

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**METODOLOGIA PARA DESENVOLVIMENTO DE BASE
DE CONHECIMENTO APLICADA À MANUTENÇÃO
BASEADA EM CONDIÇÃO DE USINAS HIDRELÉTRICAS**

ROSIMARCI PACHECO TONACO

ORIENTADOR: ALBERTO JOSÉ ÁLVARES

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM SISTEMAS MECATRÔNICOS

**PUBLICAÇÃO:
BRASÍLIA/DF: AGOSTO – 2008**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**METODOLOGIA PARA DESENVOLVIMENTO DE BASE DE
CONHECIMENTO APLICADA À MANUTENÇÃO BASEADA EM
CONDIÇÃO DE USINAS HIDRELÉTRICAS**

ROSIMARCI PACHECO TONACO

**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA DA FACULDADE DE TECNOLOGIA
DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE
MESTRE EM SISTEMAS MECATRÔNICOS.**

APROVADA POR:

Prof. Alberto José Álvares, Dr. (ENM-UnB)

(Orientador)

Prof. Guilherme Caribé de Carvalho, Ph.D. (ENM-UnB)

(Examinador Interno)

Prof. Antonio Almeida Silva, Dr. (DEM-UFCG)

(Examinador Externo)

BRASÍLIA/DF, 08 DE AGOSTO DE 2008

FICHA CATALOGRÁFICA

TONACO, ROSIMARCI PACHECO

Metodologia para Desenvolvimento de Base de Conhecimento Aplicada à Manutenção Baseada em Condição de Usinas Hidrelétricas [Distrito Federal] 2008.

xvii, 167p., 210 x 297 mm (ENM/FT/UnB, Mestre, Sistemas Mecatrônicos, 2008).

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Manutenção Baseada em Condição

2. Base de Conhecimento

3. Sistema Especialista

4. Manutenção Preditiva

I. ENM/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

TONACO, R. P. (2008). Metodologia para Desenvolvimento de Base de Conhecimento Aplicada à Manutenção Baseada em Condição de Usinas Hidrelétricas, Publicação ENM.DM 22/08, Departamento de Engenharia Mecânica e Mecatrônica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 167p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Rosimarci Pacheco Tonaco.

TÍTULO: Metodologia para Desenvolvimento de Base de Conhecimento Aplicada à Manutenção Baseada em Condição de Usinas Hidrelétricas.

GRAU: Mestre

ANO: 2008

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Rosimarci Pacheco Tonaco
Q. 208 Sul Al. 05 casa 03.
77.125-250 Palmas – TO – Brasil.

*Ao meu amado Arthur Luiz, fonte da minha alegria,
ao meus pais Olavo e Noeme pelo suporte e confiança
no meu sucesso.*

AGRADECIMENTOS

Ao Grupo de Automação e Controle (GRACO) e ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Brasília pelos recursos físicos fornecidos.

Ao meu orientador prof. Dr. Alberto José Álvares.

Aos professores que formam o corpo docente do programa de pós-graduação em Sistemas Mecatrônicos.

À Manaus Energia e a Eletronorte por fornecerem prontamente as informações necessárias para a elaboração do projeto.

A equipe que participou do projeto: Prof. Gudwin, Giovanni, Edgar e Rodrigo.

E a todos os amigos e colegas. Em particular Luciana e Jones, que se fizeram presentes de forma especial nessa conquista.

RESUMO

Este trabalho apresenta uma metodologia para o desenvolvimento de bases de conhecimento aplicada à manutenção baseada em condição e implementação de um sistema inteligente de manutenção preditiva. A metodologia descreve um método detalhado que inclui desde a coleta dos dados até a implementação das regras. O trabalho começa com a coleta de dados, que resultou na catalogação das possíveis falhas e nas intervenções de manutenção adotadas para corrigir as falhas. Em seqüência foi definida a estrutura da base de conhecimento e finalmente a implementação das regras de produção. O sistema inteligente de manutenção preditiva foi projetado para usar a base de conhecimento como fonte de raciocínio, permitindo realizar manutenção preditiva de turbinas hidráulicas. A implementação permitiu: monitorar os dados dos sensores instalados nos equipamentos da usina; sugerir tomadas de decisão apontando intervenções de manutenção; aumentar a segurança do processo de geração de energia a partir da monitoração dos dados; e tratar e interpretar as informações adquiridas a partir dos sensores instalados nos equipamentos monitorados pelo sistema.

ABSTRACT

This work presents a methodology for the development of knowledge bases applied to the condition based maintenance and implementation of an intelligent system. The methodology describes a detailed method that includes since the collection of the data until the implementation of the rules. The work starts with the data collection. The knowledge engineering identified possible failures and the actions adopted to correct those imperfections. After that the structure of the knowledge base was defined and finally the implementation of the production rules. The intelligent maintenance system was projected to use the knowledge base as a thinking source. This allowed the maintenance of hydraulic turbines using both ways, the specialist system and the knowledge base. The implementation of the system allowed to realize data evaluation from the sensors installed in the plant. With the system it is possible to suggest maintenance decision and increase the security of the process. The data aquired from the sensors can be processed and interpreted by the system.

SUMÁRIO

RESUMO.....	VI
ABSTRACT	VII
LISTA DE TABELAS	XI
LISTA DE FIGURAS.....	XIII
LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIACÕES.....	XV
1 – INTRODUÇÃO	1
1.1 – MOTIVAÇÃO DA PESQUISA	1
1.2 – OBJETIVOS	3
1.2.1 - Objetivos Gerais	3
1.2.2 - Objetivos Específicos	3
1.3 – ESTRUTURA DO DOCUMENTO	4
2 – REVISÃO DE LITERATURA: MANUTENÇÃO BASEADA EM CONDIÇÃO .. 6	
2.1 – ARQUITETURA OSA-CBM (<i>OPEN SYSTEM ARCHITECTURE FOR CONDITION BASED MAINTENANCE</i>).....	7
2.2 – MANUTENÇÃO BASEADA EM CONDIÇÃO (MBC).....	9
2.2.1 – Aquisição de Dados	11
2.2.2 – Processamento de Dados	12
2.2.3 – Tomada de Decisão de Manutenção	12
2.2.4 – Manutenção Preditiva	14
2.2.5 – MBC no Ciclo de Vida de Turbinas Hidráulicas	15
2.3 – MODELOS DE REFERÊNCIA USADOS PARA MANUTENÇÃO BASEADA EM CONDIÇÃO	17
2.3.1 – FMEA Aplicada à Manutenção Centrada na Confiabilidade	17
2.3.2 – Normas: ISA-88 e ISA-95	21
2.4 – REDES DE COMUNICAÇÃO.....	22
2.4.1 – OLE for Process Control – OPC.....	22
2.4.2 – <i>Foundation FieldBus</i>	25
2.5 – INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL APLICADA NA SOLUÇÃO DE PROBLEMAS DE MANUTENÇÃO BASEADA EM CONDIÇÃO.....	28
2.5.1 – Sistemas Inteligentes.....	28
2.5.1.1 – Sistemas Especialistas.....	30
2.5.1.2 – Sistemas de Raciocínio Baseado em Casos.....	34
3 – METODOLOGIA PARA SOLUÇÃO DE PROBLEMAS DE MANUTENÇÃO BASEADA EM CONDIÇÃO	36
3.1 – METODOLOGIA PARA DESENVOLVIMENTO DE SISTEMAS INTELIGENTES APLICADOS À MBC	36
3.1.1 – Descrição da Metodologia	36
3.1.2 – Modelo IDEF0 (Integration DEFinition language 0)	41
3.1.3 - Modelo de Informação IDEF1X (Integration Definition for Information Modeling).....	52
3.1.4 – Banco de Dados	53

3.2 – METODOLOGIA PARA DESENVOLVIMENTO DE BASES DE CONHECIMENTO APLICADA À MANUTENÇÃO PREDITIVA DE TURBINAS HIDRÁULICAS	54
3.2.1 - Representação da Base de Conhecimento	54
3.2.2 – Coleta de Dados	56
3.2.3 – Procedimento para Gerar Regras em Alto Nível para os Equipamentos da Usina	62
3.2.4. – Arquivos de Regras.....	63
3.2.5 – Processamento Inteligente	69
4 – ESPECIFICAÇÃO E PROJETO DO SISTEMA	72
4.1 – REQUISITOS FÍSICOS.....	72
4.1.1 – Arquitetura do Sistema	74
4.2 – REQUISITOS FUNCIONAIS	76
4.3 – REQUISITOS NÃO-FUNCIONAIS	78
4.4 – REQUISITOS DO SISTEMA.....	79
5 – IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL.....	86
5.1 – INTERFACE.....	86
5.1.1 – Recursos do Sistema	89
5.1.1.1 - Inspeção de Variáveis	89
5.1.1.2 – Gráficos de Tendências	90
5.1.1.3 – Históricos	91
5.2 – ARQUIVOS DE CONFIGURAÇÃO.....	92
5.2.1 – Arquivo Config.ini.....	92
5.2.2 – Arquivo FailureFile.txt	94
6 – ESTUDO DE CASO: SISTEMA DA TURBINA – SISTEMA DE REGULAÇÃO DA VELOCIDADE	96
6.1 – SUBSISTEMA ANALISADO.....	96
6.1.1 Instrumentos de Medição da Rede Foundation FieldBus	102
6.2 – FMEA PARA O SISTEMA DA TURBINA	103
6.3 – REGRAS PARA O SISTEMA DE REGULAÇÃO DA VELOCIDADE	111
6.3.1 – Diagnóstico	112
6.3.2 – Tomada de Decisão.....	114
6.4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES	115
6.4.1 Análise dos Resultados	115
6.4.2 – Análise da Metodologia para Desenvolvimento de Sistemas Inteligentes Aplicados à Manutenção Baseada em Condição	120
6.4.3 – Sugestão de Solução	121
7 – CONCLUSÕES, CONTRIBUIÇÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	125
7.1 – CONCLUSÕES.....	125
7.2 – CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO.....	1266
7.3 - TRABALHOS FUTUROS	1288
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	12929
ANEXO A – QUESTIONÁRIO SOBRE INTERVEÇÕES DE MANUTENÇÃO	1355
ANEXO B – REGRAS EM ALTO NÍVEL PARA O SISTEMA DA TURBINA ..	1411

ANEXO C – ARQUIVO DE REGRAS - REGRAS.CLP (NO CD)

ANEXO D – ARQUIVO DE CONFIGURAÇÃO – CONFIG.INI E FAILUREFILE.TXT..... (NO CD)

D.1 – ARQUIVO CONFIG.INI (PARA UGH 1) (NO CD)

D.2 –ARQUIVO FAILUREFILE.TXT (PARA UGH1 FALHAS DO SERVIDOR OPC E COMUNICAÇÃO) (NO CD)

ANEXO E – REGRAS PARA O SISTEMA DA TURBINA..... (NO CD)

**APÊNDICE A – PLANO DE MANUTENÇÃO PARA O SISTEMA DA TURBINA.
..... 14949**

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Plano de Manutenção: Mancal Guia da turbina – baseado em (ELETRONORTE, 2006).....	16
Tabela 2.2 – Formulário padronizado de análise FMEA.....	18
Tabela 6.1: Especificação dos transmissores de temperatura.....	103
Tabela 6.2: Falhas catalogadas para o sistema de regulação da velocidade:.....	104
Tabela 6.3: FMEA para Sistema de Regulação da Velocidade – Sistema de Resfriamento.	106
Tabela 6.4: FMEA para Sistema de Regulação da Velocidade – Sistema de Alimentação de Óleo.	107
Tabela 6.5: FMEA para Sistema de Regulação da Velocidade – Sistema de Comando Hidráulico.	110

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Interfaces de um serviço de manutenção (Adaptada de Monchy, 1989).	6
Figura 2.2 - Arquitetura OSA-CBM e suas 7 camadas (Álvares <i>et al.</i> , 2007).	7
Figura 2.3 - Exemplo dos 7 módulos (camadas) da arquitetura OSA-CBM.	9
Figura 2.4: Evolução da manutenção (adaptado de Wyrebski, 1998).	10
Figura 2.5: Os três passos da MBC (Mecabô, 2007 adaptado de Jardine, <i>et al.</i> , 2006).	11
Figura 2.6: Comunicação entre servidores OPC e estações de trabalho (The OPC Foundation. URL: http://www.opcfoundation.org/).	23
Figura 2.7: Comunicação entre os equipamentos de campo e as estações de trabalho.	24
Figura 2.8 - Arquitetura <i>FieldBus</i> para redes industriais de comunicação (adaptado de (Lages, 2006)).	26
Figura 2.9 - Modelo OSI <i>versus</i> modelo <i>FieldBus</i> (adaptado de (Lages, 2006)).	27
Figura 2.10: Modelos da metodologia CommonKADS.	29
Figura 2.11 – exemplo de arquitetura de um sistema especialista que utiliza o Jess, (adaptado de (Friedman-Hill, 2003)).	31
Figura 2.12 - Ciclo do RBC (adaptado de (Aamodt; Plaza, 1994)).	35
Figura 3.1: Adaptação da metodologia OSA-CBM para desenvolvimento de sistemas especialistas aplicados a manutenção preditiva.	38
Figura 3.2: Arquitetura do sistema inteligente.	40
Figura 3.3: Diagrama IDEF0 - Sistema inteligente nível A0.	41
Figura 3.4: Diagrama IDEF0 - Sistema inteligente nível A1.	42
Figura 3.5: Decomposição do módulo I-Kernel.	44
Figura 3.6: Decomposição do módulo Cliente OPC.	45
Figura 3.7: Decomposição do módulo Sistema Especialista (Jess).	47
Figura 3.8: Decomposição do módulo: Raciocínio Baseado em Casos.	48
Figura 3.9: Decomposição do módulo Ferramenta de Configuração e Monitoramento.	49
Figura 3.10: Decomposição do Cliente Applet.	50
Figura 3.11: Decomposição do módulo Cliente Browser PHP/DB.	51
Figura 3.12: Modelo de informação IDEF1X – Sistema Inteligente de Manutenção preditiva.	52
Figura 3.13: Modelo conceitual do banco de dados do sistema.	53
Figura 3.14: Estrutura da base de conhecimento.	54

Figura 3.15: Tarefas realizadas no processo de coleta de dados, de acordo com a metodologia CommonKADS.	56
Figura 3.16: Sistemas analisados na etapa de coleta dos dados.	58
Figura 3.17: Hierarquia de equipamentos do Sistema do Gerador.....	59
Figura 3.18: Hierarquia de equipamentos do Sistema de Mancais.....	60
Figura 3.19: Hierarquia de equipamentos do Sistema da Turbina.	61
Figura 3.20: Exemplo de informações encontradas para a tag G163LGF.....	63
Figura 3.21: Organização dos arquivos de regras.....	65
Figura 3.22: Regra de Produção em Clips.....	69
Figura 3.23: Processamento inteligente do sistema.....	70
Figura 4.1: Requisitos físicos do sistema inteligente.	73
Figura 4.2: Diagrama de classes - Pacote I-KernelApp.....	75
Figura 4.3: Diagrama de classes - Pacote Confmonittool.	76
Figura 4.4: Caso de uso do sistema inteligente.	80
Figura 4.5: Diagrama de caso de uso – Iniciação da aplicação I-Kernel.....	81
Figura 4.6: Diagrama de caso de uso – Processamento Inteligente.	81
Figura 4.7: Diagrama de caso de uso – Verificação de Alarmes e Alertas.	82
Figura 4.8: Diagrama de caso de uso – <i>Shutdown</i> da aplicação I-Kernel.	82
Figura 4.9: Diagrama de caso de uso – Iniciação da ferramenta Configuração e Monitoramento.	83
Figura 4.10: Diagrama de caso de uso – <i>Shutdown</i> da ferramenta Configuração e Monitoramento.	83
Figura 4.11: Diagrama de caso de uso – Monitoramento de Sinótico.....	84
Figura 4.12: Diagrama de caso de uso – Atualização de Sinótico.	85
Figura 4.13: Diagrama de caso de uso – Inspeção de Variável.....	85
Figura 5.1: Interface de apresentação do sistema.....	87
Figura 5.2: Interface de acesso ao sistema.	87
Figura 5.3: Interface do sinótico.....	88
Figura 5.4: Sinalização da função “Inspeção de Variáveis”.....	89
Figura 5.5: Gráfico de Tendências.	90
Figura: 5.6: Interface de acesso aos históricos.	91
Figura: 5.7: Histórico de Anomalias.....	92
Figura 5.8: Funções do arquivo “config.ini”.	93
Figura 5.9: Parâmetros definidos no arquivo “config.ini”.....	93

Figura 5.10: Interação do arquivo de falhas no processamento inteligente do sistema.....	94
Figura 6.1: Hierarquia dos sistemas da usina.	97
Figura 6.2: Hierarquia do sistema da turbina.	97
Figura 6.3: Tampa inferior da turbina Kaplan.....	98
Figura 6.4: Cabeçote da turbina.....	99
Figura 6.5: Turbina Kaplan e seus principais componentes.....	99
Figura 6.6: Trocadores de calor – Sistema de resfriamento.	104
Figura 6.7: Regras para Camada de Monitoração de Condição – tag G126LK.	111
Figura 6.8: Regras para Camada de Diagnóstico – tag G126LK.	112
Figura 6.9: Arquivo de falhas – falhas para a tag G126LK.....	113
Figura 6.10: Arquivo de decisão – tomada de decisão para a tag G126LK.	114
Figura 6.11: Gráfico entre datas para a tag G526LK.	117
Figura 6.12: Gráfico da tag G526AR – 28/05/2008 à 04/06/2008.....	118
Figura 6.13: Avaliação de saúde para o Sistema de Regulação da Velocidade.....	119
Figura 6.14: Visão geral do sistema inteligente de manutenção preditiva – entrada e saída de informação.	121
Figura 6.15: Arquitetura do sistema inteligente – incluindo módulo de aprendizado.....	122
Figura 6.16: Ciclo dos sistema inteligente baseado no ciclo do RBC.....	123

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIACÕES

IA	- Inteligência Artificial.
OSA-CBM	- Open System Architecture for Condition Based Maintenance.
FWEE	- Foundation for Water & Energy Education.
ANEEL	- Agência Nacional de Energia Elétrica.
FMEA	- Failure Mode and Effect Analysis.
MBC	- Manutenção Baseada em Condição.
ANN	- Redes neurais artificiais.
SE	- Sistema Especialista.
RBC	- Raciocínio Baseado em Casos.
AG	- Algoritmos Genéticos.
SCADA	- Supervisory Control And Data Acquisition.
MCC	- Manutenção Centrada na Confiabilidade.
NPR	- Número de Prioridade de Risco.
KPI	- Key Performance Indicator.
PLC	- Controlador Lógico Programável.
UML	- Unified Modeling Language.
OPC	- OLE for Process Control.
OLE	- Obeject-Linking and Embedding.
COM	- Modelo de Componentes de Objeto.
DCOM	- Modelo Distribuído de Componentes de Objeto.
LAN	- Local Area Network.
DFI	- Device Fully Integrated.
OSI	- Open Systems Interconnection .
Jess	- Java Expert System Shell.
UGH	- Unidade Geradora Hidráulica.
IDEF0	- Integration DEFinition language 0.
JDBC	- Java Database Connectivity.
JNI	- Java Native Interface.
IDEF1X	- Integration Definition for Information Modeling.
GEP	- Gerador Elétrico Principal.
SQL	- Structured Query Language.

1 – INTRODUÇÃO

O avanço da tecnologia tem proporcionado cada vez mais a pesquisa e a utilização de técnicas de Inteligência Artificial (IA). A utilização de sistemas inteligentes, para as mais variadas aplicações, tem aumentado significativamente. Isto ocorre, pois as técnicas de IA otimizam o processamento da informação, auxiliam na solução de problemas complexos e permitem economia no orçamento da empresa.

A engenharia é um campo no qual os sistemas inteligentes têm sido utilizados em larga escala especialmente para auxiliar na manutenção baseada em condição. Tais sistemas possibilitam realizar a predição de falhas evitando assim que ocorram paradas nas máquinas. A utilização de sistemas inteligentes faz parte do cenário da automação industrial por todas as facilidades que oferece (Todd *et al.*, 2007).

Nas indústrias, de modo geral, tais sistemas são utilizados no diagnóstico e prognóstico de falhas, na tomada de decisão e no suporte à manutenção baseada em condição. Em usinas, especialmente as responsáveis pela geração de energia, os sistemas inteligentes auxiliam no diagnóstico de falhas e na tomada de decisão sugerindo intervenções de manutenção. A ELETRONORTE tem investido na automação de processos industriais das Usinas de Balbina e Samuel, com o objetivo de melhorar a qualidade do processo e aumentar a produção, este investimento é fruto de projetos de pesquisa e desenvolvimento da ELETRONORTE.

1.1 – MOTIVAÇÃO DA PESQUISA

Atualmente, as hidrelétricas são as principais responsáveis pela geração de eletricidade no Brasil. O Brasil está entre os cinco maiores produtores de energia hidrelétrica no mundo, segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL URL: <http://www.aneel.gov.br/>). O país possui 158 usinas hidrelétricas, que produzem um total de 74.438.695 kW (pesquisa realizada em maio/2007). Dentre essas usinas encontra-se a usina hidrelétrica de Balbina, construída no rio Uatumã que é um dos afluentes do rio Amazonas.

O sistema eletroenergético brasileiro opera de forma coordenada, buscando desta forma minimizar os custos globais de produção de energia elétrica. Para tanto o governo em conjunto com institutos de pesquisa e desenvolvimento vêm investindo na automação de usinas hidrelétricas com o objetivo de minimizar os custos e otimizar a produção. A automação industrial visa, principalmente, a produtividade, qualidade e segurança em um processo.

Uma contribuição adicional importante dos sistemas de automação industrial é a conexão do sistema de supervisão e controle com sistemas corporativos de administração das empresas. Esta conectividade permite o compartilhamento de dados importantes da operação diária dos processos, contribuindo para uma maior agilidade do processo decisório e maior confiabilidade dos dados que suportam as decisões dentro da empresa para assim melhorar a produtividade (Smar, 2002). O presente trabalho tem como um dos objetivos conectar-se aos sistemas computacionais instalados na usina de Balbina e aos sensores instalados nos equipamentos. Isto possibilita o monitoramento das condições de operação dos equipamentos e a consulta/utilização das informações tratadas nos sistemas computacionais instalados na Usina.

A automação de usinas hidrelétricas envolve várias etapas que incluem desde a instalação de transdutores nas turbinas e em seus subsistemas a sistemas de controle. No escopo dos sistemas desenvolvidos para controlar os processos da planta, várias aplicações podem ser desenvolvidas com a finalidade de controlar e/ou monitorar os equipamentos. Os sistemas de controle, quando aplicados à manutenção baseada em condição, podem auxiliar na predição de falhas evitando que defeitos e/ou falhas aconteçam nas máquinas (Simeon *et al.*, 2007). Toda falha/defeito evitada implica em economia de energia e mão-de-obra.

Dentre as técnicas utilizadas no desenvolvimento dos sistemas de controle, destacam-se as técnicas de IA, especialmente os sistemas especialistas por sua capacidade de expressar o conhecimento do especialista humano de forma clara para o usuário final (Todd *et al.*, 2007). Sistemas especialistas podem ser combinados com a metodologia OSA-CBM (*Open System Architecture for Condition Based Maintenance*) que oferece uma proposta para criar sistemas inteligentes aplicados à manutenção baseada em condição (URL: <http://www.osacbm.org>). A combinação dessas duas técnicas proporciona a implementação de sistemas inteligentes que são capazes de fornecer diagnóstico e prognóstico das falhas,

tomada de decisão, além de disponibilizar uma interface entre o sistema físico e o usuário (Álvares *et al.*, 2007).

Diante do exposto decidiu-se desenvolver uma metodologia capaz de propor uma estrutura definida detalhadamente para o desenvolvimento de bases de conhecimento para sistemas inteligentes aplicados na solução de problemas de manutenção baseada em condição. Este trabalho faz parte de um projeto de Pesquisa e Desenvolvimento da ELETRONORTE, tal projeto é intitulado “Modernização da Área de Automação de Processos das Usinas Hidrelétricas de Balbina e Samuel” e visa o desenvolvimento de um sistema inteligente de manutenção preditiva para os equipamentos que fazem parte das Unidades Geradoras Hidráulicas (Álvares, 2006).

1.2 – OBJETIVOS

1.2.1 - Objetivos Gerais

O objetivo do trabalho é apresentar uma metodologia para desenvolvimento de bases de conhecimento aplicadas à manutenção baseada em condição de usinas hidrelétricas. Para tanto foi desenvolvido um sistema inteligente de manutenção preditiva, e para este sistema foi gerada uma base de conhecimento a partir da metodologia que será proposta.

1.2.2 - Objetivos Específicos

Os objetivos específicos do trabalho são:

- Propor roteiro de implementação para:
 - Sistemas inteligentes aplicados à manutenção preditiva de usinas hidrelétricas.
 - Bases de conhecimento aplicadas aos sistemas inteligentes citados no tópico anterior.
 - Realizar manutenção preditiva de turbinas hidráulicas utilizando tanto o sistema especialista quanto a base de conhecimento, que serão desenvolvidos.
- Implantar o sistema inteligente para que se possa melhorar a eficiência na detecção de falhas e reparos.

- Testar de forma exaustiva a base de conhecimento, bem como o sistema inteligente.
- Monitorar os dados dos sensores instalados nos equipamentos da usina.
- Aumentar a qualidade das intervenções de manutenção fornecendo diagnósticos das anomalias e sugerindo tomadas de decisão.
- Auxiliar as equipes de operação e manutenção na tomada de decisão sugerindo intervenções de manutenção.
- Aumentar a segurança do processo de geração de energia a partir da monitoração dos dados.
- Tratar e interpretar as informações adquiridas a partir dos sensores instalados nos equipamentos que serão monitorados pelo sistema.

1.3 – ESTRUTURA DO DOCUMENTO

Esta dissertação está dividida em sete capítulos. O capítulo dois apresenta uma revisão bibliográfica com os principais tópicos relacionados ao tema. O capítulo três descreve em detalhes a metodologia desenvolvida, especificamente a estrutura proposta para desenvolver bases de conhecimento aplicadas à manutenção baseada em condição, a estrutura geral do sistema inteligente e como o processamento do sistema acontece.

O capítulo quatro descreve a especificação e o projeto do sistema inteligente apresentando os detalhes da modelagem desenvolvida para implementação, seus requisitos e principais funcionalidades. O capítulo cinco trata da implementação computacional do sistema inteligente, documentando os principais recursos do sistema, e a interface gráfica. No capítulo seis será apresentado um estudo de caso detalhado que tem a finalidade de avaliar o desempenho do sistema e propor outra abordagem para implementação. O capítulo sete apresenta as conclusões, contribuições e trabalhos futuros.

O anexo A apresenta o questionário aplicado às equipes de operação e de manutenção da usina. Tal questionário foi usado como uma das formas de adquirir conhecimento durante a etapa de engenharia do conhecimento. Posteriormente o anexo B apresenta as regras em alto nível para alguns subsistemas do sistema da turbina, o anexo C apresenta o arquivo de regras denominado regras.clp, que é o primeiro a ser executado pelo ciclo de inferência do sistema. O anexo D mostra os arquivos de configuração do sistema, enquanto o anexo E apresenta as regras implementadas em Clips para o sistema da turbina completo. Os anexos

C, D e E encontram-se no CD anexado à dissertação. O apêndice A trata do plano de manutenção para o sistema de regulação da velocidade.

2 – REVISÃO DE LITERATURA: MANUTENÇÃO BASEADA EM CONDIÇÃO

Este capítulo apresenta uma revisão de literatura relativa à Manutenção Baseada em Condição e sua utilização na automação de processos industriais, tal técnica tem sido combinada com abordagens de Inteligência Artificial para o desenvolvimento de sistemas inteligentes que sejam capazes de realizar a monitoração automática dos equipamentos alertando para possíveis falhas. Isso permite realizar manutenção preditiva dos mesmos, o que auxilia a tomada de decisão de manutenção. São apresentados conceitos de Manutenção Baseada em Condição, FMEA (*Failure Mode and Effect Analysis*), normas para o processo de automação, redes industriais e técnicas de Inteligência Artificial.

Conforme definido por Giacomet (2001), “manutenção é toda ação realizada” em um equipamento, conjunto de peças, componentes, dispositivos, circuito ou estrutura que se esteja controlando, mantendo ou restaurando, a fim de que o mesmo permaneça em operação ou retorne a função requerida, ou seja, o conjunto de condições de funcionamento para o qual o equipamento foi projetado, fabricado ou instalado. A figura 2.1 mostra que a manutenção é uma função integrada à vida da empresa.



Figura 2.1 - Interfaces de um serviço de manutenção (Adaptada de Monchy, 1989).

Na manutenção de sistemas, o equipamento deve desempenhar sua função requerida com segurança e eficiência, considerando as condições operativas, econômicas e ambientais. Para Tavares (1996), entende-se por manutenção “todas as ações necessárias para que um item (equipamento, obra ou instalação) seja conservado ou restabelecido, de modo a poder permanecer de acordo com a condição especificada”.

2.1 – ARQUITETURA OSA-CBM (*Open System Architecture for Condition Based Maintenance*)

Antes de apresentar de forma mais detalhada os conceitos de Manutenção Baseada em Condição (MBC) será apresentada a arquitetura baseada em OSA-CBM (URL: <http://www.osacbm.org>). Os conceitos citados nessa seção auxiliarão no entendimento dos três passos definidos pela MBC. A arquitetura OSA-CBM consiste em sete camadas, veja figura 2.2. A noção de uma arquitetura estendida em camadas usada aqui é consistente com a usada em (Álvares *et al.*, 2007). Uma camada é vista como uma coleção de tarefas semelhantes ou funções em níveis diferentes de abstração.



Figura 2.2 - Arquitetura OSA-CBM e suas 7 camadas (Álvares *et al.*, 2007).

As camadas hierárquicas, apresentadas na figura 2.2, representam uma transição lógica ou um fluxo da saída dos sensores para a camada de tomada de decisão, através das camadas intermediárias. A camada de apresentação é uma exceção dentro da arquitetura, pois permite comunicação ponto-a-ponto entre esta camada e qualquer outra.

A seguir será apresentada uma descrição detalhada das sete camadas conforme (Bengtsson, 2004), (Álvares *et al.*, 2007) e (Tonaco *et al.*, 2007):

1. Módulo de sensor: A camada módulo de sensor consiste no transdutor e elementos de aquisição de dados. O transdutor converte alguns estímulos em energia elétrica ou óptica e estes são convertidos ou formatados a partir da produção analógica do transdutor para um formato digital ou "palavra". Após esse procedimento os dados são adquiridos e processados.
2. Processamento de sinal: A camada de processamento de sinais processa os dados digitais do módulo de sensor para convertê-los em uma forma desejada que caracterize um dado específico.
3. Monitoramento de Condição: Esta camada determina a condição do sistema atual, subsistema, ou indicadores de condição de componente (excede limiar, ciclo de tensão, condição operacional e métrica de uso). Baseia-se em algoritmos, sistemas inteligentes e na saída dos módulos de sensores e processamento de sinal. Além disso, a camada pode fazer uso de histórico de condição local e fornecer parâmetros para o modelo.
4. Avaliação de saúde: A camada de avaliação de saúde determina o estado de saúde dos sistemas monitorados, subsistemas ou componentes. Ela se baseia na saída do módulo de monitoração de condição e dos históricos de condição e valores de referência. A saída desta camada é um índice de saúde do equipamento monitorado.
5. Prognóstico: A camada de prognóstico considera a avaliação de saúde, o escalonamento empregado (predição de uso - cargas e duração) e a capacidade do modelo de raciocínio que pode prever o estado de saúde do equipamento, com uma determinada precisão.
6. Tomada de decisão: A camada de tomada de decisão integra informações necessárias para tomada de uma decisão (solução sugerida para o problema corrente). Baseada em informações sobre a avaliação de saúde e o prognóstico, prediz a saúde de um sistema, subsistema ou componentes, e indica ações e alternativas com as implicações de cada uma.
7. Apresentação: A camada de apresentação suporta a apresentação de informação para controle de acesso dos usuários de sistemas (por exemplo, manutenção e pessoal de

operação). As saídas incluem qualquer informação produzida pelas camadas mais baixas e as entradas incluem qualquer informação requerida pelas camadas mais baixas. Outra função dessa camada é fornecer a interface homem/máquina.

O sistema *WatchDog Agent* (URL: <http://www.imscenter.net>), baseado na arquitetura OSA-CBM, descreve um novo paradigma para sistemas de manutenção preditiva e preventiva usando o *framework WatchDog Agent*. O objetivo é detectar e quantificar as falhas ocorridas através de um sistema especialista capaz de adquirir dados dos sensores, extrair as características necessárias para o processo de raciocínio, e fornecer diagnóstico e prognóstico das falhas informando quando a falha ocorrerá, porque a falha ocorreu, e qual falha vai acontecer. A figura 2.3 apresenta os módulos de um sistema genérico aplicado na CBM (Manutenção Baseada em Condição), tal módulo foi inspirado no sistema *WatchDog Agent* e servirá de base para o desenvolvimento do sistema proposto no trabalho.

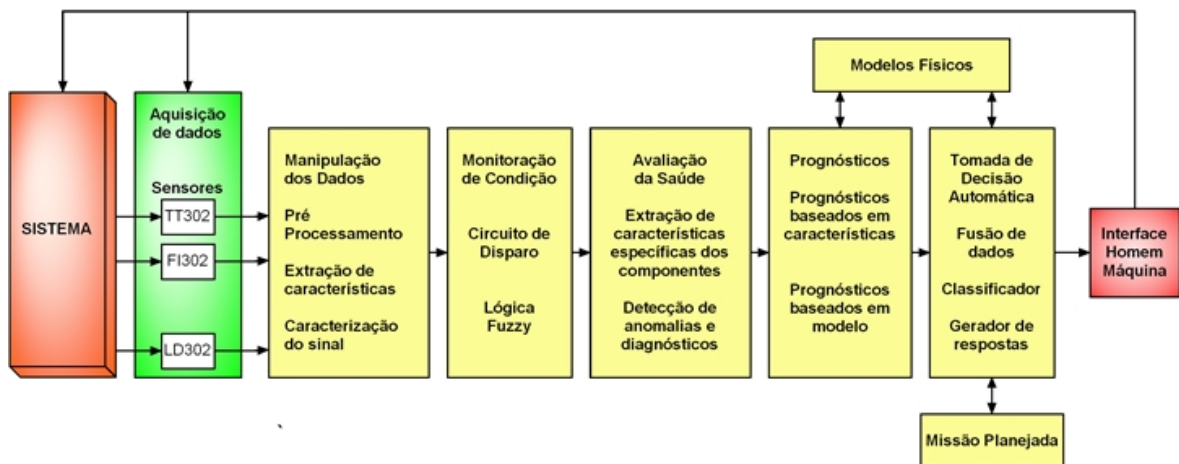


Figura 2.3 - Exemplo dos 7 módulos (camadas) da arquitetura OSA-CBM.

A arquitetura baseada em OSA-CBM permite o desenvolvimento de sistemas de manutenção baseada em condição e será utilizada no presente trabalho como modelo de referência para a metodologia proposta.

2.2 – MANUTENÇÃO BASEADA EM CONDIÇÃO (MBC)

O campo da gerência da manutenção é na atualidade um dos mais dinâmicos em mudanças. Dunn (2001), em seu trabalho “*Reinventing the Maintenance Process*”, analisa

esta dinâmica sob a perspectiva proposta por Moubray (1997) em “*Reability-Centered Maintenance*”. Assim, descreve as mudanças como sendo em três áreas principais:

- Crescimento das expectativas de manutenção.
- Melhor entendimento de como os equipamentos falham.
- Escala sempre crescente de técnicas de gerenciamento de manutenção.
- As mudanças acontecem em três “gerações” como mostra a figura 2.4.

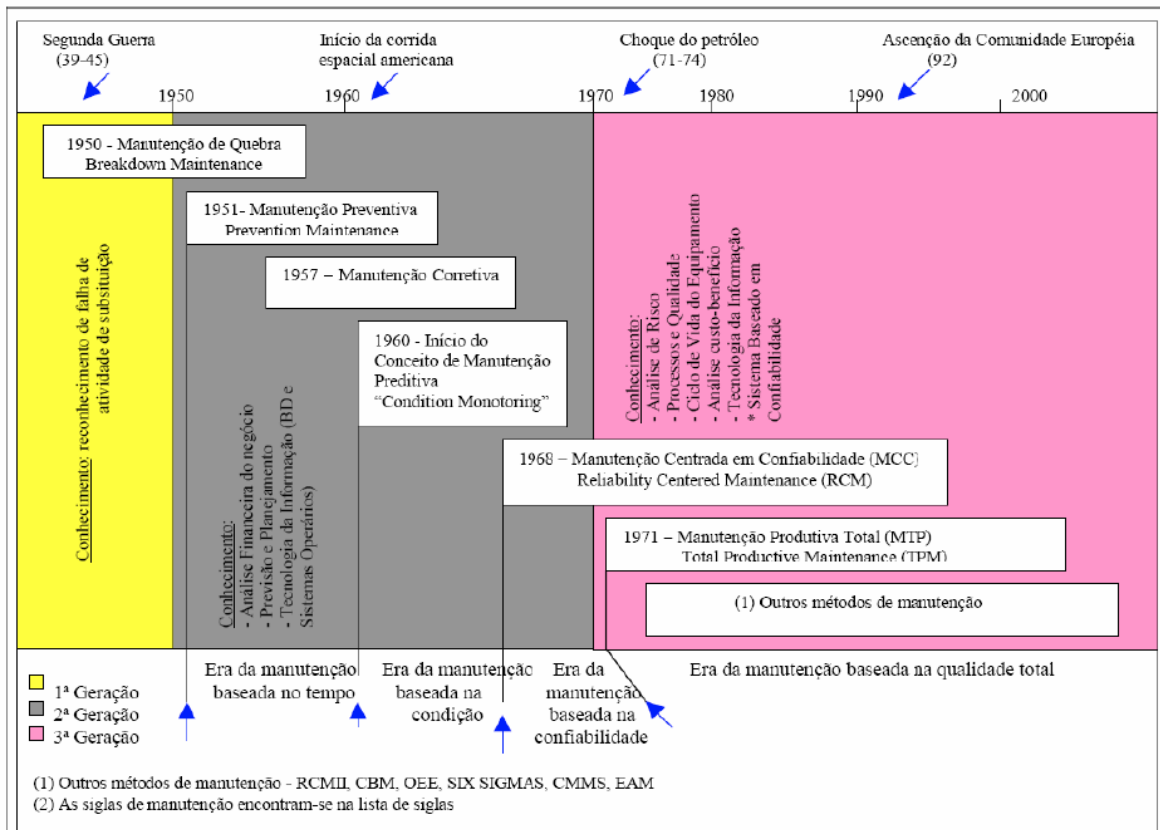


Figura 2.4: Evolução da manutenção (adaptado de Wyrebski, 1998).

A manutenção baseada em condição surgiu no início da década de 1960, e nesse período também aparecem as primeiras aplicações da manutenção preditiva e do início da utilização da monitoração baseada em condição. A terceira geração inclui análise de risco, emprego intensivo da tecnologia de informação e de profissionais versáteis.

A MBC é um programa de manutenção que fornece decisões de manutenção baseadas nas informações coletadas por meio do monitoramento da condição. A MBC consiste em três passos principais: aquisição de dados, processamento de dados e tomada de decisão de manutenção, como pode ser visto na figura 2.5.

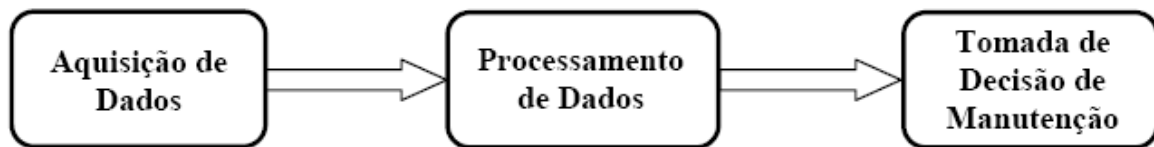


Figura 2.5: Os três passos da MBC (Mecabô, 2007 adaptado de Jardine, *et al.*,2006).

A seção anterior apresentou a metodologia OSA-CBM desenvolvida para auxiliar a implementação de sistemas computacionais que auxiliam a execução da manutenção baseada em condição. Os conceitos que serão apresentados sobre os três passos da MBC foram baseados no trabalho de Jardine, *et al.*,(2006) referenciado em Mecabô (2007).

2.2.1 – Aquisição de Dados

A aquisição de dados é o processo de coleta e armazenamento de dados (informações) dos equipamentos para a implementação de um programa de MBC. Os dados coletados em um programa de MBC podem ser categorizados em dois tipos principais: dados de eventos e dados de monitoramento da condição (Mecabô, 2007).

