


Figura 3. Fluxo de informações entre as camadas do sistema de manutenção preditiva.

Com relação ao sistema desenvolvido no presente trabalho, a especificação funcional foi realizada a partir de sua modelagem funcional e da modelagem da informação contida no banco de dados. A modelagem funcional foi desenvolvida utilizando-se o método de representação de processos IDEF0 (Integration DEFINition language 0) e a modelagem da informação para a estruturação do banco de dados do sistema foi desenvolvida utilizando-se o padrão de representação IDEF1X (Integration DEFINition for Information Modeling). Tanto os padrões IDEF0 quanto IDEF1X pertencem a uma família integrada de métodos para modelagem baseada em representações de diagramas, incluindo uma larga variedade de técnicas.

Por fim, a arquitetura de um sistema remete a uma representação abstrata daquele sistema. No presente trabalho, a arquitetura foi descrita por meio de diagramas de classe, objetivando apresentar uma referência para a implementação computacional.

A. Requisitos de usuário

Os requisitos de usuário tratam de informações acerca das necessidades do usuário sobre o sistema a ser desenvolvido [7]. Um requisito pode ser uma condição ou uma capacidade necessária para que o usuário resolva um problema ou

alcance um objetivo. De modo geral, os requisitos de usuário podem ser classificados em dois grandes grupos: os requisitos funcionais e os não-funcionais, os quais serão discutidos nas seções B e C, respectivamente.

B. Requisitos Funcionais

Os requisitos funcionais são declarações de serviços que o sistema deve fornecer. Informam a maneira com que o sistema deve reagir a entradas específicas e como deve se comportar em determinadas situações. Os requisitos funcionais (RF) do sistema SIMPREBAL são listados a seguir, conforme descrito por [4 e 7]:

✓ RF1: O sistema deve acessar os dados da Usina de Balbina a partir dos Bancos de Dados utilizados pelo Sistema de Monitoramento de Balbina, ou diretamente da instrumentação por meio de um servidor OPC que disponibiliza as informações on-line das variáveis monitoradas.

✓ RF2: O sistema deve processar esses dados nas seguintes formas:

1. Na forma de um sistema especialista baseado em regras;
2. Na forma de um sistema de regras fuzzy;
3. Na forma de redes neurais.

✓ RF3: O sistema deve alertar o usuário por meio de mensagens de email quando possíveis falhas puderem ser diagnosticadas;

✓ RF4: O sistema deve alertar o usuário por meio de uma sinalização visual, quando possíveis falhas puderem ser diagnosticadas;

✓ RF5: O sistema deve propiciar a edição de sinótico contendo um conjunto de variáveis sendo monitoradas, escolhidas pelo usuário e compondo uma tela de apresentação customizada;

✓ RF6: O sistema deve exibir o valor on-line das variáveis sendo monitoradas que foram selecionadas para compor um determinado sinótico, apresentando-as em uma tela própria previamente desenvolvida;

✓ RF7: O sistema deve ser capaz de gerar gráficos para facilitar a visualização da evolução das variáveis monitoradas ao longo do tempo;

✓ RF8: O sistema deve ser capaz de apresentar gráficos de dados históricos obtidos do Banco de Dados;

✓ RF9: O sistema deve calcular estatísticas de manutenibilidade e confiabilidade gerando indicadores de desempenho para garantir respaldo às tomadas de decisão;

✓ RF10: O sistema deve implementar algum mecanismo de aprendizagem, de tal forma que o histórico de falhas e defeitos anteriores possa ser utilizado para prevenir o surgimento de novas falhas;

✓ RF11: O processamento das informações se dará na forma de um ciclo operacional fechado, que seguirá a seguinte seqüência:

1. Verificação dos Dados a serem adquiridos;
2. Aquisição de Dados do Banco de Dados;
3. Aquisição de Dados via OPC;
4. Armazenamento provisório de todos os dados em variáveis do JESS (Java Expert System Shell);
5. Para cada uma de N camadas possíveis de processamento:

5.1. Processamento das regras via JESS;

5.2. Processamento das Regras Fuzzy, via Fuzzy-JESS;

5.3. Processamento dos dados via Redes Neurais;

6. Atualização dos Dados no Banco de Dados;

7. Atualização dos Dados via OPC.

É importante observar que o requisito funcional RF10, bem como as funções 5.2 e 5.3 do requisito funcional RF11 não foram implementados nesta primeira versão do sistema, são apenas propostas para possíveis versões futuras.

C. Requisitos não-funcionais

Os requisitos não-funcionais, ao contrário dos funcionais, não expressam nenhuma função a ser realizada pelo software, e sim atribuições e restrições que este software deve satisfazer. Tais requisitos representam necessidades adicionais que definem as qualidades globais ou atributos a serem exibidos pelo sistema resultante. Segurança, precisão, usabilidade, desempenho e manutenibilidade são exemplos de requisitos não funcionais. Os requisitos não-funcionais não possuem mapeamento direto nas funcionalidades do software e, por conseqüência, não são fáceis de detectar. Entretanto, desempenham um papel crítico durante o desenvolvimento de sistemas. Erros devido a não elicitação ou a elicitação incorreta destes requisitos estão entre os mais caros e difíceis de corrigir uma vez que o sistema tenha sido implementado.

