



## 8º CONGRESSO IBEROAMERICANO DE ENGENHARIA MECANICA

Cusco, 23 a 25 de Outubro de 2007

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

Amaya E. J.\*, Tonaco R.\*, Souza R. Q.\* Álvares A. J.\*

\*Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Mecânica e Mecatrônica, Grupo de Inovação em Automação Industrial (GIAI), CEP 70910-900, Brasília, DF, Brasil.

\*edgar.amaya@gmail.com, \*rosimarci@gmail.com, \*rodrigoqsouza@gmail.com, \*alvares@AlvaresTech.com

#### RESUMO

Neste artigo é apresentada a metodologia que foi desenvolvida no contexto do projeto de Modernização da Área de Automação de Processos das Usinas Hidrelétricas de Balbina e Samuel, onde o objetivo é o desenvolvimento de um sistema inteligente de manutenção preditiva da usina de Balbina. A metodologia SIMPREBAL é baseada em conceitos de manutenção centrada em confiabilidade (MCC), desenvolvendo um sistema chamado de I-Kernel, um kernel inteligente, que vai obter dados dos bancos de dados do sistema supervisorio da Rockwell, do sistema de gestão da manutenção e operação Maximo, do sistema Assetview e do proprio Simprebal, usando JDBC (Java Database Connectivity) e dados do Servidor OPC (OLE – Object Linking and Embedding – for Process Control) da instrumentação Fieldbus Foundation da Smar usando a biblioteca openscada do projeto Utgard, além de obter dados o I-Kernel processará informações usando sistemas especialistas baseados em regras usando JESS (Java Expert System Shell) e técnicas de Inteligência Artificial tais como, redes neurais e lógica fuzzy usando Fuzzy JESS. Os dados dos defeitos e falhas obtidos vão ser armazenados num banco de dados do Simprebal para serem usados por um sistema de aprendizagem baseado em redes neurais e predizer falhas usando essas informações. O sistema é concebido para coletar e analisar os dados monitorados das unidades geradoras da usina de Balbina, e a implementação de um sistema computacional cliente-servidor com vistas à produção de diagnósticos de estados de funcionamento e de dados que auxiliem a tomada de decisão quanto às ações operacionais e de manutenção das máquinas gerando OS (ordens de serviço) com sugestões das ações de manutenção, visando o aumento da disponibilidade dos equipamentos.

**PALAVRAS CHAVE:** Manutenção Preditiva, Sistemas Especialistas, Redes Neurais, Lógica Fuzzy, Fieldbus Foundation.

## INTRODUÇÃO

O modelo OSA-CBM (Open System Architecture for Condition Based Maintenance) que consiste em sete camadas mostrado na Fig. 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>. A noção de uma arquitetura estendida em camadas usada aqui é consistente com o conceito usado em [Buschman, 1996]. 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.



Fig. 1: Arquitetura OSA-CBM e suas 7 camadas.

A seguir será apresentado um exemplo das sete camadas estudando o caso do mancal guia da turbina e como estas se ajustam ao sistema SIMPREBAL que é baseado em MCC (Manutenção Centrada em Confiabilidade). Segundo [Fleming et al., 1997], a MCC envolve uma consideração sistemática das funções do sistema, a maneira como essas funções falham é um critério de priorização explícito baseado em fatores econômicos, operacionais e de segurança para a identificação das tarefas de manutenção aplicáveis tecnicamente e custos eficientes no combate a essas falhas.

### ESTUDO DE CASO: MANCAL GUIA DA TURBINA

Esta seção apresenta uma breve explicação sobre os mancais do grupo turbina-gerador, bem como, um estudo de caso utilizando como exemplo o mancal guia da turbina. O mancal guia da turbina é responsável por suportar o empuxo radial do eixo da turbina. O arranjo dos mancais do grupo turbina-gerador mostrado na figura 2 é o seguinte: o mancal guia inferior é colocado próximo à extremidade inferior do eixo, na tampa superior e compatível com o arranjo e o acesso à vedação do eixo; o mancal combinado ou mancal guia-escora é suportado por uma estrutura cônica apoiada na tampa superior; e o mancal de guia superior ou mancal do gerador é locado imediatamente acima do rotor do gerador, no centro da aranha superior do gerador, cujo peso deve ser suportado pela carcaça do estator, mas as forças radiais do mancal devem ser suportadas pela estrutura de concreto.