Os dados de eventos incluem informações sobre o que aconteceu (falha ocorrida) e/ou o que foi feito (medida de manutenção adotada) no equipamento monitorado. Os dados de monitoramento da condição são medidas relacionadas ao estado/condição do equipamento (pressão, temperatura, nível, densidade, e etc.).

A aquisição de dados na MBC é equivalente à camada de aquisição de dados do modelo OSA-CBM, que é uma metodologia para desenvolvimento de sistemas computacionais aplicados a MBC. No modelo OSA-CBM a camada de aquisição de dados é responsável por três módulos: módulo transdutor, módulo sensor e a aquisição de dados. Esses três módulos juntos têm a finalidade de converter algum estímulo externo em sinal elétrico para entrada do sistema, bem como realizar a conversão/formatação das saídas analógicas dos transdutores para palavras digitais compreendidas pelo sistema computacional.

2.2.2 – Processamento de Dados

O primeiro passo do processamento de dados do programa de MBC é a filtragem de dados. Essa etapa é importante, uma vez que os dados, sempre contêm erros. A filtragem de dados garante (ou pelo menos aumenta a chance) que apenas dados livres de erros sejam usados para análises e modelagens futuras (Mecabô, 2007). Outro passo importante realizado na etapa de processamento de sinal é a análise de dados de eventos, que é conhecida como análise de confiabilidade. Esse passo tem a finalidade de ajustar a distribuição de probabilidade de intervalos entre eventos a um modelo de distribuição para análises futuras.

A MBC também possui dados de monitoramento da condição, a partir destes é possível construir um modelo matemático que descreva o mecanismo subjacente da falha combinando-se, de forma apropriada, os dados monitorados. O modelo desenvolvido é a base da tomada de decisão de manutenção do diagnóstico e prognóstico (Mecabô, 2007).

O processamento de dados na MBC é equivalente às camadas de processamento de sinal, monitoração de condição e avaliação de saúde do modelo OSA-CBM. Conforme foi dito anteriormente a tarefa de processamento de sinal aplica computação de baixo nível aos dados dos sensores, e a monitoração de condição utiliza os dados da camada de processamento de sinal e os compara com características específicas predefinidas. Por fim, a avaliação de saúde utiliza dados históricos e valores da camada de monitoração de condição para determinar a saúde do sistema. Esta avaliação é o nível mais baixo do comportamento direto do sistema e auxilia a tomada de decisão de manutenção que é a próxima etapa dos três passos da MBC.

2.2.3 – Tomada de Decisão de Manutenção

A tomada de decisão de manutenção é o terceiro e último passo do programa de MBC. Nessa fase, o diagnóstico e prognóstico, que são as duas categorias de suporte à decisão, devem fornecer informações suficientes para que o pessoal da manutenção possa tomar decisões corretas e realizar ações de manutenção eficientes. O prognóstico é superior ao diagnóstico, pois pode prevenir falhas e panes e, quando possível, deixar o pessoal da manutenção preparado para os problemas iminentes, essa atitude preventiva reduz os

custos extras com manutenção corretiva. Entretanto, o prognóstico não consegue substituir o diagnóstico completamente, pois sempre existem alguns modos de falhas que não são previsíveis ou cuja iminência não seja detectada (Jardine, *et al.*, 2006). Isso se deve a ocorrência de fatores aleatórios (como queda brusca de energia) que todo equipamento está sujeito. Assim, o diagnóstico pode ser uma ferramenta complementar ao prognóstico. Vale ressaltar que o diagnóstico é feito quando a falha já ocorreu, e a manutenção aplicada nesse caso é corretiva, dessa forma não é possível que a equipe de manutenção haja proativamente. Entretanto, as informações geradas pelo diagnóstico podem aumentar o conhecimento da equipe e permitir uma ação proativa no futuro.

O diagnóstico de falhas em máquinas é um procedimento de mapeamento das informações extraídas dos dados de monitoração da condição e de eventos em um espaço de modos de falha, também conhecido como reconhecimento de padrões de operação. Em geral, esse reconhecimento de padrões é realizado por especialistas num domínio específico de diagnóstico. Isto pode ser implementado de duas formas: a) recrutamento de pessoal altamente treinado e habilitado; ou b) o reconhecimento automático de padrões, que facilita o procedimento de diagnóstico. Várias técnicas de diagnóstico automático foram desenvolvidas com ênfase nas abordagens estatísticas e de inteligência artificial. Abaixo serão apresentadas as principais abordagens de IA aplicadas ao diagnóstico automático:

- Redes neurais artificiais (ANN), sistemas especialistas (SE), sistemas ou modelos difusos, e lógica nebulosa (*fuzzy*), sistemas híbridos *neurofuzzy*, raciocínio baseado em casos (RBC) e algoritmos genéticos (GA);

O modelo OSA-CBM, desenvolvido para implementação de sistemas computacionais aplicados à manutenção baseada em condição, prevê a implementação do diagnóstico, bem como prognóstico automático das falhas/ faltas de um sistema físico. O último passo da MBC é a tomada de decisão, como mostra a seção corrente. No modelo OSA-CBM esse último passo da MBC é equivalente a três camadas (diagnóstico, prognóstico e tomada de decisão). A camada de prognóstico considera a avaliação de saúde fornecida, o quadro de funcionários, e modelos (estatísticos ou de IA) que sejam capazes de prever estados futuros com certa precisão. A camada referente à tomada de decisão utiliza a disponibilidade dos equipamentos, a equipe de manutenção para gerar as sugestões de manutenção.

2.2.4 – Manutenção Preditiva

Nesse tipo de manutenção as intervenções estão condicionadas a algum tipo de informação reveladora do estado de degradação do sistema ou equipamento (o objetivo é prever a falha). Em decorrência desta forma de determinação dos momentos de intervenção, essa prática se tornou conhecida no Brasil por manutenção preditiva (Souza, 2008).

Nesse tipo de manutenção, as inspeções periódicas se limitam à monitoração de parâmetros que possam indicar o estado operacional de um sistema ou equipamento. Se a análise desses parâmetros indicar a existência de um funcionamento não adequado, estima-se a tendência evolutiva do defeito e programa-se uma parada de correção (Arato, 2004).

A escolha da manutenção preditiva significa que se intervirá sobre uma máquina de forma condicional, isto é, unicamente se os parâmetros de controle evoluírem de forma significativa para níveis que sejam considerados não admissíveis. A principal vantagem desse processo de manutenção é a diminuição do custo de produção devido às interrupções periódicas e a diminuição da probabilidade de introdução de novos defeitos nas operações sistemáticas de montagem e desmontagem (Souza, 2008; Arato, 2004). As outras vantagens são:

- Aumento do tempo médio entre cada revisão;
- Eliminação de panes não atendidas;
- Diminuição do estoque de peças de reposição;
- Diminuição do custo de cada intervenção;
- Eliminação da substituição de componentes em estado operacional;
- Minimização de paradas não programadas decorrentes de quebras de componentes durante o serviço.

A prática de manutenção preditiva ou condicional envolve três fases: detecção do defeito, estabelecimento de um diagnóstico e estabelecimento de um prognóstico. A detecção do defeito consiste na observação de que os valores medidos dos parâmetros de controle indicam uma evolução mais acelerada que a decorrente da degradação normal do equipamento (Souza, 2008).

O diagnóstico é o resultado da análise dos valores dos parâmetros de acompanhamento determinando, com base em modelos de desgaste e informações anteriores sobre o equipamento, a origem e a gravidade de seus possíveis defeitos.

Estabelecer um prognóstico consiste na ampliação do diagnóstico e na previsão de quanto tempo se dispõe antes da parada forçada pela quebra propriamente dita, ou quais serão as conseqüências futuras acarretadas pela prorrogação de um eventual defeito. Nessa fase, o equipamento é submetido a uma vigilância cuidadosa e se faz a programação do reparo. Simeón (2008), sugere em seu trabalho a aplicação de redes neurais ao sistema inteligente de Balbina para previsão de séries temporais o que possibilita o prognóstico das falhas.

2.2.5 – MBC no Ciclo de Vida de Turbinas Hidráulicas

A MBC por todas as vantagens que oferece e por auxiliar na tomada de decisão de manutenção, tem sido usada em larga escala na automação de processos industriais. Pirttioja (2002) apresenta um sistema multiagente baseado em regras, para automação de processos. A proposta é complementar os sistemas de automação de processos já existentes (sistema supervisórios e sistemas de controle que estejam implantados) da seguinte forma: a) o nível mais alto do processamento possui um agente que supervisiona o sistema de automação existente e o reconfigura quando necessário; b) a comunicação entre os dois sistemas é definida por uma base de eventos; c) o controle dos equipamentos é feito em tempo real, e quando ocorre um evento novo, que pode gerar falha, o sistema multiagente alerta para a ocorrência do mesmo.

Mecabô (2007) apresenta um sistema especialista para manutenção de turbomáquinas. Tal sistema foi desenvolvido a partir dos conceitos de manutenção baseada em condição para sugerir tomadas de decisão de manutenção para a equipe de manutenção. Outro exemplo claro é a utilização da MBC no ciclo de vida de turbinas hidráulicas, bem como na automação de usinas hidrelétricas.

É possível desenvolver um plano diretor de manutenção para todos os subsistemas e equipamentos de turbinas hidráulicas como propõem (ELETRONORTE, 2006). Com esse plano diretor de manutenção as equipes de operação e manutenção ganham um documento

detalhado dos procedimentos de manutenção propostos para cada equipamento, bem como a frequência com que cada procedimento deve ser executado, veja tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Plano de Manutenção: Mancal Guia da turbina – baseado em (ELETRONORTE, 2006).

MANCAL GUIA DA TURBINA	
COMPONENTE	TAREFA PROPOSTA PARA MANUTENÇÃO
1. Cuba	<ul style="list-style-type: none"> - Verificar estado de funcionalidade do indicador de pressão da cuba (5 anos) - Ensaiar a proteção de nível de óleo (5 anos) - Verificar estanqueidade das tubulações, válvulas e tampas de acesso (3 anos) - Verificar aperto dos parafusos de fixação da tampa e suporte (10 anos) - Filtrar o óleo da cuba e realizar análise laboratorial de sua composição (3 anos)
2. Sapatas	<ul style="list-style-type: none"> - Ensaiar a proteção de temperatura do metal (5 anos) - Realizar alinhamento e ajuste de folga das sapatas (10 anos) - Verificar estado geral quanto a corrosão (5 anos)

O plano de manutenção é uma das ferramentas de maior importância para a tomada de decisão de manutenção e combinando esse documento com a FMEA (*Failure Mode and Effect Analysis*), que será apresentada posteriormente, é possível realizar de forma eficiente o processo de manutenção. Os dois documentos citados são informações extremamente importantes para o processo de automação industrial e na construção do sistema de controle que atuará nos equipamentos.

A automação de processos, e nesse caso específico a automação de usinas hidrelétricas, envolve algumas etapas que devem ser cumpridas. Pode-se dizer que a primeira delas é a implantação de equipamentos digitais (sensores, transmissores, atuadores, e etc.) que colem dados de operação (temperatura, pressão, nível, e etc), esses dados podem ser adquiridos por meio de sensores ligados a redes industriais, (um exemplo é a rede *Foundation FieldBus*) e após serem processados poderão ser monitorados por um sinótico. Essa monitoração garante ao usuário, que pode ser a equipe de operação e/ou manutenção, a visualização da condição atual de funcionamento dos equipamento, visto que cada equipamento possui uma faixa ideal de valores predefinidos de operação .

Outra tarefa que pode ser implementada junto com a automação do processo é a implantação de um sistema SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*) que seja

capaz de atuar apontando falhas iminentes e sugerindo decisões de manutenção para os usuários, isso viabiliza o reconhecimento automático de padrões, que nesse caso específico pode ser entendido como detecção de alteração nos valores de operação. Esse sistema atuará diretamente na tomada de decisão e técnicas de IA poderão ser utilizadas no desenvolvimento.

Uma abordagem muito utilizada é a técnica de Sistemas Especialistas, nesse caso o sistema fornece informações (tomadas de decisão de manutenção) de acordo com o conhecimento de especialistas do domínio (especialista humano) (Russel; Norvig, 2003). Todo o conhecimento do especialista humano é traduzido para uma base de conhecimento e nessa etapa o plano diretor de manutenção e a FMEA são as grandes fontes de informação para a geração da base de conhecimento do sistema.

Diante do exposto, pode-se afirmar que a MBC auxilia diretamente a automação de processos industriais e os três passos da MBC, descritos anteriormente, são a base para o desenvolvimento de metodologias aplicadas à solução de problemas de manutenção baseada em condição.

2.3 – MODELOS DE REFERÊNCIA USADOS PARA MANUTENÇÃO BASEADA EM CONDIÇÃO

2.3.1 – FMEA Aplicada à Manutenção Centrada na Confiabilidade

A literatura define a manutenção centrada na confiabilidade (MCC) como uma ferramenta de manutenção que auxilia na determinação de tarefas que poderão ser adotadas no plano de manutenção. Além disso, também pode garantir a confiabilidade e a segurança operacional dos equipamentos instalados (Siqueira, 2005). Usando diferentes formas de manutenção, a MCC tem o objetivo de proteger a função dos equipamentos determinando os procedimentos de manutenção necessários para cada um deles.

Segundo Moss (1985), a MCC é estruturada a partir do princípio básico de que todas as tarefas de manutenção devem ser justificadas antes de serem executadas. Os critérios de justificativa correspondem a segurança, disponibilidade e economia obtidas a partir do retardamento ou impedimento da falha. Esses critérios compreendem a principal

característica da MCC, que é estabelecer as tarefas mais adequadas de manutenção, que garantem a função operacional da planta a partir de uma avaliação detalhada das funções desenvolvidas por cada componente, sistema ou equipamento (Souza; Álvares, 2007).

A FMEA (*Failure Mode and Effect Analysis*) é um método utilizado para gerenciar risco, que tem por objetivo identificar os possíveis modos de falhas de um dado produto/processo e suas respectivas causas, bem como os efeitos dessas sobre o cliente (comprador, processo subsequente, e etc.). Essa técnica permite através de procedimentos apropriados atuar sobre tais itens de forma a reduzir e/ou eliminar a chance de falhas virem a ocorrer (Tonaco *et al.*, 2007). Com a possibilidade auxiliar na avaliação de saúde dos equipamentos, a FMEA pode ser usada para gerar conhecimento necessário para a avaliação (e/ou tomada de decisão) baseada na condição de funcionamento do ativo físico em questão.

Uma FMEA elaborada detalhadamente contém informações sobre os componentes de um sistema físico, que podem auxiliar na detecção prévia de potenciais falhas. Para o processo de manutenção, a FMEA auxilia na busca por soluções mais eficazes no tratamento das falhas, suas prevenções e conseqüências, podendo indicar pontos críticos do equipamento sob o ponto de vista da manutenibilidade e da confiabilidade (Mecabô, 2007). A FMEA oferece três funções diferentes:

- Prognosticar problemas.
- Desenvolver e executar projetos, processos e serviços (novos ou revisados).
- Documentar rotinas de processos ou serviços (execução).

No presente trabalho a documentação da FMEA foi desenvolvida segundo o formulário mostrado na Tabela 2.2. Essa documentação baseou-se nos conceitos retirados de (Siqueira, 2005; Scarpin, 1999; Helman e Andery, 1995; Souza e Álvares, 2007).

Tabela 2.2 – Formulário padronizado de análise FMEA.

IDENTIFICAÇÃO DO SISTEMA					
FUNÇÃO	Descrição da função do sistema				
COMPONENTE	FUNÇÃO DO COMPONENTE	FALHA FUNCIONAL	MODO DE FALHA	CAUSA DA FALHA	EFEITOS DA FALHA

A seguir será apresentada uma explicação das informações contidas no formulário apresentado na tabela 2.2:

- Função: Ação que o usuário deseja que o item ou sistema execute dentro de um padrão de apresentação especificado.
- Componente: Identificação de cada componente pertencente ao sistema.
- Função do componente: Descrição sucinta e exata da tarefa que o componente deve desempenhar.
- Falha funcional: Descrição de todas as possíveis falhas pertinentes a cada componente.
- Modo de falha: Descrição da forma como a falha é observada pela equipe de operação do sistema. Por exemplo, atuação de um determinado tipo de alarme, ou atuação de um relé sinalizando falha.
- Causa da falha: Descrição simples e concisa das ocorrências (causas) que podem dar origem ao tipo de falha considerado.
- Efeito da falha: Conseqüência da ocorrência da falha, percebida ou não pelo usuário final. Pode ser local (não afeta os outros componentes) ou global (pode afetar outras funções ou componentes).

Segundo Mecabô (2007) uma das maiores dificuldades de realizar a FMEA é a baixa reusabilidade do conhecimento gerado devido descrições redundantes e inconsistentes das funções dos componentes e sistemas e das suas falhas correspondentes. Isto se deve principalmente à falta de uma metodologia para se conduzir uma FMEA e ao uso de linguagem natural para descrever as informações relativas à análise. Entretanto, os desenvolvedores começam a utilizar técnicas de Inteligência Artificial em conjunto com a FMEA.

Os fatores para avaliação dos componentes consistem numa série de critérios utilizados para avaliar a criticidade ou prioridade de risco de um componente. Vale ressaltar que essa avaliação é baseada em critérios pré-determinados e para cada processo uma pontuação diferente deve ser definida (Siqueira, 2005; Scarpin, 1999; Helman e Andery, 1995). Na avaliação é considerada a influência de três parâmetros: severidade, ocorrência e detecção das falhas.

- Severidade: Trata-se de um índice que reflete a gravidade das conseqüências de uma falha. Quanto maior o índice, maior a gravidade.
- Ocorrência: É um índice definido em função do número de ocorrências de falhas registrados num determinado período.
- Detecção: É um índice construído com base na estimativa da probabilidade de uma falha ser detectada, assumindo-se que ela tenha ocorrido.

Os parâmetros citados anteriormente são, normalmente, medidos em uma escala de 1 a 10, o número 1 indica uma menor importância da falha, do ponto de vista de determinado parâmetro, e o número 10 indica que uma maior importância deve ser atribuída à falha. A partir destes parâmetros, é definido o chamado número de prioridade de risco (NPR) (Siqueira, 2005).

Para encontrar o NPR deve-se calcular o produto dos três índices anteriores (Severidade x Ocorrência x Detecção). Esse número é utilizado para a priorização da tomada de ação e permite priorizar certas falhas e avaliar quais providências devem ser tomadas primeiramente. Vale ressaltar que os índices de ocorrência, severidade e detecção serão utilizados para avaliar a importância dos modos de falha e, portanto, atribuídos a cada uma das falhas funcionais de cada componente, enquanto o NPR será utilizado para avaliar os próprios componentes. Conseqüentemente, nos componentes que apresentarem mais de uma falha funcional, o NPR do componente será definido como sendo igual ao maior NPR de suas falhas funcionais (Siqueira, 2005).

O NPR é um tipo de KPI (*Key Performance Indicator*) e pode ser inferido da FMEA. Tal métrica auxilia na avaliação de saúde dos equipamentos analisados. Segundo Eckerson (2006), KPIs são "veículos de comunicação". Permitem que os executivos comuniquem a missão e a visão da empresa aos mais baixos níveis hierárquicos, envolvendo diretamente todos os colaboradores na realização dos objetivos estratégicos da empresa (Beck e Oliver, 2004).

Na seção referente ao estudo de caso será apresentada uma FMEA para o sistema da turbina. Esse exemplo permitirá uma maior compreensão da ferramenta e como esta auxiliou nas sugestões de manutenção que a metodologia apresentada neste trabalho oferecerá para as equipes de manutenção e operação da usina.

2.3.2 – Normas: ISA-88 e ISA-95

A norma ISA-88 foi publicada em 1995 (URL: <http://www.isa-95.com/index.php>), sendo um padrão internacional para implementação de processos industriais discretos ou contínuos que requeiram flexibilidade, isso significa que os mesmos equipamentos podem ser usados em diferentes produtos e/ou serviços. Os processos são programados sequencialmente em PLCs (*Programmable Logic Controller*), usando *hard code*. Esses mesmos PLCs podem ser usados em diferentes equipamentos, como sensores de pressão, temperatura e etc.

Com a utilização dos modelos e terminologias que a ISA-88 provê para a estruturação de processos industriais, torna-se possível separar equipamentos do controle de processos. Outra facilidade oferecida é o suporte ao desenvolvimento de modelos hierárquicos que definem a estrutura física dos equipamentos (esse tipo de modelo hierárquico é chamado de modelo físico), baseado nos modelos hierárquicos a equipe de engenharia de controle programa todas as possíveis funções de cada equipamento.

Além do modelo hierárquico, a norma ISA-88 oferece um modelo de controle de atividades e um modelo de dados. O modelo de controle de atividades permite desenvolver um sistema de controle flexível, resultando num processo de produção flexível. O modelo de estrutura de dados possibilita a modelagem de dados e fornece métodos padronizados para isso. Esse modelo trata aspectos importantes da informação, como: rendimentos, capacidade dos equipamentos, e escalonamento.

A norma ISA-95 publicada em 2000 é um padrão internacional para integração de empresas e sistemas de controle, pois permite determinar quais informações devem ser trocadas entre a empresa e o sistema de controle. Esta norma consiste em modelos e terminologias (modelos UML - *Unified Modeling Language*), que podem ser usados para determinar quais informações serão manipuladas pelo sistema de controle. Dentre os modelos que a norma provê encontram-se:

- Controle de sistemas empresariais;
- Modelos e terminologias UML;
- Modelo de Atividades (diagramas);

- Modelo de Objetos e Atributos.

A versão ISA-95.01 permite determinar quais informações devem ser trocadas entre a empresa e o sistema de controle e, com base no resultado dessa análise, torna-se possível a construção da interface entre esses dois sistemas. A ISA-95.02 determina os atributos para todos os objetos definidos na ISA-95.01 usando os seguintes modelos: a) modelo de equipamentos; b) modelo pessoal; c) modelo de desempenho da produção. Já a versão ISA-95.03 define atividades de produção e fluxos de informação, preocupando-se com as seguintes questões: a) qual departamento é responsável por quais atividades? b) qual sistema de automação é responsável por qual sistema físico? c) qual funcionalidade é representada em mais de um modelo de informação?

Tanto a ISA-88 quanto a ISA-95 foram utilizadas no processo de desenvolvimento e implantação da metodologia proposta no presente trabalho. A ISA-88 auxiliou na definição da parte física do processo de automação, pois a rede de comunicação industrial usada e os equipamentos implantados estão de acordo com esta norma. A ISA-95 ofereceu, para a definição da metodologia, os modelos de informação necessários para o desenvolvimento do sistema de controle que se comunica diretamente com o chão de fábrica e fornece informações úteis aos usuários.

2.4 – REDES DE COMUNICAÇÃO

2.4.1 – OLE for Process Control – OPC

OLE for process control é uma série de especificações padronizadas para *Object-Linking and Embedding* (OLE) (URL: <http://www.opcfoundation.org/>). O primeiro padrão teve origem em 1996 (originalmente chamado de especificações OPC e agora conhecido como especificações para acesso de dados) e define a comunicação em tempo real da planta com o sistema de controle via rede industrial.

Originalmente baseado nas tecnologias da Microsoft OLE COM (modelo de componentes de objeto) e DCOM (modelo distribuído de componentes de objeto), a especificação definia padrões para conjuntos de objetos, interfaces e métodos para uso em controle de processos e aplicações de automação da manufatura, o que facilitava a interoperabilidade

entre equipamentos de campo e sistemas de controle. As tecnologias COM/DCOM provêm uma estrutura para desenvolvimento de produtos de software. Atualmente existe uma variedade de servidores e clientes OPC. O OPC foi desenvolvido para oferecer uma ponte de comunicação Windows baseada em aplicações e controle de processos para hardware e software. É um padrão aberto que permite um método consistente de acesso aos dados dos equipamentos de campo.

Os servidores OPC provêm métodos para diferentes pacotes de software capazes de acessar dados de equipamentos ligados ao controle de processos, como PLCs. O propósito do OPC é definir uma interface, ou *driver* que permita a comunicação com aplicações SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*) ou outros pacotes de software. A figura 2.6 apresenta a interface de comunicação entre servidores OPC e as estações de trabalho.

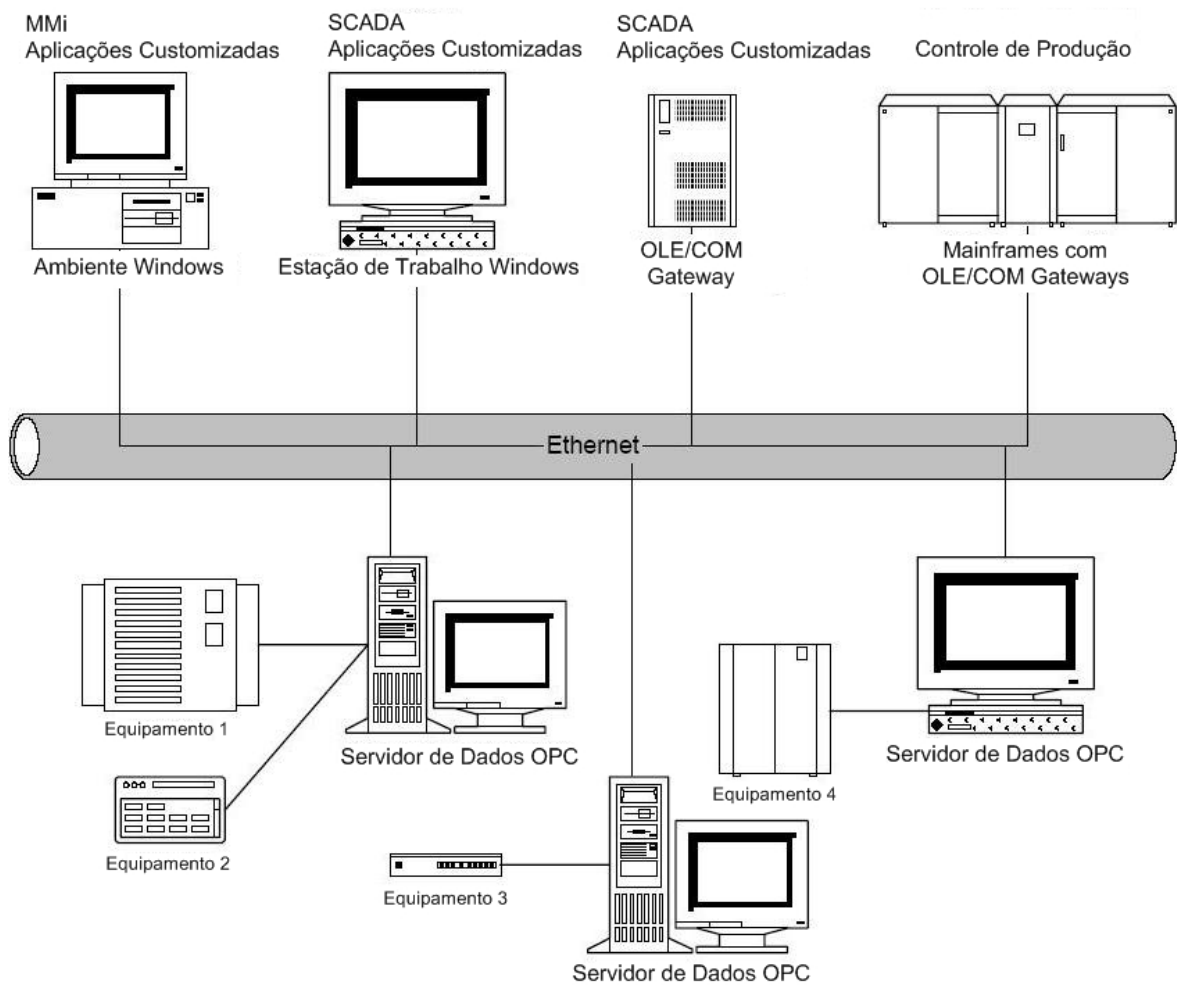


Figura 2.6: Comunicação entre servidores OPC e estações de trabalho (The OPC Foundation. URL: <http://www.opcfoundation.org/>).

Um servidor OPC pode ser definido para um equipamento em particular e reusado em qualquer outra aplicação que seja capaz de funcionar como um cliente OPC. Os servidores OPC utilizam a tecnologia OLE (também conhecida como Modelo de Componente de Objeto, ou COM), oferecida pela Microsoft, para comunicar com o cliente. A tecnologia COM permite um padrão de comunicação entre aplicações de software e hardware de controle. A figura 2.7 apresenta a comunicação entre os equipamentos de campo (via rede *FieldBus*) e as estações de trabalho onde estão instalados os sistemas de controle.

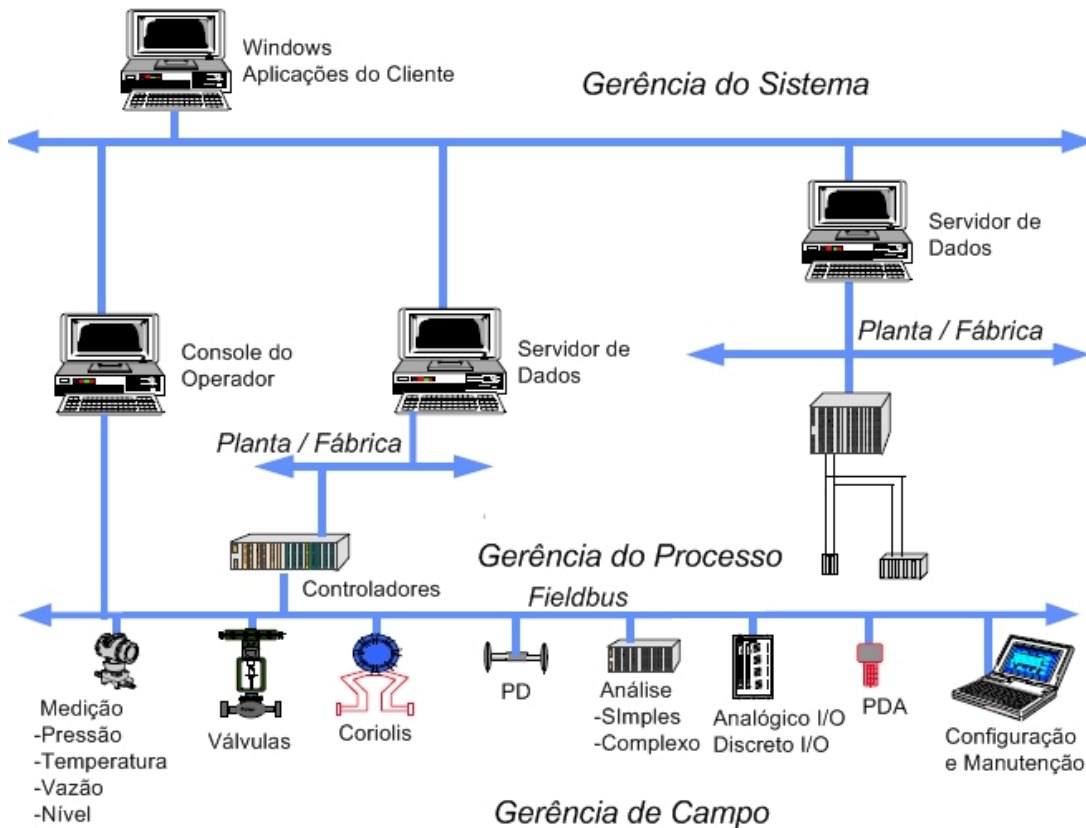


Figura 2.7: Comunicação entre os equipamentos de campo e as estações de trabalho.

A tecnologia OPC é utilizada em conjunto com as redes de comunicação *FieldBus*, pois oferecem uma estrutura cliente/servidor para a comunicação dos dados dos sensores com o sistema computacional. Tal tecnologia será utilizada na metodologia, apresentada no presente trabalho, visto que o sistema especialista necessita de um servidor para se comunicar com os dados dos sensores, que serão monitorados com o objetivo de encontrar possíveis falhas nos equipamentos.

2.4.2 – *Foundation FieldBus*

Fieldbus é um protocolo de comunicação interoperável, totalmente digital, serial e bi-direcional, entre equipamentos de campo (instrumentação inteligente como: sensores, transmissores, conversores, atuadores e etc.) e sistemas de controle. Na instrumentação inteligente o próprio instrumento passa a desempenhar um papel de maior importância dentro dos sistemas. Possuindo a função de viabilizar a manipulação elétrica dos sinais associados às grandezas, e também de converter, pré-processar e transmitir os dados a sistemas de automação. Possuem também a capacidade de prever a distribuição de parte da inteligência dos sistemas com seus diversos módulos, possibilitando a interação entre os diversos módulos e a tomada de decisões.

O uso de instrumentos inteligentes conectados através de redes de controle possibilita a concepção de sistemas que privilegiam a aplicação e investigação de novos conceitos aplicados a essa área, como a modularidade, distribuição de inteligência, redundância e a interoperabilidade. Podem-se ainda considerar os conceitos apresentados como grande potencial para a aplicação de novas tecnologias nessa área como: inteligência artificial, lógica nebulosa e redes neurais. Como aplicações potenciais destacam-se a automação industrial, predial, e instrumentação embarcada em veículos (Cugnasca; Saraiva, 2007).

FieldBus é uma LAN (*Local Area Network*) para instrumentos usados na automação de processos, com capacidade embutida de distribuição do controle de aplicação através da rede. A figura 2.8 apresenta a arquitetura *FieldBus* que é utilizada em redes industriais de comunicação (Smar, 2002). Observe a pirâmide apresentada na figura 2.8, no primeiro nível encontra-se a rede *FieldBus* (equipamentos instalados no chão de fábrica), no segundo nível encontra-se o sistema de automação e apresentação (onde está instalado um sistema de monitoração e/ou controle dos equipamentos), e no terceiro nível encontra-se a central de processamento dos dados.

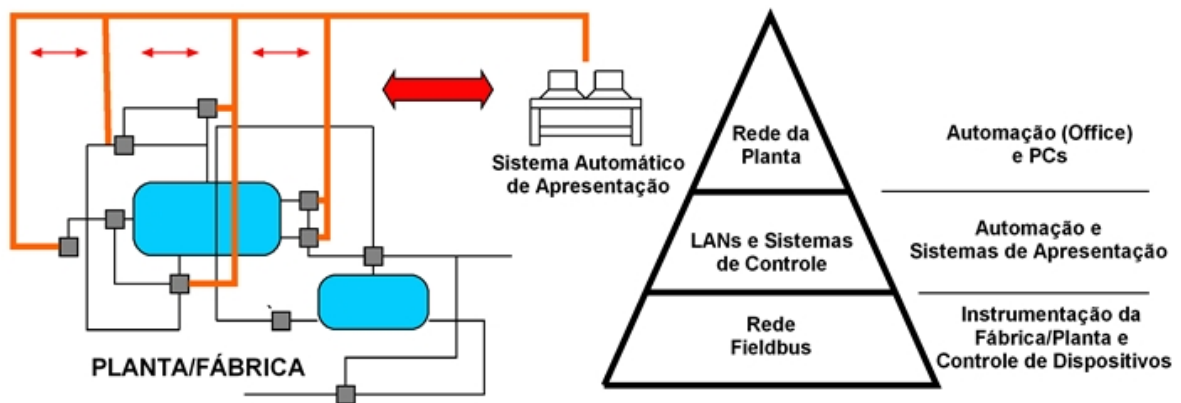


Figura 2.8 - Arquitetura *FieldBus* para redes industriais de comunicação (adaptado de (Lages, 2006)).

Em uma rede *FieldBus* existem DFIs que fazem a interface de comunicação entre os dispositivos e a rede. Esses dispositivos são conhecidos como pontes de comunicação. As redes que utilizam o protocolo *FieldBus* seguem um modelo semelhante ao modelo do protocolo de comunicação OSI (*Open Systems Interconnection*) definido para implementação de redes de computadores. A figura 2.9 mostra o que estes modelos têm em comum. O modelo OSI é dividido em sete camadas hierárquicas enquanto o *FieldBus* possui apenas três camadas e a última camada é dividida em duas. A divisão de tarefas para cada camada do modelo *FieldBus* segue a estrutura abaixo:

- Camada Física;
- Camada de Enlace:
 - Link escalonador de atividades;
- Camada de Aplicação:
 - Subníveis de acesso *FieldBus*;
 - Especificação de mensagens *FieldBus*;

No nível mais acima, porém não fazendo parte das camadas hierárquicas de comunicação, encontra-se o nível de aplicação do usuário. Fazem parte desse nível todos os sistemas de monitoramento dos sensores, sinóticos, e etc. Essa camada fornece os dados necessários para as camadas de aquisição de dados e monitoração de condição do modelo OSA-CBM abordado anteriormente.

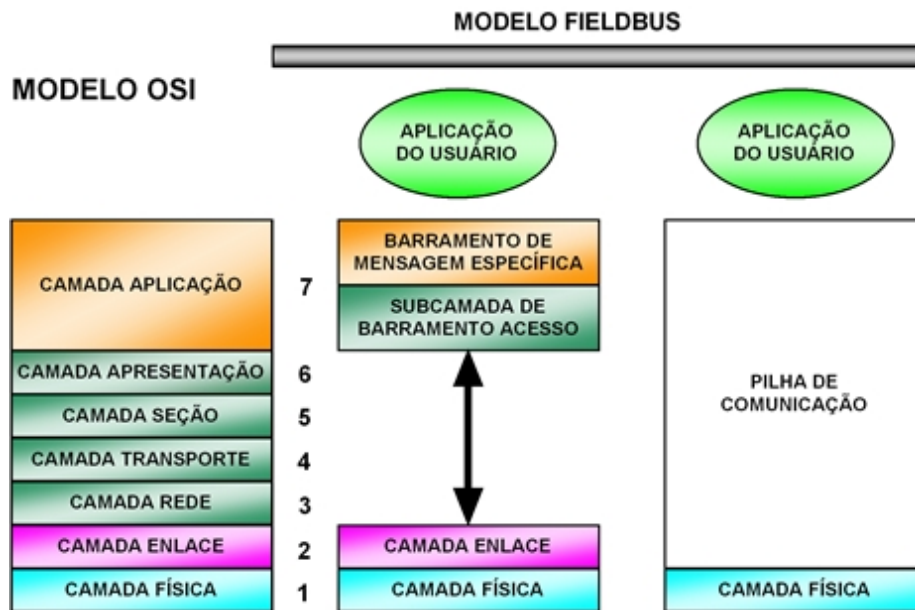


Figura 2.9 - Modelo OSI versus modelo *FieldBus* (adaptado de (Lages, 2006)).

A tecnologia *FieldBus* oferece algumas facilidades para a implementação de redes industriais, como: a) integração real de todos os componentes, mantendo o sinal puramente digital por todo o caminho o que evita perda de precisão ou a integridade do sinal; b) interoperabilidade total que permite múltiplos dispositivos, independente do fabricante, operarem no mesmo sistema sem qualquer perda de funcionalidade; c) o controle no campo é feito usando uma estratégia de controle distribuída entre os equipamentos de campo, o que assegura maior tolerância a falhas; d) manutenção otimizada de dispositivos, que permite manutenção proativa e relatórios de informação (Smar, 2002). Tais informações são geradas devido ao maior número de dados de diagnóstico fornecidos pelos dispositivos de campo.

O protocolo *Foundation FieldBus* é usado nos processos de automação industrial por todas as facilidades que oferece para a implementação de redes industriais e a comunicação com o sistema de controle. A investigação desse assunto no presente trabalho ocorre pelo fato de esta tecnologia ter sido usada no processo de automação da malha industrial, objeto de estudo desse trabalho, e foi um pré-requisito para o desenvolvimento da metodologia que será apresentada posteriormente.

2.5 – INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL APLICADA NA SOLUÇÃO DE PROBLEMAS DE MANUTENÇÃO BASEADA EM CONDIÇÃO

2.5.1 – Sistemas Inteligentes

A disponibilidade e a confiabilidade dos equipamentos industriais é estrategicamente importante para as empresas. Portanto, a monitoração da condição do ativo físico torna-se fundamental para o diagnóstico de falhas e para que medidas corretivas possam ser tomadas antes que o problema se agrave e acarrete numa parada do equipamento.

Existem técnicas de Inteligência Artificial (IA) eficientes para resolver esse problema de manutenção baseada em condição, pois são capazes de auxiliar os especialistas na interpretação da grande quantidade de dados monitorados. A literatura oferece uma vasta quantidade de sistemas inteligentes (usando sistemas especialistas, redes neurais, lógica *fuzzy* e raciocínio baseado em casos) aplicados na solução de problemas como o citado anteriormente.