Os requisitos não-funcionais (RNF) do sistema inteligente de manutenção preditiva de Balbina (SIMPREBAL) são expostos a seguir, conforme listado [4 e 7]:

✓ RNF1: O sistema deve ser desenvolvido na linguagem Java;

✓ RNF2: As regras do sistema não devem ser armazenadas diretamente em código-fonte, mas devem ser editáveis e estar disponíveis externamente em um arquivo modificável;

✓ RNF3: O sistema deve possuir uma interface web de acesso, por meio da qual seja possível ao usuário visualizar diagnósticos de falhas e tomadas de decisão online ou através de históricos, visualizar indicadores de desempenho, e monitorar as variáveis processadas pelo sistema;

✓ RNF4: Os identificadores das variáveis monitoradas e os parâmetros do sistema devem estar disponíveis para edição em um arquivo externo ao código-fonte;

✓ RNF5: O sistema deve ser conectável a bancos de dados SQL genéricos, desde que exista um driver JDBC para o respectivo banco de dados;

✓ RNF6: Para se conectar ao servidor OPC, o sistema deve utilizar a biblioteca JOPCClient;

✓ RNF7: Para processar as regras na forma de sistemas especialistas, o sistema deve utilizar o pacote JESS (Java Expert System Shell);

✓ RNF8: Para processar as regras fuzzy, o sistema deve utilizar o pacote Fuzzy-JESS;

RNF9: O sistema deve ser concebido de tal forma que as regras clássicas, regras fuzzy e redes neurais possam ser usadas de modo intercambiável para cada uma das camadas de processamento do SIMPREBAL (monitoração de condição, avaliação de saúde, prognósticos, tomada de decisão).

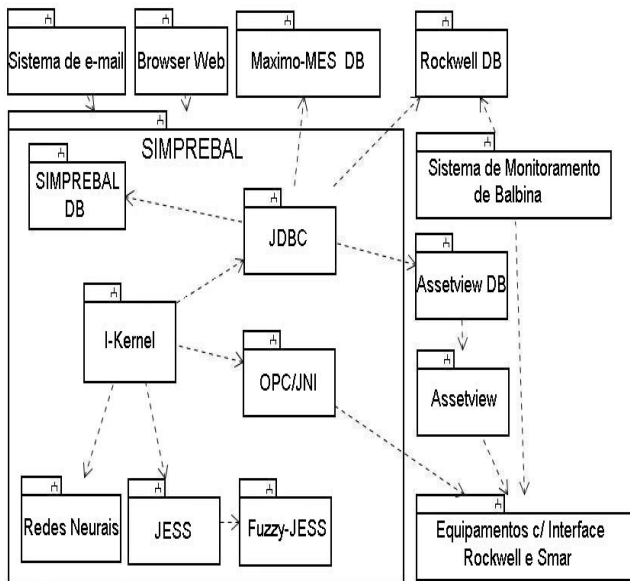


Figura 4. Kernel de processamento inteligente do sistema e sua interação com outros módulos [6, 7 e 8]

Pelos requisitos não-funcionais preconiza-se a integração de diversos componentes de software ao subsistema de processamento inteligente, aqui designado como I-Kernel do SIMPREBAL. Tais componentes, mostrados na Figura 4, são basicamente drivers JDBC para conexão ao banco de dados, API JOPCCClient para comunicação com o servidor OPC e pacotes JESS e Fuzzy-JESS para o processamento das regras de produção e regras fuzzy, respectivamente. As regras fuzzy, porém, não foram implementadas nesta primeira versão do sistema.

IV. IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL

Desenvolvido o projeto do sistema SIMPREBAL, o próximo passo é realizar sua implementação computacional. Nesta seção será detalhada a implementação computacional do sistema. A proposta não é descrever as principais classes Java do código-fonte do sistema, mas sim detalhar a estrutura e implementação das camadas do modelo OSA-CBM inseridas na arquitetura cliente-servidor, e sua relação com os módulos externos ao código-fonte. Será apresentada inicialmente a aplicação servidor e as seis primeiras camadas do modelo OSA-CBM a ela relacionadas; em seguida, a aplicação cliente e a camada de apresentação, enfocando os detalhes da interface com o usuário; e finalmente, serão descritos os módulos externos ao código-fonte, os quais são utilizados pela aplicação servidor para obtenção e armazenamento de informações. Tais módulos são: o arquivo de configuração de parâmetros, o arquivo de indexação e a base de regras.

Servidor SIMPREBAL

O servidor SIMPREBAL (SimpresbalServer) é uma aplicação Java standalone, responsável pela aquisição de dados dos equipamentos de Balbina, por meio do banco de dados e dos equipamentos via OPC, seu processamento inteligente de forma a detectar situações de manutenção preventiva, e eventualmente indicações de tomadas de

decisão sobre atuação no sistema. Quando diagnosticada uma determinada falha, o servidor envia email informando a equipe responsável pela manutenção, armazena o diagnóstico em banco de dados e envia ao módulo de comunicação cliente-servidor informações de falha e sugestões de manutenção. Para iniciar o servidor SimpresbalServer basta executar o arquivo Server.bat na pasta ...\simpresbal\simpresbalserv. Uma vez iniciada a aplicação, executam-se os ciclos do processamento inteligente e aguarda-se que um cliente solicite informações. A aplicação servidor compreende as seis primeiras camadas do modelo OSA-CBM.

A. Aquisição de dados

A aquisição de dados referentes às grandezas físicas dos equipamentos monitorados na usina de Balbina é realizada pelo SIMPREBAL via OPC ou via Banco de dados. A instrumentação da usina de Balbina é formada por transmissores inteligentes da Smar, os quais são controlados por componentes de hardware multifuncionais DFI302 Foundation Fieldbus. Este componentes, designados como DFIs, são dotados de um servidor OPC denominado DFI OLE Server. As DFIs adquirem, através de seus módulos E/S, dados diretamente dos transmissores inteligentes pertencentes à rede de instrumentação e os disponibiliza na rede de supervisão por meio do servidor OPC.