Uma vez definida as funções do sistema utilizando as sete camadas do modelo OSA-CBM, pode-se definir os módulos das camadas para o sistema em estudo do mancal guia da turbina.

**Módulo de sensor:** O módulo do sensor deve ser desenvolvido de acordo com o padrão IEEE Std 1451 segundo [Bengtsson, 2004]. A aquisição de dados necessários para o processamento da informação relativa ao mancal guia da turbina, a obtenção das Tags referentes a cada equipamento é feita via OPC para Tags da instrumentação Fieldbus Foundation da Smar da serie 302 é feita segundo [Smar, 2001], e as Tags do banco de dados da Rockwell via JDBC mostrado na Fig. 3.

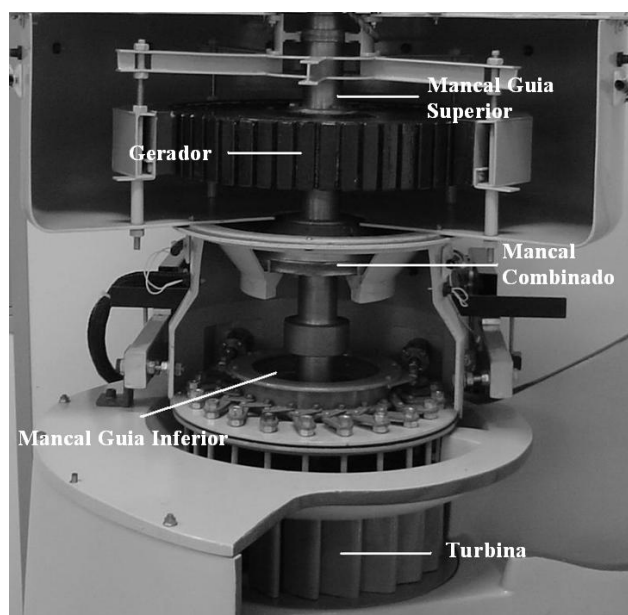


Fig. 2: Maquete de uma Unidade Geradora Hidraulica.

**Processamento de sinal:** O sistema deve acessar os dados da Usina de Balbina a partir dos Bancos de Dados SQL utilizados pelo Sistema de Monitoramento de Balbina, Sistema de Gestão de Operação e Manutenção Máximo ou diretamente da instrumentação Fieldbus Foundation da Smar através do servidor OPC mostrado na Fig. 3, sendo que estes disponibilizam as informações on-line dos equipamentos. Para obtenção das variáveis on-line via OPC de acordo com as configurações dos blocos funcionais segundo [Smar, 2005], está em desenvolvendo um programa para aquisição das Tags necessárias pra avaliação dos equipamentos usando a biblioteca openscada do projeto Utgard [Utgard, 2007]. Cada Tag tem um valor de Status que é um número de 8 bits, onde os 2 bits mais significativos representam a qualidade do signal do dispositivo (0=Bad, 1=Uncertain, 2=Good Non Cascade, 3=Good Cascade), os 2 bits menos significativos são os limites (0=Not Limited, 1=Low Limited, 2=High Limited, 3=Constant), os quatro bits intermediário representam o substatus, onde para cada valor da qualidade existem valores de substatus e se ocorrer um defeito ou falha é indicado com números diferentes, assim pode-se saber se foi no sensor, equipamento ou outros, segundo a tabela 1. As regras para esta camada mostra-se na tabela 2 onde na primeira coluna compara-se o status e o subStatus com número e na segunda coluna declara-se um código para essa condição da Tag.

Tabela 1: Valores de Sub-status e qualidade no atributo de Status.