Molina *et al.*, (2000) apresentam um sistema de monitoração e controle, que combina a técnica de sistema especialista com redes neurais artificiais para monitoração de turbinas hidrelétricas. Existem três módulos de processamento inteligente. Um módulo de diagnóstico baseado em regras coleta todos os parâmetros operacionais da planta e os avalia de acordo com o conhecimento adquirido, a partir do conhecimento dos especialistas humanos, com o objetivo de prever problemas. O sistema ainda possui dois módulos de redes neurais artificiais, um que coleta amostras de espectro de áudio, no grupo de geração de energia, e outro que coleta imagens dos interruptores elétricos que transferem energia para fora da planta. Além desses módulos o sistema oferece um sinótico para a monitoração dos subsistemas da turbina que fornece ao usuário mais informações sobre os equipamentos monitorados. Esse sistema consegue abranger todas as informações que podem ser extraídas dos equipamentos, o que permite realizar um diagnóstico mais preciso e detalhado.

Ciarapica e Giacchetta, (2006) apresentam técnicas de *soft computing* (lógica *fuzzy* e redes neurais) aplicadas à manutenção baseada em condição. Os estudos de caso apresentados pelos autores mostram que tais técnicas permitem prever e prevenir falhas nos

equipamentos, e possibilitam, através da monitoração, identificar o estado de funcionamento dos equipamentos analisados. Tais informações podem ser usadas para efetuar manutenção preventiva de sucesso, evitando problemas mais graves. Emmanouilidis *et al.*, (2006) apresentam um sistema inteligente flexível (usando *soft computing*) aplicado à monitoração de condição e diagnóstico de falhas em máquinas, que pode ser customizado facilmente para vários cenários de aplicação.

Alkaim (2003) apresenta uma metodologia para incorporar conhecimento intensivo às tarefas de manutenção centrada na confiabilidade. Tal metodologia utiliza o sistema inteligente CommonKADS (URL: <http://www.commonkads.uva.nl/>), desenvolvido a partir do projeto ESPRIT (*European ESPRIT IT Programme*) da comunidade europeia, para o estabelecimento de bases de conhecimento. A metodologia CommonKADS é aplicada na engenharia do conhecimento, oferecendo uma estrutura para o desenvolvimento de sistemas baseados em conhecimento. O ponto forte desses sistemas é a base de conhecimento e a metodologia CommonKADS oferece métodos detalhados para realizar a aquisição do conhecimento a partir de especialistas. A metodologia CommonKADS afirma que a etapa de engenharia do conhecimento consiste na construção de modelos que representem diferentes aspectos do conhecimento humano. Para tanto, a metodologia CommonKADS propõe 6 modelos para serem usados na engenharia do conhecimento, como mostra a figura 2.10. Estes são: a) nível contextual: modelo organizacional, modelo de tarefa e modelo de agente; b) nível conceitual: modelo de conhecimento e modelo de comunicação; c) nível de artefato: modelo de design.

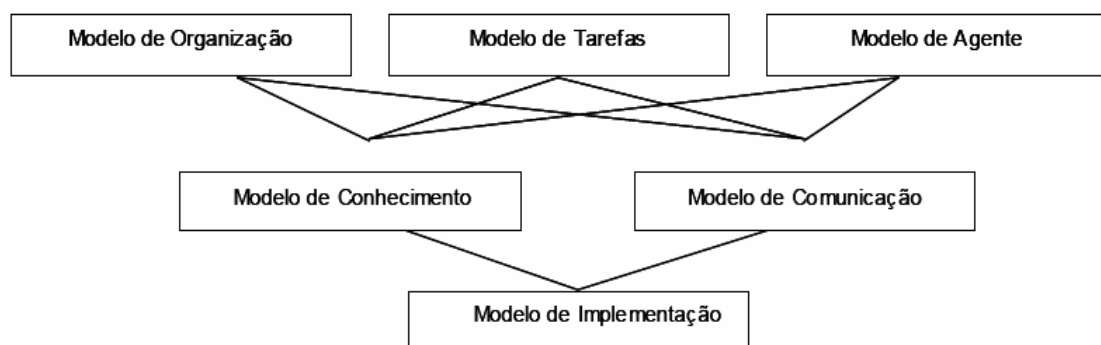


Figura 2.10: Modelos da metodologia CommonKADS.

Todd *et al.*, (2007) fazem referência a um sistema multiagente que usa o algoritmo *backpropagation*. Esse sistema detecta falhas de um vetor de atributos calculando médias estatísticas de dados de sensores e foi proposto por McArthur *et al.*, (2004). Todd *et al.*, (2007) também apresentam um sistema similar usando redes neurais e sistema baseado em regras, que é usado para detectar comportamento anormal de transformadores diagnosticando os problemas a partir de várias falhas predefinidas na base de regras, tal sistema é proposto por Wang *et al.*, (1998).

Redes neurais artificiais têm sido utilizadas em vários problemas de monitoração de condição e diagnóstico de falhas (Todd *et al.*, 2004). Entretanto, outras técnicas de IA também são aplicadas para resolução desse tipo de problema, dentre essas técnicas pode-se citar: algoritmos genéticos, redes *bayesianas*, e árvores de decisão. Todd *et al.*, (2007) fazem referência a alguns sistemas inteligentes desenvolvidos para solução de problemas de manutenção baseada em condição. No presente trabalho duas técnicas serão abordadas: sistemas especialistas e raciocínio baseado em casos. A primeira delas foi utilizada na elaboração da metodologia proposta e a segunda é apresentada como outra alternativa para resolver o problema de manutenção baseada em condição.

2.5.1.1 – Sistemas Especialistas

Sistemas Especialistas são sistemas que solucionam problemas resolvidos apenas por profissionais que acumularam conhecimento exigido, também são conhecidos como peritos. O conhecimento que será adquirido pelo sistema é a fonte de raciocínio do mesmo (Russel, Norvig, 2003). Para representar esse conhecimento a literatura oferece várias linguagens de representação do conhecimento, tais como regras de produção, redes semânticas dentre outras. O processamento do raciocínio compreende a avaliação do problema novo de acordo com o conhecimento armazenado no sistema e isso é feito pela máquina de inferência do sistema. Uma máquina de inferência pode ser implementada usando heurísticas próprias, entretanto, a literatura já oferece ferramentas para desenvolvimento de sistemas inteligentes, sendo o Jess (Java Expert System Shell, URL: <http://herzberg.ca.sandia.gov/>) uma delas (Friedman-Hill, 2003).

O Jess é uma biblioteca de funções feita na linguagem de programação Java e foi desenvolvida para a implementação de sistemas especialistas baseados em regras

(Friedman-Hill, 2003). Um sistema baseado em regras (ou baseado em conhecimento) possui uma base, na qual o conhecimento é armazenado e a cada problema novo (ou entrada) realiza uma consulta à base de para resolver a nova situação. A base do sistema pode ser composta por milhares de regras, sendo gerada em uma linguagem declarativa (por exemplo, a linguagem CLIPS). As linguagens declarativas são a forma mais próxima da linguagem natural, para a implementação de regras e são utilizadas para solucionar problemas que envolvem controle, diagnóstico, predição, classificação e reconhecimento de padrões (Friedman-Hill, 2003). A arquitetura de um sistema baseado em regras típico pode ser visualizada na figura 2.11, adaptada de (Friedman-Hill, 2003).

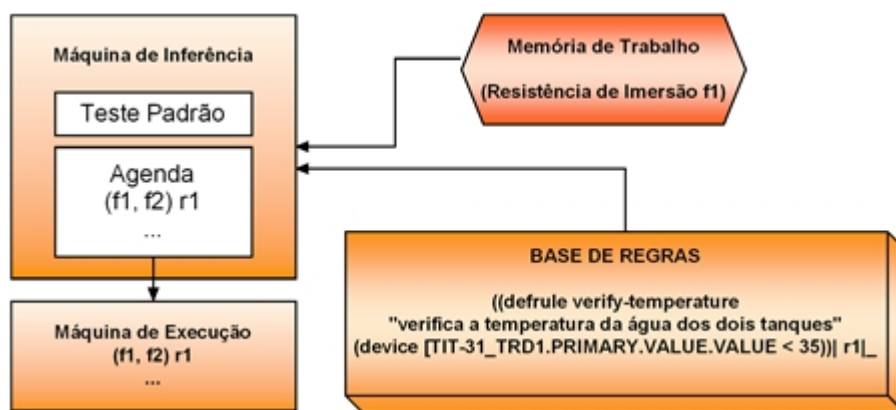


Figura 2.11 – Exemplo de arquitetura de um sistema especialista que utiliza o Jess, (adaptado de (Friedman-Hill, 2003)).

A máquina de inferência é responsável por receber da memória de trabalho, os fatos da base de conhecimento e as entradas. Em seguida, realiza o teste das entradas de acordo com as regras fornecidas pelo programador e manda o resultado para a agenda, a qual enviará o mesmo para a máquina de inferência. A máquina de inferência é responsável por realizar o raciocínio e fornecer a solução para o problema (Friedman-Hill, 2003).

A maior dificuldade encontrada no desenvolvimento de sistemas especialistas é estruturar e gerar a base de conhecimento, visto que essa deve ser o mais fiel possível ao conhecimento do especialista humano e para adquirir esse conhecimento o desenvolvedor do sistema deve entrevistar o especialista a fim de coletar a maior quantidade de informações que conseguir. Essa tarefa leva um tempo considerável por sua complexidade e precisa ser realizada com perícia, pois é a partir da base de conhecimento que o sistema raciocinará e fornecerá o conhecimento necessário aos usuários finais. Nessa fase a metodologia

CommonKADS pode ser utilizada, pois oferece um roteiro detalhado para desenvolver a etapa de engenharia do conhecimento (que compreende a aquisição das informações) sugerindo abordagens para aquisição do conhecimento, como entrevistas e questionários.

Apesar da dificuldade de gerar a base de conhecimento de um sistema especialista, Todd *et al.*, (2007) justificam o uso dessa técnica para solução de problemas relacionados à manutenção baseada em condição. Segundo Todd *et al.*, (2007) a base de conhecimento possui informações explícitas que provêm a fonte de informação para o raciocínio de cada avaliação feita pelo sistema. Esse nível de transparência é importante para verificar a correteza do diagnóstico proposto, bem como a ausência de sugestões de diagnóstico. Essa transparência permite, aos usuários e aos engenheiros responsáveis pela manutenção, localizar as áreas vulneráveis do sistema.

Segundo Todd *et al.*, (2007) as redes neurais artificiais não necessitam do mesmo nível de detalhamento e de uma base de conhecimento (como os sistemas especialistas), pois aprendem a partir de um conjunto de treinamento definido de forma mais geral e simples. Essa característica a torna mais vantajosa que os sistemas especialistas. Entretanto, o conjunto de “explicação” do problema (diagnóstico, ou resultado final) provido pelas redes neurais, não fornece ou fornece de forma vaga, o conhecimento explícito do especialista (a resposta de uma rede neural necessita de uma análise do desenvolvedor de modo a tornar a informação gerada mais clara para o usuário final). Isso pode acarretar na falta de informação para diagnosticar o problema, o que dificulta a tomada de decisão por parte dos usuários. Diante do exposto, pode-se afirmar que apesar da dificuldade para desenvolver a base de conhecimento, a demanda do uso de sistemas especialistas, na indústria para solução de problemas de manutenção baseada em condição, tem aumentado.

Todd *et al.*, (2004) citam um sistema especialista proposto por David e Krivine (1989). Este sistema é usado para diagnosticar falhas de máquinas rotativas. A base de conhecimento consiste de mais de 1500 regras heurísticas, e inclui uma explicação causal para cada falha. Isso provê, ao usuário não-especialista, uma explicação do diagnóstico o que aumenta a confiabilidade das tomadas de decisão.

Segundo Todd (2004), um dos mais importantes sistemas de monitoração de condição de turbinas geradoras é o TIGER proposto por Milne *et al.*, (2001). O sistema consiste em

dois módulos: módulo baseado em regras e módulo baseado em diagnóstico. O conhecimento representado no módulo baseado em diagnóstico possui tanto conhecimento empírico quanto causas e efeitos relacionados às falhas, possuem ainda equações que representam o comportamento físico do sistema.

Todd *et al.*, (2007) apresentam como foco do seu trabalho a proposta de um sistema semi-automático baseado em conhecimento para diagnóstico de turbinas. A proposta é realizar manutenção baseada em condição. O sistema possui uma base de regras contendo modelos que explicam a causa das falhas diagnosticadas, e uma outra base contendo os valores das faixas de alarmes dos equipamentos monitorados.

Mecabô (2007) apresenta um protótipo de sistema especialista que realiza diagnóstico de falhas em compressores centrífugos a partir de informações relacionadas ao estado interno da máquinas, além de informações gerais sobre a situação de operação e manutenção e dos sistemas auxiliares. As tarefas realizadas pelo sistema protótipo foram divididas em duas partes principais: a análise de *performance* termodinâmica e o diagnóstico de falhas propriamente dito. A primeira trata da comparação do estado termodinâmico do processo atual com o seu estado esperado a partir da aquisição dos dados do processo. O diagnóstico utiliza as informações geradas pela análise numérica do processo, além de informações adicionais sobre as instalações e indicações dos sensores do compressor, para inferir informações relativas ao estado interno dos seus componentes e/ou do processo.

Tonaco *et al.*, (2007) apresenta a proposta de um sistema especialista baseado na metodologia OSA-CBM que utiliza a biblioteca de funções Jess. Tal sistema possui uma base de regras, que foi projetada a partir da FMEA gerada para a malha industrial em questão. O mesmo recebe informações da malha industrial (via rede *FieldBus*), processa essas informações e fornece o resultado para o usuário. Esse sistema tem o objetivo de diagnosticar as possíveis falhas nos equipamentos da malha industrial que está sendo monitorada, mas não oferece sugestões de tomada de decisão para a falha diagnosticada.

Uma propriedade em comum de todos os sistemas citados anteriormente é a necessidade de entrevistas com o especialista humano para gerar a base de conhecimento do sistema. Essa característica pode representar grande desvantagem para alguns desenvolvedores,

entretanto os sistemas especialistas fornecem o conhecimento de modo mais claro que algumas técnicas (o que para muitos é a grande vantagem dos sistemas).

2.5.1.2 – Sistemas de Raciocínio Baseado em Casos

Uma técnica muito utilizada na solução de problemas (bem como problemas relacionados a monitoração de condição) é o Raciocínio Baseado em Casos (RBC). Sistemas que utilizam esta técnica possuem uma base de casos *M* na qual o conhecimento é armazenado. Então, quando surge um novo caso, o sistema recupera um caso em *M* mais parecido ao caso novo através de comparações dos valores de seus atributos. Em geral, essas comparações são feitas por similaridade, que é um dos princípios básicos de sistemas RBC (Silva *et al.*, 2003).

Aamodt e Plaza (1994) apresentam o ciclo do RBC e este pode ser visto na figura 2.12, e definiram o mesmo como segue: uma descrição inicial do problema define um novo caso (topo da figura). O novo caso é usado para recuperar (*retrieve*) um caso de uma coleção de casos resolvidos previamente. O caso recuperado é combinado com o caso novo – para reutilização (*reuse*) – e a combinação fornece a solução para o caso novo, isto é, uma sugestão de solução para o problema inicial. Durante o processo de revisão (*revise*) a solução proposta é testada (pode ser testada no mundo real ou em sistemas de simulação, dependendo do problema) e reparada se a mesma não for bem sucedida. Durante a retenção (*retain*) a experiência adquirida com a solução do caso novo é armazenada na base de casos para futura reutilização e a base de casos é atualizada viabilizando o aprendizado do sistema (Mateli *et al.*, 2007).

O objetivo dos sistemas de RBC é reutilizar soluções conhecidas no contexto de problemas novos. Para tanto recupera-se da base de casos um caso mais similar ao caso novo, conseqüentemente, uma média quantitativa, que expresse o quanto um caso é similar a outro, é necessária. Essa média é conhecida como similaridade e pode ser calculada através do algoritmo Vizinho mais Próximo. Tipicamente, um caso representa a descrição da situação (o problema) e a experiência armazenada (a solução) durante a solução do problema. Então, pode-se afirmar que um caso é a associação de dois conjuntos de informação: a descrição do problema e a solução (Wangenheim; Wangenheim, 2003).

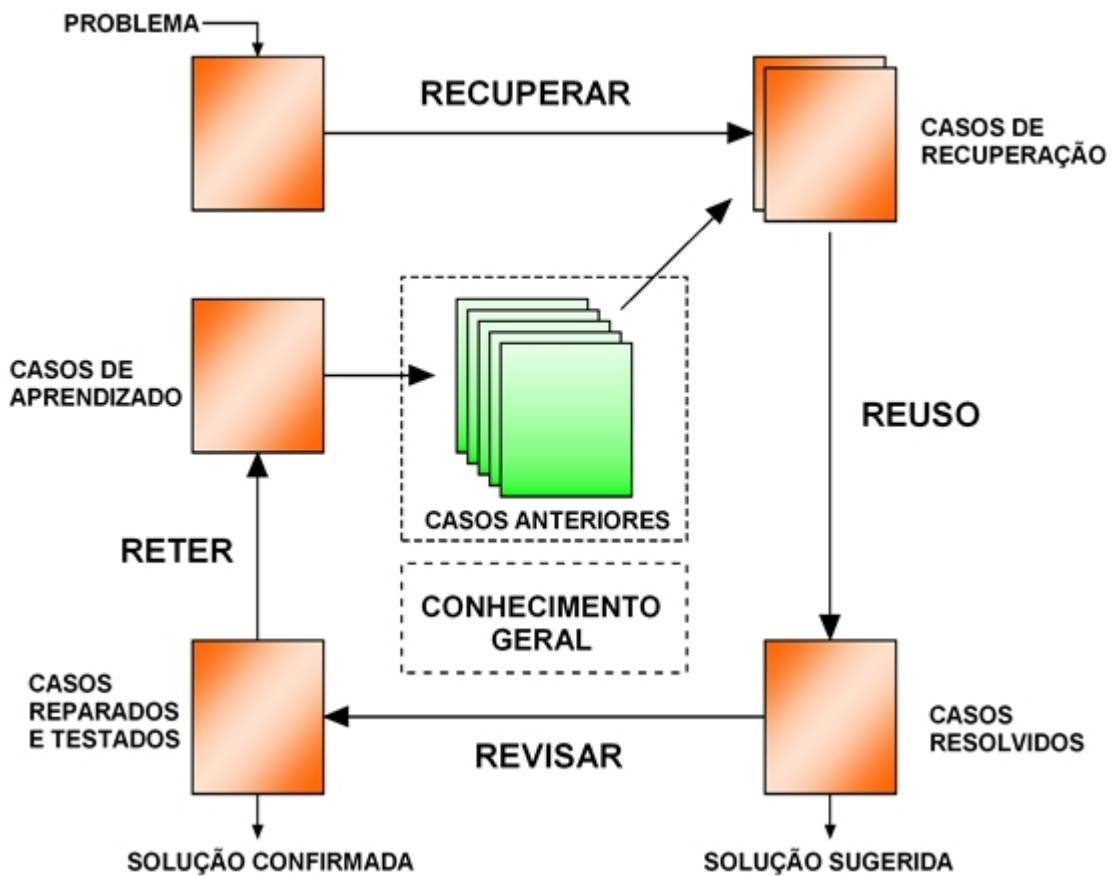


Figura 2.12 - Ciclo do RBC (adaptado de (Aamodt; Plaza, 1994)).

Todd *et al.*, (2007) citam um sistema de RBC, proposto por Stanek *et al.*, (2001), para diagnóstico de falhas de curto circuito num sistema de distribuição de força. Os casos de falha são derivados de um modelo do sistema funcional simulando paradas por curto circuito. Essa simulação permite extrair atributos chaves da saída do resultado do sinal elétrico. Esses casos gerados (e armazenados na base de casos) são comparados com as saídas atuais do sistema para detectar alguma falha nova que já esteja armazenada na base de falha.

3 – METODOLOGIA PARA SOLUÇÃO DE PROBLEMAS DE MANUTENÇÃO BASEADA EM CONDIÇÃO

Este capítulo apresenta uma descrição detalhada da metodologia proposta no presente trabalho incluindo as ferramentas necessárias para implementá-la, bem como os requisitos físicos necessários. O objetivo do trabalho é propor uma metodologia para desenvolvimento de bases de conhecimento para sistemas especialistas aplicados à manutenção preditiva.

As etapas que devem ser executadas serão apresentadas detalhadamente na seção 3.2, em linhas gerais compreendem os seguintes passos: a) coletar dados com os especialistas, nesta etapa foram realizadas entrevistas e análise de documentos (ordem de serviços, memória técnica da usina e etc.); b) identificar as falhas ocorridas nos equipamentos; c) identificar as tomadas de decisão adotadas para cada falha; d) identificar as faixas de operação dos equipamentos; e) desenvolver as regras em alto nível; f) dividir as regras por camadas de processamento; g) implementar as regras na linguagem Clips.

Na base de conhecimento está armazenado o conhecimento do sistema, porém ela é apenas uma das partes que o compõem. Diante disso, torna-se necessária uma explicação detalhada do todo (sistema especialista) para que se compreenda a parte de interesse do trabalho (base de conhecimento), a seção 3.1 tem esse objetivo.

3.1 – METODOLOGIA PARA DESENVOLVIMENTO DE SISTEMAS INTELIGENTES APLICADOS À MBC

3.1.1 – Descrição da Metodologia

A metodologia apresentada neste trabalho utiliza conceitos de manutenção baseada em condição, e foi desenvolvida para analisar os modos e efeitos de falhas de Unidades Geradoras Hidráulicas (UGHs) de usinas hidrelétricas a partir das grandezas monitoradas por um sistema SCADA que pode ser utilizado em usinas, focando a sua análise na turbina hidráulica. Outra função do sistema é diagnosticar e/ou prever a falha, sugerindo tomadas de decisão apresentadas na forma de intervenções de manutenção.

O sistema inteligente desenvolvido a partir da metodologia proposta visa dar suporte às atividades de manutenção de usinas hidrelétricas, utilizando-se de técnicas de sistemas especialistas para detectar situações que podem ocasionar falhas e defeitos, e alertar o usuário para a iminência das mesmas, de modo a possibilitar que a equipe de manutenção possa agir proativamente permitindo realizar a manutenção preditiva dos equipamentos. A concepção do sistema é fundamentada na idéia de manutenção baseada em condição a partir de grandezas monitoradas pelo sistema de supervisão e controle usado em usinas hidrelétricas (Álvares, 2006).

Os sinais adquiridos dos equipamentos e do sistema de supervisão e controle da usina passam por um processamento que envolve sete camadas de acordo com o modelo OSA-CBM apresentado na seção 2.1 (Álvares *et al.*, 2007). Parte deste processamento (camadas 1 e 2, e também parte das camadas 3 e 4), serão processadas em equipamentos de aquisição de dados para redes industriais. A outra parte do processamento (parte das camadas 3 e 4, bem como as camadas 5, 6 e 7) deverão ser processadas pelo sistema proposto no presente trabalho. Essa organização do processamento pode ser observada na figura 3.1.

Diante do exposto anteriormente, para que o sistema inteligente possa ser construído, torna-se necessário o desenvolvimento de um *kernel* de sistemas inteligentes, capaz de capturar os dados do sistema de supervisão (a partir do banco de dados do sistema, ou diretamente dos equipamentos monitorados), processar estes dados utilizando técnicas de sistemas especialistas e atualizar o banco de dados com os dados resultantes desse processamento (Simeon *et al.*, 2007). O *kernel* inteligente faz parte da arquitetura cliente/servidor que será apresentada nesse trabalho, sendo este o servidor do sistema.

Este *kernel* é capaz de acessar diretamente os dados, independente de sua origem e disponibilizá-los na forma de variáveis. Tais variáveis são processadas por um conjunto de regras de produção, e o processamento atende as camadas da arquitetura OSA-CBM que orientou o desenvolvimento do sistema, a figura 3.1 apresenta uma adaptação dessa arquitetura para a metodologia proposta. O resultado do processamento é armazenado novamente no banco de dados, e utilizado na tomadas de decisão de manutenção. O sistema tem a função de gerar sinais de alerta aos controladores do sistema da usina, que podem ser mensagens de *e-mail* ou algum tipo de alerta visual. Os registros dos históricos de falhas são armazenados, para compor “logs” dos eventos diagnosticados pelo sistema, e

poderão ser aproveitados futuramente para desenvolver o aprendizado do mesmo (seja por meio de redes neurais ou outra técnica).

A metodologia proposta neste trabalho é uma adaptação da OSA-CBM para o desenvolvimento do sistema inteligente aplicado à manutenção preditiva de turbinas hidráulicas (Amaya *et al.*, 2007). O processamento inteligente do sistema, bem como a base de conhecimento foram desenvolvidos a partir dos conceitos apresentados em OSA-CBM e podem ser vistos na figura 3.1. A metodologia compreende as camadas de monitoração de condição, avaliação de saúde, diagnóstico, e tomada de decisão (ou seja, todo processamento inteligente do sistema especialista). Nas seções seguintes será explicada detalhadamente a metodologia gerada para desenvolvimento de sistemas especialistas aplicados à manutenção preditiva.

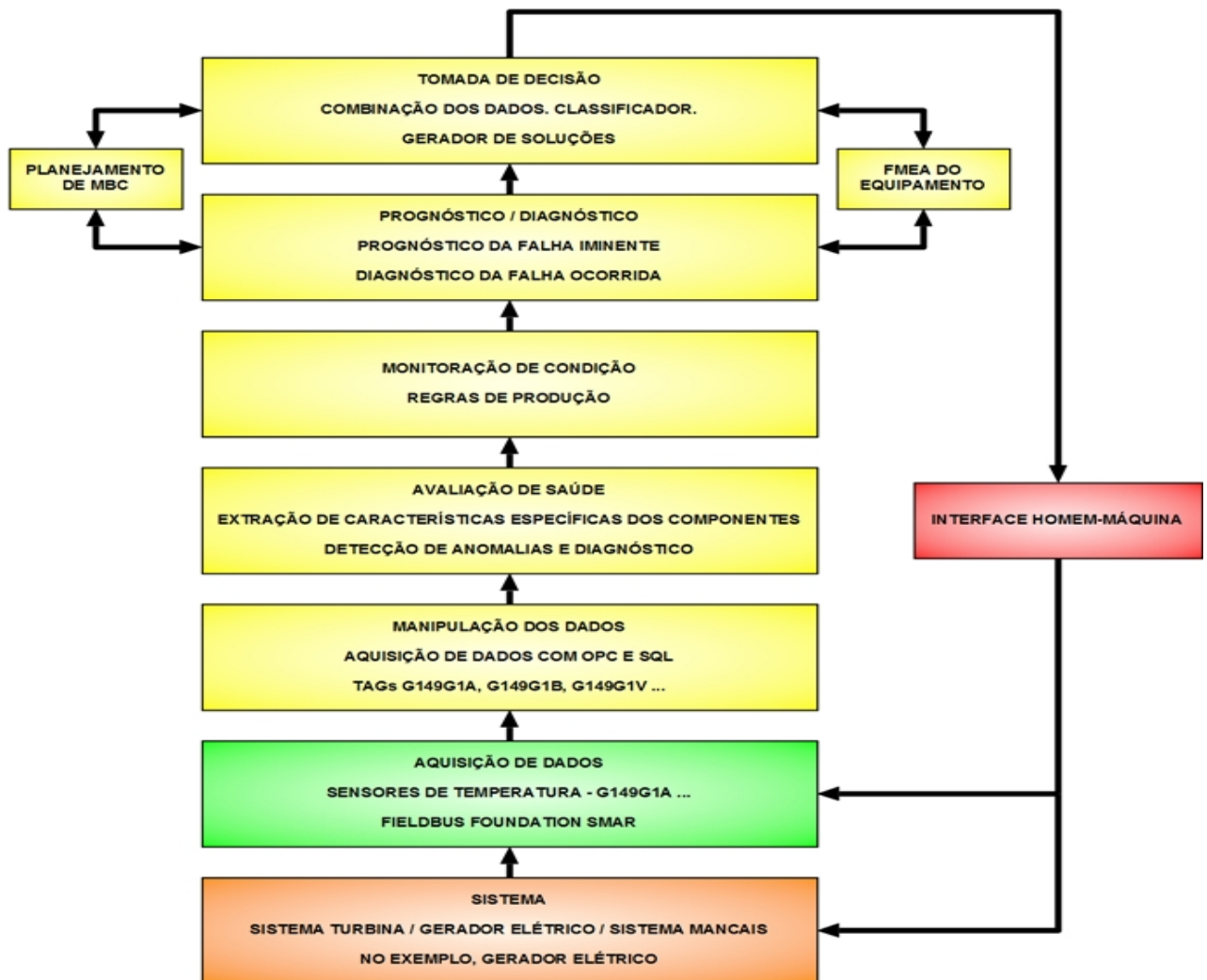


Figura 3.1: Adaptação da metodologia OSA-CBM para desenvolvimento de sistemas especialistas aplicados a manutenção preditiva.

A figura 3.1 apresenta todas as camadas de processamento da metodologia desenvolvida para sistemas inteligentes aplicados a manutenção preditiva. O primeiro retângulo (de baixo para cima) da figura corresponde ao sistema físico, no caso sistema da turbina, sistema de mancais e gerador elétrico principal. O segundo corresponde à camada 1 da arquitetura sendo responsável pela aquisição de dados. Essa tarefa coleta dados dos sensores dos equipamentos (temperatura, pressão, nível, densidade, e etc.). Para realizar essa aquisição de dados existem dois tipos de comunicação, a comunicação feita pela rede *FieldBus* e a comunicação lógica que é feita pelo OPC. O sinal da comunicação *FieldBus* indica o *status* do sinal da tag monitorada e o sinal da comunicação OPC indica o *status* do sinal do canal de comunicação existente entre o sistema computacional e os equipamentos de campo, essa comunicação é feita através da rede *FieldBus*.

O retângulo seguinte corresponde à camada 2 da arquitetura sendo responsável pela manipulação dos dados adquiridos. O sistema inteligente inicia seu processamento a partir da camada de monitoração de condição, camada 3 da arquitetura. Nessa camada, as tags dos sensores instalados nos equipamentos são monitoradas por regras de produção e quando acontece uma alteração na faixa de valores de operação (valores estes que são predefinidos pelo fabricante do equipamento) o sistema alerta para essa mudança. Toda tag monitorada possui quatro mensagens possíveis para indicar sua condição atual, que são: normal, alerta, alarme e *trip*. O valor de alerta é um valor antes do estado de alarme e tem a finalidade de indicar a iminência da falha antes que o equipamento entre em estado de alarme, essa medida permite a ação proativa dos controladores.

A camada de avaliação de saúde está no nível 4 da arquitetura e recebe informações da camada de monitoração de condição para determinar a saúde do equipamento monitorado, é nessa camada que o sistema detecta as anomalias e as armazena no banco de dados. As informações armazenadas no banco de dados compõem o histórico de anomalias do equipamento, vale ressaltar que cada equipamento possui um histórico de anomalias, que poderá ser usado no módulo de aprendizado do sistema quando esse for desenvolvido.

A metodologia realiza o prognóstico (camada 5 da arquitetura) a partir da geração de alarmes de alerta indicando que o valor da variável está aumentando/abaixando de forma a atingir o estado de alarme. Além do sinal de alerta, o sistema fornece uma causa provável (diagnóstico) para essa alteração. Isso permite que os operadores tenham mais controle dos

equipamentos e possam agir de forma a evitar que a falha aconteça. Junto com o diagnóstico, o sistema oferece uma ação de manutenção a ser adotada, que auxilia a tomada de decisão dos operadores e/ou equipe de manutenção, essa função corresponde à camada 6 da arquitetura. Assim como as anomalias detectadas, todas as tomadas de decisão são armazenadas no banco de dados do sistema e formam um histórico de tomada de decisão que também poderá ser utilizado no módulo de aprendizado do sistema.

A camada 7 corresponde à interface do sistema inteligente de manutenção preditiva e oferece um sinótico dos equipamentos monitorados, bem como um *browser web* que permite o acesso às informações do banco de dados do mesmo. Outra função oferecida na interface é a inspeção das variáveis monitoradas e análise de tendências a partir de gráficos em intervalos de tempo ou em tempo real. A figura 3.2 apresenta a arquitetura para a metodologia proposta, com todos os módulos do sistema e a comunicação com sistemas externos.

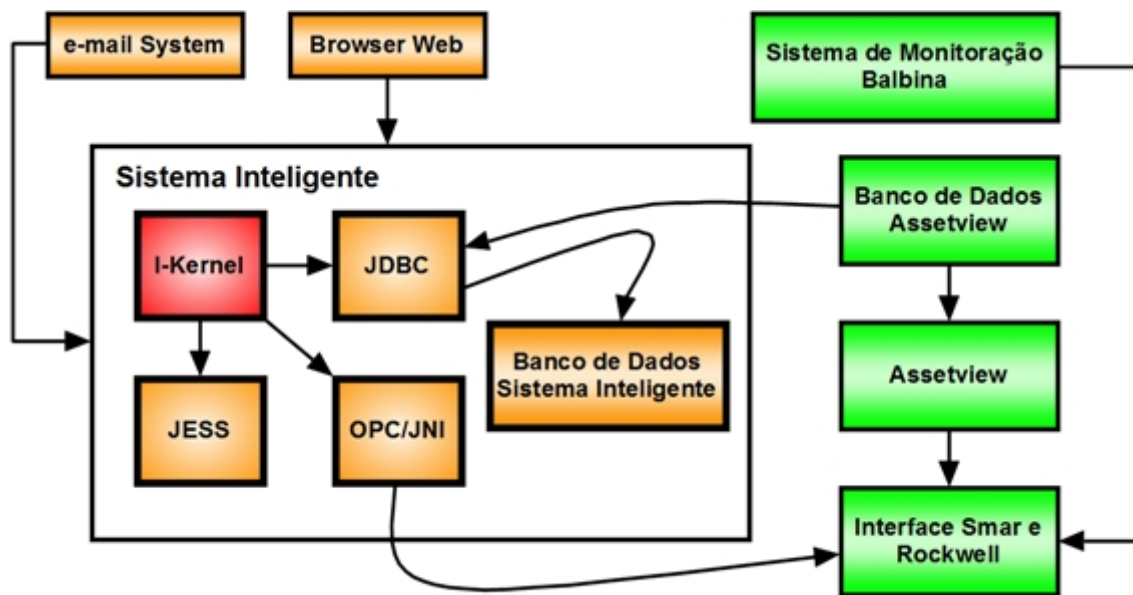


Figura 3.2: Arquitetura do sistema inteligente.

Alguns módulos não foram implementados nessa primeira versão, mais detalhes sobre a implementação serão apresentados no capítulo 5. O módulo chamado Jess é onde se encontra a base de regras e a máquina de inferência do sistema especialista. O I-Kernel realiza o processamento inteligente através do Jess e da base de regras que foi modelada com base na metodologia OSA-CBM e será apresentada posteriormente.

3.1.2 – Modelo IDEF0 (Integration DEFinition language 0)

O sistema inteligente foi modelado através da metodologia IDEF0. A figura 3.3 representa o nível 0 do modelo IDEF0 com todas as entradas, controles, mecanismos, saídas e funcionalidades que são propostas pela metodologia. Outra função do modelo é detalhar a integração do sistema desenvolvido com as demais tecnologias que serão utilizadas para fornecer as saídas do sistema.

O nível A0 do diagrama IDEF0, observado na figura 3.3, apresenta o sistema inteligente numa visão geral. Esse diagrama tem a finalidade de mostrar as entradas e as saídas do sistema sem detalhar os módulos que fazem parte do mesmo.

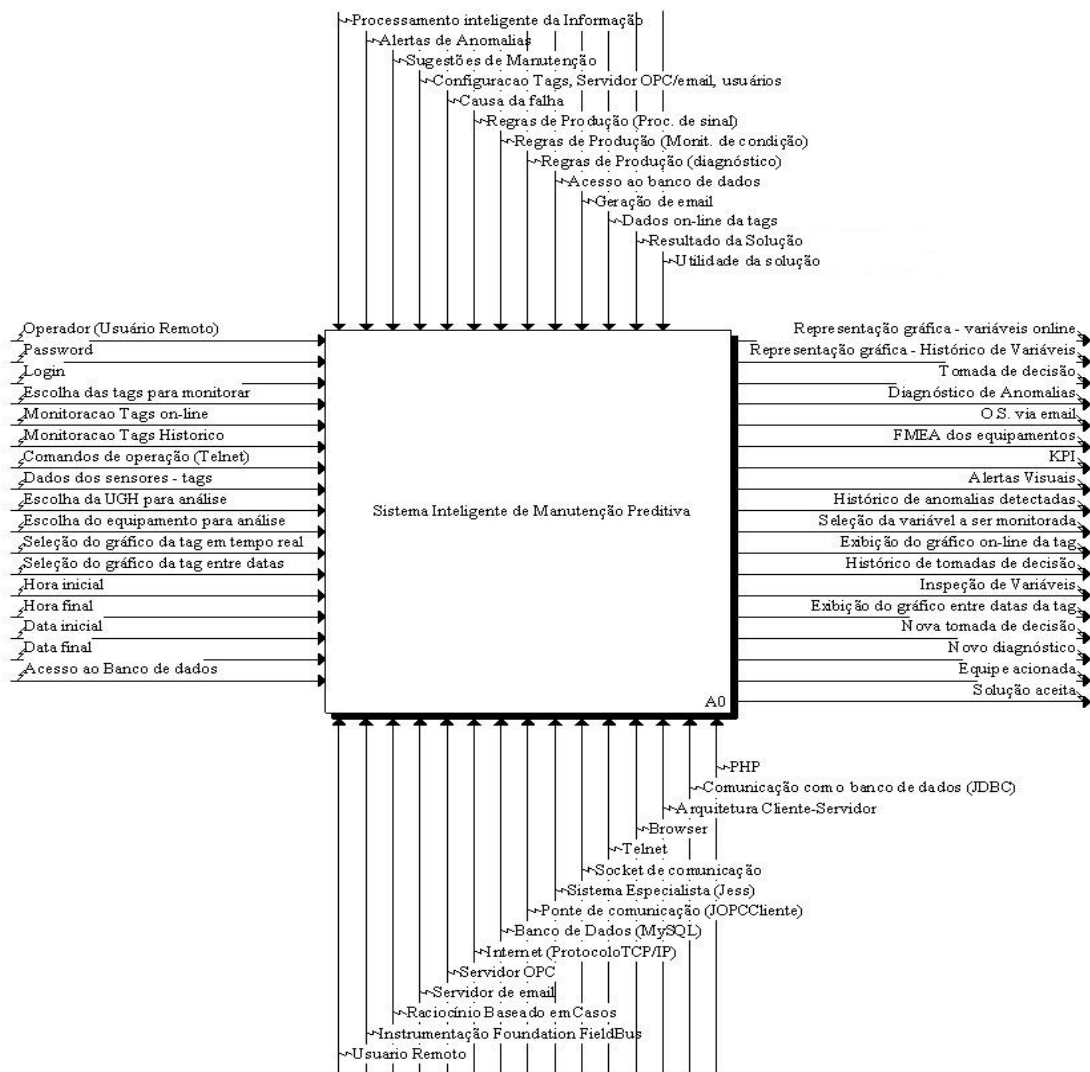


Figura 3.3: Diagrama IDEF0 - Sistema inteligente nível A0.

A figura 3.4 apresenta o nível A1 do diagrama IDEF0, nessa figura são apresentados os principais módulos do sistema inteligente. Esses módulos são: I-Kernel e a Ferramenta de Configuração e Monitoramento. A figura apresenta de forma geral as principais funções de cada um desses módulos.