O Software SIMPREBAL, por sua vez, possui um cliente OPC, desenvolvido por meio da biblioteca comercial JOPCCClient, que se comunica com o DFI OLE Server e recebe de forma online os referidos dados. São trocadas, portanto, informações sobre o valor e a qualidade de variáveis de processo tais como temperatura, nível, vazão e pressão.

Existem na usina alguns dados que não podem ser obtidos por meio da instrumentação inteligente Smar Foundation Fieldbus e para os quais não há um servidor OPC. São, na maioria dos casos, dados referentes à abertura e fechamento de relés, relativos aos mecanismos de proteção da usina, além de medições elétricas como potência gerada, corrente e tensão. Estes relés e medidores são instrumentos fabricados pela Rockwell e os dados não são disponibilizados via OPC, mas são armazenados num banco de dados específico. A comunicação com o referido banco de dados é feita através de drivers, os quais, por meio da API de Conectividade de Banco de dados Java (Java Database Connectivity – JDBC), oferecem ao SIMPREBAL os recursos necessários para acesso aos dados.

Além de prever o acesso ao banco de dados da Rockwell, o sistema computacional em estudo prevê também acesso ao banco de dados do sistema Assetview, da Smar. Este último consiste num sistema para monitoração online de instrumentos. Seu objetivo principal é disponibilizar funções de diagnóstico encontradas nos equipamentos Fieldbus, bem como funções de calibração, parametrização, configuração e monitoração dos instrumentos.

Uma terceira forma de aquisição de dados no sistema SIMPREBAL consiste num mecanismo criado para execução de testes no programa em desenvolvimento. Trata-se de variáveis cujo valor pode ser simulado para, deste

modo, verificar se o sistema responderá de acordo com o previsto. As variáveis são obtidas a partir de arquivos de texto e seus valores podem ser modificados sempre que necessário. Variáveis simuladas foram bastante utilizadas na elaboração do sistema inteligente descrito no presente trabalho para testar o disparo das regras de produção.

B. Processamento de sinal

No módulo de processamento de sinal o sistema em estudo realiza a seguinte seqüência de ações [5 e 6]:

- Testa a conectividade com o servidor OPC caso o mesmo esteja num computador remoto;
- Testa a conectividade com as Bridges Universais Fieldbus (DFIs);
- Testa a dinamicidade das tags recebidas, isto é, verifica se os valores das tags recebidas estão alterando corretamente. Se num dado momento os valores de todas as tags permanecerem com todas as casas decimais iguais ao respectivo valor anteriormente apresentado e se este cenário assim permanecer por um intervalo de dez segundos significa que os valores lidos estão definitivamente constantes e, por razões desconhecidas, o sistema está travado;
- Processa informações sobre a qualidade do sinal OPC recebido;
- Processa informações sobre a qualidade do sinal Fieldbus.

Os testes de conectividade, tanto com o servidor OPC quanto com as DFIs, são realizados basicamente por meio do comando PING. Com este comando, se verifica a conectividade de nível IP com outro processador através do envio de mensagens de solicitação de eco de protocolo ICMP. O teste é executado baseando-se na confirmação das mensagens de resposta.

Para melhor compreender o processamento de informações sobre a qualidade do sinal, faz-se necessário primeiramente explicar o método de representação das variáveis monitoradas pelo sistema inteligente. Cada variável de processo (e.g., temperatura do óleo na cuba do mancal combinado) é descrita a partir de duas tags, ou dois itens OPC, sendo um do tipo VALUE e outro do tipo STATUS. O primeiro carrega informações sobre o valor propriamente dito da grandeza monitorada e sobre a qualidade do dado obtido via OPC, e o último traz informações sobre a qualidade do sinal transmitido pela instrumentação Fieldbus.

A partir destas informações é construída no SIMPREBAL uma instância da Classe Tag. Deste modo, cada objeto Tag, que posteriormente será enviado como fato inicial para o processamento das regras de produção do sistema inteligente, possui uma estrutura formada a partir dos dois itens OPC supracitados. A Figura 5 apresenta o processo de representação da variável de temperatura do óleo na cuba do mancal combinado.

Conforme apresentado na Figura 5, os itens VALUE e STATUS de cada variável de processo passam, cada um, por um tipo diferente de processamento de sinal. No item

VALUE utiliza-se o campo Quality e se obtém a qualidade do sinal OPC, e no item STATUS, utiliza-se o campo value e se obtém a qualidade do sinal Fieldbus [5 e 6].

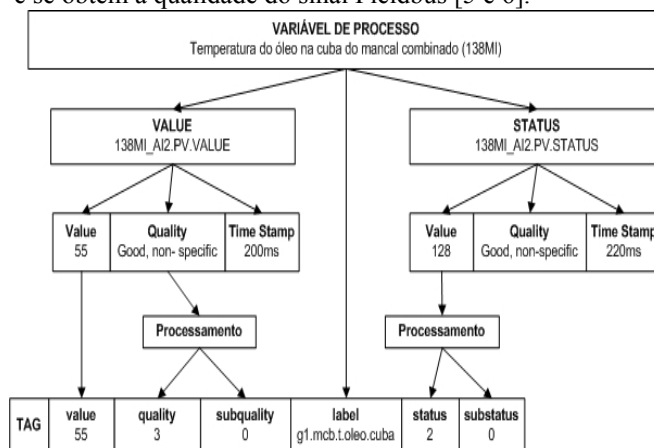


Figura 5. Construção do objeto Tag para a temperatura do óleo do mancal combinado.