		Qualidade			
		0 = Bad	1 = Uncertain	2 = Good (Non Cascade)	3 = Good (Cascade)
Sub-status	0	Não específico	Não específico	Não específica (baixa prioridade)	Não específica
	1	Erro na configuração	Último valor usável	Alarme ativo de bloco	Inicialização aprovada (IA)
	2	Não conectado	Substituto	Alarme ativo de consulta	Requisição de inicialização (IR)
	3	Falha no Equipamento	Valor inicial	Alarme ativo critico	Não solicitado (NI)
	4	Falha no Sensor	Conversão do sensor não exato	Alarme de bloco desconhecido	Não selecionado (NS)
	5	Sem Comunicação, com último valor usavel	Violação de limite de unidade técnica	Alarme de consulta desconhecido	Cancelamento local (LO)
	6	Sem Comunicação, com valor não usável	Sub-normal	Alarme crítico desconhecido	Estado de falha ativo (FSA)
	7	Fora de serviço (alta prioridade)			Estado de falha iniciado (IFS)

Tabela 2: Regras para a camada Processamento de sinal.

Status e subStatus das Tags	Código
status = "2" ou status = "3"	(assert (signal-GOOD ?label))
status = "0" e subStatus = "0"	(assert (signal-BAD-0 ?label))
status == "0" e subStatus = "1"	(assert (signal-BAD-1 ?label))
status == "0" e subStatus = "2"	(assert (signal-BAD-2 ?label))
status == "0" e subStatus = "3"	(assert (signal-BAD-3 ?label))
status == "0" e subStatus = "4"	(assert (signal-BAD-4 ?label))
status = "1" ou (status = "0" e (subStatus = "5" ou subStatus = "6" ou subStatus = "7"))	(assert (signal-UNCERTAIN ?label))

**Monitoração de Condição:** Esta camada determina a condição do sistema atual, subsistema, ou indicadores de condição de componente baseando-se em algoritmos, sistemas inteligentes e na saída dos módulos de sensores e processamento de sinal. Este módulo de monitoração deve ser desenvolvido usando o padrão ISO 13373-1 segundo [Bengtsson, 2004]. É possível fazer o uso de histórico de condição local e fornecer parâmetros para o modelo. Duas dimensões devem ser consideradas: primeira, o sistema Assetview da Smar e o sistema MES Máximo fornecem análises relativa à condição da instrumentação FieldBus; segunda dimensão, o sistema SIMPREBAL fornece a condição do sistema monitorado. Um exemplo de regras de produção nesta camada para a Tag da pressão de óleo na cuba pode ser visto na tabela 3, onde os valores da tag são comparados com valores da faixa de operação do dispositivo e gera-se um código para a condição do dispositivo.

Tabela 3: Regras para a camada Monitoração de Condição.

Faixa de Valores (mm bar)	Codigo	Condição
(400 < G163MS_AI.PV.VALUE) e signal-GOOD	G163MS-normal	Nível normal de óleo na cuba do mancal guia inferior
(300 < G163MS_AI.PV.VALUE < 400) e signal-GOOD	G163MS-baixo	Nível baixo de óleo na cuba do mancal guia inferior
(200 < G163MS_AI.PV.VALUE < 300) e signal-GOOD	G163MS-alarme	Nível muito baixo de óleo na cuba do mancal guia inferior - 1º estágio
(G163MS_AI.PV.VALUE < 200) e signal-GOOD	G163MS-trip	Nível muito baixo de óleo na cuba do mancal guia inferior - 2º estágio