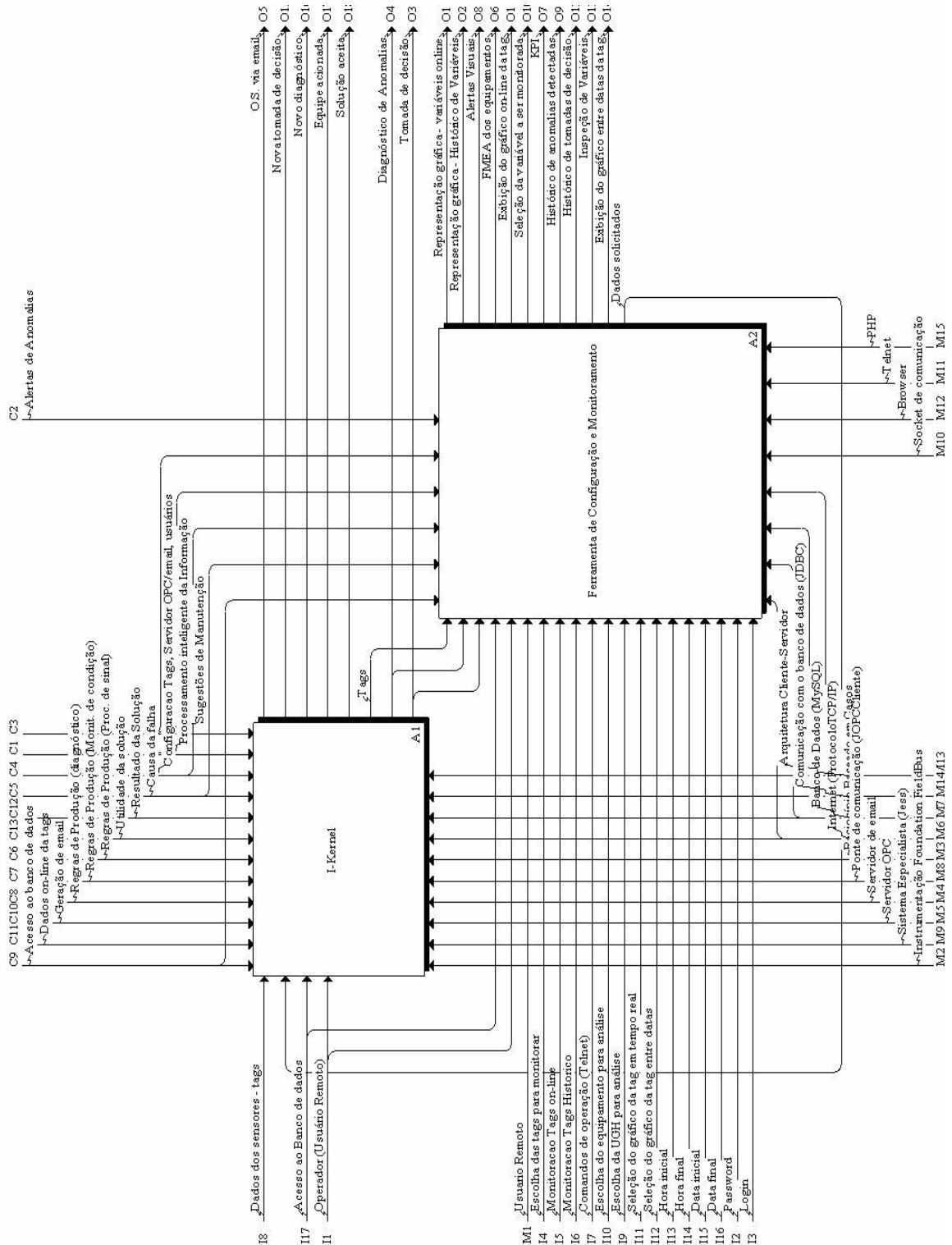


Figura 3.4: Diagrama IDEF0 - Sistema inteligente nível A1.

Observe a figura 3.4, ela ilustra de forma mais detalhada os dois principais módulos do sistema, suas entradas e saídas, e principalmente, deixa explícito quais são as funções de cada módulo. Essa figura apresenta a dependência de informação entre os módulos apresentados. Nela pode-se observar que o servidor I-Kernel fornece informações para o cliente (Ferramenta de Configuração e monitoramento).

A figura 3.5 apresenta a decomposição do servidor I-Kernel, cada bloco de atividade inclui uma tarefa que o sistema executa, a figura também mostra como a comunicação entre cliente e servidor acontece.

Pela figura é possível observar que o pacote I-Kernel se subdivide em 5 módulos (Cliente OPC, Sistema Especialista (Jess), Banco de Dados, Sistema de Email e Raciocínio Baseado em casos). O módulo Raciocínio Baseado em Casos não faz parte da implementação atual do sistema, ele é responsável pelo processo de aprendizado previsto para uma implementação futura.

Duas informações de controle, que não fazem parte da implementação atual, foram acrescentadas no modelo IDEF0. A primeira delas é “Utilização da Solução” e a segunda é “Resultado da solução”, ambas foram previstas na metodologia, mas farão parte do módulo de aprendizado. Essas duas informações de controle têm a finalidade de armazenar, junto com o diagnóstico de anomalias e a tomada de decisão, o “feedback” do usuário em relação a solução fornecida pelo sistema. As informações referidas terão o objetivo de compor a resposta do módulo de aprendizado, e ambas fazem parte da etapa de revisão da solução (maiores informações sobre a proposta serão apresentadas no capítulo 6).

A figura 3.6 apresenta a decomposição do módulo Cliente OPC. Pode-se observar que 4 módulos aparecem nessa decomposição. Eles são responsáveis por ilustrar a hierarquia das informações monitoradas pelo sistema. Compreendem desde a UHG até o grupo de tags que será monitorado pelo usuário, esse módulo permite a leitura dos valores das tags para que estes sejam apresentados pelo Cliente Applet Java.

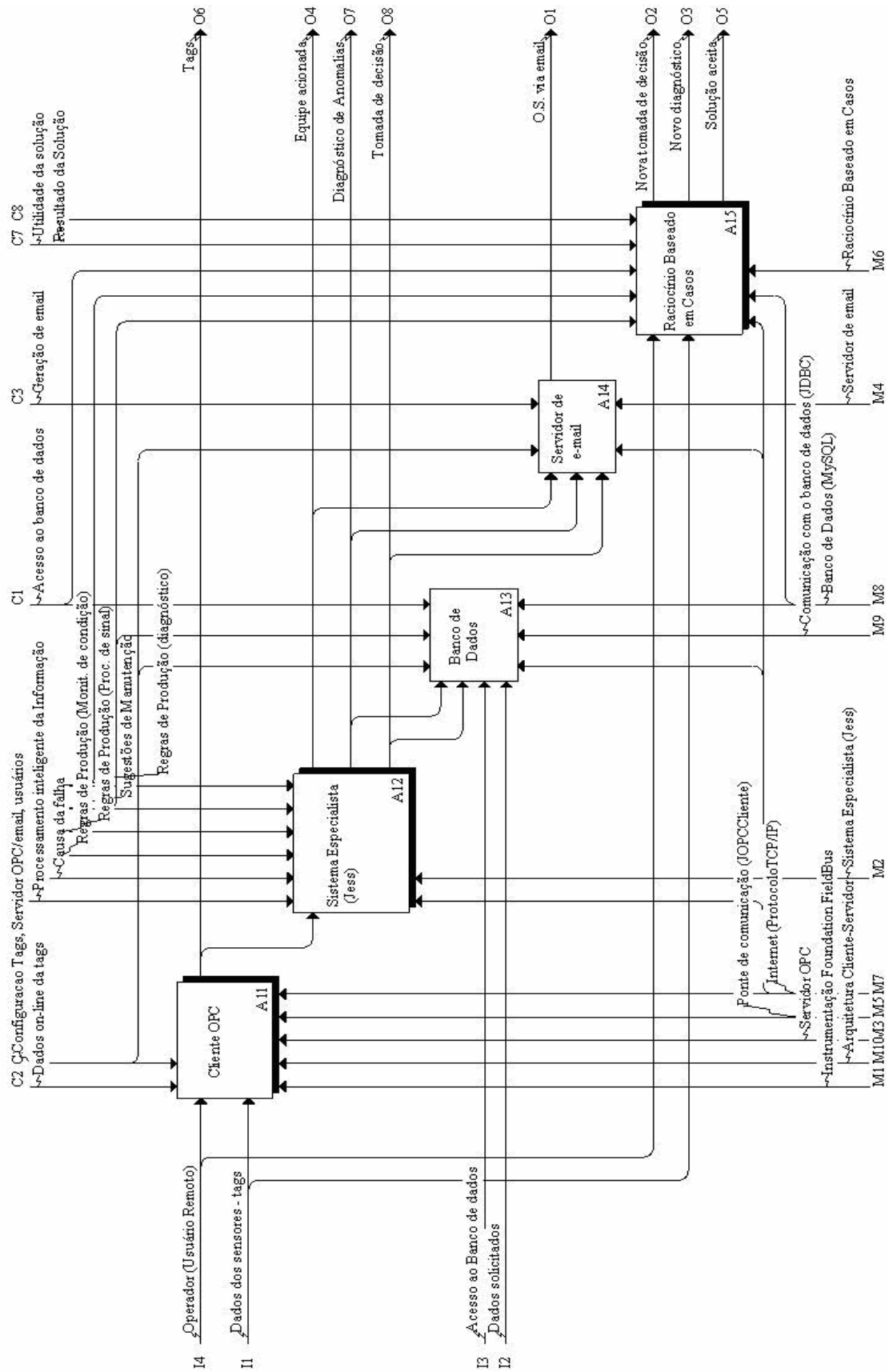


Figura 3.5: Decomposição do módulo I-Kernel.

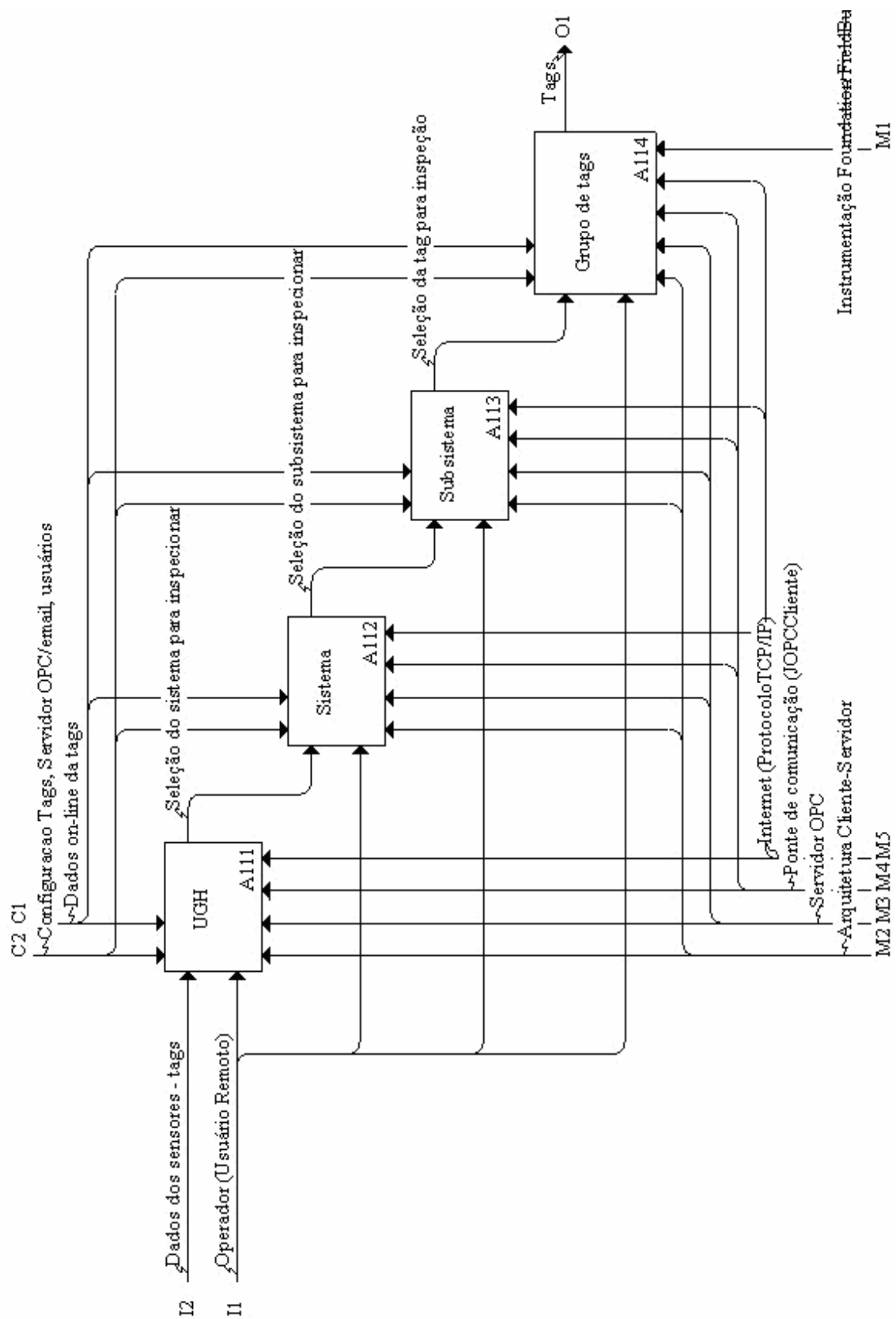


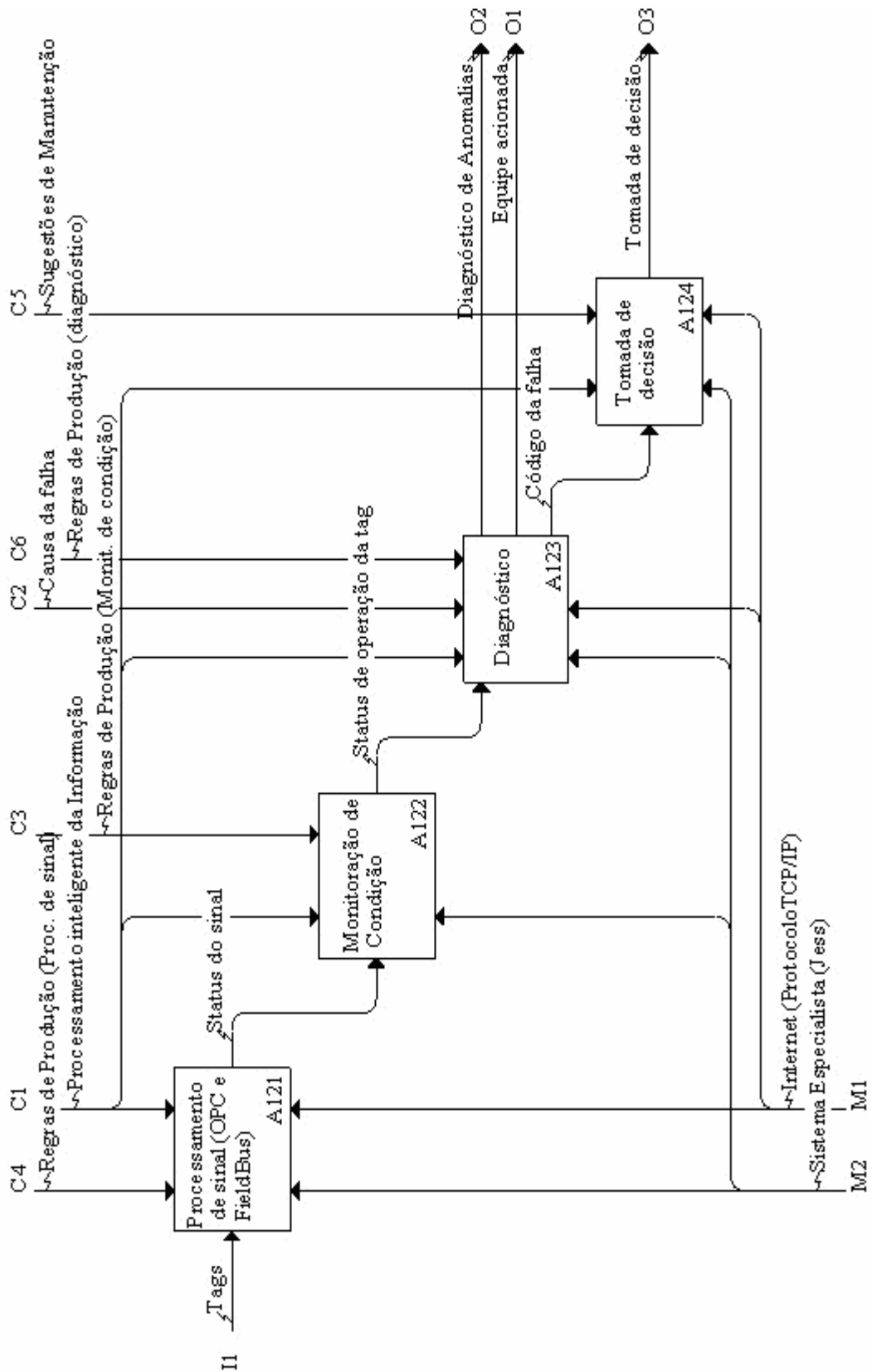
Figura 3.6: Decomposição do módulo Cliente OPC.

A figura 3.7 apresenta o detalhamento do módulo responsável pelo processamento inteligente do sistema. A decomposição apresentada segue o modelo proposto pela arquitetura OSA-CBM, porém não inclui nessa etapa todas as camadas do modelo. Algumas dessas, as duas primeiras camadas, são processadas pela rede FieldBus, as demais são processadas pelo sistema.

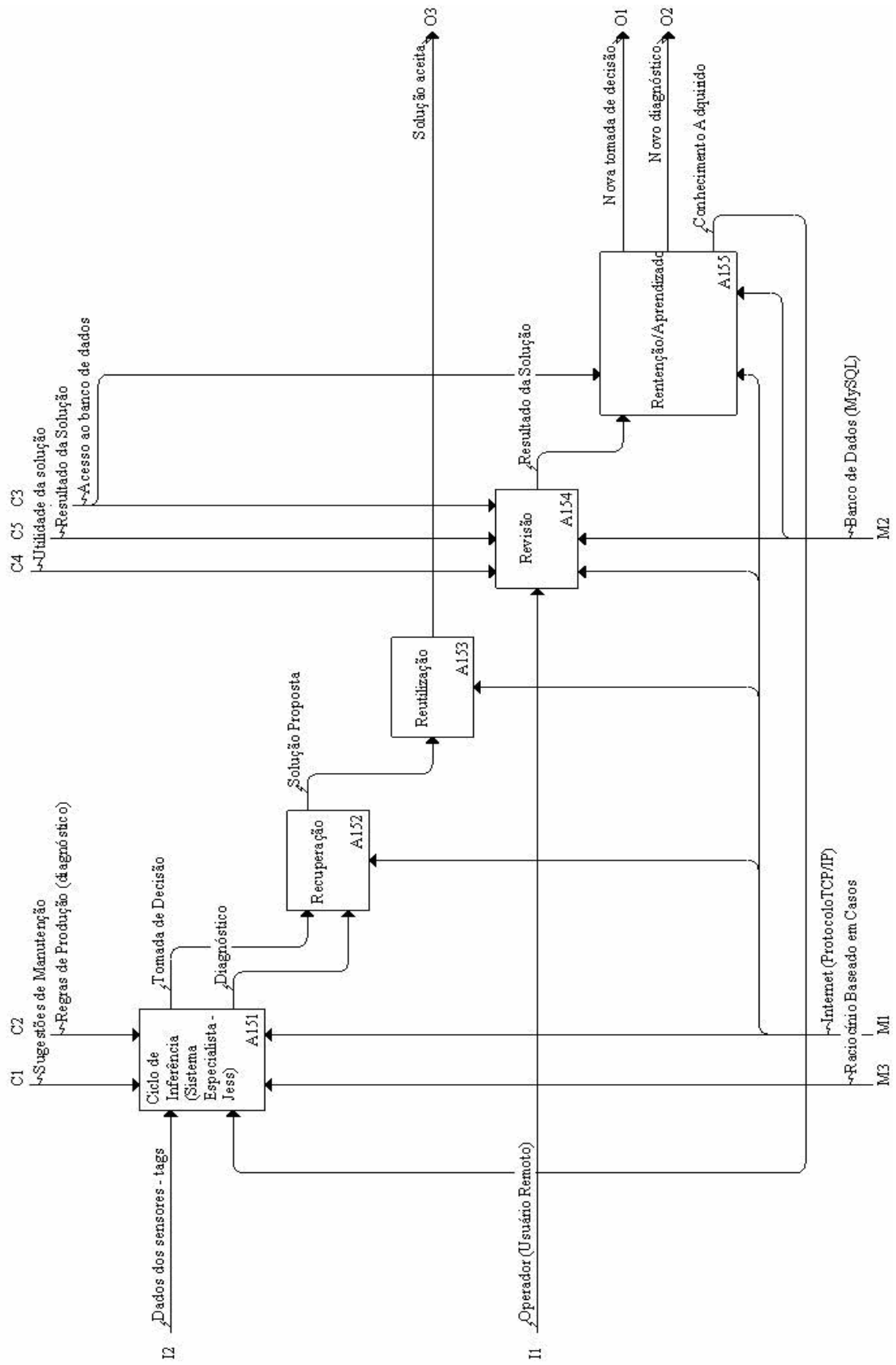
A execução começa na camada de processamento de sinal e para esta existe um bloco de regras específico. Em seguida a camada de monitoração de condição é processada e posteriormente a camada de diagnóstico. A figura 3.7 mostra as informações trocadas entre as camadas de processamento, as regras de produção de cada uma delas e finalmente a resposta fornecida. A figura 3.8 apresenta a decomposição do módulo referente ao aprendizado do sistema (Raciocínio Baseado em Casos), no capítulo 6 essa proposta é detalhada.

A figura 3.9 apresenta o detalhamento do pacote cliente do sistema. O cliente é composto por três partes que são responsáveis pela apresentação da solução do sistema, bem como a interação do usuário. Várias funções são definidas nesse módulo, dentre elas destacam-se: O sinótico, que permite ao usuário a monitoração das tags referentes aos sensores dos equipamentos; uma janela para inspeção das variáveis monitoradas; e os gráficos de tendências das tags, todas essas informações são apresentadas pelo cliente Applet Java.

O cliente *browser web*, permite o interfaceamento do sistema via internet. No *browser* estão disponíveis informações como, os históricos de anomalias e tomadas de decisão. Também estão disponíveis os detalhes do projeto, que são: os colaboradores que participaram do desenvolvimento, detalhes da usina, materiais gerados e manuais de operação do sistema. A figura 3.10 apresenta o detalhamento do cliente Applet Java e a figura 3.11 a decomposição do cliente Browser PHP/DB, ambos explicados nesse parágrafo.



3.7: Decomposição do módulo Sistema Especialista (Jess).



3.8: Decomposição do módulo: Raciocínio Baseado em Casos.

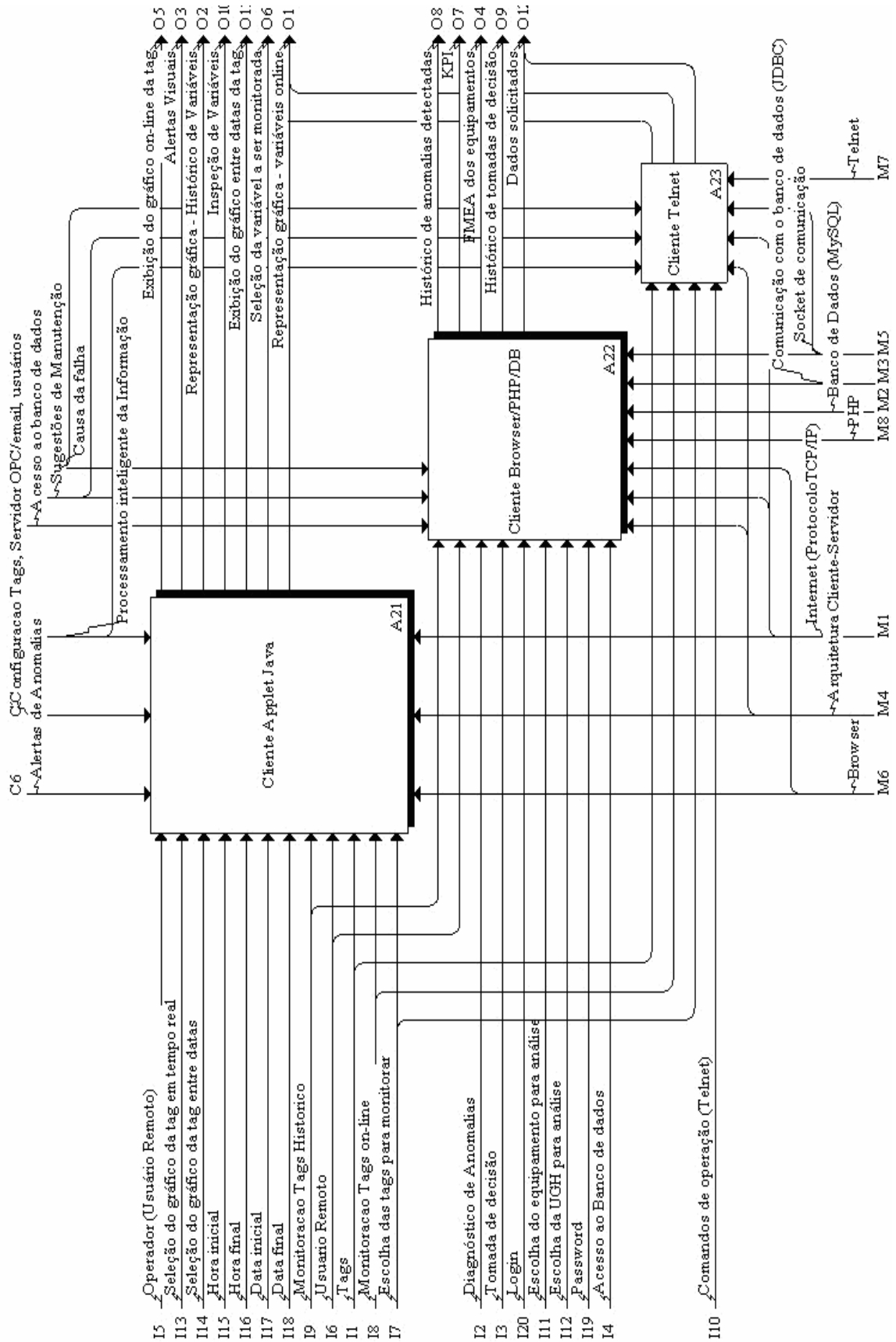
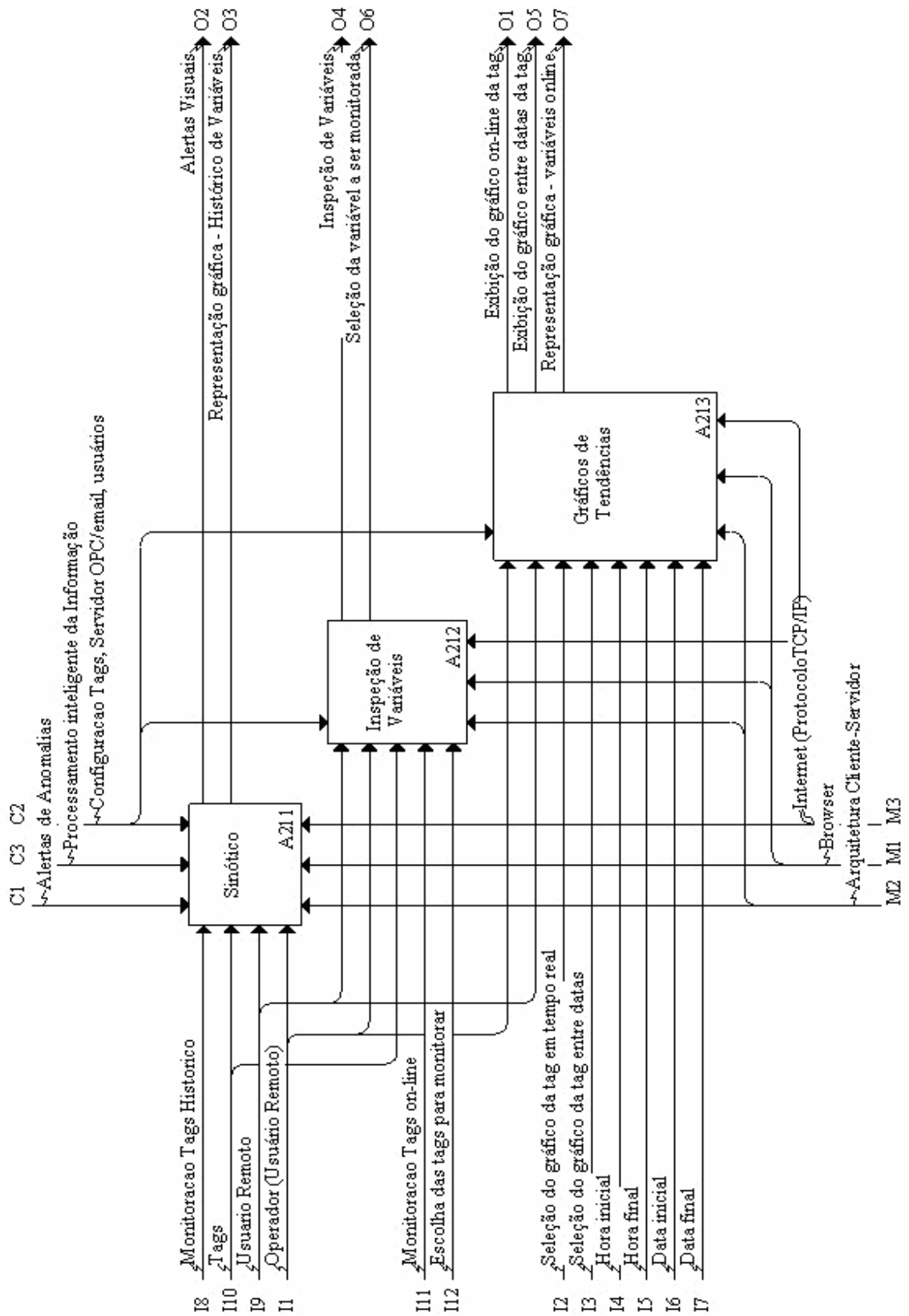
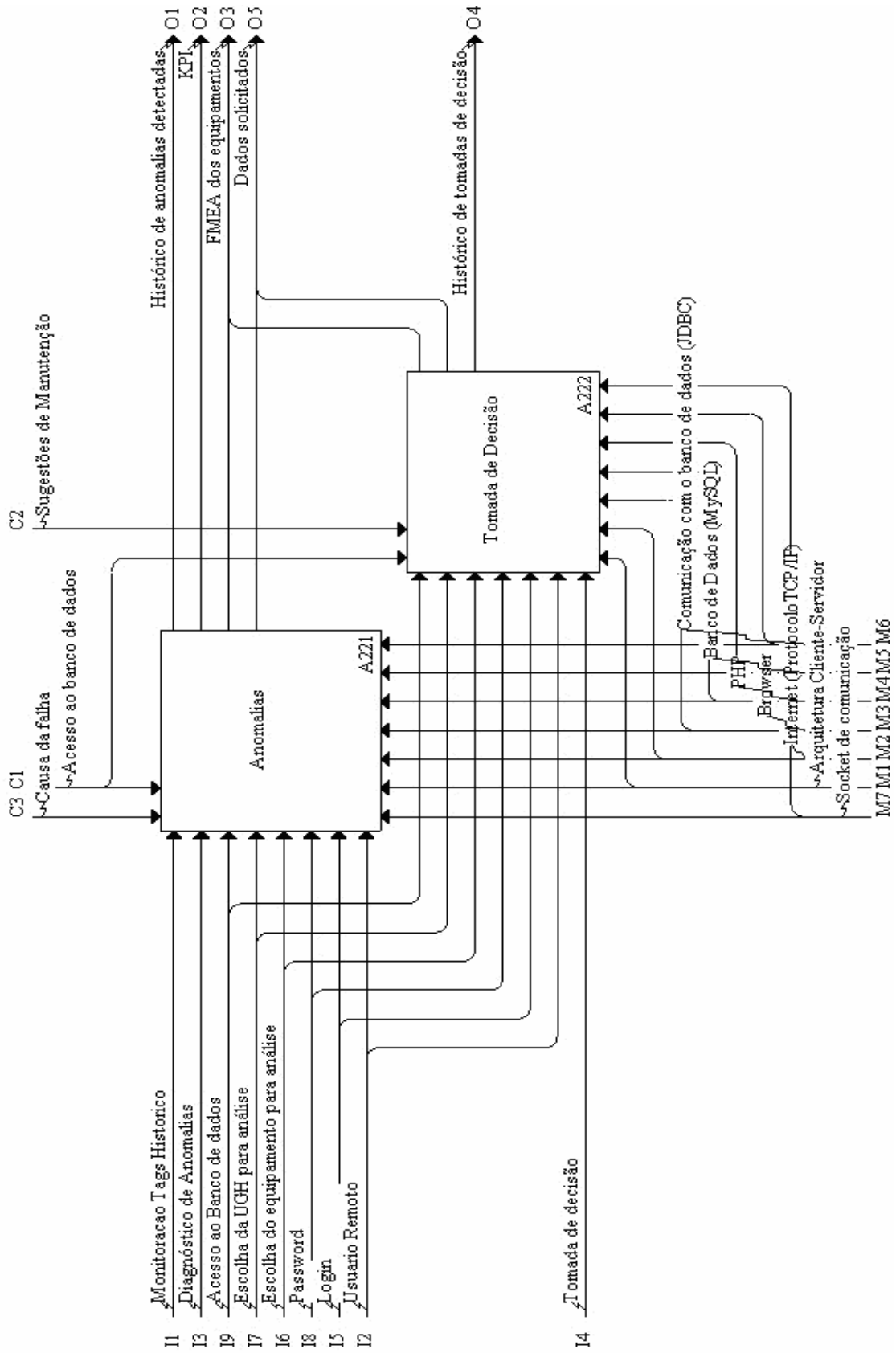


Figura 3.9: Decomposição do módulo Ferramenta de Configuração e Monitoramento.



3.10: Decomposição do Cliente Applet.



3.11: Decomposição do módulo Cliente Browser PHP/DB.

3.1.3 - Modelo de Informação IDEF1X (Integration Definition for Information Modeling)

O modelo de informação que possibilita a integração do sistema, foi concebido através da abordagem metodológica IDEF1X (banco de dados relacional), tendo os dados de anomalias e decisões referentes ao modelo de informação contida em um único diagrama IDEF1X. Foi utilizado o sistema MySQL para desenvolver o banco de dados. O diagrama IDEF1X é apresentado na figura 3.12.

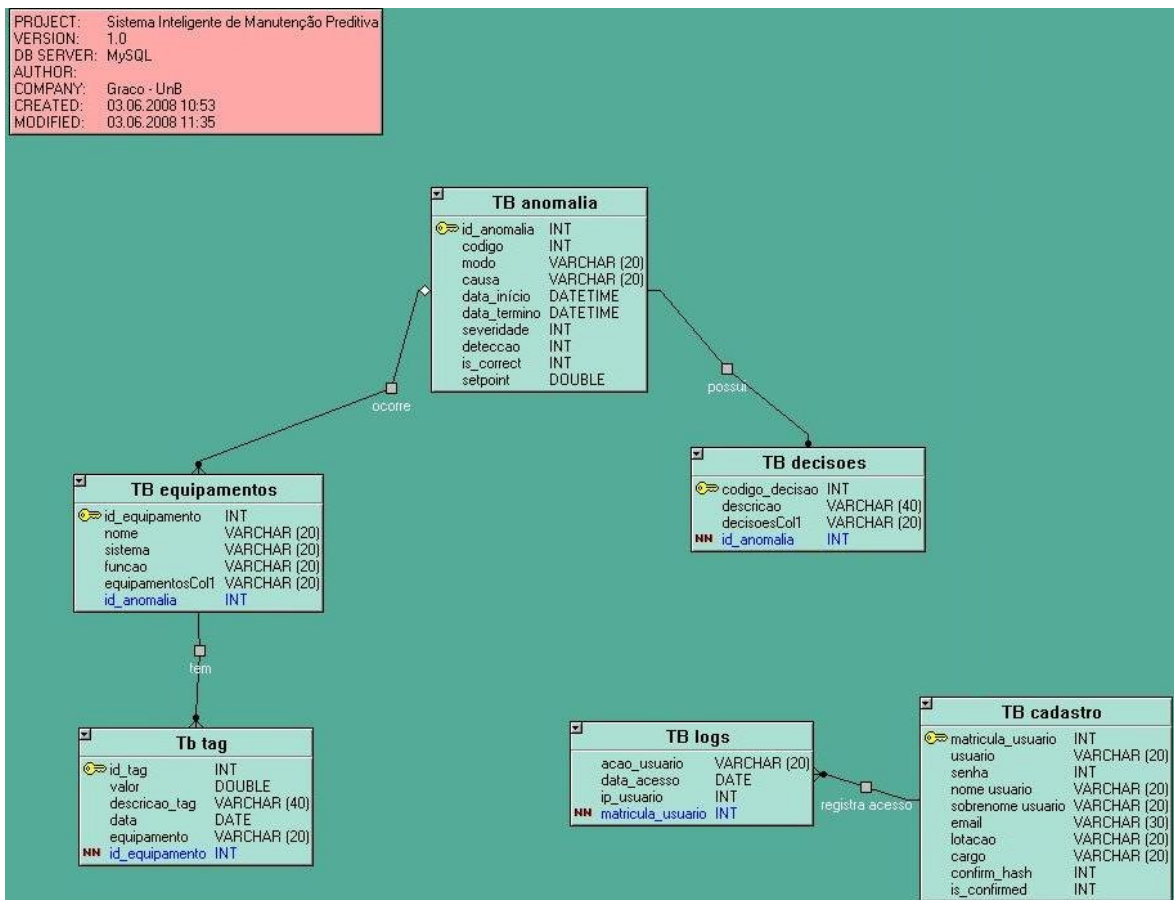


Figura 3.12: Modelo de informação IDEF1X – Sistema Inteligente de Manutenção preditiva.

O modelo de informação descreve os históricos de anomalias e tomadas de decisão de cada equipamento/tag em termos de entidades/objetos, atributos e relacionamentos, e é dividido em domínios associados às bases de dados. A versão implementada do banco de dados possui 5 tabelas para algumas das tabelas apresentadas na figura 3.12. Essas tabelas são: equipamentos, tag, decisões e anomalias. Isso ocorre, pois na usina existem 5 UGHs e cada

UGH possui o conjunto de tabelas citado anteriormente. A partir deste modelo IDEF1X é gerado o modelo físico da base de dados e o modelo conceitual do banco de dados (Álvares, 2005).

3.1.4 – Banco de Dados

Conforme definiu o projeto do sistema, o banco de dados foi desenvolvido em MySQL e se comunica com o sistema inteligente através do *driver* JDBC. O banco de dados tem a principal finalidade de armazenar os históricos de anomalias e os históricos de tomada de decisão. Entretanto, outras informações são armazenadas conforme mostra o modelo conceitual do banco de dados apresentado na figura 3.13.

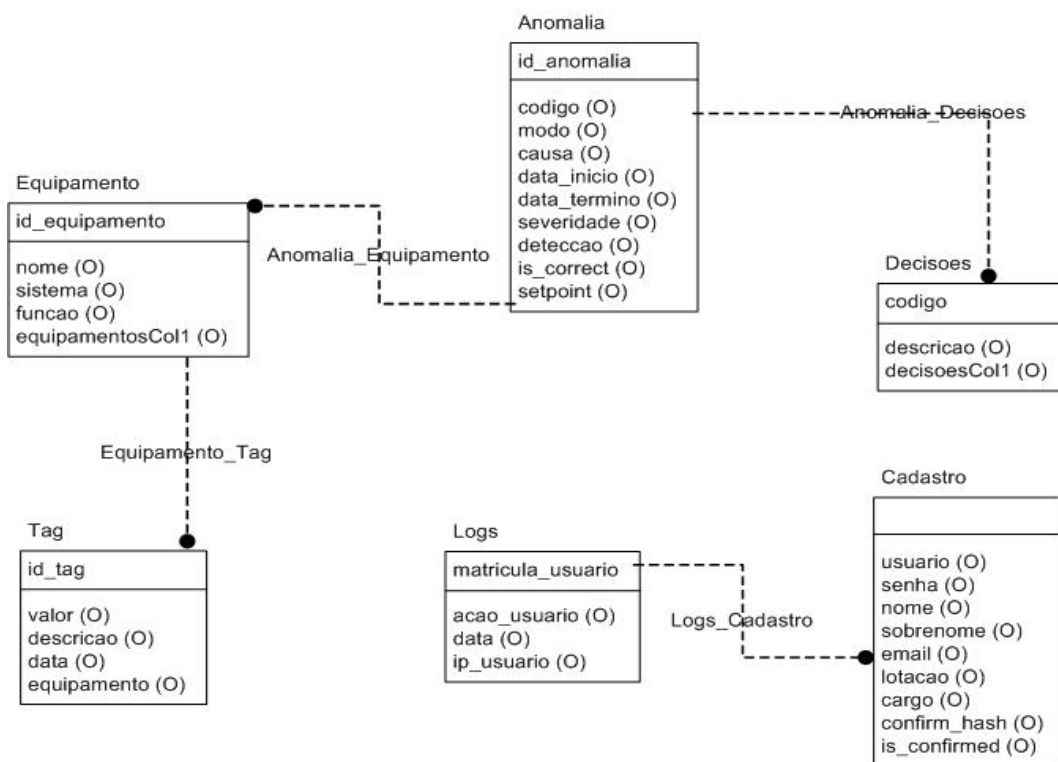


Figura 3.13: Modelo conceitual do banco de dados do sistema.

Segundo Wazlawick (2006) o modelo conceitual descreve as informações que o sistema deve gerenciar, e seus elementos básicos são: conceitos, atributos e associações. Como pode ser observado na figura 3.13 o banco de dados do sistema possui tabelas referentes a cadastro e acesso ao sistema. As tabelas que armazenam informações do sistema, são: tabela Equipamento e tabela Tag (contem informações necessárias ao processamento);

tabela Anomalia e tabela Decisões (contem informações que são as saídas geradas pelo sistema).