C. Monitoração de condição

A camada de monitoração de condição recebe os dados provenientes da camada de processamento de sinal, os quais são objetos da classe Tag, e os compara com valores previamente estabelecidos de modo a atribuir às variáveis monitoradas uma condição específica.

A camada de monitoração de condição foi implementada utilizando-se somente regras de produção. Nesta camada verifica-se a condição do valor do parâmetro monitorado, ou seja, o atributo Value de um item OPC. São definidas 4 faixas de variação para o valor deste atributo as quais são classificadas em aceitáveis, toleráveis e inaceitáveis. Estas faixas são:

- Padrão de operação normal: Trata-se de uma faixa de valores que indicam um funcionamento dentro do previsto para um determinado equipamento, isto é, uma condição normal de operação;
- Alerta: Trata-se de uma faixa de valores dentro da qual a variável monitorada indica um defeito incipiente no equipamento. Esta faixa de valores foi estabelecida visando alcançar respostas para toda e qualquer alteração da condição normal de operação de um determinado equipamento;
- Alarme: Consiste numa faixa de valores previamente estabelecida pelos gestores da automação da usina e indica uma situação de risco ao equipamento monitorado. Exige-se que, ao atingir a faixa de alarme, sejam tomadas atitudes preventivas para evitar danos ao equipamento ou prejuízos decorrentes de uma parada inesperada;
- Trip: Consiste numa faixa de valores que caracterizam uma condição de operação inaceitável para os equipamentos da usina. Ao se atingir a faixa de trip, os equipamentos são, por medida de segurança, automaticamente desligados.

A saída da camada de monitoração de condição corresponde à inserção de fatos na memória de trabalho de sistema especialista a respeito da condição de cada variável monitorada.

D. Avaliação de saúde

A camada de Avaliação de saúde utiliza a ferramenta FMEA para encontrar relações entre as grandezas monitoradas e as falhas do sistema. A vasta experiência da equipe de trabalho no processo de geração de energia elétrica permitiu identificar as não conformidades que normalmente ocorrem no sistema. Além do auxílio dos funcionários da usina, a elaboração do FMEA também foi respaldada por documentos, denominados de Instruções Técnicas de Operação (ITO), Instruções Técnicas de Manutenção (ITM) e Planejamento de Manutenção Autônoma (PMA), que continham descritivos funcionais dos equipamentos, bem como, descrições dos procedimentos operacionais e procedimentos de manutenção. Tais documentos eram utilizados para treinamento dos funcionários de operação e manutenção da usina. Outros documentos utilizados para a elaboração das planilhas de FMEA foram as ordens de serviço de manutenção catalogadas do ano de 2004 a 2008. Foram analisadas exaustivamente todas as ocorrências de falhas descritas nas ordens de serviço durante o período mencionado e os procedimentos de manutenção realizados.

De posse de todas estas informações, elaborou-se então uma análise mais completa possível dos modos e efeitos de falhas. Vale lembrar, porém que o FMEA tem um desenvolvimento dinâmico e deve ser atualizado sempre que necessário de forma a registrar todas as modificações de procedimentos efetuadas e todas as ocorrências inéditas de falhas.

As regras de produção desenvolvidas a partir das planilhas do FMEA são regras de diagnósticos de falha relacionados aos fatos produzidos na camada de monitoração de condição.

Além do diagnóstico de falhas, uma das saídas da camada de avaliação de saúde é a determinação do risco potencial associado a cada falha. O risco potencial, representado no FMEA através do número de prioridade de risco (NPR), é uma ferramenta utilizada para avaliar a criticidade das falhas potenciais visando hierarquizar e priorizar determinadas ações de manutenção ou de melhoria.

O risco potencial é definido pelo produto de três fatores: ocorrência (O), severidade (S) e detecção (D). A ocorrência define a frequência da falha, enquanto a severidade corresponde à gravidade do efeito da falha, e a detecção é a habilidade para detectar a falha antes que ela atinja o cliente. Os fatores O, S e D são classificados de 1 a 10 [5].

Tendo obtido o risco potencial, as causas das falhas são ranqueadas, direcionando a atuação do gestor. Em [5] é mostrado um exemplo de análise da criticidade das possíveis falhas do mancal guia da turbina da unidade geradora 1 de Balbina.

E. Prognóstico

Os prognósticos de falha são estimativas de tempo médio entre falhas calculadas por meio da modelagem do processo através de cadeias de Markov. Para os cálculos de prognóstico é necessário obter no banco de dados do SIMPREBAL os registros de ocorrências de ALERTA,

ALARME e TRIP para cada tag de um determinado equipamento, além dos tempos de início e de término de cada falha. A implementação de prognósticos é detalhada em [5], juntamente com os indicadores de desempenho (KPIs).

F. Tomada de decisão

A tomada de decisão é uma sugestão de ordem de serviço desenvolvida a partir do estudo de FMEA. Todas as tomadas de decisão, associadas a cada eventual diagnóstico de falha, estão previamente inseridas no banco de dados do sistema SIMPREBAL em tabelas denominadas decisões_ughX, onde X é o número da unidade geradora.

Cliente SIMPREBAL

O cliente Simprebal envolve a camada de apresentação do modelo OSA-CBM. Este cliente foi concebido para ser uma aplicação Web, disponibilizando na rede interna da Manaus Energia informações para toda a empresa. Foi desenvolvido em páginas HTML nas quais estão inseridos um applet Java e estruturas em PHP e Javascript. A interface pode ser acessada remotamente por meio de browser, através do endereço intranet de Balbina <http://simprebal/simprebal>.