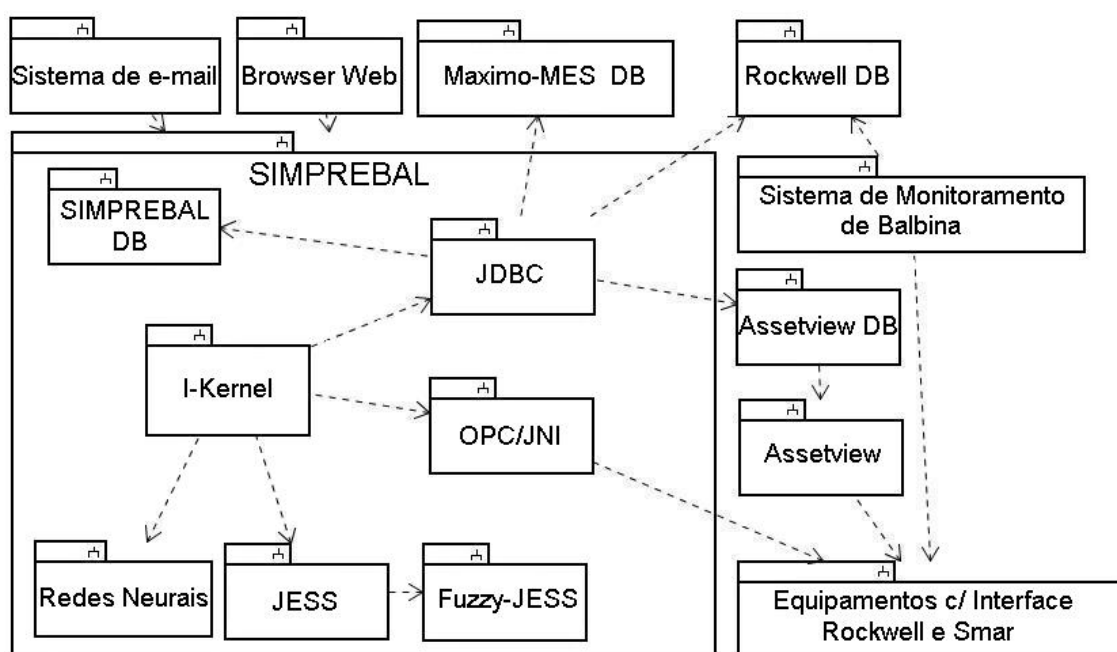


Fig. 3: Visão Geral do Projeto SIMPREBAL, demonstrando o I-Kernel e sua interação.

**Avaliação de saúde:** Esta camada deve ser desenvolvida a partir das normas IEEE 1232 e a ISO 13373-1 segundo [Bengtsson, 2004]. Na primeira dimensão o conversor FieldBus e o sistema Assetview da Smar fornecem a avaliação da saúde da instrumentação FieldBus. Na segunda dimensão o sistema SIMPREBAL fornece a avaliação da saúde do sistema monitorado. A avaliação da saúde do equipamento ocorre através da extração das características de cada equipamento e posterior detecção de anomalias e diagnósticos dos mesmos. A análise será feita usando os valores históricos das Tags, cálculo do KPI (Key Performance Indicators), os valores das tags serão obtidos do banco de dados do supervisor da Rockwell. No encerramento das OS (Ordens de Serviço), o usuário deverá encerrar as OS fornecendo todos os dados para registro histórico e cálculo de KPI.

**Prognósticos:** Na tarefa de prognóstico, considera-se a avaliação da saúde do sistema, subsistemas, componentes, o escalonamento empregado (predição de uso) e a capacidade de raciocínio do modelo para prever o estado de saúde do equipamento. Um prognóstico é sugerido a partir das informações dos módulos anteriores. Este pode ser baseado em modelos pré-estabelecidos ou feito considerando as características encontradas na avaliação de saúde. O prognóstico vai consistir de dois passos, o diagnóstico que será feita com os valores atuais e o prognóstico que vai ser feito, usando tendência de tags armazenadas no banco de dados ou através de redes neurais que vão prever falhas ou defeitos futuros baseadas em dados históricos ou acontecimentos passados. As regras para diagnóstico são baseadas em valores reais e são mostradas na tabela 4.

Tabela 4: Regras de produção para Diagnóstico.

Sinal de "g1.st.p.oleo.cuba"	Codigo de Diagnostico
signal-BAD-0	assert(diagnostic G163MS-signal0)
signal-BAD-1	assert(diagnostic G163MS-signal1)
signal-BAD-2	assert(diagnostic G163MS-signal2)
signal-BAD-3	assert(diagnostic G163MS-signal3)
signal-BAD-4	assert(diagnostic G163MS-signal4)
signal-UNCERTAIN	assert(diagnostic G163MS-signal5)
not (condition G163MS-normal)	assert(diagnostic G163MSF1)