As tabelas de Anomalias e Decisões contem os históricos das falhas encontradas pelo sistema e as tomadas de decisão sugeridas para cada falha encontrada. Como já explicado anteriormente, as informações armazenadas nas tabelas Anomalia e Decisões auxiliarão no desenvolvimento do módulo de aprendizagem do sistema, pois elas armazenam o conhecimento gerado e este conhecimento servirá de apoio para desenvolver a nova base de conhecimento do sistema.

3.2 – METODOLOGIA PARA DESENVOLVIMENTO DE BASES DE CONHECIMENTO APLICADA À MANUTENÇÃO PREDITIVA DE TURBINAS HIDRÁULICAS

3.2.1 - Representação da Base de Conhecimento

A base de conhecimento é composta por regras de produção que processam os seguintes níveis da arquitetura OSA-CBM: 1) Processamento de sinal OPC; 2) Processamento de sinal *Foundation FieldBus*; 3) Monitoração de condição; 4) Diagnóstico; 5) Tomada de decisão. A figura 3.14 ilustra a divisão apresentada acima, os três quadros juntos indicam as camadas de regras, o quadro (código da falha) é a saída da regra e o quadro (diagnóstico da falha e tomada de decisão) a solução do problema.

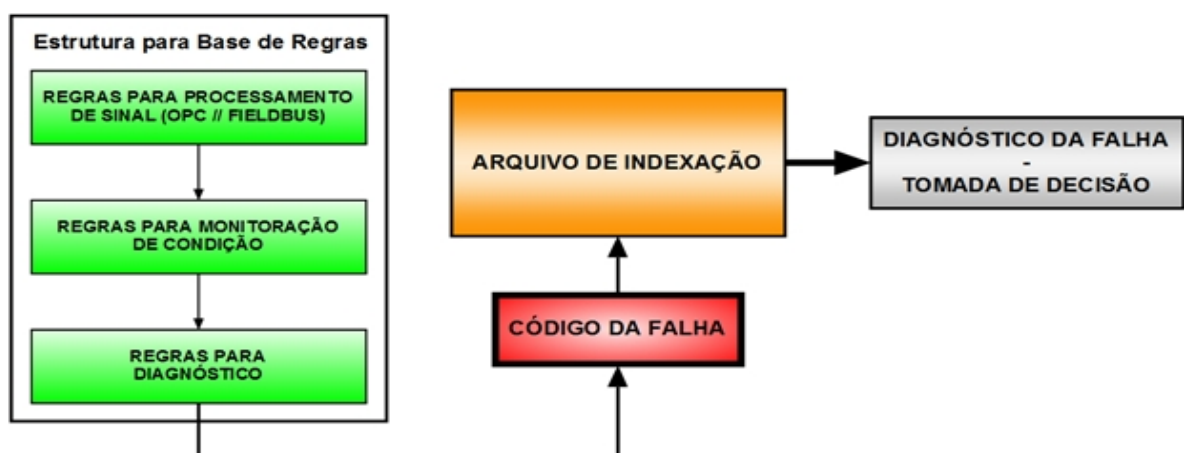


Figura 3.14: Estrutura da base de conhecimento.

A estrutura definida para o desenvolvimento de bases de regras para sistemas especialistas aplicados a manutenção preditiva, tem os seguintes níveis de organização do conhecimento:

Camada 1: Regras para processamento de sinal. Esta camada tem o objetivo de verificar o *status* do sinal *FieldBus* vindo dos sensores dos equipamentos, e o *status* do sinal OPC. Caso a qualidade do sinal seja ruim, uma ordem de serviço é enviada para que se faça a verificação no sensor instalado no equipamento. Se o *status* do sinal for bom, então o sistema prossegue a execução e avança para a próxima camada;

Camada 2: Regras para monitoramento de condição. Essa camada tem a finalidade de monitorar a condição em que os equipamentos estão operando, a saída dessa camada é o modo da falha. É na camada de monitoração de condição que o sistema verifica o valor do parâmetro de operação de cada tag, são definidos quatro estados de operação. O primeiro deles indica o estado normal de operação, ou seja, a tag monitorada possui naquele momento um valor de operação que se encontra dentro da faixa de valores aceitáveis. O segundo estado de operação é o estado de alerta, esse estado é anterior ao estado de alarme e tem a finalidade de alertar para a variação dos valores das tags permitindo a ação proativa dos operadores, é nesse estado que o sistema realiza a predição da falha. Os próximos estados são os estados de alarme e *trip*. O estado de *trip* pode ocasionar a parada da máquina, portanto este deve ser evitado, quando a tag entra no valor de alarme o valor de *trip* é alcançado rapidamente, por isso a necessidade de um valor anterior ao valor de alarme.

Camada 3: Regras para diagnóstico. Essa camada recebe como entrada a saída da camada de monitoração de condição, e fornece como saída informações da falha que ocorreu, causas prováveis da falha, e o efeito dessa falha no equipamento.

Camada 4: Tomada de Decisão. Fornece as sugestões de manutenção para solucionar o problema que a falha acarretou. Essa camada não faz parte da base de conhecimento, a regra disparada possui um código de diagnóstico e o sistema busca em um arquivo de indexação a tomada de decisão para aquele código de diagnóstico.

É importante destacar que a estrutura que foi apresentada anteriormente é usada quando o problema ocorreu para fornecer o diagnóstico e a tomada de decisão. Entretanto, o sistema é capaz de fazer manutenção preditiva evitando que possíveis falhas ocorram, e isso é realizado na camada de monitoração de condição. A partir da monitoração de condição o sistema pode calcular KPIs para fazer uma análise de tendências do equipamento com o objetivo de prever quais falhas poderão ocorrer.

3.2.2 – Coleta de Dados

A coleta de dados é o primeiro passo para gerar a base de conhecimento, pois a partir desta se consegue informação para gerar as regras e sem estas não é possível desenvolver o sistema inteligente. A etapa de coleta de dados até o desenvolvimento da base de conhecimento compreende a atividade de engenharia do conhecimento e para a execução desta tarefa foi utilizada a metodologia CommonKADS, citada no capítulo 2, como fonte de inspiração.

A figura 3.15 mostra as tarefas realizadas no processo de coleta de dados, de acordo com a metodologia CommonKADS. Os dados foram coletados de acordo com os níveis de hierarquia dos equipamentos que serão analisados. Dentre as informações coletadas, destacam-se a catalogação das falhas já ocorridas, as intervenções de manutenção para cada falha catalogada, e um estudo detalhado dos equipamentos e seu funcionamento.



Figura 3.15: Tarefas realizadas no processo de coleta de dados, de acordo com a metodologia CommonKADS.

Conforme Waterman (1986), as fontes potenciais de conhecimento são os especialistas humanos (principal fonte), livros-texto, bancos de dados, documentos com relatos de experiências e estudos. Quando a fonte de conhecimento é uma pessoa, a atividade é essencialmente um empreendimento social que requer cooperação entre o engenheiro de conhecimento e o provedor de conhecimento. Ambas as partes interpretam a situação como sua progressão e ajustam suas respostas para tornarem-se apropriadas (Cunha, 1995).

Existe uma variedade de técnicas utilizadas para obter conhecimento. Elizabeth Cordingley (Diaper, 1989), cita vários tipos de técnicas para aquisição do conhecimento, a partir de pessoas e outras fontes.

- Entrevistas: é uma atividade bi-partida, a interação entre pessoas onde interagem o entrevistador e a fonte de conhecimento humano. Baseia-se em uma estratégia de perguntas e respostas.
- Discussão Dirigida: atividade de aquisição semelhante à estratégia de pergunta/resposta da entrevista, no que diz respeito a designar relatórios verbais. É considerada como introspectiva. O provedor de conhecimento é questionado sobre o que pensa e imagina de alguma coisa de interesse do engenheiro do conhecimento. Classificada como atividade tri-partida: o engenheiro do conhecimento, o entrevistado e o mediador.
- Classificação de Tarefas: utiliza elementos de um domínio para entender como o provedor de conhecimento conceitualiza este mundo. As coisas para serem classificadas, os elementos, são obtidos de análises do domínio e escritas em pequenos cartões. Com estas informações em mãos pode-se trabalhar de várias formas.
- Julgamento: discussão dos prós e contras da abordagem proposta para comparar com alternativas que podem ser razoáveis ou preferidas. É particularmente útil como técnica de aquisição em domínios onde não há somente um modo de realizar coisas.
- Comportamental (baseando-se em observações) e registro retrospectivo (relatando aspectos lembrados de uma atividade).

Para coletar os dados necessários foram usadas algumas das técnicas citadas anteriormente, tanto a proposta por Elizabeth Cordingley (Diaper, 1989), quanto a metodologia CommonKADS. As técnicas usadas para coletar informação foram: questionário sobre

intervenções de manutenção, que foi elaborado e aplicado as equipes de operação e manutenção (este questionário encontra-se no anexo A do presente trabalho); entrevistas com os especialistas humanos; análise detalhada da “Memória Técnica da Usina”; análise das ordens de serviço executados e outros materiais.

As entrevistas foram realizadas com os especialistas que possuíam mais experiência na execução da função. Essa etapa de aquisição do conhecimento teve o objetivo de fornecer a compreensão de todo o sistema da turbina, as falhas mais frequentes, as intervenções de manutenção adotadas, dentre outras informações.

O questionário desenvolvido para a coleta de dados foi dividido de acordo com os sistemas/equipamentos existentes na usina. Foram coletadas informações como: tempo de atuação do operador na função, para que se pudesse avaliar a experiência do especialista entrevistado. A figura 3.16 apresenta os sistemas que foram considerados nessa etapa de coleta dos dados.



Figura 3.16: Sistemas analisados na etapa de coleta dos dados.

As figuras seguintes (3.17, 3.18, 3.19) detalha cada um dos sistemas, bem como seus subsistemas. Esse detalhamento apresenta de forma hierárquica todos os sistemas para os quais foram geradas as regras que compõem a base de conhecimento. Outra função desse detalhamento foi catalogar todos os sensores que seriam monitorados pelo sistema inteligente. As tarefas conseguidas com esse detalhamento foram: dividir as regras de acordo com a hierarquia dos sistemas; detalhamento do funcionamento desses equipamentos; catalogar as relações de dependência existentes entre eles; e a separação das falhas/defeitos de acordo com cada subsistema.

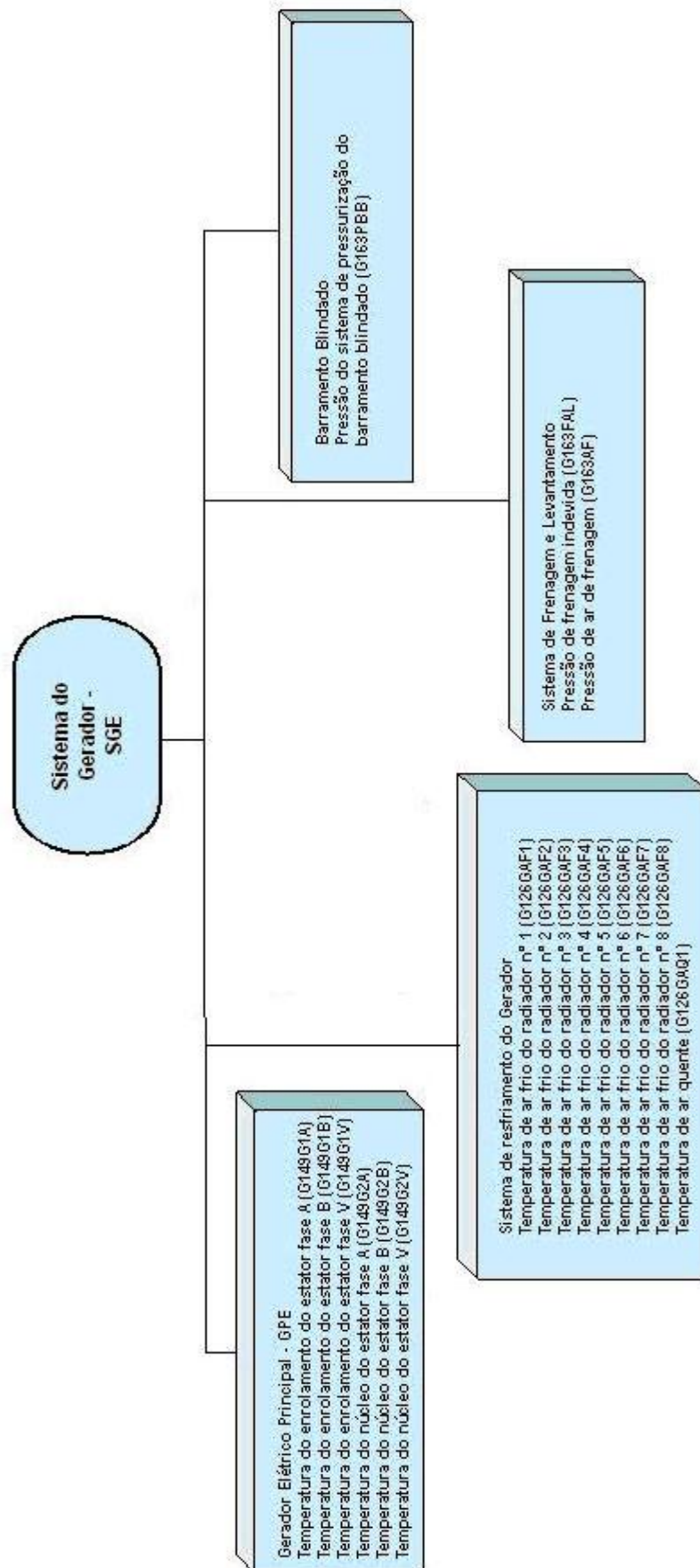


Figura 3.17: Hierarquia de equipamentos do Sistema do Gerador.

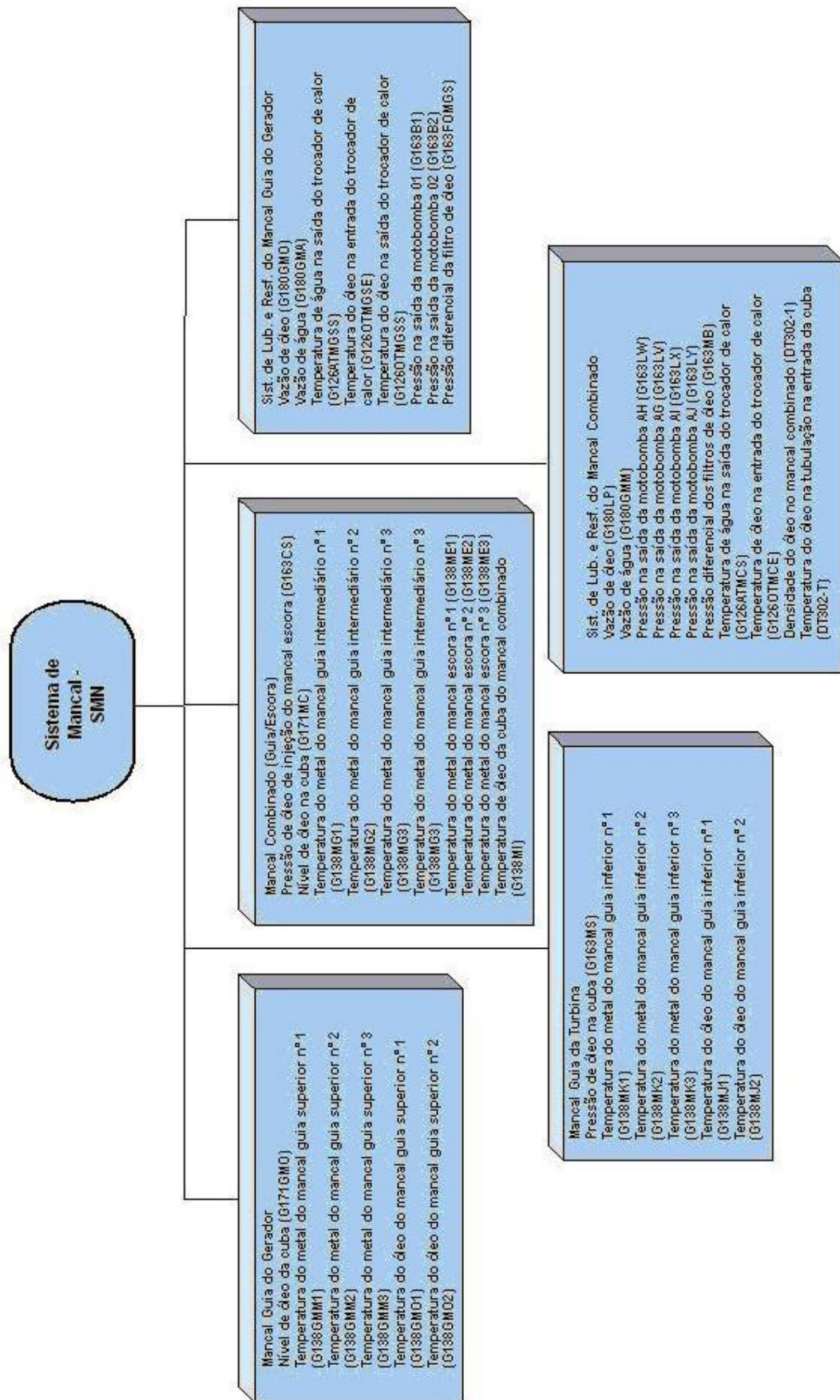


Figura 3.18: Hierarquia de equipamentos do Sistema de Mancais.

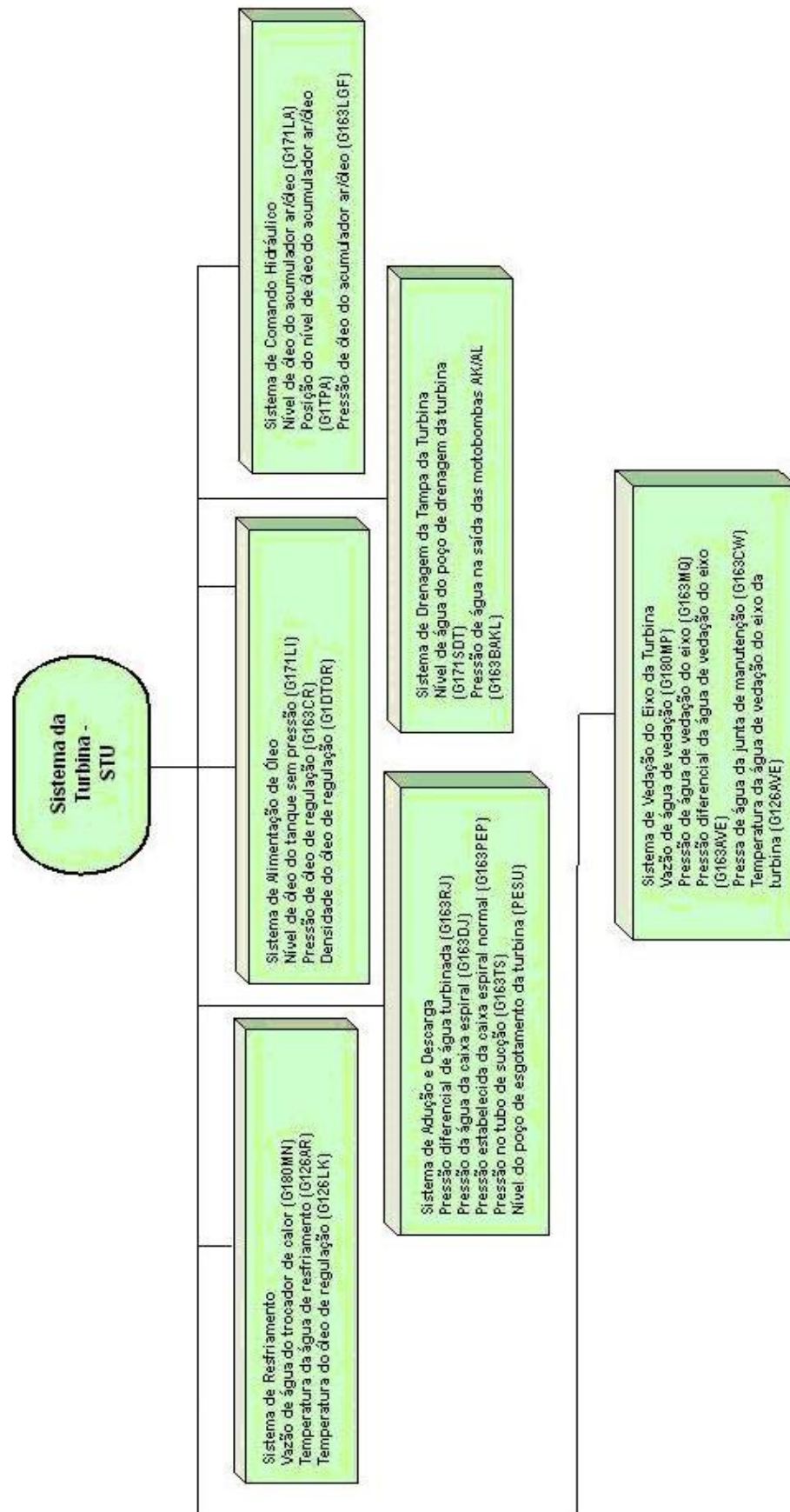


Figura 3.19: Hierarquia de equipamentos do Sistema da Turbina.

Observando as figuras 3.17, 3.18 e 3.19 nota-se que ao final de cada nome do sensor existe um código, esse código é a tag que indica o sensor no sistema de monitoramento da usina e esse padrão foi respeitado nas regras. Entretanto, essas tags não são usadas diretamente em todas as camadas de regras, em alguns lugares eles precisaram ser trocados por *labels* para facilitar o processamento dos dados.

Tanto as falhas catalogadas, quanto as regras que serão geradas exprimem o conhecimento que foi adquirido através dos dados coletados na usina. A partir de uma primeira versão das regras a base de conhecimento foi gerada e em seguida refinada através de mais entrevistas com os especialistas objetivando garantir a acurácia das regras e atender à estrutura proposta.

3.2.3 – Procedimento para Gerar Regras em Alto Nível para os Equipamentos da Usina

A coleta de dados permitiu catalogar as falhas e defeitos já ocorridos na usina, além de possibilitar a identificação dos equipamentos que serão analisados e posteriormente monitorados pelo sistema. Os equipamentos analisados e os sensores monitorados foram apresentados nas figuras 3.17, 3.18 e 3.19. As informações prioritizadas para o desenvolvimento das regras foram: identificar as possíveis faixas de operação; as falhas ocorridas; e as falhas que não ocorreram ainda em cada equipamento; e determinar a tomada de decisão adotada pela equipe de operação e/ou manutenção para as falhas já ocorridas.

Considere a tag G163LGF referente à pressão de óleo do acumulador ar/óleo, do sistema de comando hidráulico do sistema da turbina, veja figura 3.19. A figura 3.20 apresenta um exemplo das informações encontradas para tal tag.



Figura 3.20: Exemplo de informações encontradas para a tag G163LGF.

O exemplo apresentado na figura 3.20 mostra que na etapa de coleta de dados todas as informações são listadas juntas e escritas em português estruturado. A parte superior da regra (começando com a palavra-chave “se”) é referente à camada monitoração de condição e esses valores (intervalo de valores que indicam os *status* normal, alerta, alarme e *trip*) foram consultados no sistema de monitoramento da usina. Em seguida tem-se a falha que pode ocorrer para cada estado e a decisão que indica a tomada de decisão adotada para a falha. Uma vez encontradas todas as falhas o passo seguinte é gerar as regras na linguagem declarativa Clips e separá-las nas camadas definidas na figura 3.14.

3.2.4. – Arquivos de Regras

O sistema inteligente aplicado à manutenção preditiva é um sistema especialista baseado em regras de produção. Todo sistema especialista possui uma base de conhecimento na qual fica armazenado o conhecimento utilizado no sistema. Durante o processamento inteligente é essa base de conhecimento que auxilia o raciocínio do sistema. Estes arquivos

são gerados em formato .txt (do bloco de notas) usando a linguagem Clips e depois são salvos com a extensão .clp. As regras de produção, no geral, seguem a estrutura abaixo:

Se teste de condição 1

Então

Ação X

Elas são formadas por um conjunto de estruturas Se...então... . A linguagem Clips segue a mesma idéia, porém com sintaxe diferente.

(defrule SISTEMA-ON ;;**Nome da regra**

(Tag{label == "_sistemaoff" && value == "0"}) ;;**Se teste de condição**

=> ;;então

(assert (SISTEMA ON)) ;;**Ação X**

As regras em Clips necessitam ter um nome para que se possa diferenciar uma regra da outra. No exemplo acima o nome da regra é SISTEMA-ON. Após definido o nome da regra inicia-se o teste de condição. No exemplo acima o teste de condição verifica se o *label* de nome sistemaoff recebe o valor 0. Isso significa que o *label* sistemaoff recebe o valor 0 que é equivalente a falso, pode-se concluir que se sistemaoff é falso, então sistemaon é verdadeiro. É exatamente isso que a parte referente à ação (assert (SISTEMA ON)) quer dizer. Assim, a ação está definida e a regra encerrada.

No sistema inteligente proposto no presente trabalho, a base de conhecimento é composta por 16 arquivos com extensão .clp. Estes são divididos de acordo com o número de DFIs que existe na Usina (são três DFIs para cada UGH): 1a, 1b, 1c, 2a, 2b, 2c e assim sucessivamente até as DFIs referentes à UGH 5, essa divisão separa os sensores em canais de comunicação. Existe ainda um arquivo chamado regras.clp que testa a conexão do sistema. Tal divisão tornou-se necessária porque a quantidade de regras geradas era muito grande para um único arquivo, outro fator determinante foi a otimização do ciclo de inferência do sistema. Com as regras em um único arquivo o sistema pode levar muito tempo na execução do ciclo de inferência devido à quantidade de regras, e isto afeta a resposta final. Então, as regras foram separadas por canal de comunicação e foi criado um arquivo que deve ser testado primeiro (regras.clp). Este arquivo de regras também é responsável por nortear o teste das demais regras, se a falha estiver ocorrendo no canal 1

da UGH 1, então o arquivo testado será `regrasdfi1a.clp`. Essa estratégia se chama meta-regras e tem a finalidade de garantir que só as regras referentes à falha serão testadas, isso evita o processamento desnecessário de informação.

O arquivo `regras.clp` tem a finalidade de testar a comunicação do sistema com o servidor OPC. Se estiver conectado, o sistema testa a comunicação com as DFIs. Testa também se as tags estão mudando de valores a cada 10 minutos, se isso não estiver acontecendo significa que o servidor está “travado”. Após esses testes, e se tudo estiver funcionando corretamente, os outros arquivos de regras serão executados conforme as falhas aparecerem. A figura 3.21 apresenta como os arquivos de regras estão organizados e a quantidade de arquivos que a base de conhecimento contém.

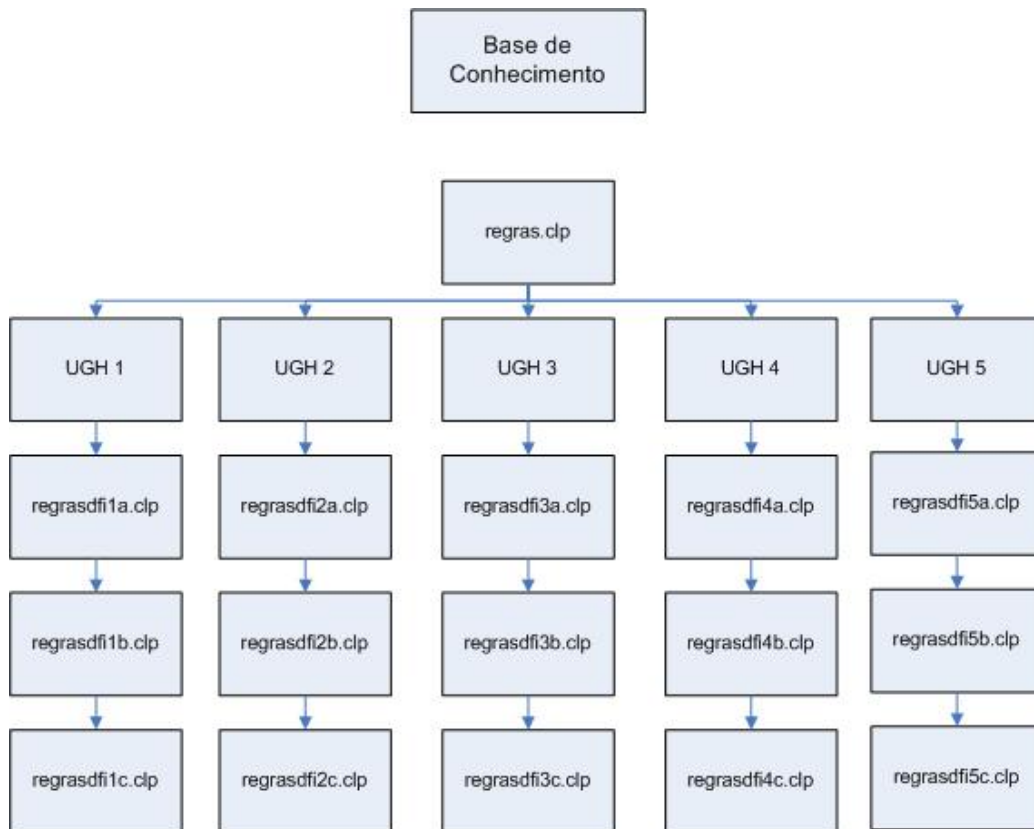


Figura 3.21: Organização dos arquivos de regras.

O teste de falhas começa com o bloco de regras chamado “OPC Servers”, em seguida vêm as regras referentes à conexão do sistema (bloco de regras chamado SIMPREBAL), e finalmente as regras referentes ao teste das DFIs. Estas são organizadas em blocos, um bloco de regras para testar se está *online* e outro para testar se está *offline* para cada uma das 5 DFIs e cada DFI possui três canais de comunicação (a, b e c).

O arquivo `regrasdfi1a.clp` faz o teste para todas as tags que estão presentes na DFI 1a. O primeiro bloco de regras testa o processamento de sinal OPC da DFI, o segundo bloco de regras testa o processamento de sinal *Fieldbus* da DFI. Depois o sistema executa as regras de acordo com a metodologia apresentada na figura 3.14.

Para fazer uma alteração na faixa de valores de uma regra basta procurar o *label* da tag no arquivo “`config.ini`”, que será descrito no capítulo 5. Uma vez encontrado esse *label* procure pelo mesmo no arquivo de regras e prossiga com a alteração:

```
(defrule UGH1-GEP-MonitoracaoCondicao-1
  (Tag {label == "g1.gep.t.enrol.a" && value != "" && value <= "105"})
  =>
  (assert (condition-NORMAL ?label))
)
```

O *label* (`g1.gep.t.enrol.a`) indica o nome que foi usado na regra para referenciar a tag real. Se for alterado um valor referente à condição NORMAL (na regra “`MonitoracaoCondicao-1`”, o valor definido foi 105) cuide para que as regras seguintes, referentes às condições HIGH/LOW, ALARM, TRIP, não percam a coerência.

Ainda na monitoração de condição, existe um conjunto de regras responsáveis por atribuir uma condição a tag de cada *label* usado nas regras descritas anteriormente. Observe a regra denominada “`MonitoracaoCondicao-23`”:

```
(defrule UGH1-GEP-MonitoracaoCondicao-23
  (signal-GOOD "g1.gep.st.t.enrol.a")
  (condition-NORMAL "g1.gep.t.enrol.a")
  =>
  (assert (condition G149G1A-normal))
)
```

A finalidade da regra “`MonitoracaoCondicao-23`” é testar de forma combinada a condição do sinal (observe o *label* na regra acima), e a condição de operação (`g1.gep.t.enrol.a`). Se o sinal estiver bom a tag (`G149G1A`) recebe a condição definida, que pode ser normal, alto/baixo, alarme e *trip*. Esse mesmo procedimento se repete para cada uma das tags que

fazem parte dessa DFI e estão correlacionadas com as faixas de valores definidas para os *labels* referentes as tags, conforme foi explicado mais acima.

Outra camada do arquivo `regrasdfi1a.clp` é a camada de diagnóstico. Essa camada recebe como entrada a saída da camada monitoração de condição e fornece como saída informações como: a falha que ocorreu, causas prováveis da falha e o efeito dessa falha no equipamento. O primeiro diagnóstico realizado nessa camada está relacionado com a comunicação OPC. Tal regra testa se todos os canais de comunicação estão conectados e caso ocorra alguma falha nesses canais de comunicação o sistema envia uma mensagem para o banco de dados. Note a regra “Diagnostico-1”:

```
(defrule UGH1-OPC-Diagnostico-1
  (or (COM-BAD-0 "g1.srg.st.t.arfrio.rad1")
      (COM-BAD-0 "g1.srg.st.t.arfrio.rad2")
      (COM-BAD-0 "g1.srg.st.t.arfrio.rad3")
      (COM-BAD-0 "g1.srg.st.t.arfrio.rad4")
      (COM-BAD-0 "g1.srg.st.t.arfrio.rad5")
      (COM-BAD-0 "g1.srg.st.t.arfrio.rad6")
      (COM-BAD-0 "g1.srg.st.t.arfrio.rad7")
      (COM-BAD-0 "g1.srg.st.t.arfrio.rad8")
      (COM-BAD-0 "g1.srg.st.t.arquente")
      (COM-BAD-0 "g1.gep.st.t.enrol.a")
      (COM-BAD-0 "g1.gep.st.t.enrol.b")
      (COM-BAD-0 "g1.gep.st.t.enrol.v")
      (COM-BAD-0 "g1.gep.st.t.nucleo.a")
      (COM-BAD-0 "g1.gep.st.t.nucleo.b")
      (COM-BAD-0 "g1.gep.st.t.nucleo.v")
      (COM-BAD-0 "g1.mgg.st.t.metal.mguia.sup1")
      (COM-BAD-0 "g1.mgg.st.t.metal.mguia.sup2"))
  =>
  (assert (diagnostic G1A-canal1-0))
)
```

A regra testa o sinal OPC de todas as tags que estão contidas nesse canal de comunicação (veja os *labels* contidos na regra), se houver erro o sistema enviará um código para o banco

de dados (G1A-canal1-0) indicando que ocorreu uma falha de comunicação no canal especificado da UGH.

Uma vez testadas as falhas nos canais de comunicação o sistema começa a testar as falhas do sinal *Fieldbus*. Veja a regra denominada “Diagnostico-1”:

```
(defrule UGH1-GEP-Diagnostico-1
  (signal-BAD-0 "g1.gep.st.t.enrol.a")
  =>
  (printout gui14 "gep-amarelo#")
  (printout gui12 "G149G1ASIND0#electronics#")
)
```

A falha testada na regra “Diagnóstico-1” é de sinal, e foi indicada pelo código (signal-BAD-0). Para cada *label* existe cinco regras variando de 0 a 4. Se a falha ocorrer, as regras mandam para o sistema uma mensagem (printout gui14 "gep-amarelo#") indicando que (na interface gráfica) a janela, referente à UGH que apresentou a falha, deve piscar em amarelo para sinalizar a falha. As regras ainda enviam outra mensagem para o banco de dados, com o código da falha e qual a equipe responsável deve ser acionada por email.

O diagnóstico das falhas nos equipamentos é feito seguindo as faixas de valores determinadas na camada de monitoração de condição. Então, existe uma regra na camada de diagnóstico para os estados de alerta, alarme e *trip* (no exemplo abaixo, alto) de cada tag. Observe as regras “Diagnostico-31” e Diagnostico-32” e Diagnostico-33”:

```
(defrule UGH1-GEP-Diagnostico-31
  (condition G149G1A-alto)
  =>
  (printout gui14 "gep-amarelo#")
  (printout gui11 "G149G1AD1#operators#")
)
(defrule UGH1-GEP-Diagnostico-32
  (condition G149G1A-alarme)
  =>
```

```

(printout gui14 "gep-vermelho#")
(printout gui11 "G149G1AD2#electricians#")
)
(defrule UGH1-GEP-Diagnostico-33
(condition G149G1A-trip)
=>
(printout gui14 "gep-vermelho#")
(printout gui11 "G149G1AD3#electricians#")
)

```

Se a falha ocorrer as regras mandam para o sistema uma mensagem (printout gui14 ...) indicando que a janela referente ao equipamento deve piscar, na cor indicada na mensagem, para sinalizar a falha. As regras ainda enviam outra mensagem para o banco de dados, com o código da falha, e qual a equipe responsável deve ser acionada por email. Todos os procedimentos descritos para o arquivo regrasdfila.clp valem para os outros arquivos de regras de cada uma das DFIs. O anexo C apresenta os arquivos de regras regras.clp e regrasdfila.clp.

3.2.5 – Processamento Inteligente

O processamento inteligente do sistema inicia com a aquisição de dados via OPC, tais dados são os valores das tags monitoradas e servem de entrada para o sistema é a partir dessas informações que o sistema inteligente começa o raciocínio. O raciocínio do sistema (ou processamento inteligente) é a ação de executar as regras de acordo com as entradas, ou seja, comparar os valores de entrada com os valores definidos nas regras. Para cada valor de entrada existe uma ação definida na base de regras. Considere a regra apresentada na figura 3.22:

```

(defrule UGH1-GEP-MonitoracaoCondicao
(Tag {label == "g1.gep.t.enrol.v" && value != "" && value <= "105"})
=>
(assert (condition-NORMAL ?label))
)

```

Figura 3.22: Regra de Produção em Clips.

A regra apresentada na figura 3.21 foi desenvolvida para monitorar a condição da tag definido no rótulo “g1.gep.t.enrol.v”. A variável “value” recebe o valor da tag e esse valor é comparado posteriormente com o valor determinado na regra (no exemplo acima o valor é “105” e a condição definida é “normal”). Quatro faixas de valores são definidas: normal, alerta, alarme e *trip* (esses valores já foram explicados anteriormente).

A regra apresentada na figura 3.22 faz parte da segunda camada da estrutura definida para desenvolvimento de bases de regras, e a execução das regras pelo sistema inteligente segue o esquema definido na figura 3.14. O processamento inteligente do sistema e todos os passos de execução podem ser observados na figura 3.23.

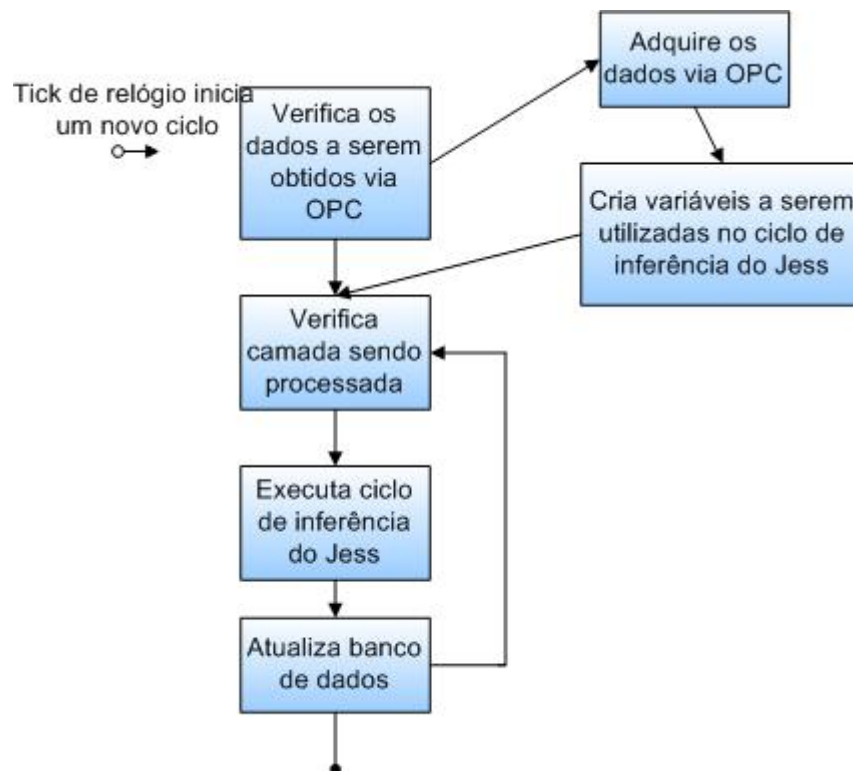


Figura 3.23: Processamento inteligente do sistema.

Durante a execução do processamento inteligente o sistema estabelece conexão com o banco de dados para gravar as anomalias detectadas e a tomada de decisão sugerida para cada anomalia diagnosticada pelo sistema. A comunicação OPC tem a finalidade de obter dados dos equipamentos de campo e são esses dados que serão monitorados. O próximo passo de execução é associar os valores das entradas aos rótulos definidos nas regras, que são as variáveis utilizadas pelo Jess. Para cada tag é associado um rótulo, todas as

associações estão definidas num arquivo de configuração que será explicado posteriormente.