A. Sinótico SIMPREBAL (SimprebalClient)

Ao clicar em acessar sinótico (um submenu do menu Home) o usuário encontra uma tela semelhante à mostrada na figura 6.

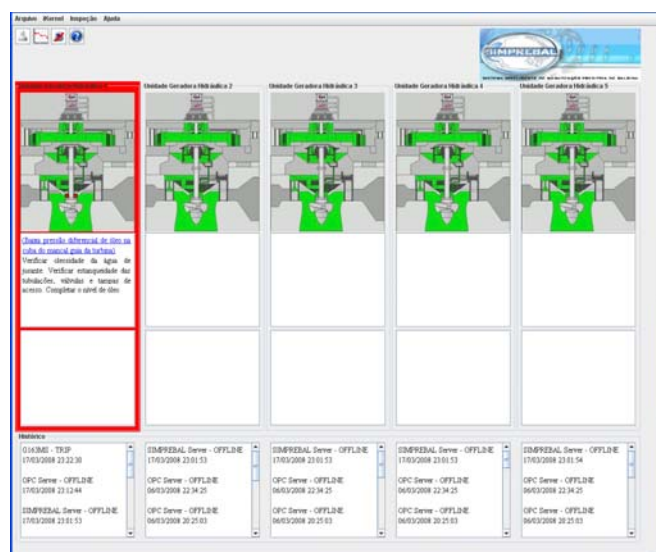


Figura 6. Sinótico SIMPREBAL.

Nesta tela podem-se observar as figuras referentes às 5 (cinco) UGHs da usina. Em cada figura estão representados os equipamentos monitorados pelo Simprebal. Os equipamentos que aparecem com a cor verde estão em funcionamento normal, os equipamentos com a cor amarela estão com defeito, ou seja, possuem valores das tags próximos aos valores de alarme (diz-se que estão em estado de alerta) e os equipamentos na cor vermelha (como é o caso do mancal guia da turbina da unidade geradora 1 da Figura 6) estão em estado de alarme ou trip.

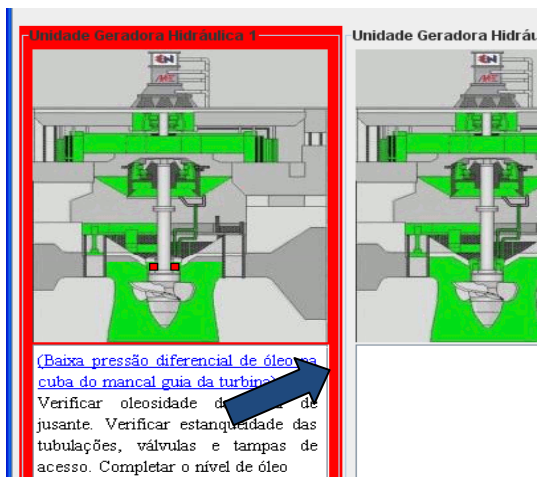


Figura 7. Link para detalhamento da anomalia.

No primeiro quadrante abaixo da figura de cada UGH, serão apresentadas as anomalias e as tomadas de decisão referentes aos equipamentos do sistema de mancal, sistema da turbina ou sistema do gerador. No segundo quadrante serão apresentadas as anomalias e as tomadas de decisão referentes ao sistema de medição. São, portanto, falhas de processamento de sinal. E o terceiro e último quadrante disponibiliza um histórico das trinta últimas ocorrências de falhas ou defeitos em cada UGH. O primeiro e o segundo quadrante mostram a descrição da anomalia entre parênteses e sob a forma de um link, conforme melhor observado na Figura 7.

ANÁLISE DOS MODOS E EFEITOS DE FALHAS				
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA		USINA HIDRELÉTRICA DE BALBINA UNIDADE GERADORA HIDRÁULICA 1		ME Manaus Energia
MANCAL-GUIA DA TURBINA				
FUNÇÃO	Transferir os esforços radiais do eixo da turbina ao concreto			
CÓDIGO DE FALHA	DESCRIÇÃO	MODOS DE FALHA	VALOR CONFIGURADO PARA O MODO DE FALHA	CAUSA DA FALHA
G163MSD2	Baixa pressão diferencial de óleo na cuba do mancal guia da turbina	G163MS - ALARME	0,25	Vazamento de óleo pelas selagens e conexões da cuba
FATORES PARA AVALIAÇÃO DA FALHA				SUGESTÃO DE OS
SEVERIDADE	OCCORRÊNCIA	DETECÇÃO	AVALIAÇÃO GERAL (MPR)	Verificar oleosidade da água de jusante. Verificar estanqueidade das tubulações, válvulas e tampas de acesso. Completar o nível de óleo. <input checked="" type="checkbox"/> Declaro que esta sugestão de OS condiz com a realidade.
8	1	1	8	
INFORMAÇÕES ADICIONAIS				
Horário de início: 07/07/2008 16:41		Horário de término: <input type="text"/>		
<input type="button" value="Enviar informações"/>				

Figura 8. Análise dos modos e efeitos de falha.

Clicando no link o usuário é direcionado para uma página HTML contendo a análise dos modos e efeitos da referida falha (FMEA), conforme mostrado na Figura 8. A tela de FMEA contém uma análise detalhada de cada falha ocorrida. Convém observar nesta tela que o campo modo de falha é uma descrição da forma como a falha foi identificada. É constituído pelo tag da variável monitorada

que revelou a falha e a faixa de operação (ALERTA, ALARME ou TRIP) em que a mesma se encontrava no momento do falha.