**Tomada de decisão:** Tem o objetivo de integrar informações necessárias para a tomada de decisão, considerando informações sobre a saúde dos equipamentos e para prever a saúde de um sistema e/ou subsistema. O sistema SIMPREBAL irá realizar a tomada de decisão baseando-se na sua base de conhecimento gerada a partir da árvore de faltas/falhas, da árvore de sintomas, e pelas informações de inspeções realizadas pelo sistema TPM (Manutenção Produtiva Total), segundo [Wyrebski, 1998] hoje é considerada uma metodologia que auxilia na redução de ocorrência de falhas em instalações de máquinas e equipamentos nas empresas. Nesse módulo o sistema inteligente apresenta algumas sugestões para a solução do problema, cabe ao usuário tomar a decisão mais aplicada. As regras para esta camada com as sugestões de manutenção são mostradas na tabela 5, a decisão é enviada do servidor i-kernel para o cliente onde é mostrada na tela que interage com o pessoal da operação, gerando OS para manutenção.

Tabela 5: Regras de produção para Tomada de Decisão.

Codigo	Decisão
G163MS-signalD0	Falha no processamento de sinal do tag G163MS: Não específica
G163MS-signalD1	Falha no processamento de sinal do tag G163MS: Erro na configuração
G163MS-signalD2	Falha no processamento de sinal: verificar conexão do sensor de pressão à cuba e ao transmissor G163MS
G163MS-signalD3	Verificar falha no transmissor de pressão G163MS
G163MS-signalD4	Verificar falha no sensor de pressão diferencial da cuba do mancal guia inferior
G163MS-signalD5	Verificar falha de comunicação na aquisição do tag G163MS
G163MSD1	Verificar estanqueidade das tubulações, válvulas e tampas de acesso
	Verificar aperto dos parafusos de fixação da tampa e suporte da cuba
	Realizar alinhamento e ajuste de folga das sapatas
	Restituir a carga de óleo

**Apresentação:** Suporta a apresentação das informações para o controle das entradas dos usuários do sistema (por exemplo, manutenção e operação). As saídas incluirão qualquer informação produzida pelas camadas mais baixas e as entradas incluirão qualquer informação requerida pelas camadas mais baixas. A figura 4 apresenta a interface homem-máquina associada ao lado do Cliente, sendo desenvolvida em Java para ser usada como uma aplicação Web ou um Applet chamado via browser, independentemente da plataforma computacional usada pelo cliente. A GUI (Interface Gráfica com o Usuário) mostrada na Fig. 4 apresenta a camada de Apresentação (sétima camada) do sistema Simprebal mostrando a Tomada de Decisão (sexta camada) sugerida pelo sistema SIMPREBAL. A GUI apresenta também os valores das Tags em inspeção de variáveis e a estrutura hierárquica dos ativos.