O próximo passo é verificar a camada que está sendo processada e executar o ciclo de inferência do Jess. O ciclo de inferência executa todas as camadas contidas na base de regras. Caso seja detectada alguma falha durante o ciclo de inferência o sistema apresenta o diagnóstico da falha e sugere a tomada de decisão mais adequada, essas últimas informações são armazenadas no banco de dados e poderão ser utilizadas posteriormente para auxiliar no aprendizado do sistema.

Esse capítulo apresentou a metodologia proposta para desenvolvimento de sistemas especialistas aplicados a manutenção preditiva enfocando a proposta de uma metodologia para gerar base de conhecimento. O próximo capítulo apresenta o projeto do sistema, tal projeto foi desenvolvido com a metodologia proposta neste capítulo.

4 – ESPECIFICAÇÃO E PROJETO DO SISTEMA

Este capítulo tem o objetivo de apresentar o projeto do sistema proposto na metodologia apresentada nos capítulos anteriores, uma análise de requisitos foi desenvolvida durante a etapa de projeto e, a partir dessa análise, foi possível detectar os requisitos funcionais, não-funcionais e os requisitos de sistema. As próximas seções apresentam todos os detalhes da etapa de projeto, bem como os diagramas de caso de uso gerados.

Propósitos básicos:

1. Decidir e descrever os requisitos físicos do sistema;
2. Decidir e descrever os requisitos funcionais do sistema;
3. Prover uma descrição clara e consistente do que o sistema deve fazer;
4. Prover a base para a realização de testes que validam e verificam o sistema;
5. Prover facilidades para rastrear requisitos funcionais dentro das classes e operações do sistema.

4.1 – REQUISITOS FÍSICOS

Para implementar a metodologia apresentada anteriormente, torna-se necessário o desenvolvimento de um subsistema de aquisição de dados e processamento. O sub-sistema, chamado de I-Kernel, visa o apoio à construção do sistema inteligente de manutenção preditiva, a idéia é construir um sub-sistema genérico desenvolvido em linguagem Java, capaz de realizar a aquisição dos dados a partir de bancos de dados e equipamentos acessíveis via OPC. O processamento será por meio de regras convencionais, nas camadas definidas no capítulo 3.

Com o objetivo de tornar o desenvolvimento do I-Kernel uma atividade mais rápida, propõe-se integrar diversos componentes já existentes, promovendo um desenvolvimento orientado ao reuso. Da mesma forma, o I-Kernel, dada sua concepção na forma de um componente de software, poderá ser reutilizado em projetos futuros que demandem soluções de processamento inteligente envolvendo o processamento de regras.

Dentre os componentes que serão integrados encontram-se as ferramentas Jess – *Java Expert System Shell* para implementar a máquina de inferência e realizar o processamento

das regras, o JDBC para acessar o banco de dados e o JNI para o acessar aos servidores OPC que se comunicam direto aos equipamentos. Uma visão geral desta proposta pode ser observada na figura 3.2.

Para o desenvolvimento do sistema inteligente é necessário que exista uma rede industrial ligando o sistema aos sensores conectados nos equipamentos de campo, o OPC (via rede *FieldBus*) faz a comunicação entre o sistema inteligente e os equipamentos. Na estrutura geral do sistema, existe uma série de computadores do tipo PC, onde diferentes serviços estão instalados (observe a figura 4.1).

O diagrama, apresentado na figura 4.1, mostra diferentes máquinas, porém, estes serviços podem estar instalados todos em uma mesma máquina. A única restrição que se apresenta neste sentido é que tanto o módulo ConfMonitToolApp como o módulo I-KernelApp precisam estar instalados na mesma máquina. Essa restrição ocorre, pois o módulo ConfMonitToolApp será um Applet Java que utilizará a rede para se comunicar com o módulo IkernelApp, provendo dessa forma uma arquitetura cliente/servidor na qual o módulo ConfMonitToolApp é o cliente e o módulo IkernelApp é o servidor. A estrutura geral dos requisitos físicos do sistema pode ser observada na figura 4.1.

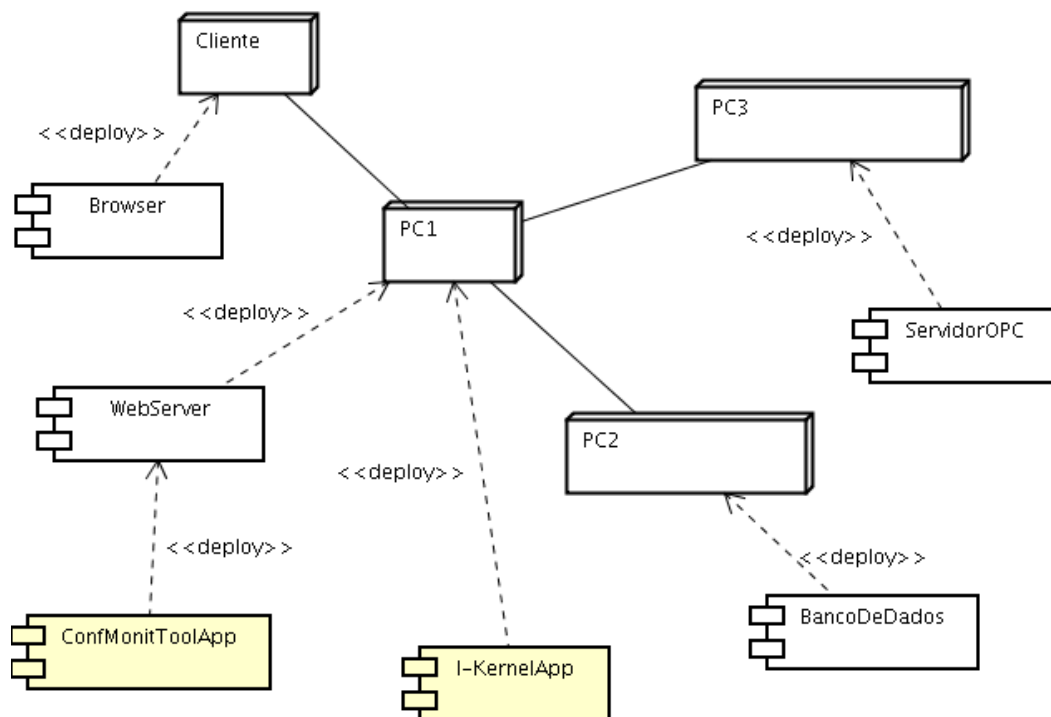


Figura 4.1: Requisitos físicos do sistema inteligente.

Os módulos não marcados na figura 4.1 não fazem parte do desenvolvimento, pois são softwares que serão reutilizados. Entretanto, o sistema deve interagir com tais módulos, o que justifica sua indicação na figura 4.1. Dentre os serviços que serão incorporados por reuso, estão um servidor *Web*, um Banco de Dados compatível com o JDBC e um servidor OPC que deve ser acessível por meio de JNI.

Os componentes de software que serão desenvolvidos (aplicativos I-KernelApp e ConfMonitToolApp) serão disponibilizados na forma de arquivos JAR e deverão ser executados independentemente por meio de uma máquina virtual Java. O módulo I-KernelApp é uma aplicação Java responsável pela aquisição de dados dos equipamentos da usina, por meio do banco de dados e dos equipamentos via OPC, seu processamento inteligente acontece visando detectar situações de manutenção preventiva, e eventualmente sugestões de tomada de decisão. O módulo ConfMonitToolApp é um Applet Java, carregado a partir de uma página *Web* armazenada no servidor *Web*, e é responsável pelas tarefas de configuração de parâmetros, bem como o monitoramento ativo das variáveis consideradas importantes, exibidas por meio de um sinótico (Álvares, 2006).

4.1.1 – Arquitetura do Sistema

A arquitetura do sistema pode ser visualizada nas figuras 4.2, 4.3, e 4.4. O pacote i-kernel é ilustrado na figura 4.2, e inclui as classes necessárias para implementar o módulo I-KernelApp (Gudwin, 2006). O pacote confmonittool é ilustrado na figura 4.3, e também inclui as classes necessárias para implementar o módulo ConfMonitToolApp.

Essa arquitetura visa projetar um conjunto de classes básicas para a implementação das aplicações. A arquitetura proposta tem a função de apresentar a referência que foi usada na implementação. Detalhes de implementação não foram aqui considerados, o capítulo 5 apresentará o sistema implementado e suas funções.

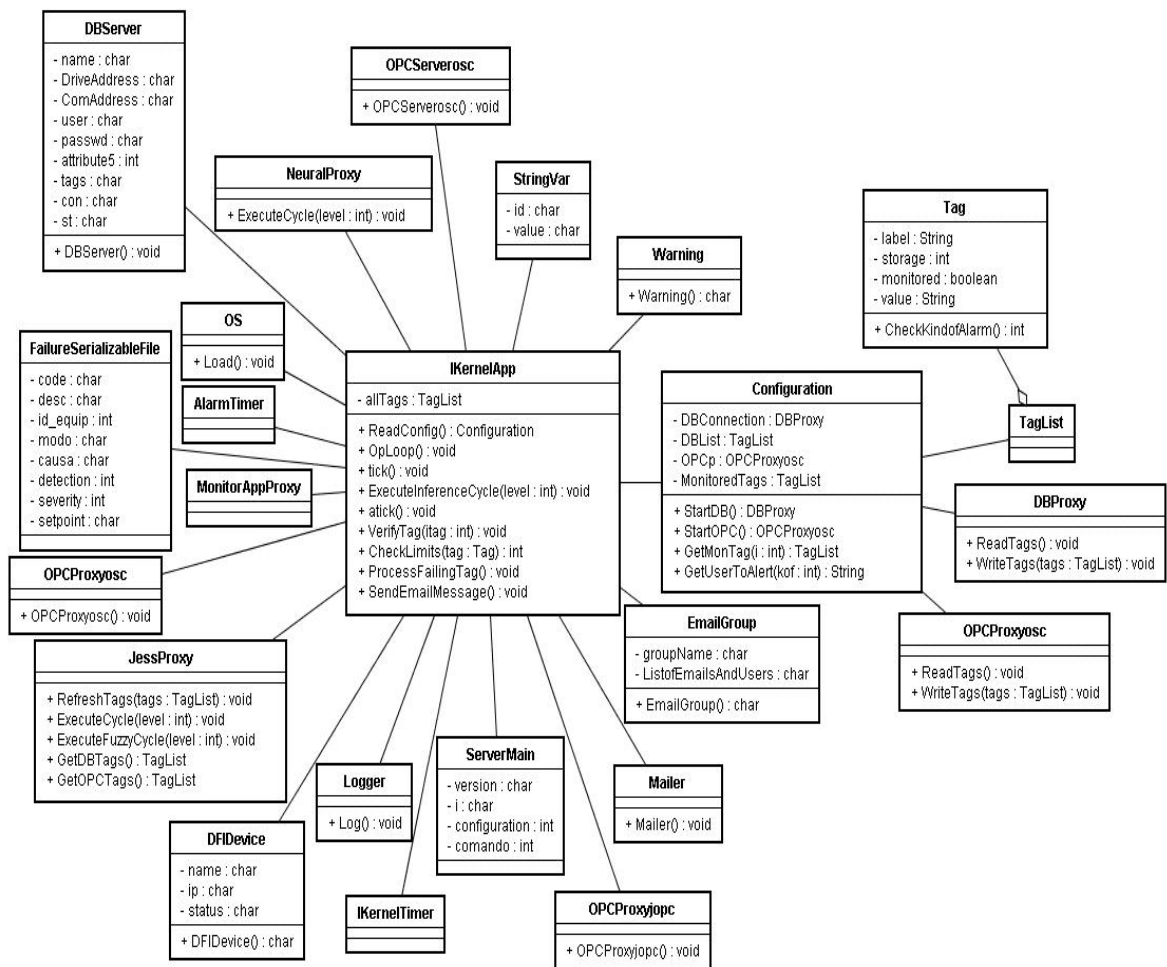


Figura 4.2: Diagrama de classes - Pacote I-KernelApp.

O pacote I-KernelApp é o módulo servidor e é responsável pelo processamento inteligente do sistema. Suas principais classes são OS, NeuralProxy, Configurations, e JessProxy. Essas classes são responsáveis pelo envio de OS (que são as ordens de serviço), comunicação com a rede neural (para o módulo de aprendizado que ainda não será implementado nessa versão do sistema), configurações das tags, banco de dado, comunicação OPC, e a comunicação com o Jess que executa a base de regras, respectivamente.

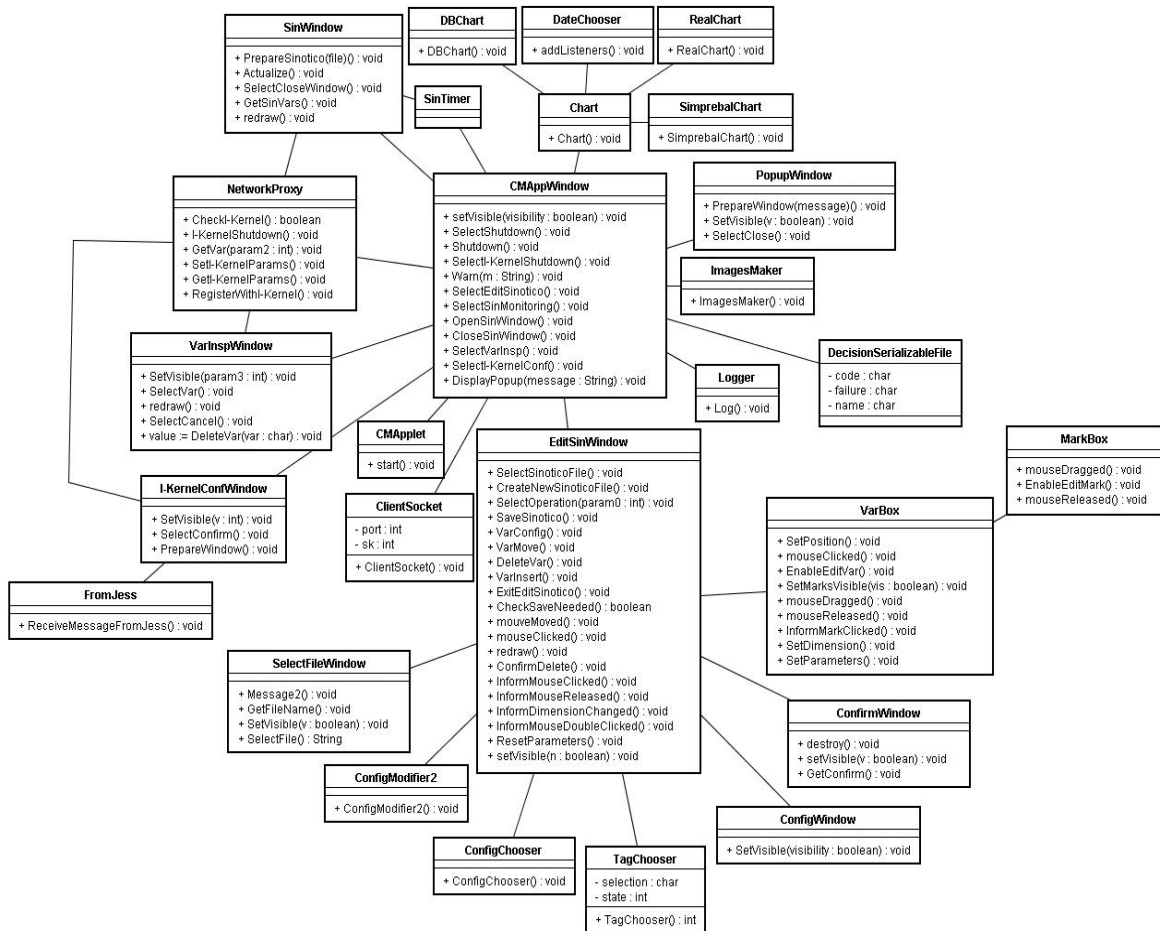


Figura 4.3: Diagrama de classes - Pacote Conmonitool.

O pacote conmonitool é módulo cliente do sistema, sendo responsável pela interface com o usuário, oferecendo sinótico e outras funções. As principais classes do pacote são: VarInspWindow, SinWindow, VarBox, CMAAppWindow, NetworkProxy. Essas classes são responsáveis pela inspeção de variáveis, sinótico do sistema, caixa de texto contendo as tags monitoradas, a tela principal do sistema, e a comunicação com a rede respectivamente. Com esse pacote completa-se a arquitetura cliente/servidor do sistema com as principais funções que foram projetadas para implementação.

4.2 – REQUISITOS FUNCIONAIS

Os requisitos funcionais do sistema descrevem as funcionalidades desejadas pelos clientes, ou seja, o que se espera que o software faça (Pressman, 1995). A Norma ISO/IEC 9126 (URL: <http://www.iso.org>) define seis características de qualidade de software que devem ser avaliadas:

- Funcionalidade (finalidade do produto);
- Usabilidade (esforço para utilizar, aprender o produto);
- Confiabilidade (frequência de falhas, recuperabilidade);
- Eficiência (característica relacionada ao desempenho);
- Manutenibilidade (esforço necessário para modificar);
- Portabilidade (capacidade de transferir o produto para outros ambientes).

De acordo com exposto acima foram definidos os requisitos funcionais para o sistema inteligente e esta definição segue uma lista detalhada de suas funcionalidades de acordo com (Simeón *et al.*, 2007), (Álvares, 2006).

- Requisito Funcional 1: O sistema deve acessar os dados da Usina a partir dos equipamentos de controle, por meio de um servidor OPC que disponibiliza as informações *on-line* dos equipamentos.
- Requisito Funcional 2: O sistema deve processar esses dados na forma de um sistema especialista baseado em regras, possibilitando a implementação futura do módulo de aprendizado.
- Requisito Funcional 3: O sistema deve alertar o usuário por meio de mensagens de e-mail quando possíveis falhas forem diagnosticadas.
- Requisito Funcional 4: O sistema deve alertar o usuário por meio de um alerta visual, quando as falhas forem diagnosticadas. Tal função será oferecida por um sinótico contendo certo conjunto de variáveis monitoradas, escolhidas pelo usuário, que devem compor uma tela de apresentação.
- Requisito Funcional 5: O sistema deve exibir o valor *on-line* das variáveis sendo monitoradas. Tais variáveis devem ser selecionadas para serem apresentadas no sinótico, apresentando-as em uma tela própria previamente desenvolvida. Também deverá ser apresentado gráfico de tendência para as variáveis.
- Requisito Funcional 6: O sistema deve permitir a implementação futura de algum mecanismo de aprendizagem, de tal forma que os históricos de falhas e tomadas de decisão anteriores possam ser utilizados para prevenir o aparecimento de novas falhas.
- Requisito Funcional 7: O processamento das informações ocorrerá na forma de um ciclo operacional com a seguinte seqüência:

- 1 . Verificação dos Dados a serem adquiridos.
- 2 . Aquisição de Dados via OPC.
- 3 . Armazenamento provisório de todos os dados em variáveis do JESS.
- 4 . Para cada uma das N camadas possíveis de processamento:
 - 4.1 Processamento das regras via JESS.
 - 4.2 Processamento das Regras *Fuzzy*, via Fuzzy-JESS.
 - 4.3 Processamento dos dados via Redes Neurais.
- 6 . Atualização dos Dados no Banco de Dados.
- 7 . Atualização dos Dados via OPC..

É importante lembrar que as funções 4.2 e 4.3 não farão parte da primeira versão implementada do sistema, elas são apenas uma proposta e deverão ser desenvolvidas em versões futuras.

4.3 – REQUISITOS NÃO-FUNCIONAIS

Os requisitos não-funcionais compreendem os atributos e restrições do sistema relacionados à manutenção, uso, desempenho, custo e interface. Os requisitos não-funcionais são críticos para o sucesso de sistemas de software e estão diretamente relacionados com a satisfação dos usuários (Pressman, 1995). Devido a essa importância, alguns requisitos funcionais podem ser sacrificados para atender às restrições impostas pelos requisitos não-funcionais.

Diante disso foram definidos os requisitos não-funcionais para o sistema inteligente e esta definição segue uma lista detalhada de suas funcionalidades de acordo com (Simeón *et al.*, 2007), (Álvares, 2006).

- Requisito Não-Funcional 1: O sistema deve ser desenvolvido na linguagem Java.
- Requisito Não-Funcional 2: As regras do sistema não devem ser armazenadas diretamente em código-fonte, mas devem ser editáveis e estar disponíveis externamente em um arquivo modificável. A linguagem de desenvolvimento deve ser a linguagem declarativa CLIPS.
- Requisito Não-Funcional 3: O sistema deve possuir uma interface *web* de acesso por meio da qual o usuário possa configurar o sistema, editar regras e parâmetros,

monitorar as variáveis processadas pelo sistema, e a interface deve ser desenvolvida em linguagem PHP.

- Requisito Não-Funcional 4: O sistema deve se conectar a bancos de dados SQL (*Structured Query Language*) genéricos, desde que exista um *driver* JDBC para o respectivo banco de dados.
- Requisito Não-Funcional 5: O sistema deve se comunicar com os sensores da planta a partir da rede *FieldBus* e para tanto será usada a ferramenta JOPCClient.
- Requisito Não-Funcional 6: Para processar as regras na forma de sistema especialista, o sistema deve utilizar o pacote JESS.
- Requisito Não-Funcional 7: O sistema deve ser concebido de tal forma que as regras clássicas, possam ser usadas de modo equivalente para cada uma das camadas de processamento (monitoração de condição, avaliação de saúde, diagnóstico, tomada de decisão).

4.4 – REQUISITOS DO SISTEMA

O capítulo 2 apresentou exemplos de sistemas aplicados à manutenção baseada em condição e a metodologia OSA-CBM, que serviram de base para a elaboração dessa proposta e posterior implementação do sistema. Jacobson *et al.*, (1999) apresentam um processo de desenvolvimento unificado, no qual os requisitos do sistema devem ser especificados na forma de casos de uso. A figura 4.4 apresenta um diagrama de caso de uso com a visão geral do sistema.

Conforme já foi apresentado anteriormente, o sistema é composto de duas aplicações: a aplicação I-Kernel e a aplicação de Configuração e Monitoramento. A aplicação I-Kernel é um servidor que não possui interface com o usuário. Desta forma, a única coisa que o usuário pode fazer é iniciar a aplicação. Além disso, um *timer* previamente programado envia “*ticks*” periódicos que iniciam um ciclo operacional de processamento inteligente e da mesma forma faz a verificação de alarmes e alertas.

A aplicação de Configuração e Monitoramento é uma aplicação *web*, destinada a promover a configuração de parâmetros do I-Kernel, o monitoramento das variáveis sob controle do sistema e a solicitação de *shutdown* do I-Kernel. Este monitoramento pode ser direto do

estado das variáveis, selecionando uma variável dentre todas aquelas disponíveis, ou pode ser por sinótico. No monitoramento direto de variáveis escolhe-se a variável a ser monitorada e o sistema exibe seu estado diretamente, o usuário também tem a opção de solicitar que o sistema apresente um gráfico da variável (que pode ser entre datas ou em tempo real). Este tipo de monitoramento visa efetuar uma inspeção isolada no estado de alguma variável do sistema. O monitoramento por sinótico é feito por meio da configuração de uma tela com um conjunto de variáveis que se deseja monitorar, e uma vez que um sinótico tenha sido editado, pode-se proceder ao monitoramento de sinótico.

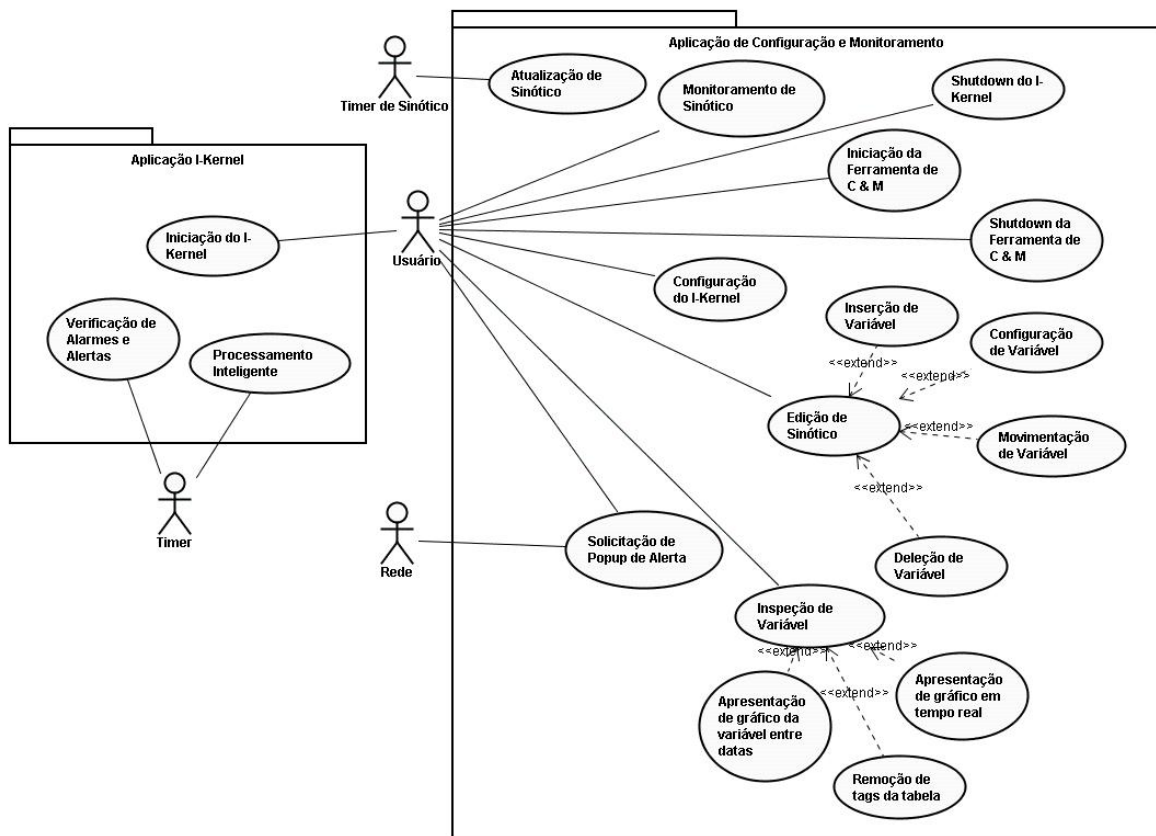


Figura 4.4: Caso de uso do sistema inteligente.

Além destes casos de uso pode surgir uma solicitação via rede, normalmente originada pela aplicação I-Kernel, para que um sinal de alarme/alerta seja exibido para o usuário. Essa solicitação de sinal de alerta normalmente é gerada a partir do caso de uso de verificação de alarmes e alertas do I-Kernel (Álvares, 2006).

A figura 4.5 apresenta o diagrama de caso de uso para a iniciação da aplicação I-Kernel. Para cada caso de uso, identificado na especificação da arquitetura dos principais pacotes

do sistema (seção 4.1.1), desenvolveu-se uma possível colaboração entre objetos da arquitetura, que visa realizar o caso de uso em termos de objetos do sistema.

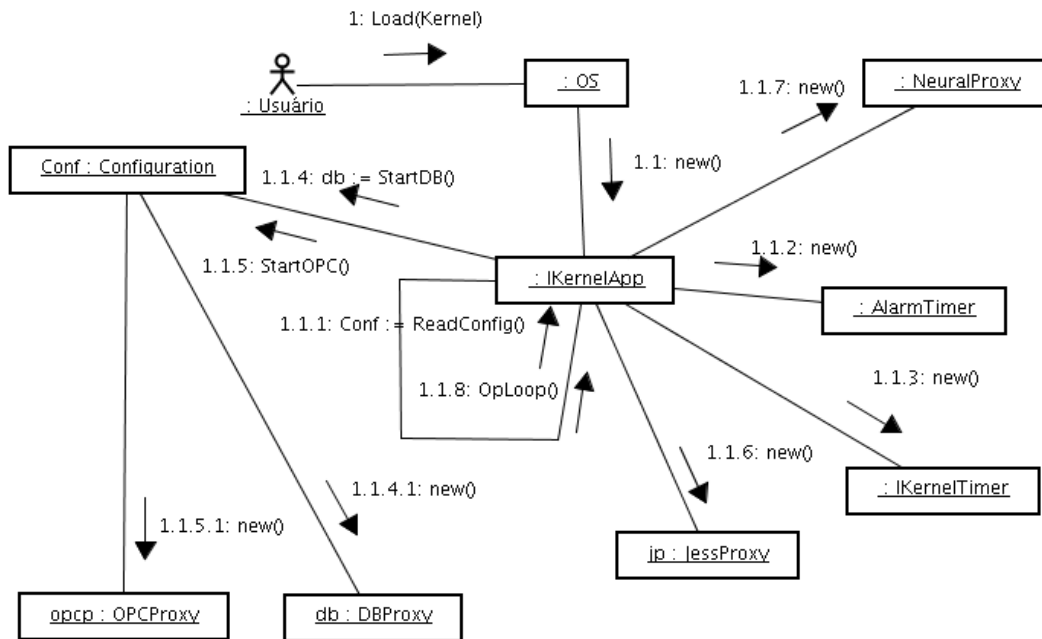


Figura 4.5: Diagrama de caso de uso – Iniciação da aplicação I-Kernel.

A figura 4.5 refere-se à iniciação do *kernel* inteligente e a partir disso o servidor do sistema é iniciado. Quando a aplicação I-Kernel é iniciada estabelece-se a comunicação com o banco de dados e com o servidor OPC. O próximo passo é realizar o ciclo de inferência do Jess, que é responsável pelo processamento inteligente do sistema (figura 4.6).

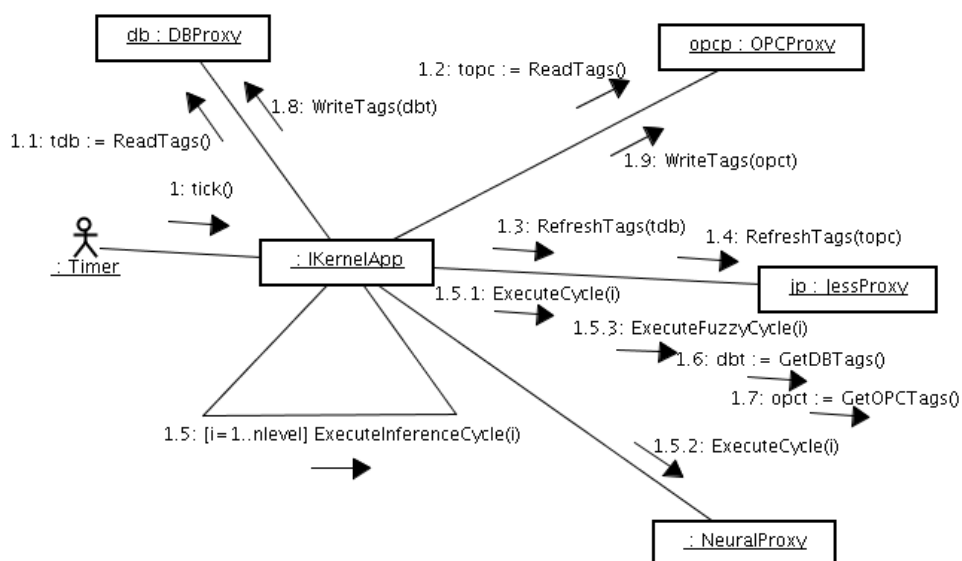


Figura 4.6: Diagrama de caso de uso – Processamento Inteligente.

O diagrama de caso de uso para o processamento inteligente pode ser observado na figura 4.6, a descrição do processamento inteligente foi apresentada detalhadamente na seção 3.2.5. A figura 4.7 apresenta o diagrama de caso de uso para a função denominada “Verificação de Alarmes e Alertas”.

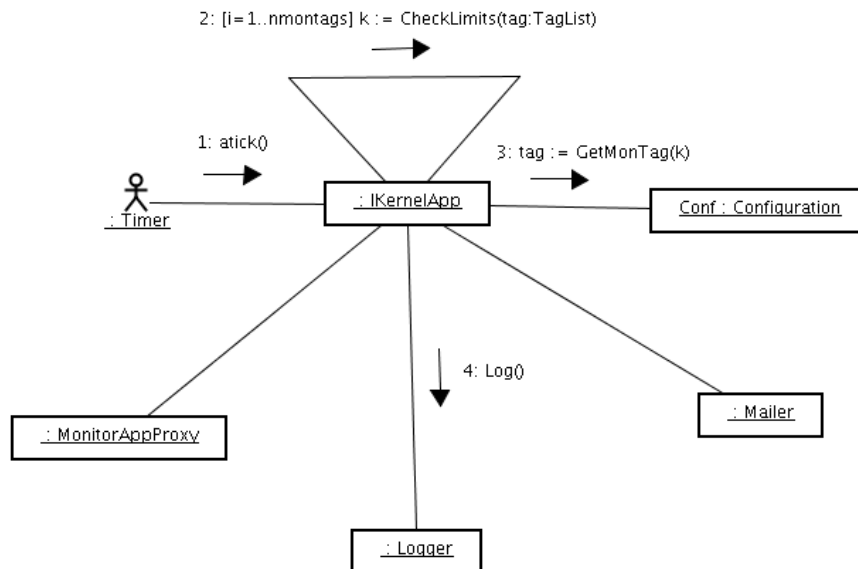


Figura 4.7: Diagrama de caso de uso – Verificação de Alarmes e Alertas.

Pode-se observar pela figura 4.7 que um sinal de alarme e/ou alerta é disparado quando um *tick* de relógio é enviado para o I-Kernel, nesse momento o sistema verifica a faixa de operação das tags monitoradas e armazena os *logs* da operação. Caso exista alguma alteração nos valores de operação um sinal de alerta é disparado pelo sistema. O procedimento de shutdown do I-Kernel pode ser visto na figura 4.8.

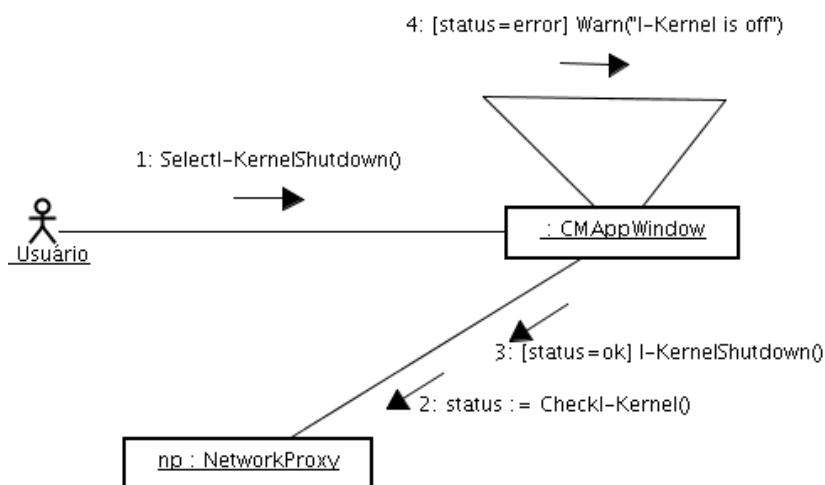


Figura 4.8: Diagrama de caso de uso – *Shutdown* da aplicação I-Kernel.

O diagrama ilustrado na figura 4.8 indica que uma solicitação de *shutdown* é feita pelo usuário, em seguida o I-Kernel verifica o status de operação, se o status estiver assumindo o valor “ok” então o procedimento de *shutdown* é realizado e o processamento inteligente do sistema é encerrado. As próximas figuras apresentam os diagramas de atividades para a aplicação Configuração e Monitoramento começando pela figura 4.9.

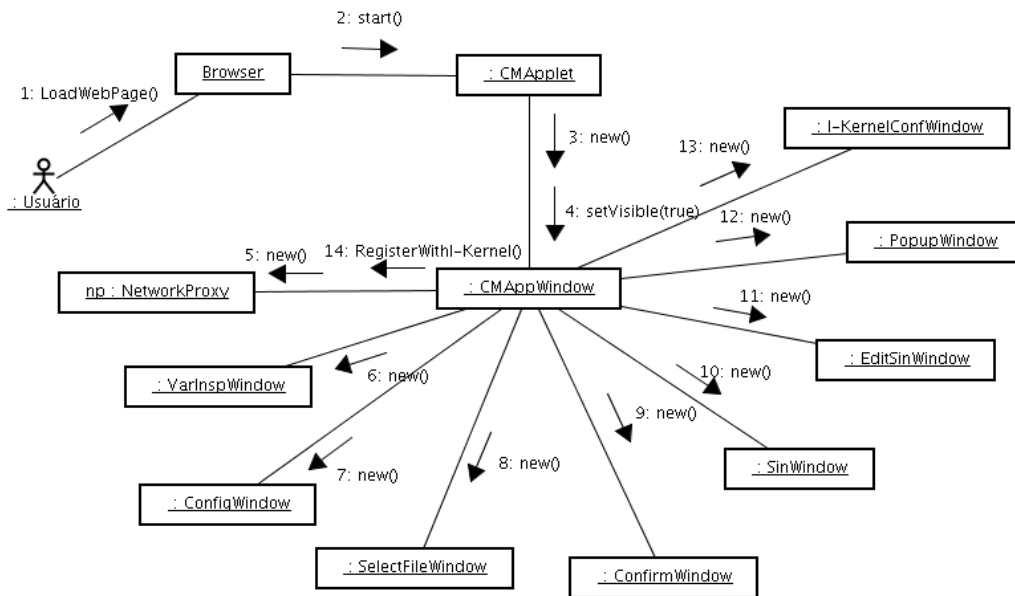


Figura 4.9: Diagrama de caso de uso – Iniciação da ferramenta Configuração e Monitoramento.

A figura 4.9 apresenta o diagrama de caso de uso para o procedimento de iniciação da ferramenta Configuração e Monitoramento. O usuário carrega a página da ferramenta, que é disponibilizada num *browser web*, em seguida o módulo cliente do sistema é iniciado com todas as funções da ferramenta. A figura 4.10 mostra o procedimento de *shutdown* da ferramenta.

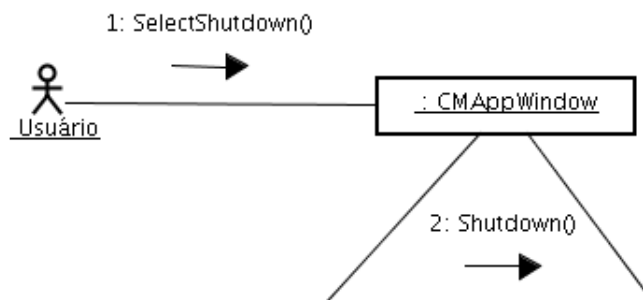


Figura 4.10: Diagrama de caso de uso – *Shutdown* da ferramenta Configuração e Monitoramento.

As funções referentes à configuração/edição da ferramenta não serão apresentadas neste capítulo. A função de monitoramento do sinótico é apresentada no caso de uso ilustrado na figura 4.11.

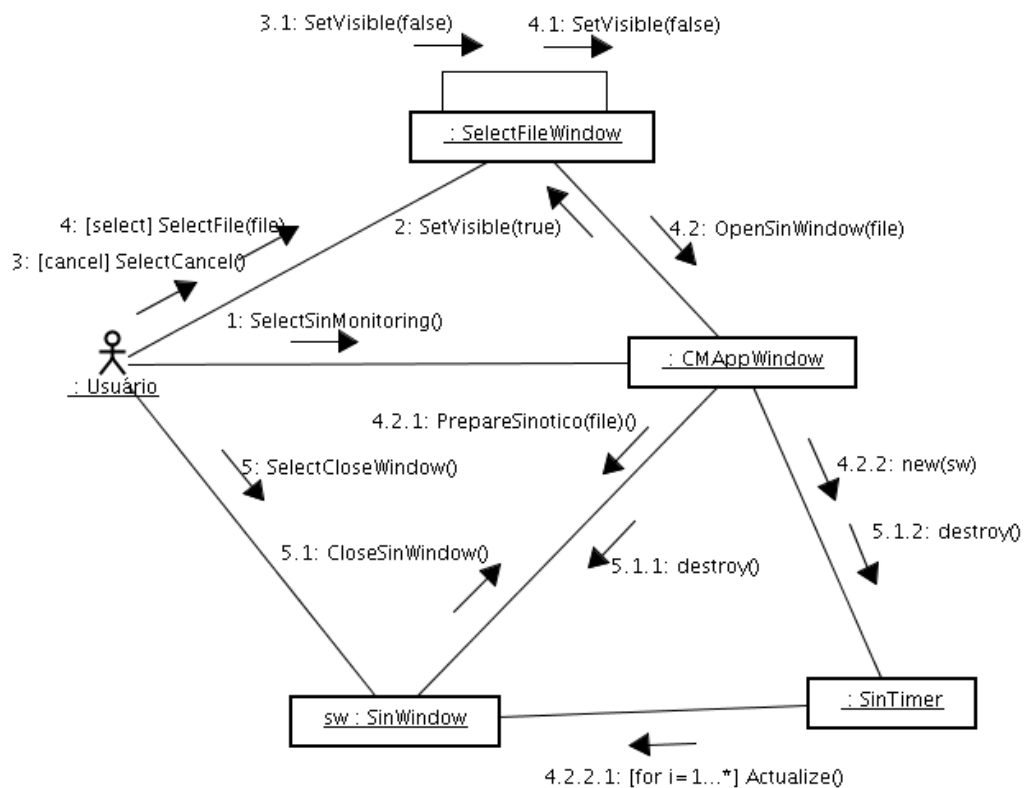


Figura 4.11: Diagrama de caso de uso – Monitoramento de Sinótico.