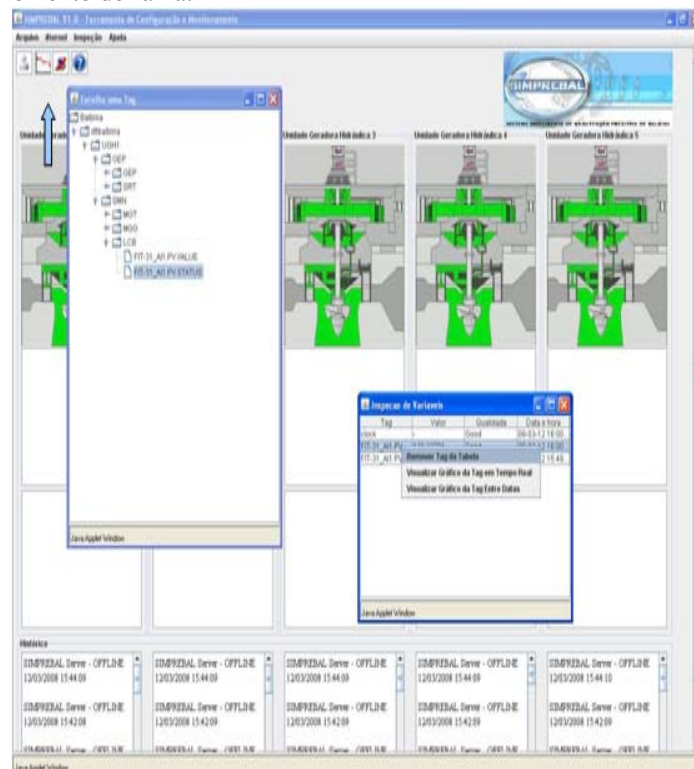


Figura 9. Inspeção de variáveis.

Na tela do sinótico, a função Inspeção de Variáveis, que pode ser acessada pelo menu inspeção → itens ou pelo botão de atalho inspeção de variáveis, permite que o usuário visualize o valor das tags monitoradas pelo SIMPREBAL. Conforme mostrado na Figura 9.

Ao selecionar a opção Inspeção de Variáveis o SIMPREBAL abrirá uma janela, com o título “Escolha uma Tag”, na qual será apresentada uma árvore com todas as 5 UGHs, os sistemas monitorados, seus equipamentos e por fim as tags de cada um deles. Para acessar os valores das variáveis deve-se escolher uma tag e dar um duplo clique nela. Aparecerá uma janela com o título Inspeção de variáveis. Nesta janela o usuário poderá acompanhar a variação dos valores das tags escolhidas, bem como verificar a qualidade do sinal monitorado.

Se o usuário clicar com o botão direito do mouse em uma ou mais destas variáveis, aparecerá um menu com as opções remover tag da tabela, visualizar gráfico da tag em tempo real e visualizar gráfico da tag entre datas. Para selecionar o gráfico de mais de uma variável deve-se selecionar as variáveis desejadas mantendo a tecla Ctrl pressionada, conforme mostrado na Figura 10.

A opção “Visualizar Gráfico da Tag entre Datas”, permite visualizar o gráfico de valores de uma ou mais tags entre dois instantes escolhidos. Ao clicar na opção Visualizar Gráfico da Tag entre Datas aparecerá uma caixa de diálogo que permite ao usuário selecionar as datas de início e de término da amostragem, conforme observado na Figura 11.

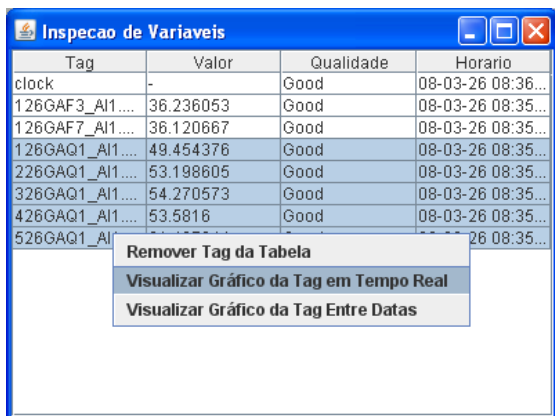


Figura 10. Menu da tela de inspeção de variáveis.

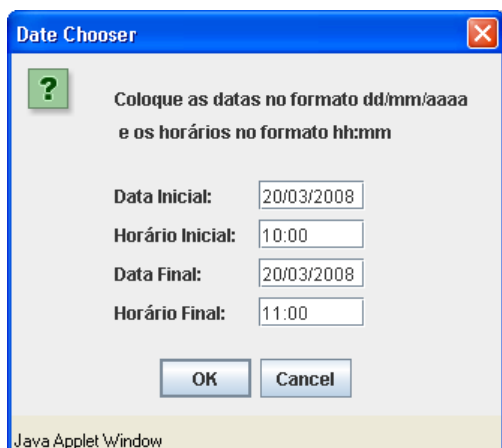


Figura 11. Seleção do intervalo de aquisição dos dados históricos.

A opção “Visualizar Gráfico da Tag em Tempo Real”, permite monitorar a variação de uma ou mais tags a partir do instante em que se clica nesta opção. Conforme mostrado na Figura 12.