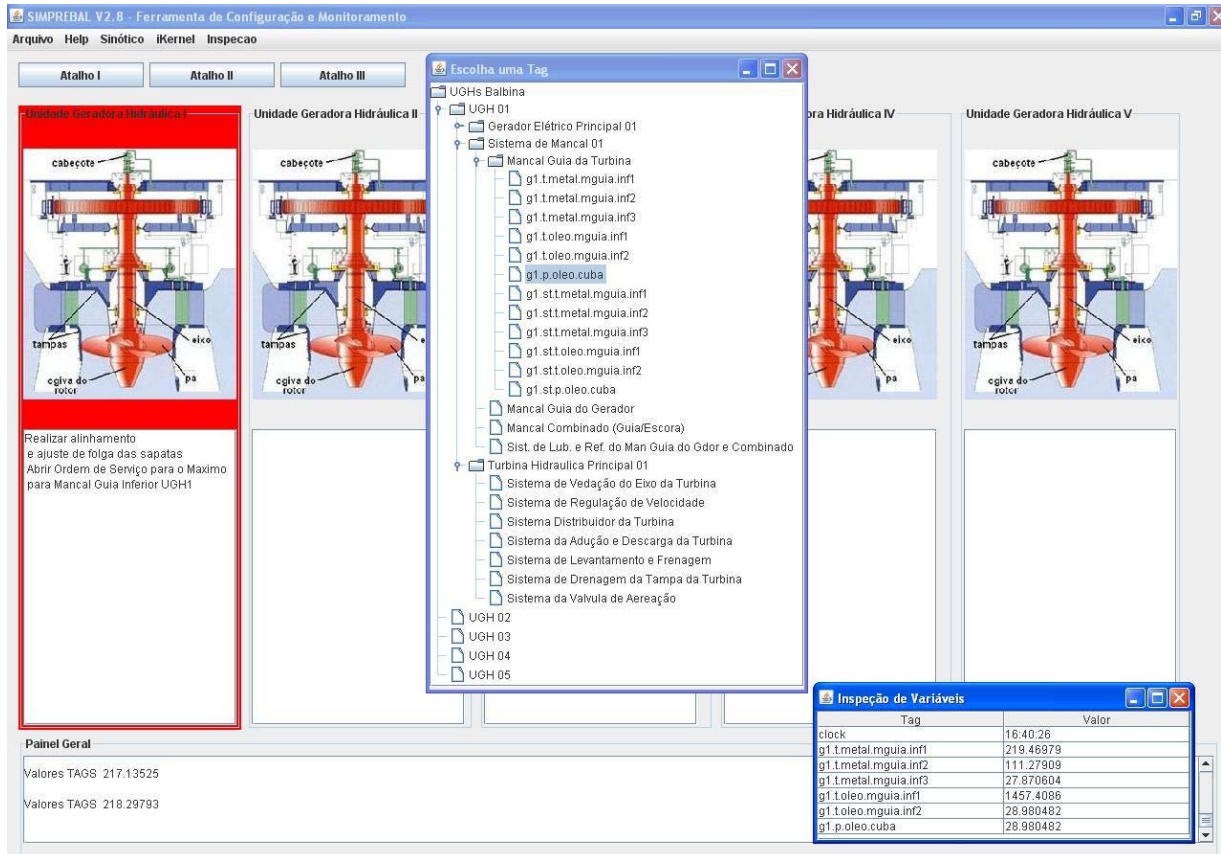


Fig. 4: GUI SIMPREBAL Configuração e Monitoração: Cliente Web referente à camada de Apresentação da metodologia SIMPREBAL.

## CONCLUSÃO

Com a proposta apresentada no presente artigo, espera-se mostrar sugestões de manutenção para os operadores e o pessoal de manutenção antes que o equipamento apresente problema. Esse processo de manutenção é conhecido como manutenção preditiva e é baseada em confiabilidade. O sistema SIMPREBAL será desenvolvido usando técnicas de IA (Inteligência Artificial) como regras de produção, Lógica Fuzzy e redes neurais, o que facilitará o processo de tomada de decisão, visto que um dos objetivos do sistema é avaliar e monitorar o equipamento para oferecer prognósticos confiáveis. Permitindo dessa maneira que o operador possa tomar decisões de manutenção com base em informações geradas pelo sistema. O Sistema Inteligente SIMPREBAL auxiliará na tomada de decisão sugerindo prognósticos, para que a manutenção do equipamento possa ocorrer antes que a falha ocorra. Isto implica em ganho de tempo e maior confiabilidade do sistema da usina. Vale ressaltar que a metodologia aqui proposta ainda está em fase de elaboração, resultados concretos serão obtidos posteriormente.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradecemos à Eletronorte, Manaus Energia e ao Eng. Antonio Araújo da Eletronorte pelas informações cedidas que foram de extrema importância para o desenvolvimento do presente trabalho.

## **REFERÊNCIAS**

1. F. Buschman, *Oriented Software Architecture A System of Patterns*, England, 1996.
2. OSA-CBM, *Open Systems Architecture for Condition-Based Maintenance*.  
<<http://www.mimoso.org/downloads/39/specifications/index.aspx>>, acessado em agosto de 2007.
3. P. V. Fleming e S.R.R.O. França, *Considerações Sobre a Implementação Conjunta de TPM e MCC na Indústria de Processos*, Abraman 12º Congresso Brasileiro de Manutenção: TT044, São Paulo, pp.53, 1997.
4. M. Bengtsson, *Condition Based Maintenance System Technology –Where is Development Heading?*, *Proceedings of the 17th European Maintenance Congress*, Spain, 2004.
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. Utgard, *Projeto Utgard*, <<http://openscada.org/UtgardProject>>, acessado em agosto de 2007.
8. J. Wyrebski, *Manutenção Produtiva Total um Modelo Adaptado*”, *Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, UFSC*, 1998.