O caso de uso que especifica a função de monitoramento do sinótico mostra que o usuário seleciona a opção de monitorar um arquivo de variáveis. Quando isto ocorre, a ferramenta de Configuração e Monitoramento disponibiliza numa interface gráfica o sinótico que permite ao usuário acompanhar a evolução da variável selecionada. O sinótico é atualizado periodicamente para que o usuário possa monitorar a variável desejada, essa função é apresentada na figura 4.12.

Na figura 4.12, pode-se observar que a atualização do sinótico acontece pois existe um *timer* de sinótico que envia sinais periódicos de atualização. Neste caso o sinótico pega os novos valores das variáveis, redesenha a tela para mostrar as atualizações e segue efetuando esse ciclo. A inspeção de variável é outra função oferecida pela ferramenta de Configuração e Monitoramento, e seu diagrama de caso de uso pode ser visto na figura 4.13.

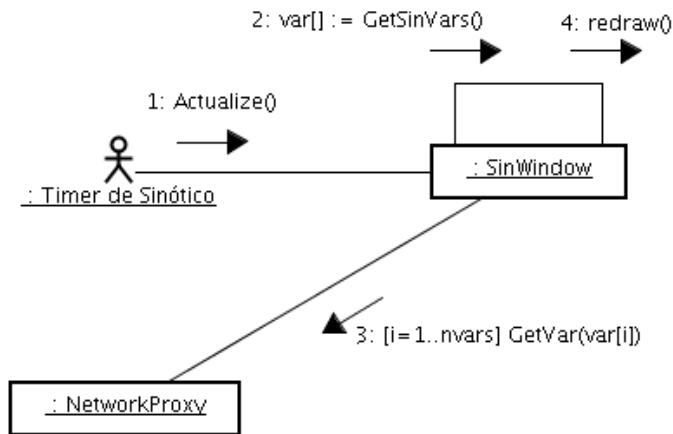


Figura 4.12: Diagrama de caso de uso – Atualização de Sinótico.

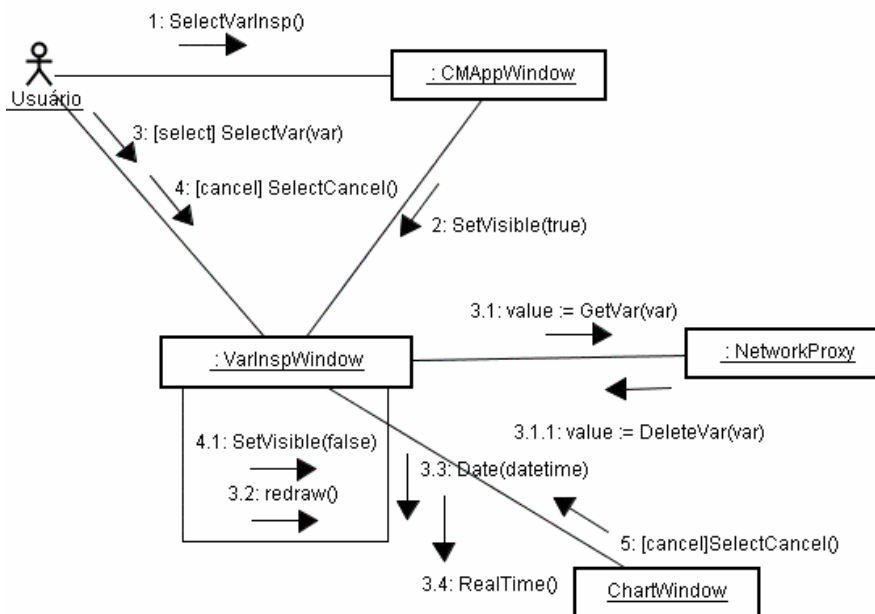


Figura 4.13: Diagrama de caso de uso – Inspeção de Variável.

A partir da figura 4.13 pode-se observar que a inspeção de variável é uma opção oferecida para o usuário e este seleciona a variável que deseja inspecionar. O sistema pega essa variável através do *proxy* de rede e disponibiliza na janela de inspeção e redesenha a mesma a cada nova solicitação do usuário.

O objetivo desse capítulo foi apresentar o projeto do sistema com a análise dos requisitos e a modelagem UML para as principais funções que serão implementadas. O próximo capítulo apresentará a implementação computacional da metodologia proposta neste trabalho.

5 – IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL

A especificação do projeto deve ser convertida numa linguagem de programação que resulte em instruções que possam ser executadas pelo computador, e a etapa de implementação (ou codificação) realiza essa conversão (Pressman, 1995). Tanto o projeto do sistema quanto a implementação encontram-se na fase de desenvolvimento e ambas focalizam o “como”. Ou seja, durante a definição o desenvolvedor de software tenta definir como as estruturas de dados e a arquitetura de software têm de ser projetadas, como os detalhes procedimentais têm de ser implementados, e como o projeto será traduzido em linguagem de programação.

O sistema inteligente foi implementado seguindo o projeto apresentado no capítulo 4, toda especificação dos requisitos foi seguida na etapa de implementação computacional. Este capítulo tem o objetivo de apresentar a implementação com suas características e funções para mostrar o resultado do produto final da metodologia que é a implementação do sistema e da base de conhecimento. Para realizar os testes de desempenho do sistema e verificar sua acurácia tornou-se necessária a escolha e um objeto de aplicação e/ou implantação.

A fim de atender as necessidades apresentadas escolheu-se a Usina Hidrelétrica de Balbina - situada no rio Uatumã no estado do Amazonas - para implantação do sistema. O sistema foi desenvolvido para manutenção preditiva de turbinas hidráulicas, então escolheu-se o grupo Turbina/Gerador como foco da aplicação. O Conjunto Turbina/Gerador da Usina de Balbina tem as seguintes especificações: 5 turbinas tipo Kaplan com capacidade instalada de 250MW e queda líquida de 21,85m; 5 geradores tipo Umbrella com capacidade nominal de 55,5MVA e tensão nominal de 13,8kV.

5.1 – INTERFACE

A interface gráfica do sistema foi construída com o objetivo de facilitar o acesso as suas funções, sendo o mais auto-explicativa possível. A interface é disponibilizada em um *browser web*, como foi dito anteriormente, para acessá-la o usuário precisa estar cadastrado

no sistema. Assim, após a tela de apresentação do sistema, e antes de acessar o sinótico existe uma tela de acesso ao sistema. Veja figuras 5.1 e 5.2.

A figura 5.1 é a tela de apresentação do sistema e a partir dela, o usuário consegue acessar o sinótico, os gráficos de tendências e as tags monitoradas. Ainda na tela de apresentação, o usuário pode acessar informações referentes aos colaboradores do projeto, os produtos gerados e os históricos de anomalias e tomada de decisão.



Figura 5.1: Interface de apresentação do sistema.

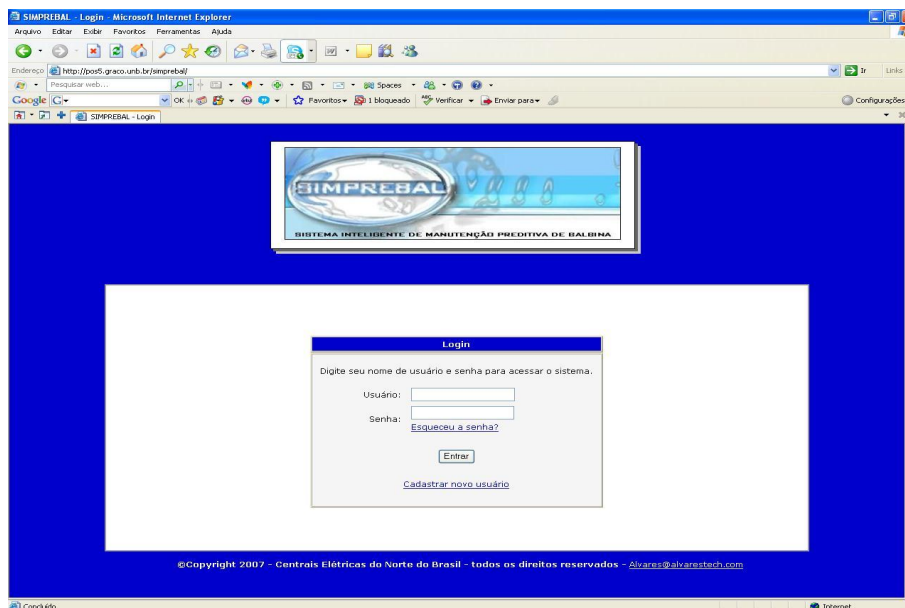


Figura 5.2: Interface de acesso ao sistema.

O sinótico é uma das principais funções da aplicação de Configuração e Monitoramento do sistema, nela o usuário pode acompanhar o funcionamento dos equipamentos e verificar a ocorrência, ou possibilidade de ocorrência de alguma falha, dentre outras funções. A figura 5.3 apresenta a interface do sinótico do sistema.

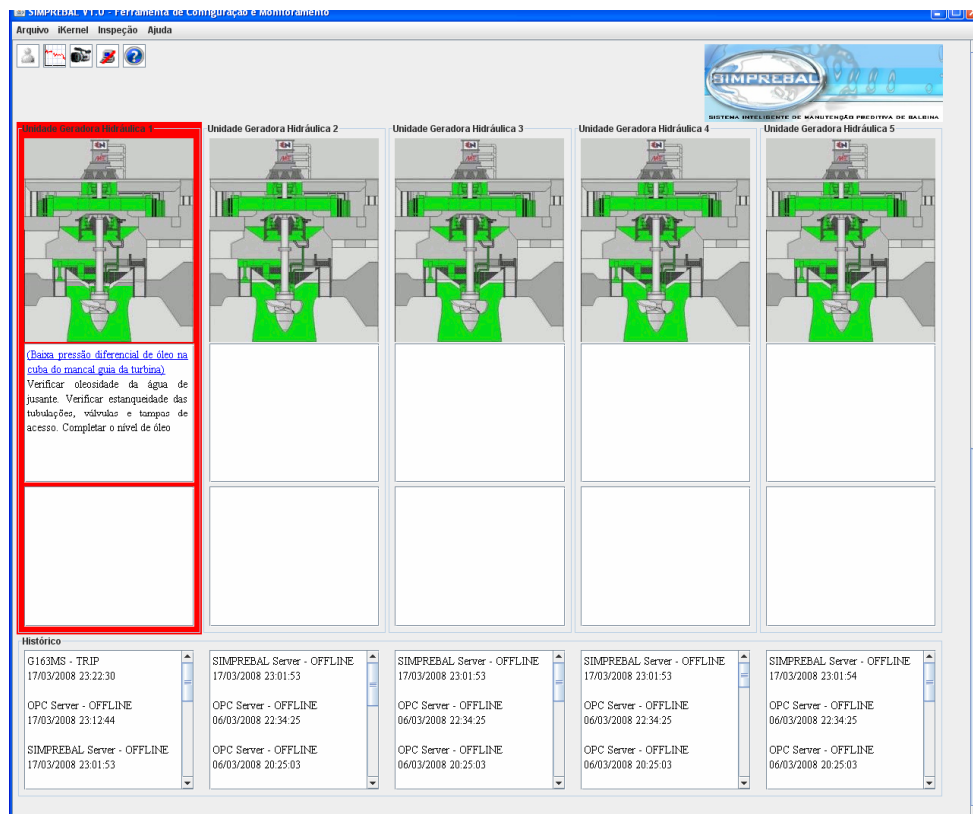


Figura 5.3: Interface do sinótico.

Na figura 5.3 podem-se observar os desenhos referentes às cinco UGHs da usina, nestes são apresentados os subsistemas monitorados. Na tela apresentada na figura 5.3 todos os subsistemas aparecem com a cor verde indicando o funcionamento normal. Caso um equipamento monitorado entre na faixa de alerta as figuras mudarão de cor, nesse caso amarelo, sinalizando um estado de alerta daquele equipamento. Se as faixas de alarme ou *trip* forem atingidas a cor das figuras será mudada para vermelha sinalizando uma falha iminente. A borda vermelha na figura 5.3 indica uma falha de sinal que pode ser no sinal *FieldBus* ou OPC.

No primeiro quadrante abaixo do desenho de cada UGH, são apresentadas as tomadas de decisão para cada falha ocorrida. No segundo quadrante são apresentadas as falhas de processamento de sinal e o terceiro e último quadrante disponibiliza um histórico das

falhas de equipamentos ocorridas em cada UGH. As figuras 5.1, 5.2, 5.3, apresentam as principais tela da interface do sistema, as demais telas são referentes aos recursos do sistema e serão apresentadas na seção seguinte.

5.1.1 – Recursos do Sistema

No canto superior esquerdo da tela do sinótico pode-se observar um conjunto de botões atalhos, que correspondem aos recursos do sistema (veja figura 5.4). O primeiro deles refere-se a função “sair do sinótico”, o segundo botão permite acessar a função “Inspeção de Variáveis” das tags monitoradas pelo sistema, o terceiro botão acessa uma câmera que captura imagens das UGHs. O quarto botão termina a execução do sistema.

5.1.1.1 - Inspeção de Variáveis

A função “Inspeção de Variáveis”, que pode ser acessada pelo menu ou pelo botão de atalho, permite que o usuário observe o valor de uma das tags monitoradas pelo sistema. Veja figura 5.4:

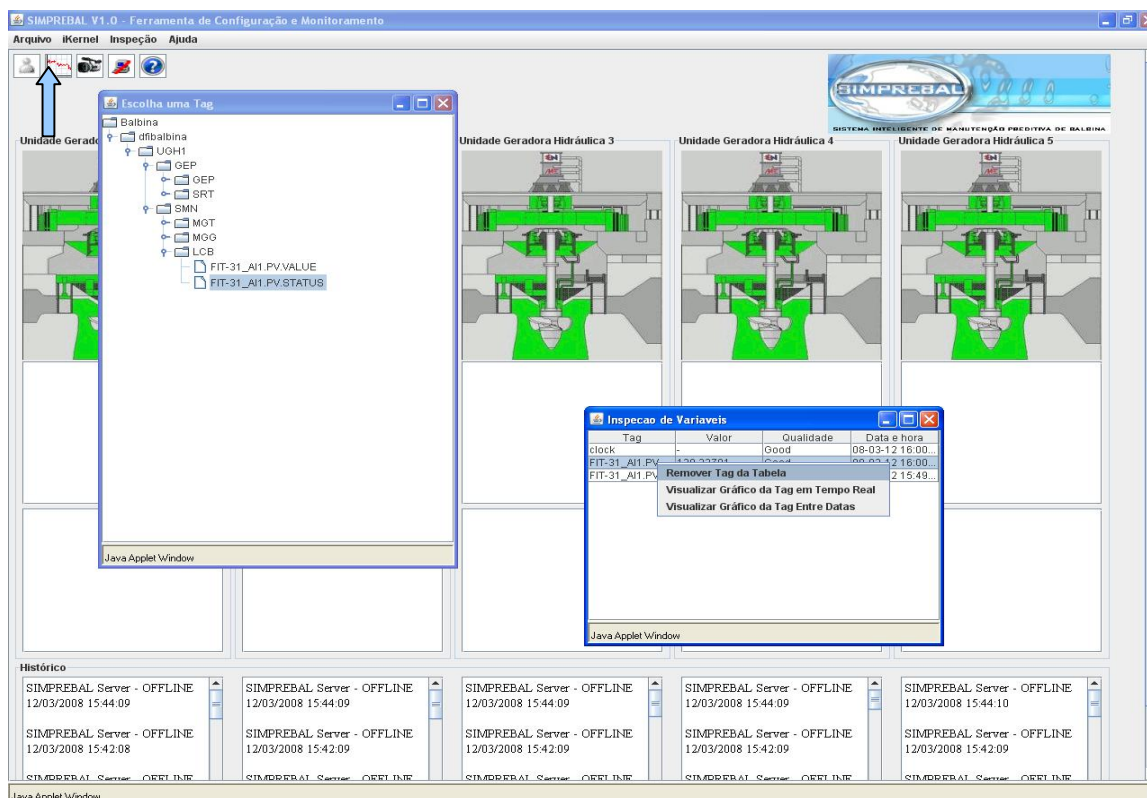


Figura 5.4: Sinalização da função “Inspeção de Variáveis”.

Ao selecionar a opção “Inspeção de Variáveis” o sistema abrirá uma janela, com o título “Escolha uma Tag”, na qual será apresentada uma árvore com todas as 5 UGHs, os sistemas monitorados, seus subsistemas e por fim as tags de cada um deles. Para acessar os valores das variáveis uma janela com o título “Inspeção de variáveis” é apresentada, nesta janela o usuário poderá acompanhar a variação dos valores das tags escolhidas. Além de inspecionar as variáveis, o usuário ainda pode remover tags da tabela, visualizar gráfico da tag em tempo real e visualizar gráfico da tag entre datas.

5.1.1.2 – Gráficos de Tendências

O sistema oferece ainda análise de tendência das variáveis monitoradas, essa análise é disponibilizada em gráficos de tendências que podem ser visualizados em tempo real ou entre datas definidas pelo usuário. A figura 5.5 mostra a tela onde o sistema apresenta o gráfico de tendências.

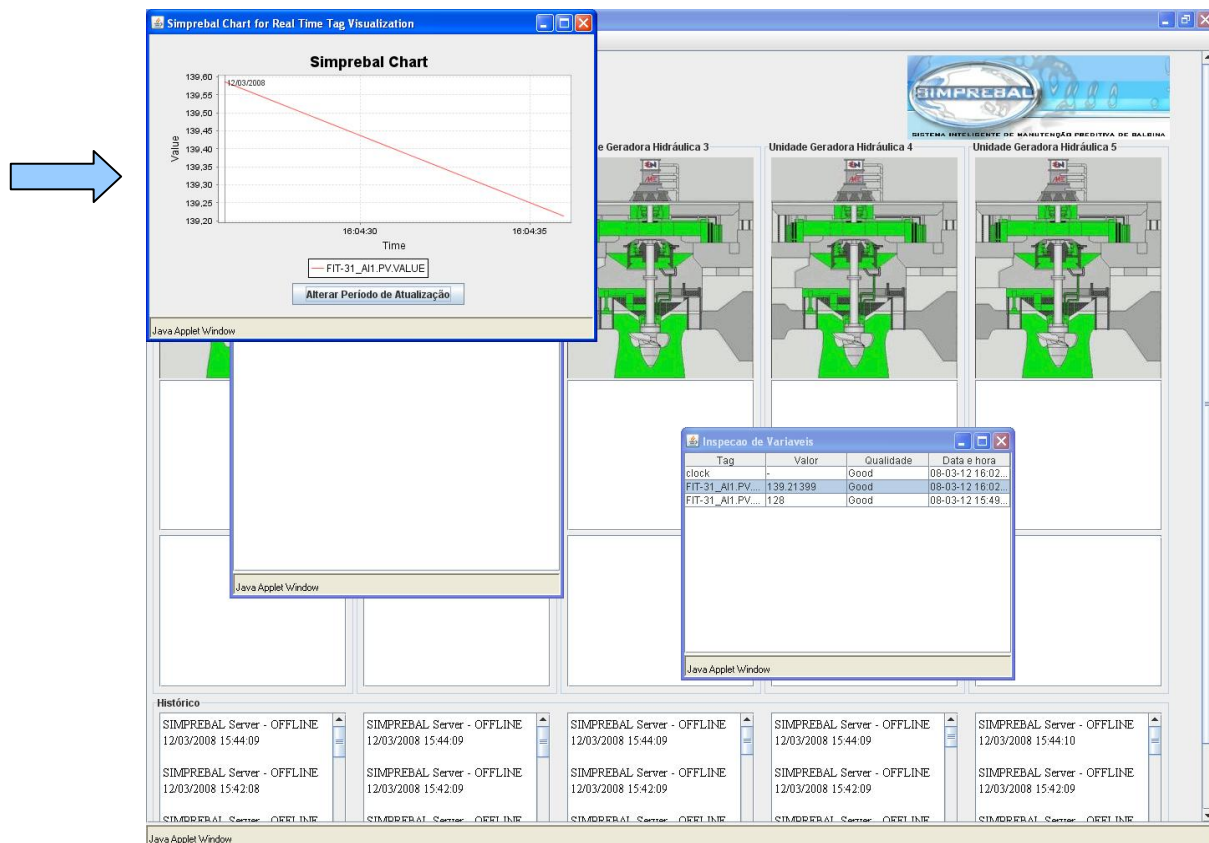


Figura 5.5: Gráfico de Tendências.

Para que o sistema gere o gráfico da variável é necessário que o usuário escolha a variável que deseja observar e se a análise será em tempo real ou entre datas. A figura 5.5 mostra a

janela da inspeção de variáveis (próxima ao canto inferior direito) e a janela onde aparece o gráfico (sinalizada pela seta).

5.1.1.3 – Históricos

O usuário ainda poderá encontrar no sistema os históricos de anomalias e as tomadas de decisão para as falhas já ocorridas. Toda vez que o sistema detecta uma falha, um diagnóstico para aquela falha é gerado, bem como uma sugestão de tomada de decisão.

As informações são armazenadas em históricos para auxiliar na construção do módulo de aprendizado (como foi explicado anteriormente) essas informações também são importantes para avaliar a saúde dos equipamentos e analisar o desempenho dos mesmos. A figura 5.6 apresenta a interface na qual o sistema oferece as opções de histórico.

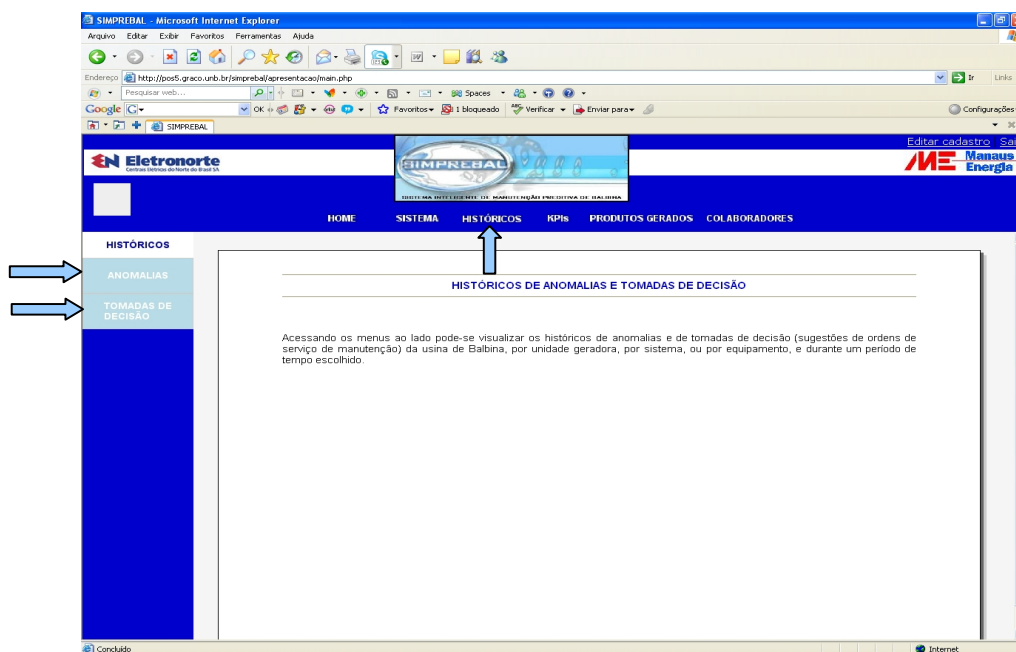


Figura: 5.6: Interface de acesso aos históricos.

A figura 5.7 apresenta o histórico de anomalias gerado para todas as UGHs e para todos os subsistemas e equipamentos de cada uma. No histórico são oferecidas informações como: sistema que ocorreu a falha, equipamento desse sistema, identificador que permanece armazenado junto com a descrição da falha, a causa, a data de início e término da falha.

Unidade Geradora: Todas as unidades geradoras
 Sistema: Todos os sistemas
 Equipamentos: Todos os equipamentos
 Unidade Geradora: UGH-01

Sistema	Equipamento	ID anomalia	Descrição	Causa	Data de início	Data de término
Sistema de medição	Servidor OPC	892	Falha ao conectar com o servidor OPC	O cabo da rede está desconectado	2008-03-06 13:03:24	
Sistema de medição	DF1A	893	Falha ao conectar com o dispositivo DF1A	O cabo da rede está desconectado	2008-03-06 20:12:34	
Sistema de medição, controle e monitoramento	Servidor SIMPREBAL	894	Falha no servidor SIMPREBAL	O servidor OPC está inacessível	2008-03-06 20:13:34	
Sistema de medição	Servidor OPC	895	Falha ao conectar com o servidor OPC	O cabo da rede está desconectado	2008-03-06 20:25:03	
Sistema de medição	Servidor OPC	896	Falha ao conectar com o servidor OPC	O cabo da rede está desconectado	2008-03-06 22:34:25	

Figura: 5.7: Histórico de Anomalias.

As funções apresentadas nessa seção são os principais recursos do sistema. A próxima seção apresenta os arquivos de configuração, sua utilidade e a informação que contém cada um deles.

5.2 – ARQUIVOS DE CONFIGURAÇÃO

5.2.1 – Arquivo Config.ini

O arquivo “config.ini” é o arquivo de configuração do sistema, nele encontram-se todos os parâmetros de configuração necessários para a execução do sistema inteligente. A figura 5.8 ilustra as funções do arquivo “config.ini” no sistema.

As principais funções do arquivo são: adicionar novas tags para serem monitoradas pelo sistema; alterar os principais parâmetros do sistema; adicionar novos endereços de email; adicionar novas DFIs; conectar com os servidores (OPC e Banco de Dados); e adicionar novos servidores OPC.

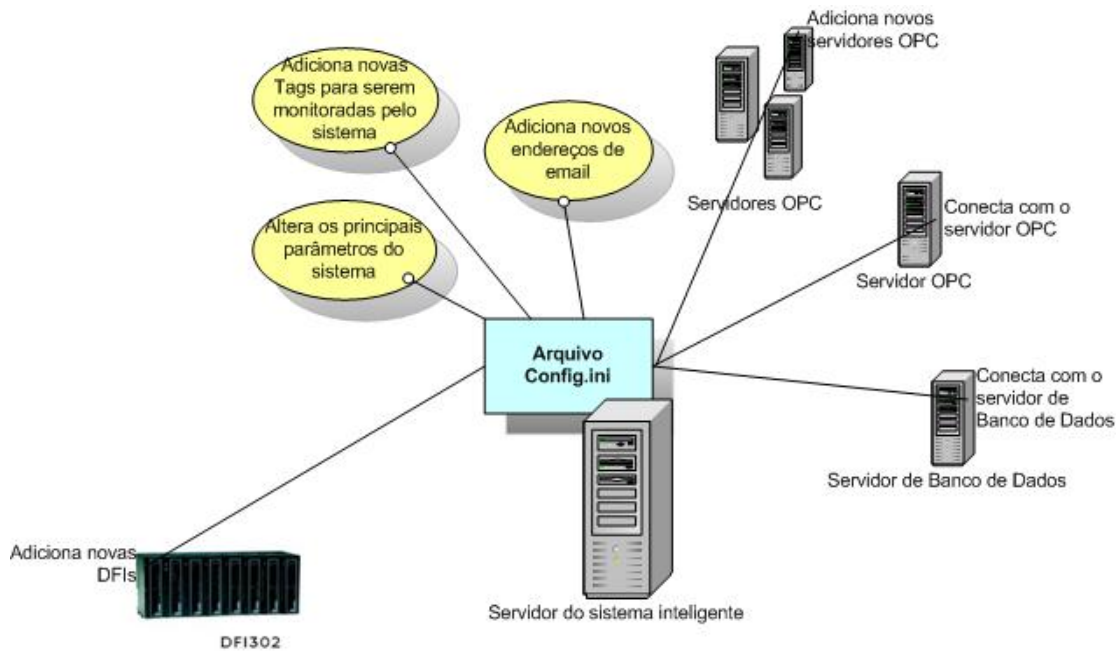


Figura 5.8: Funções do arquivo “config.ini”.

O arquivo de configuração foi criado para facilitar a alteração dos parâmetros de configuração do sistema. Esse arquivo é do tipo .txt e a existência dele evita que qualquer alteração (parâmetros de configuração, comunicação com servidores, e etc.) seja feita diretamente no código-fonte, isto impede a relação do usuário com o código-fonte e facilita qualquer alteração/atualização necessária. A figura 5.9 apresenta um exemplo de parâmetros de configuração definidos no arquivo “config.ini”.

```
[General]
VERSION = 4.0.0 versão do sistema.
PORT = 4451, porta para comunicação do Servidor com o Cliente.
OPCLIBRARY = 1, biblioteca usada para obter os dados via OPC.
LOGLEVEL = 1, forma de mostrar os eventos do Servidor se + 1 =
armazenado em arquivo logger.txt, e se + 0 = mostrado na tela do
prompt.
IKERNELTIMER = 60000, tempo do ciclo de execução do
Processamento do Servidor.
PERCENTDEADBAND = 0.05, porcentagem que o valor da tag tem
que mudar para ser armazenado no banco de dados.
SENDMAIL = 1, permissão para envio de emails, se + 1= o enviar
emails, se + 0 = o não enviar emails.
LOADINGTIMER = 60000, tempo para carregar os valores das tags
para o processamento inteligente.
```

Figura 5.9: Parâmetros definidos no arquivo “config.ini”.

A figura 5.8 mostra alguns dos parâmetros que são definidos no arquivo de configuração. Esses são os parâmetros gerais dos sistema, que definem algumas características de execução. Porém, como mostra a figura 5.8 outras configurações estão definidas no mesmo arquivo. É importante ressaltar que esse arquivo é de extrema importância para a execução do sistema inteligente e qualquer alteração errada pode afetar o desempenho. O anexo D do presente trabalho disponibiliza os arquivos de configuração do sistema. No exemplo apresentado no anexo D foram retirados todos os dados sigilosos (como IP, senhas, *login*, e etc.) por questões de segurança de operação da usina de Balbina.

5.2.2 – Arquivo FailureFile.txt

Os arquivos de indexação contêm as descrições das informações que saem das regras. Para cada saída das regras (falha diagnosticada e tomada de decisão) foi definido um código, pois durante a etapa de criação da base de conhecimento observou-se que as regras ficariam muito “carregadas” de texto se a descrição da falha e a sugestão de manutenção fossem armazenadas nos arquivos de regras. Observou-se também que separando essas informações das regras o ciclo de inferência do sistema seria otimizado. Então, um arquivo de indexação foi criado contendo a descrição das possíveis falhas que foram catalogadas. A figura 5.10 mostra a função do arquivo de indexação (arquivo de falhas) no processamento do sistema.



Figura 5.10: Interação do arquivo de falhas no processamento inteligente do sistema.

O arquivo de falhas é um arquivo com extensão .txt de fácil alteração. O usuário pode realizar alterações diretamente nesse arquivo sem precisar mexer no código fonte do sistema. Depois de realizada a alteração, basta salvar o arquivo e executar outro arquivo que se chama *serialization.bat*, este procedimento atualiza as alterações realizadas.

Veja o trecho de código abaixo, ele faz parte do arquivo de falhas e tem um conjunto de códigos que será explicado em seguida:

```
G1ACH1D1#Falha na comunicação OPC com UGH-01A canal1-  
H1#2#DFI1A canal1 - Quality BAD#Erro na configuração do  
servidor OPC#1#4
```

Note que o trecho de código acima contém códigos separados pelo caractere #. O primeiro se refere ao código da falha, o segundo é a descrição da falha, o terceiro é o modo de falha (tag-condição), o quarto é a causa da falha, o quinto a detecção da falha, e finalmente o sexto é a severidade da falha.

Além das falhas, o arquivo de falhas armazena as tomadas de decisão sugeridas para cada falha. As informações desse arquivo são comandos apenas para o cliente, e não estão armazenadas no banco de dados. Para a tomada de decisão é necessário que o usuário crie um código de falha, e em seguida crie o código de decisão referente a nova falha inserida. As mensagens de tomada de decisão seguem a forma abaixo:

```
G1OPCSRV#Falha ao conectar com o servidor OPC#Conectar o cabo  
Ethernet do servidor simprebal ao servidor OPC.
```

Note que o trecho de código acima também contém códigos separados pelo caractere #. O primeiro se refere ao código da decisão, o segundo é a descrição da falha, o terceiro é a descrição da decisão.

O próximo capítulo apresentará um estudo de caso para o sistema apresentado, no qual será analisado um dos subsistemas da turbina. Além do estudo de caso, o capítulo seguinte apresentará uma sugestão de metodologia também usando sistemas inteligentes, porém aplicando outra técnica de IA.

6 – ESTUDO DE CASO: SISTEMA DA TURBINA – SISTEMA DE REGULAÇÃO DA VELOCIDADE

Afim de testar as funcionalidades, acurácia, desempenho e respostas do sistema apresentado no capítulo anterior foi desenvolvido um estudo de caso. Conforme foi explicado anteriormente o sistema inteligente foi implantado na Usina Hidrelétrica (UHE) de Balbina sendo responsável por monitorar o grupo turbina/gerador da usina. A UHE Balbina possui cinco turbinas (ou UGHs) e para cada uma das cinco turbinas, os sistemas monitorados pelo sistema inteligente são: sistema da turbina, sistema de mancais e sistema do gerador. O sistema analisado no presente capítulo é o sistema da turbina, mais especificamente o sistema de regulação da velocidade.

Será apresentado o sistema analisado, as tags para tal sistema, as falhas catalogadas e a FMEA gerada a partir das falhas. Neste capítulo ainda serão apresentadas as regras de produção para uma determinada tag, o diagnóstico e a tomada de decisão para as falhas da tag analisada. Finalmente, será feita uma análise do desempenho do sistema e será apresentada uma sugestão de solução para o sistema desenvolvido.

6.1 – SUBSISTEMA ANALISADO

O Conjunto Turbina/Gerador (objeto de aplicação da metodologia) tem as seguintes especificações: turbina tipo Kaplan com capacidade instalada de 250MW e queda líquida de 21,85m; geradores tipo Umbrella com capacidade nominal de 55,5MVA e tensão nominal de 13,8kV, a figura 6.1 apresenta a hierarquia dos sistemas da usina. Entretanto, apenas o sistema de regulação da velocidade que faz parte do sistema da turbina será analisado no presente trabalho, a hierarquia do sistema da turbina pode ser observada na figura 6.2.

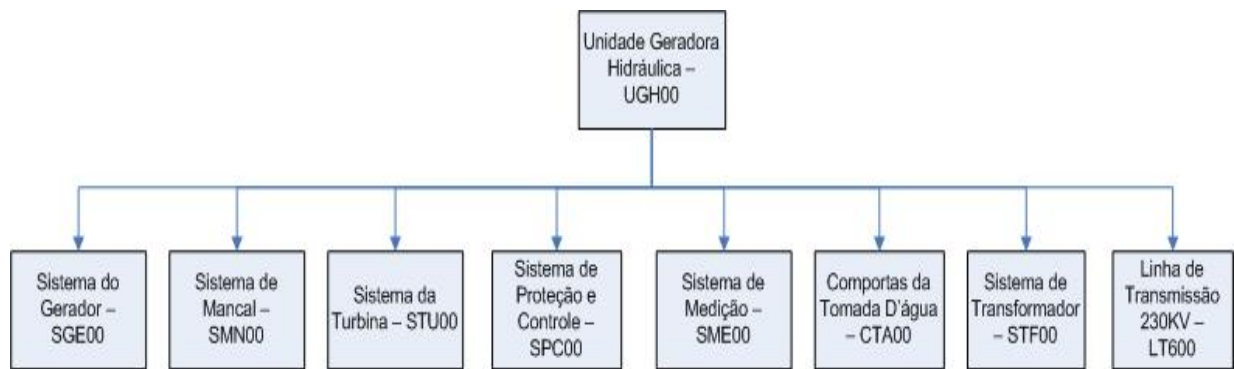


Figura 6.1: Hierarquia dos sistemas da usina.

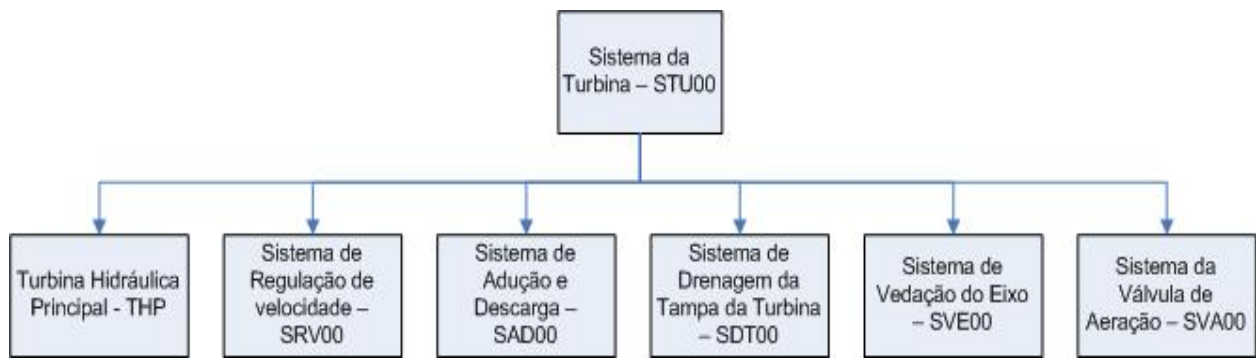


Figura 6.2: Hierarquia do sistema da turbina.

As turbinas compreendem cinco grupos Kaplan de eixo vertical, para instalação em caixa espiral de concreto, e tubo de sucção em cotovelo. A turbina hidráulica da UHE de Balbina é do tipo Kaplan de eixo vertical. As turbinas Kaplan são compostas por um rotor¹ com pás em formato de hélice de avião. São dotadas de um dispositivo de regulagem que possibilita o controle do fluxo de água por meio da abertura ou fechamento das pás, as quais são ditas ajustáveis. Cada pá está individualmente presa à ogiva do rotor, e possui movimento de rotação em torno do próprio eixo, mudando de ângulo. Este movimento é simultâneo para todas as pás. Essas turbinas são comuns em baixas e médias quedas, e destacam-se por sua grande flexibilidade de ação frente às variações de capacidade, de velocidade e de queda. Elas conseguem alcançar velocidades maiores em relação aos outros tipos de turbinas em decorrência da regulação das pás motrizes.

¹ Neste trabalho os termos rotor e roda são usados indistintamente.

Outros componentes relevantes das turbinas hidráulicas são as tampas inferior e superior e o cabeçote. As tampas são placas de aço inoxidável responsáveis por garantir a estanqueidade dos compartimentos da turbina, evitando o extravasamento de água para regiões que não seja o tubo de sucção. A tampa superior é fixada na parte superior do pré-distribuidor por meio de prisioneiros, porcas e arruelas de segurança. A tampa inferior é montada no campo sobre o anel de descarga (cinta da roda), por meio de parafusos, sendo este conjunto centrado e soldado diretamente sobre o flange superior do tubo de sucção, veja figura 6.3.



Figura 6.3: Tampa inferior da turbina Kaplan.

O cabeçote é a região superior da turbina. É responsável pela condução de óleo às pás do rotor Kaplan e às palhetas móveis do distribuidor. O óleo destinado ao controle de fluxo de água (movimento das pás e palhetas) é denominado óleo de regulação e o óleo destinado à lubrificação dos componentes da ogiva do rotor é denominado óleo de lubrificação. O cabeçote também é responsável pelo isolamento acústico do grupo gerador-turbina, garantindo melhores condições de trabalho aos operadores. A Figura 6.4 apresenta uma foto do cabeçote da turbina e a figura 6.5 apresenta um desenho da turbina e seus principais componentes.



Figura 6.4: Cabeçote da turbina.