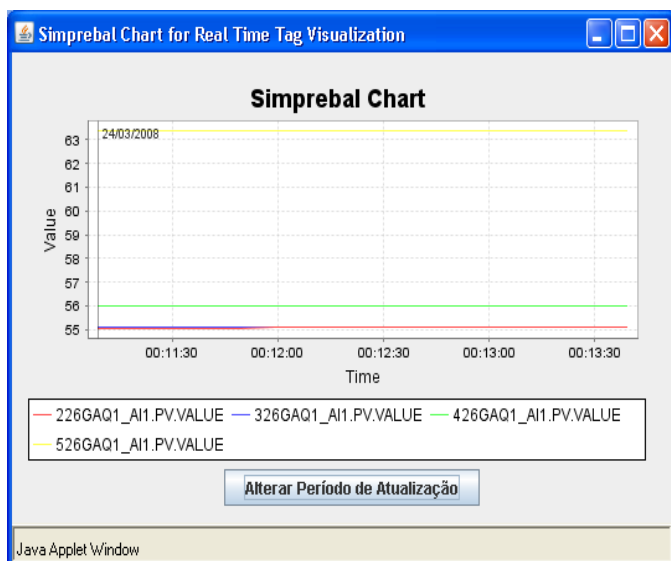


Figura 12. Gráfico em tempo real da temperatura de ar quente do radiador das 5 UGHs.

Clicando no botão OK o SIMPREBAL apresentará um gráfico com a variação dos valores do(s) tag(s) selecionado(s) no intervalo de tempo determinado pelo usuário, conforme ilustrado na Figura 13.

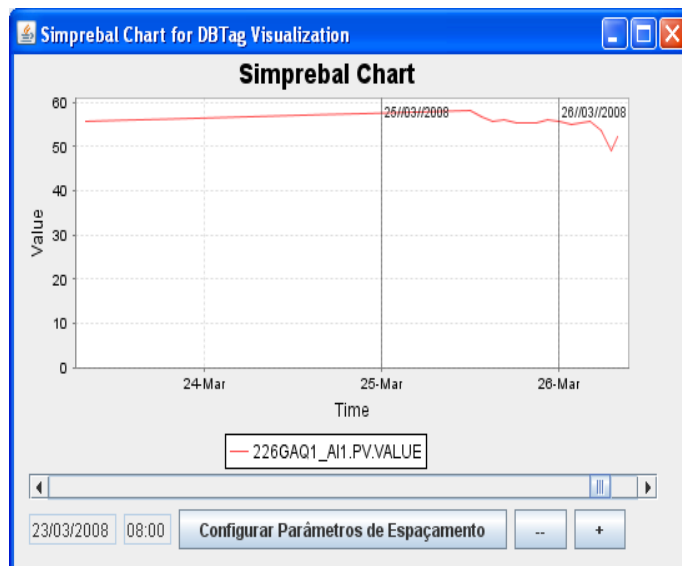


Figura 13. Gráficos históricos.

V. CONCLUSÕES

Este trabalho desenvolveu uma metodologia para concepção de sistemas inteligentes de manutenção preditiva visando o diagnóstico e prognóstico de falhas e o auxílio à tomada de decisão, sugerindo ordens de serviço de manutenção e disponibilizando informações via web. A metodologia foi concebida para melhorar a qualidade e produtividade das equipes de manutenção industrial, além de melhorar a confiabilidade e disponibilidade dos equipamentos.

Esta metodologia oferece um roteiro detalhado para o desenvolvimento de sistemas de manutenção baseada em condição. Utilizou como modelo de referência a especificação OSA-CBM, herdando um modelo de concepção de sistemas baseado na divisão em camadas ou módulos funcionais de modo que cada camada acrescentasse um nível de abstração sobre a camada inferior.

Uma grande contribuição da metodologia proposta foi agregar ao modelo OSA-CBM técnicas de inteligência artificial garantindo flexibilidade e rapidez ao sistema. A metodologia descreve a utilização de um sistema especialista baseado em regras de produção para identificar situações de manutenção preditiva. As regras de produção possuem uma estrutura dividida em camadas, fundamentada no modelo OSA-CBM. São compostas por três camadas: processamento de sinal, monitoração de condição e avaliação de saúde. A camada de avaliação de saúde gera um diagnóstico de falhas identificando anomalias em tempo real. Cada diagnóstico está associado a uma tomada de decisão bem documentada, que direciona as ações de manutenção. A automatização do processo de tomada de decisão utilizando conhecimento é uma estratégia bastante promissora no ambiente industrial atual, onde são exigidas frequentemente decisões cada vez mais eficazes e especializadas.

Outra contribuição deste trabalho é a utilização de ferramentas de manutenção centrada em confiabilidade para elaborar a base de conhecimento do sistema especialista. O FMEA mostrou-se uma ferramenta bastante útil para a

análise de falhas funcionais e potenciais dos equipamentos de um sistema, na medida em que permitiu identificar as anomalias do sistema em estudo, relacioná-las com suas causas e discutir suas conseqüências. As planilhas FMEA bem estruturadas e documentadas permitiram relacionar as grandezas monitoradas do sistema de forma a identificar modos de falha específicos. Por exemplo, o sistema de mancal da usina hidrelétrica de Balbina (mancal guia do gerador, mancal guia da turbina e mancal combinado) foram encontrados 43 modos de falha em 20 equipamentos distintos. E as ações de melhoria apontadas na metodologia FMEA foram utilizadas para descrever sugestões de ordens de serviço colaborando para a padronização dos procedimentos de manutenção.

É importante ainda comentar outra abordagem da metodologia proposta: a disponibilização on-line do conhecimento para toda a empresa. As regras de produção, bem como a análise FMEA, são técnicas caracterizadas por explicitar o conhecimento. Elas permitem acompanhar todos os passos percorridos para a obtenção de uma determinada solução facilitando, portanto, o acesso ao conhecimento em todos os departamentos da empresa. Numa organização, gerir os conhecimentos trás vantagens inquestionáveis. Segundo Drucker (1999), “O ativo mais valioso de uma organização do século XX era o seu equipamento produtivo. Os ativos mais valiosos de uma instituição do século XXI, empresarial ou não, serão a sua produtividade e os conhecimentos dos seus colaboradores”.

Dar o passo seguinte, na gestão de ativos não é algo que seja atingido trabalhando mais, mas sim trabalhando de uma maneira mais inteligente. Dever-se-á aceitar um novo processo e evoluir para uma cultura de empresa prezando pela informação universal e de qualidade.

Várias sugestões podem ser listadas tanto com o objetivo de incrementar a metodologia proposta, quanto de tornar o SIMPREBAL uma aplicação completamente funcional, comparada aos sistemas comerciais de gestão da manutenção.

A primeira recomendação se refere à filtragem dos dados para classificação do estado operacional de uma variável. Esta necessidade foi observada a partir dos resultados do estudo de caso. Notou-se que são registradas desnecessariamente várias anomalias repetidas no banco de dados, e se propõe uma filtragem por histerese na camada de monitoração de condição, ou a implementação de regras fuzzy, de modo a atribuir um determinado grau de incerteza às variáveis em cada faixa de monitoração da condição.

Com relação ao prognóstico de falhas, sabe-se que o número de falhas identificadas pelo sistema computacional ainda é bastante reduzido para que se possa calcular estatisticamente a vida útil restante de um equipamento, uma vez que a aplicação das equações de Chapman-Kolmogorov pressupõe um tempo de observação suficientemente longo de modo que as falhas possam ser modeladas como eventos aleatórios (distribuições exponenciais). À medida que o sistema evoluir e dispuser de uma base dados grande o suficiente, os prognósticos poderão ser realizados com precisão.

Outra recomendação para evolução do sistema é a integração de um módulo de aprendizagem. Este módulo trata de uma realimentação da base de conhecimento. Cada diagnóstico proveniente das regras de produção deveria ser avaliado e validado. Caso o diagnóstico estivesse incorreto, o sistema deveria oferecer novas opções de diagnóstico utilizando-se de técnicas de inteligência artificial voltadas para aprendizado. Segundo este novo paradigma, decisões sobre o gerenciamento das falhas de um equipamento quase sempre devem ser tomadas com pouca informação sobre o comportamento das falhas. O módulo de aprendizagem eliminaria a necessidade de informações excessivas sobre as falhas de um equipamento, pois a base de dados poderia se aperfeiçoar a cada diagnóstico de falha.

Houve, na implementação computacional descrita neste trabalho, uma tentativa de validação dos diagnósticos indicados pelo sistema SIMPREBAL. Após a ocorrência de cada falha o sistema envia um link para uma página contendo a descrição completa da anomalia, bem como seus efeitos e sugestões de manutenção, nesta mesma página há uma caixa de seleção perguntando ao operador se as descrições apresentadas são válidas, e cabe ao operador responder. Esta forma de validação, porém é bastante primitiva e altamente dependente de um especialista humano. Propõem-se o desenvolvimento de novas técnicas e estratégias de avaliação. Este é um problema interessante, que, provavelmente provocará uma mudança na estrutura das regras de produção adotadas.

VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] F. Buschman, *Oriented Software Architecture A System of Patterns*, England, 1996.
- [2] OSA-CBM, *Open Systems Architecture for Condition-Based Maintenance* <<http://www.mimosa.org/downloads/39/specifications/index.aspx>>, 2007
- [3] P. V. Fleming e S.R.R.O. França, *Considerações Sobre a Implementação Conjunta de TPM e MCC na Indústria de Processos*, Abramam 12º Congresso Brasileiro de Manutenção: TT044, São Paulo, pp.53, 1997.
- [4] Souza, R. Q. (2008). “Metodologia e Desenvolvimento de um Sistema de Manutenção Preditiva Visando à Melhoria da Confiabilidade de Ativos de Usinas Hidrelétricas”. Dissertação de Mestrado em Sistemas Mecatrônicos, Departamento de Mecânica, UnB, Brasília, 207p.
- [5] Smar, *Equipamentos de Campo série 302 Foundation. Manual de instalação, operação e manutenção*, 2001.
- [6] Smar, *Manual de instruções dos blocos funcionais Fieldbus Foundation*, 2005.
- [7] Álvares, A.J., Gudwin, R.R., Souza, R.Q., Simeón, E.A., Tonaco, R.P. (2007). “An intelligent kernel for the maintenance system of a hydroelectric power plant”. In: COBEM 2007 - 19th International Congress of Mechanical Engineering: TT1681, Anais. Brasília, Brazil.
- [8] Tonaco, R.P. (2008). “Metodologia para Desenvolvimento de Base de Conhecimento Aplicada à Manutenção Baseada em Condição de Usinas Hidrelétricas”. Dissertação de Mestrado em Sistemas Mecatrônicos, Departamento de Mecânica, UnB, Brasília, 194p.
- [9] Simeón, E.A. (2008). “Aplicação de Técnicas de Inteligência Artificial no Desenvolvimento de um Sistema de Manutenção Baseada em Condição”. Dissertação de Mestrado em Sistemas Mecatrônicos, Departamento de Mecânica, UnB, Brasília, 179p.