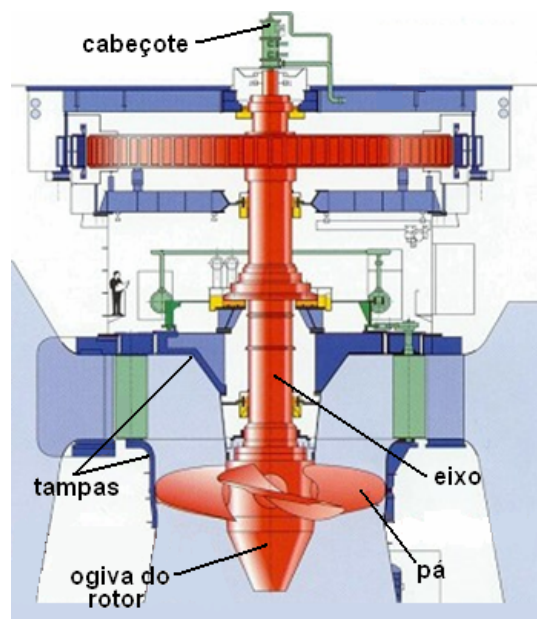


Figura 6.5: Turbina Kaplan e seus principais componentes.

Os ativos físicos que compreendem o sistema da turbina são:

1. Turbina Hidráulica Principal

- Rotor.
- Eixo.

- Pás.
 - Servomotor das pás.
 - Cabeçote Kaplan.
2. Sistema de Regulação de Velocidade:
- a) Sistema do Distribuidor:
- Servomotor.
 - Palheta diretriz.
 - Bucha.
 - Vedações.
 - Anel de sincronismo.
 - Biela.
 - Fim de curso.
 - Manivela.
 - Pino de cisalhamento.
 - Travas.
- b) Sistema de Resfriamento:
- Trocador de calor.
- c) Sistema de Alimentação de Óleo:
- Tanque sem pressão.
 - Motobomba AE.
 - Motobomba AF.
 - Válvula de intermitência.
 - Válvula de isolamento.
 - Válvula detectora de pressão.
 - Filtro.
- d) Sistema de Comando Hidráulico:
- Acumulador ar/óleo.
 - Sistema de amortecimento da palheta.
- e) Sistema de Ar de Regulação:
- Acumulador de ar.
 - Eletroválvula.
 - Painel elétrico de comando e controle.
3. Sistema de Adução e Descarga:

- Caixa espiral.
 - Anel de descarga.
 - Soleira.
 - Tubo de sucção.
 - Motobomba de esgotamento BES001.
 - Motobomba de esgotamento BES003.
4. Sistema de Drenagem da Tampa da Turbina:
- Motobomba AK.
 - Motobomba AL.
 - Poço de Drenagem.
 - Painel elétrico de comando e controle.
5. Sistema de Vedação do Eixo da Turbina:
- Junta carbônica.
 - Junta de manutenção.
 - Sistema de água de bloqueio.
 - Tubulação.
 - Válvulas.
6. Sistema da Válvula de Aeração:
- Válvula de aeração.

Os subsistemas listados anteriormente fazem parte do sistema da turbina, porém será analisado somente o sistema de regulação da velocidade que se subdivide em: sistema de comando hidráulico, sistema de alimentação de óleo e sistema de resfriamento.

O sistema de regulação da velocidade foi projetado para ser composto de estação de ar comprimido, constituída de três compressores multi-estágio, resfriados a ar, e um reservatório comum aos três compressores. A partir do reservatório de ar, estende-se a tubulação de ar comprimido, passando pela galeria mecânica superior. Para cada unidade, foi previsto um ramal que alimenta o acumulador de ar comprimido do regulador.

O sistema de regulação é composto por dois servomotores que comandam a abertura das pás do distribuidor. Existe um anel de regulação acima do mancal inferior que é responsável por regular a abertura das pás, e atua em conjunto com os servos motores. É nesse anel que se encontram os pinos de cisalhamento. Ainda no sistema da turbina,

encontram-se duas válvulas de aeração, que são responsáveis pela sucção do ar existente no ambiente em que a turbina está funcionando, esse procedimento evita que a água existente na turbina possa vazar para fora da tampa da turbina.

Nos sistema de resfriamento encontram-se os trocadores de calor (veja figura 6.6), que são responsáveis por resfriar o óleo de regulação, de modo que não perca suas características de compressão e viscosidade, garantindo o funcionamento correto do sistema de comando hidráulico. No sistema de alimentação de óleo encontra-se o tanque sem pressão, a função deste é alimentar com óleo as pás da turbina e do distribuidor. A circulação do óleo acontece do tanque sem pressão para o balão de ar/óleo que faz parte do sistema de comando hidráulico. A próxima seção apresenta a lista dos instrumentos de medição da rede *FieldBus* para o sistema de regulação da velocidade que faz parte do sistema da turbina.

6.1.1 Instrumentos de Medição da Rede Foundation FieldBus

A partir dos instrumentos de medição da rede *FieldBus*, é possível monitorar os parâmetros de operação do sistema da turbina e demais sistemas. O sistema inteligente monitora os dados desses instrumentos e, para cada instrumento, existe uma “tag” que o identifica. As “tags” são usadas para gerar as regras de produção que fazem parte da base de conhecimento do sistema. Abaixo, encontra-se uma lista dos instrumentos de medição previstos para serem instalados para o sistema de regulação da velocidade:

1. Sistema de Regulação da Velocidade:

a) Sistema de Resfriamento:

- Vazão de água do trocador de calor (G180MN).
- Temperatura da água de resfriamento (G126AR).
- Temperatura do óleo de regulação (G126LK).

b) Sistema de Alimentação de Óleo:

- Nível de óleo do tanque sem pressão (G171LI).
- Pressão de óleo de regulação (G163CR).
- Densidade do óleo de regulação (G1DTOR).

c) Sistema de Comando Hidráulico:

- Nível de óleo do acumulador ar/óleo (G171LA).

- Posição do nível de óleo do acumulador ar/óleo (G1TPA).
- Pressão de óleo do acumulador ar/óleo (G163LGF).

A lista acima compreende parte dos instrumentos instalados na rede *FieldBus*. Entretanto, somente os transmissores de temperatura estão instalados até o presente momento, e estão sublinhados no texto. A tabela 6.1 apresenta a especificação dos transmissores de temperatura que foram considerados no estudo de caso (sublinhados na lista apresentada acima).

Tabela 6.1: Especificação dos transmissores de temperatura.

Sensor/ Canal	Descritivo	Modelo	Fabricante	Unidade de Engenharia	Fluido
G126LK	Temperatura do óleo de regulação do tanque sem pressão	TT302	Smar	°C	Óleo
G126AR	Temperatura da água de resfriamento do óleo de regulação	TT302	Smar	°C	Água

6.2 – FMEA PARA O SISTEMA DA TURBINA

Durante o processo de coleta de dados várias falhas foram catalogadas e junto com elas a causa provável e o procedimento de manutenção adotado, veja tabela 6.2. Os dados apresentados na tabela 6.2 são apenas uma parte das falhas catalogadas a partir dos questionários e das entrevistas realizadas com os especialistas.

Estes dados permitiram o desenvolvimento da FMEA para o sistema de regulação da velocidade. Tal análise pode ser observada nas tabelas 6.3, 6.4 e 6.5. A figura 6.6 apresenta os trocadores de calor usados no sistema de resfriamento que faz parte do sistema de regulação da velocidade.



Figura 6.6: Trocadores de calor – Sistema de resfriamento.

Tabela 6.2: Falhas catalogadas para o sistema de regulação da velocidade:

	DESCRIÇÃO
FALHA	Nível baixo de óleo do tanque sem pressão.
CAUSA	Vazamento de óleo pelo servo-motor do distribuidor.
Procedimento	Foi completado o nível com lubrificante TR86.
Classificação do procedimento	Manutenção corretiva.
FALHA	Sujeira no trocador de calor nº2 do sistema de óleo do regulador de velocidade.
CAUSA	Incrustação nos feixes tubulares do trocador.
Procedimento	Feito limpeza interna no trocador de calor nº02 e em seguida no nº01.
Classificação do Procedimento	Manutenção corretiva.
FALHA	Conexão partida da tubulação de água do trocador de calor nº 1 do Sistema de regulação da velocidade.
CAUSA	União de 2” quebrada.
Procedimento	Foi substituído a união de 2” na entrada do trocador nº 01.
Classificação do Procedimento	Manutenção corretiva, com substituição de peças.
FALHA	Defeito no sistema de regulação de velocidade.
CAUSA	Foi encontrada a cartela 265 fora de ajuste.
Procedimento	Reajuste na cartela 265 de limitação de potência do Grupo.
Classificação do procedimento	Manutenção corretiva.
FALHA	Defeito na elevação de temperatura do óleo no sistema de regulação de velocidade.
CAUSA	Após abertura e inspeção nos trocadores de calor, foi constatada presença de crosta de sujeira no sistema de circulação de água de resfriamento do óleo de regulação.
Procedimento	Foi realizada uma injeção de ar para desobstruir as tubulações, realizado a purga nos dois trocadores de calor, não obtendo resultados satisfatórios. Então, efetuou-se pedido de parada da máquina para solucionar os problemas com limpeza interna nas tubulações de água de resfriamento do óleo de regulação de velocidade.

Classificação do Procedimento	Manutenção corretiva e parada da máquina.
FALHA	Vazamento de óleo pelo manômetro do acumulador ar/óleo.
CAUSA	
Procedimento	Foi feita substituição do manômetro do acumulador ar óleo no tanque sem pressão.
Classificação do Procedimento	Manutenção corretiva, com substituição de peças.
FALHA	Defeito no 1º estágio no regulador de velocidade.
CAUSA	Defeito na cartela 258 dos sensores de proximidade.
Procedimento	A mesma foi substituída por uma cartela com as mesmas características.
Classificação do Procedimento	Manutenção corretiva, com substituição de peças.
FALHA	Defeito no sistema de regulação de velocidade.
CAUSA	Mau contato dos relés.
Procedimento	Feito reaperto das conexões dos relés 20BVX1.1 e 20BVX1.2 (temporizado) normalizando o sistema de injeção de ar do acumulador ar/óleo.
Classificação do Procedimento	Manutenção corretiva, com substituição de peças.

Todas as informações apresentadas na tabela 6.2 foram coletadas com as equipes de manutenção e operação da usina e compreendem algumas das falhas conhecidas pelas equipes entrevistadas. As falhas mais frequentes são: alta temperatura do óleo de regulação e alta temperatura da água de resfriamento, e serão abordadas nas próximas seções. É importante lembrar que poderá ocorrer uma falha que não se encontra na catalogação e conseqüentemente não é conhecida pelos especialistas que forneceram as informações. As FMEAs, para o mesmo subsistema, serão apresentadas nas tabelas 6.3, 6.4 e 6.5.

Tabela 6.3: FMEA para Sistema de Regulação da Velocidade – Sistema de Resfriamento.

SISTEMA DE REGULAÇÃO DE VELOCIDADE – SISTEMA DE RESFRIAMENTO					
FUNÇÃO	Resfriar o óleo de regulação, de modo que não perca suas características de compressão e viscosidade, garantindo o funcionamento correto do sistema hidráulico de regulação de velocidade.				
COMPONENTE	FUNÇÃO DO COMPONENTE	FALHA FUNCIONAL	MODO DE FALHA	CAUSA DA FALHA	EFEITOS DA FALHA
1. Trocador de calor	Resfriar o óleo	Resfriamento insuficiente do óleo	1.1 Alta temperatura do óleo na saída dos trocadores (26LK). Baixa vazão de água (80MN). Alta temperatura de saída de água (26AR)	Incrustação nas placas de inox dos trocadores	- Perda das características físico-químicas do óleo - Má formação do filme de óleo
		Vazamento de óleo	1.2 Vazamento (DTOR)	Desgaste nas borrachas de vedação	- Risco de contaminação da carga de óleo - Perda das características físico-químicas do óleo
		Vazamento de água	1.3 Baixa vazão de água (80MN)	Folgas nas conexões das placas de inox	- Distúrbio no funcionamento normal do sistema (falha no resfriamento)
2. Válvulas	Direcionar o fluxo de água a um dos trocadores de calor	Direcionar inadequadamente o fluxo de água	2.1 Vazamento. Baixa vazão de água (80MN)	Deterioração da sede ou contra-sede	- Distúrbio no funcionamento normal do sistema (falha no resfriamento) - Risco de TRIP da máquina por temperatura alta de óleo
		Não direcionar o fluxo de água	2.2 Obstrução de fluxo (80MN)	Quebra do mecanismo interno	- Distúrbio no funcionamento normal do sistema (falha no resfriamento)
				Emperrament o da haste	- Grande risco de TRIP da máquina por temperatura alta de óleo

Tabela 6.4: FMEA para Sistema de Regulação da Velocidade – Sistema de Alimentação de Óleo.

SISTEMA DE REGULAÇÃO DE VELOCIDADE – SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO DE ÓLEO					
FUNÇÃO	Alimentar com óleo o acumulador ar/óleo				
COMPONENTE	FUNÇÃO DO COMPONENTE	FALHA FUNCIONAL	MODO DE FALHA	CAUSA DA FALHA	EFEITOS DA FALHA
1. Tanque sem pressão	Armazenar óleo	Vazamento nas válvulas, na tubulação ou nas conexões da instrumentação	1.1 Baixo nível de óleo (71LI)	Folgas nas conexões da tubulação Engripamento da haste das válvulas	- Perda de pressão na linha de óleo - Mau funcionamento da válvula detectora de pressão. - Distúrbio no funcionamento normal do sistema - Atuação de TRIP na unidade geradora - Desliga as motobombas e bloqueia a partida
2. Motobombas AE e AF	Bombear óleo para o acumulador ar/óleo	Operar abaixo da pressão de 36,8 bar	2.1 Pressão baixa de óleo na saída das motobombas (63CR) (94XKT1.1) (94DEFX.1)	Vazamento de óleo pelo selo mecânico	- Desliga a bomba prioritária e liga a bomba reserva na pressão baixa. Caso esta também falhe, provoca TRIP na unidade geradora. - Distúrbio no funcionamento normal do sistema (má lubrificação e resfriamento)
				Danificação do acoplamento	
Corrosão dos rolamentos por óleo contaminado ou de má qualidade					
		Ruído anormal	2.2 Ruído	Desgaste dos rolamentos	- Risco de quebra da motobomba
				Má lubrificação dos rolamentos	
3. Válvula de intermitência	Controlar o fluxo de óleo das motobombas para o tanque sem pressão ou para o acumulador ar/óleo	Não controlar o fluxo de óleo	3.1 Não obedece comando (CN/CO)	Micro switch desajustada	- Perda de automatismo - Distúrbio no funcionamento normal do sistema

			3.2 Vazamento	Deterioração da sede ou contra-sede	- Perda gradativa da carga de óleo podendo levar a parada do grupo por nível muito baixo (71LI)
			3.3 Obstrução de fluxo (26LK)	Quebra do mecanismo interno	- Comanda o fechamento da válvula de isolamento
				Emperramento da haste	- Atuação de TRIP na unidade geradora
4. Válvula de isolamento	Isolar o acumulador ar/óleo para proteção do funcionamento ou manutenção	Não isolar o acumulador	4.1 Não obedece comando (BB)	Micro switch desajustada	- Perda de automatismo - Distúrbio no funcionamento normal do sistema
		Isolar inadequadamente o acumulador	4.2 Vazamento	Deterioração da sede ou contra-sede	- Impossibilidade de executar manutenção no acumulador.
	Quebra do mecanismo interno	- Perda de proteção de nível de óleo muito baixo			
	Emperramento da haste				
5. Válvula detectora de pressão	Pilotar a válvula de intermitência, mantendo constante a pressão na linha de óleo	Pilotar inadequadamente a válvula de intermitência	5.1 Vazamento	Deterioração da sede ou contra-sede	- Perda gradativa da carga de óleo podendo levar a parada do grupo por nível muito baixo (71LE)
			5.2 Obstrução de fluxo na abertura da válvula (63CR) (71LE)	Quebra do mecanismo interno	- Pressão baixa na linha de óleo - Nível baixo no acumulador ar/óleo - Risco de TRIP na unidade geradora por nível baixo no acumulador
				Emperramento da haste	
			5.3 Obstrução de fluxo no fechamento da válvula (63CR) (26LK)	Quebra do mecanismo interno	- Pressão alta na linha de óleo - Alta temperatura de óleo - Distúrbio no funcionamento do sistema de resfriamento - Perda das características físicas do óleo
6. Filtro	Filtrar o óleo	Não filtrar o óleo	6.1 Deterioração (DTOR)	Rompimento da manha do filtro	- Risco de contaminação da carga de óleo
				Ruptura dos O'rings	- vazamento de óleo

		Obstruir a passagem de óleo	6.2 Entupimento.	Excesso de impurezas no elemento filtrante	- Comprometimento do resfriamento do sistema - Alta temperatura do óleo (26LK)
7. Painel de comando, controle e soft start	Indicar o status, partir, parar e comutar automaticamente as motobombas. Realizar paradas de emergência.	Perda de indicação de status	7.1 Perda de indicação	Mau contato na fiação Queima de LED's	- Falha na supervisão
		Problemas no automatismo das motobombas	7.2 Problemas de acionamento automático	Má conexão dos bornes da contatora	- Risco de TRIP na unidade geradora - Distúrbio no funcionamento normal do sistema
				Queima de componentes da cartela eletrônica	
				Bobina das contadoras com resistência ressecada	
		Não obedecer comandos manuais	7.3 Problemas de acionamento manual	Contatos danificados	- Risco de TRIP na unidade geradora - Distúrbio no funcionamento normal do sistema
				Má conexão dos bornes da contatora	
		Falha nos dispositivos de sobrevelocidade	7.4 Atuação das proteções (12LA) (12LB) (R29) (94SVX.1) (94SVX.2) (94SVX1)	Queima de componentes da cartela eletrônica	- Risco de TRIP na unidade geradora - Distúrbio no funcionamento normal do sistema - Distúrbio no controle de velocidade do sistema
Bobinas das contadoras com resistência ressecada					
Contatos danificados					
Falha na soft start	7.5 Atuação da proteção R27 (sub-tensão)	Falta de ajuste dos relés	- Defeito na partida das motobombas AE e AF - Risco de TRIP na unidade geradora		

Tabela 6.5: FMEA para Sistema de Regulação da Velocidade – Sistema de Comando Hidráulico.

SISTEMA DE REGULAÇÃO DE VELOCIDADE – SISTEMA DE COMANDO HIDRÁULICO					
FUNÇÃO	Controlar nível e pressão de óleo do acumulador ar/óleo.				
COMPONENTE	FUNÇÃO DO COMPONENTE	FALHA FUNCIONAL	MODO DE FALHA	CAUSA DA FALHA	EFEITOS DA FALHA
1. Acumulador ar/óleo	Armazenamento de óleo pressurizado de 31 a 41 bar (pressão normal de operação 34 a 40 bar) para a movimentação das palhetas do distribuidor	Sobrepessão acima de 41 bar	1.1 Sobrepessão (63LG)	Emperramento na posição aberta da válvula de alimentação de ar comprimido BV e não atuação da válvula de segurança dos acumuladores de ar e ar/óleo	- Sobrepessão na linha de óleo - Rompimento de vedações e tubulações - Risco de acidente pessoal - Risco iminente de indisponibilidade do sistema de regulação da unidade
				Pressão abaixo de 31 bar	1.2 Baixa pressão (63LF)
		Vazamento de ar devido ao rompimento na tubulação e acessórios de alimentação de ar no acumuladores			
Não reposição de óleo para o sistema pelas motobombas					
2. Válvula distribuidora	Transformar o sinal hidráulico, oriundo a válvula piloto, em comando hidráulico para acionamento dos servomotores	Não controlar o fluxo de óleo	2.1 Não obedece comando (BA)	Micro switch desajustada	- Perda de automatismo - Distúrbio no funcionamento normal do sistema
			2.2 Vazamento	Deterioração da sede ou contra-sede	- Perda gradativa da carga de óleo podendo levar a parada do grupo por nível muito baixo
			2.3 Obstrução de fluxo (63CR)	Quebra do mecanismo interno	- Comanda o fechamento da válvula de isolamento
Emperramento da haste	- Atuação de TRIP na unidade geradora				

6.3 – REGRAS PARA O SISTEMA DE REGULAÇÃO DA VELOCIDADE

A base de conhecimento do sistema inteligente possui regras para todos os sensores de cada sistema (sistema da turbina, sistema do gerador e sistema de mancais), porém somente os sensores de temperatura foram instalados até o momento. As regras desenvolvidas para o sistema da turbina estão disponíveis no apêndice E do presente trabalho.

A tag G126LK (temperatura do óleo de regulação) foi selecionada para exemplificar as regras desenvolvidas para o sistema de regulação da velocidade. Nesse exemplo serão apresentadas as regras para monitoração de condição, diagnóstico e tomada de decisão. O primeiro bloco de regras testado para uma tag específica encontra-se na camada de monitoração de condição (como já foi explicado anteriormente), a figura 6.7 apresenta o bloco de regras para a camada de monitoração da tag G126LK.

```
(defrule UGH1-SRV-MonitoracaoCondicao-40
  (signal-GOOD "g1.srv.st.t.oleo.regulacao")
  (condition-NORMAL "g1.srv.t.oleo.regulacao")
  =>
  (assert (condition G126LK-normal))
)

(defrule UGH1-SRV-MonitoracaoCondicao-41
  (signal-GOOD "g1.srv.st.t.oleo.regulacao")
  (condition-HIGH "g1.srv.t.oleo.regulacao")
  ?tt <- (Tag {label == "_g126lk"})
  =>
  (modify ?tt (value "alto"))
  (assert (condition G126LK-alto))
)

(defrule UGH1-SRV-MonitoracaoCondicao-42
  (signal-GOOD "g1.srv.st.t.oleo.regulacao")
  (condition-ALARM "g1.srv.t.oleo.regulacao")
  ?tt <- (Tag {label == "_g126lk"})
  =>
  (modify ?tt (value "alarme"))
  (assert (condition G126LK-alarme))
)

(defrule UGH1-SRV-MonitoracaoCondicao-43
  (signal-GOOD "g1.srv.st.t.oleo.regulacao")
  (condition-TRIP "g1.srv.t.oleo.regulacao")
  ?tt <- (Tag {label == "_g126lk"})
  =>
  (modify ?tt (value "trip"))
  (assert (condition G126LK-trip))
)
```

Figura 6.7: Regras para Camada de Monitoração de Condição – tag G126LK.

Observe a figura 6.7, ela apresenta as regras para a camada de monitoração da tag G126LK. Os *labels* (ex.: “g1.mgg.st.t.metal.mguia.sup2”) são as variáveis Jess, descritas na figura 3.21, usadas no processamento inteligente. Esses *labels* fazem referência a tag e recebem o valor adquirido via OPC. Na camada de monitoração de condição os valores de operação da tag são testados com a finalidade de detectar alguma alteração. Em geral, são definidos quatro valores para cada tag e esses valores são: normal, baixo/alto, alarme e *trip*. A tag pode apresentar defeito quando seu valor de operação aumenta ou diminui muito. Entretanto, alguns medidores específicos indicam defeito tanto quando o valor de operação diminui quanto quando ele aumenta, ou podem não possuírem valor de *trip*. A variação na faixa de valores causa defeitos/falhas para o equipamento e o diagnóstico é feito na camada de diagnóstico e será apresentado na próxima seção.

6.3.1 – Diagnóstico

A camada de diagnóstico oferece o diagnóstico das falhas ocorridas no processamento de sinal e o diagnóstico para cada condição testada na camada de monitoração de condição. A figura 6.8 apresenta as regras de diagnóstico para a tag G126LK.

```
(defrule UGH1-SRV-Diagnostico-11
  (signal-BAD-0 "g1.srv.st.t.oleo.regulacao")
  =>
  (printout gui14 "srv-amarelo#")
  (printout gui12 "G126LKSIND0#electronics#")
)

(defrule UGH1-SRV-Diagnostico-50
  (condition G126LK-alto)
  =>
  (printout gui14 "srv-amarelo#")
  (printout gui11 "G126LKD1#operators#")
)

(defrule UGH1-SRV-Diagnostico-51
  (condition G126LK-alarme)
  =>
  (printout gui14 "srv-vermelho#")
  (printout gui11 "G126LKD2#mechanics#")
)

(defrule UGH1-SRV-Diagnostico-52
  (condition G126LK-trip)
  =>
  (printout gui14 "srv-vermelho#")
  (printout gui11 "G126LKD3#mechanics#")
)
```

Figura 6.8: Regras para Camada de Diagnóstico – tag G126LK.

A regra de número 11 oferece o diagnóstico de uma falha de processamento de sinal. Além de diagnosticar a falha, essas regras são responsáveis por enviar mensagens para as equipes responsáveis, a fim de que realizem as intervenções de manutenção sugeridas pelo sistema. Tais intervenções de manutenção são oferecidas pela camada de tomada de decisão. Não se encontram nas regras a descrição da falha nem a descrição da tomada de decisão, existem códigos que apontam para uma descrição que está armazenada em um arquivo de indexação.

As regras de 50 a 52 fazem o diagnóstico das falhas no equipamento, nesse caso no medidor de temperatura do óleo de regulação. Essas regras estão relacionadas com as regras da camada de monitoração de condição e detectam falhas ocorridas para as seguintes faixas de valores descritas anteriormente.

Os códigos indicam o código da falha e a equipe que deve ser acionada para tomar as medidas de manutenção necessárias. A estruturação das regras foi detalhada na seção 3.2.4, os códigos para as falhas catalogadas para a tag G126LK são apresentados na figura 6.9.



Um arquivo de texto contendo sete linhas de códigos de falha e suas descrições. Cada linha começa com um código em verde, seguido de uma descrição em preto. O código de cada linha é: G126LKSIND0, G126LKSIND1, G126LKSIND2, G126LKSIND3, G126LKSIND4, G126LKD1, G126LKD2, e G126LKD3. As descrições detalham falhas no processamento de sinal, erros de configuração, mal contato, falhas no transmissor de temperatura, e alta temperatura do óleo de regulação.

```
G126LKSIND0#Falha no processamento de sinal do tag G126LK#81#G126LK - STATUS BAD#Nao especifica#4#4#  
G126LKSIND1#Falha no processamento de sinal do tag G126LK#81#G126LK - STATUS BAD#Erro na configuracao do  
servidor FieldBus#2#4#  
G126LKSIND2#Falha no processamento de sinal do tag G126LK#81#G126LK - STATUS BAD#Mal contato na conexao do  
transmissor G126LK#1#4#  
G126LKSIND3#Falha no processamento de sinal do tag G126LK#81#G126LK - STATUS BAD#Falha no transmissor de  
temperatura G126LK#1#4#  
G126LKSIND4#Falha no processamento de sinal do tag G126LK#81#G126LK - STATUS BAD#Falha no transmissor de  
temperatura do oleo de regulacao#1#4#  
G126LKD1#Alta temperatura do oleo de regulacao#413#G126LK - ALERTA#Sujeira nos trocadores de calor#1#3#47  
G126LKD2#Alta temperatura do oleo de regulacao#413#G126LK - ALARME#Sujeira nos trocadores de calor#1#4#48  
G126LKD3#Alta temperatura do oleo de regulacao#413#G126LK - TRIP#Sujeira nos trocadores de calor#1#6#55
```

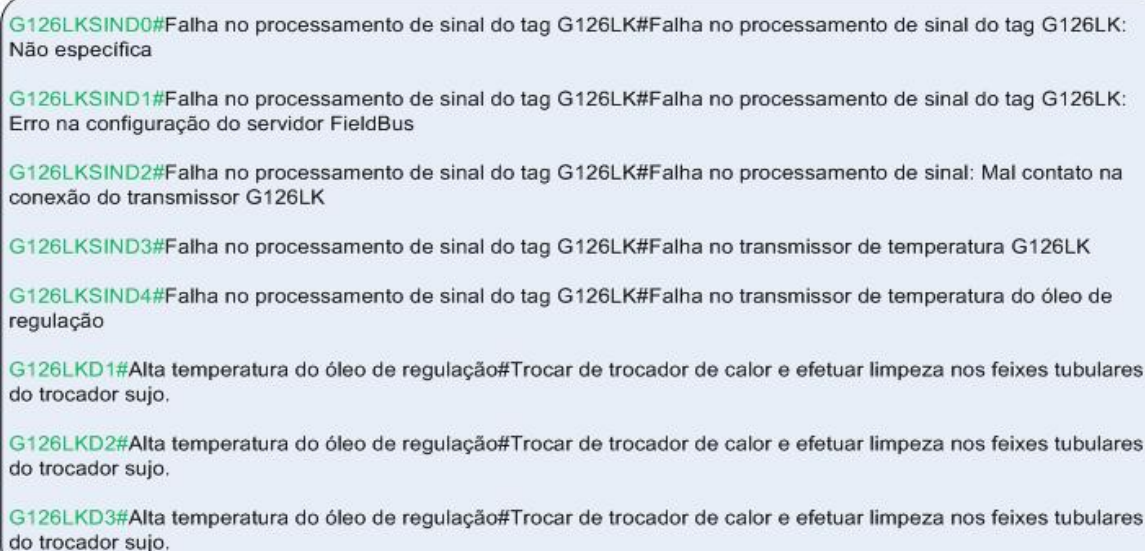
Figura 6.9: Arquivo de falhas – falhas para a tag G126LK.

Na figura 6.9 os códigos (primeiro bloco de caracteres separado por #) referem-se às falhas diagnosticadas nas regras. Para cada código foram listadas todas as possíveis causas para a falha encontrada, as informações desse arquivo foram retiradas da FMEA desenvolvida para o sistema de regulação da velocidade. O sistema acessa essa descrição através do código, e a descrição compõe o histórico de anomalias (que foi apresentado na seção

5.1.1.3.). Após diagnosticar a falha o próximo passo de execução é sugerir tomadas de decisão para tal falha, a próxima seção apresenta a tomada de decisão para as falhas do medidor G126LK.

6.3.2 – Tomada de Decisão

Assim como o diagnóstico da falha, a tomada de decisão também está armazenada em um arquivo de indexação. É pelo código da falha (do arquivo de falhas) que o sistema encontra, no arquivo de decisão, a tomada de decisão sugerida para aquela falha. A figura 6.10 apresenta a tomada de decisão para as falhas catalogadas para o medidor G126LK.



G126LKSIND0#Falha no processamento de sinal do tag G126LK#Falha no processamento de sinal do tag G126LK: Não específica

G126LKSIND1#Falha no processamento de sinal do tag G126LK#Falha no processamento de sinal do tag G126LK: Erro na configuração do servidor FieldBus

G126LKSIND2#Falha no processamento de sinal do tag G126LK#Falha no processamento de sinal: Mal contato na conexão do transmissor G126LK

G126LKSIND3#Falha no processamento de sinal do tag G126LK#Falha no transmissor de temperatura G126LK

G126LKSIND4#Falha no processamento de sinal do tag G126LK#Falha no transmissor de temperatura do óleo de regulação

G126LKD1#Alta temperatura do óleo de regulação#Trocar de trocador de calor e efetuar limpeza nos feixes tubulares do trocador sujo.

G126LKD2#Alta temperatura do óleo de regulação#Trocar de trocador de calor e efetuar limpeza nos feixes tubulares do trocador sujo.

G126LKD3#Alta temperatura do óleo de regulação#Trocar de trocador de calor e efetuar limpeza nos feixes tubulares do trocador sujo.

Figura 6.10: Arquivo de decisão – tomada de decisão para a tag G126LK.

O arquivo de decisão contém todas as intervenções de manutenção e/ou operação para as falhas catalogadas. No exemplo apresentado na figura 6.10 estão as tomadas de decisão para as possíveis falhas do medidor de temperatura do óleo de regulação do sistema de comando hidráulico.

6.4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.4.1 Análise dos Resultados

Durante o desenvolvimento do sistema vários testes foram realizados para avaliação de desempenho principalmente do ciclo de inferência. Parte dos testes foram feitos usando a Planta Didática III da Smar (que está instalada no GRACO-UnB), esta planta oferece alguns exemplares dos sensores que foram instalados na usina.

O procedimento de teste era o seguinte: alterar os parâmetros de operação das regras para que estivessem de acordo com os parâmetros de operação dos sensores da Planta Didática; mudar os *labels* das regras para que indicassem as tags da Planta Didática. Assim, as regras e o ciclo de inferência do sistema poderiam ser testados. Durante essa primeira etapa de testes o sistema, em especial as regras, foi refinado com o intuito de melhorar o desempenho.

A segunda etapa de testes compreendeu a instalação do sistema na Usina de Balbina, e naquela ocasião o sistema foi conectado diretamente a rede da usina que dá acesso aos sensores instalados nas UGHs. Novamente as regras foram refinadas e uma última entrevista com os operadores foi realizada com a finalidade de corrigir algum erro existente nas regras. Testes simulados também foram feitos, pois nenhuma falha ocorreu no sistema físico (durante o período de testes) e diante disso o sistema não detectou nenhuma anomalia nos sistemas monitorados. A simulação permitiu verificar se o sistema estava detectando de forma correta as anomalias que pudessem ocorrer.

O resultado dos testes, de simulação, realizados na usina permitiu identificar que o sistema estava demorando muito para processar o ciclo de inferência e com isso não detectava algumas falhas ocorridas. Uma análise detalhada foi efetuada e descobriu-se que o arquivo de regras estava muito grande e isso prejudicava o ciclo de inferência do sistema. Para resolver esse problema foram desenvolvidas as meta-regras e o arquivo de regras foi dividido em 16 arquivos, conforme foi explicado na seção 3.2.4. A solução desse problema permitiu que o sistema executasse o processamento inteligente de forma correta detectando as falhas ocorridas.

Até a data da avaliação passaram-se aproximadamente dois meses, e neste período o sistema foi avaliado com o objetivo de detectar alguma falha na implementação para que a versão final pudesse ser entregue com o mínimo de erros. Após isto o sistema foi implantado e encontra-se em funcionamento até o presente momento, o que soma aproximadamente três meses. Contudo, o sistema ficou fora de operação durante um mês por problemas na rede da usina. Desde a implantação nenhum problema foi detectado no sistema inteligente, e os operadores da usina utilizam o sistema para identificar as anomalias.

No subsistema analisado só existem dois sensores instalados, (temperatura da água de resfriamento e temperatura do óleo de regulação) pois somente os sensores de temperatura estão instalados na usina. Desde que foi implantado até o presente momento o sistema detectou poucas anomalias no sistema da turbina, sendo que o sensor que costuma apresentar mais falhas é o sensor de temperatura da água de resfriamento do trocador de calor.

Após consultar os históricos de anomalia do sistema foi possível observar que ocorreram duas anomalias no sistema de regulação da velocidade da UGH 5, estas são: alta temperatura do óleo de regulação e alta temperatura da água de resfriamento. Estas falhas não foram detectadas nas demais UGHs da usina e, a partir de informações coletadas pode-se observar que esta falha é mais freqüente na UGH 5 pois está localizada no leito do rio e sujeita a maior contato com a sujeira trazida pela água. A temperatura alta no óleo de regulação ocorreu no dia 07 de abril de 2008 e não há registro da data de término da anomalia. O histórico de decisão indica que o sistema forneceu uma sugestão de manutenção para a anomalia detectada indicando que o sinal disparado era de alerta.

Quando a anomalia ocorre o sistema detecta a anomalia, registra a data da ocorrência e fornece uma tomada de decisão. O esperado é, que o operador informado da ocorrência da anomalia adote a tomada de decisão sugerida pelo sistema e informe (para o sistema) a data de término da anomalia. Isto indica que a tomada de decisão foi adotada e a anomalia resolvida. Entretanto, esse retorno do usuário não está ocorrendo, por isso não há registro da data de término da anomalia.

Analisando o gráfico entre datas pode-se observar que houve uma elevação da temperatura do óleo de regulação da UGH 5, porém não permaneceu depois do dia 07 de abril, mas não há registro da data de término da falha. A figura 6.11 apresenta o gráfico da tag G526LK para o período de 4 de abril a 28 de abril de 2008.

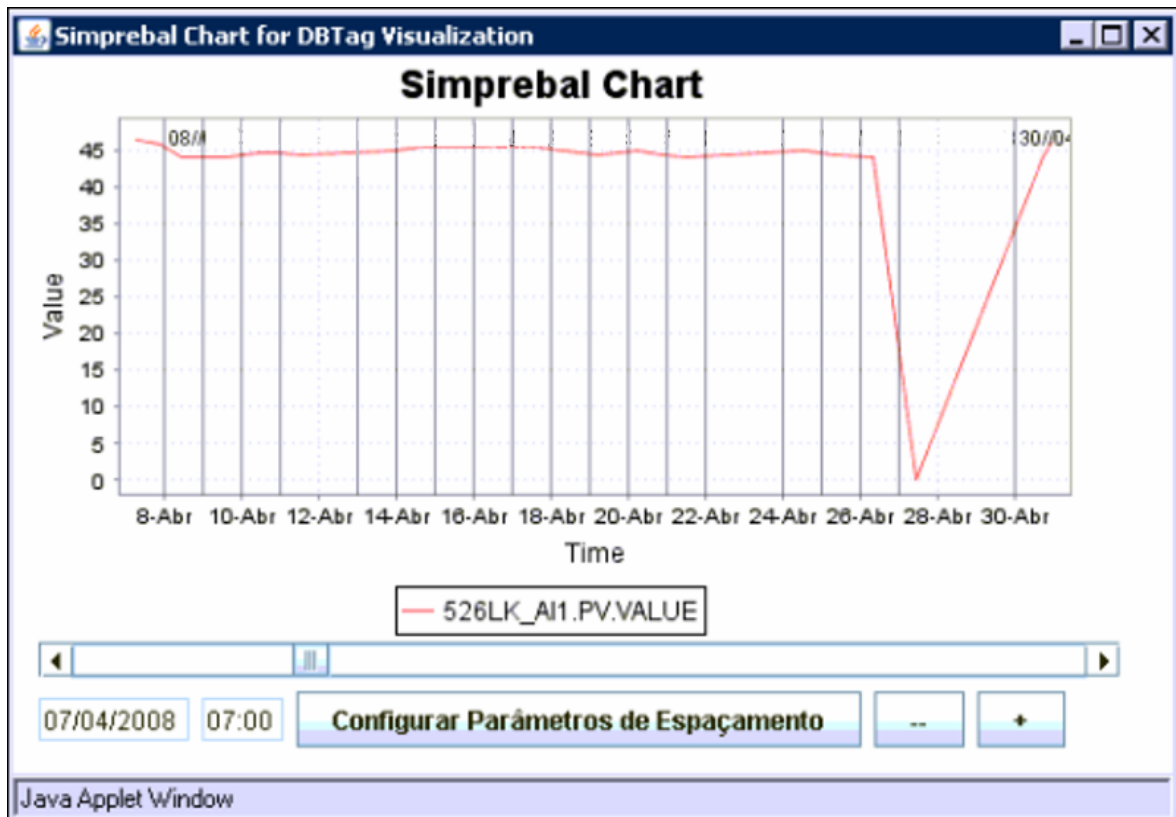


Figura 6.11: Gráfico entre datas para a tag G526LK.

Observando o gráfico apresentado na figura 6.11 pode-se notar que aconteceu uma pequena elevação da temperatura e foi detectada no dia 7 de abril de 2008 (sublinhado na figura). Esta alteração no parâmetro de operação indica que a temperatura está aumentando e neste caso o sistema deve fornecer um sinal de alerta para os operadores. Como parte do processamento inteligente, o sistema também deve fornecer uma tomada de decisão para a anomalia detectada, que neste caso é trocar de trocador de calor e efetuar a limpeza nos feixes tubulares. Entretanto, a sugestão só é adotada se o problema persistir e se houver uma elevação considerável da temperatura, o que não é o caso.

O sistema também detectou outra falha no sistema de regulação da velocidade. A falha indica alta temperatura na água de resfriamento. A falha foi detectada inicialmente no dia 07 de abril de 2008, sem registro de data de término. E reapareceu no dia 28 de maio de

2008 permanecendo até o dia 04 de junho de 2008, para este período também não há registro da data de término da falha. O histórico de decisão indica que o sistema forneceu as sugestões de manutenção definidas para a falha detectada sendo estas: verificar obstrução ou fechamento indevido do registro de água, trocar de trocador de calor e efetuar a limpeza dos feixes tubulares do trocador sujo. Assim como no exemplo anterior, a sugestão só é adotada se o problema persistir e se houver uma elevação considerável da temperatura.

O gráfico de tendência da tag G526AR mostra que ocorreu uma elevação na temperatura da água de resfriamento no período que compreende os dias 28 de maio a 04 de junho. A figura 6.12 apresenta o gráfico da tag G526AR no período em que a falha ocorreu e, pode-se observar que houve uma elevação mínima na temperatura. É importante ressaltar que a tag analisada não possui valor de *trip*, então as regras dispararam um sinal de alarme e indicaram uma anomalia. A tomada de decisão oferecida pelo sistema sugere uma intervenção de manutenção imediata. Entretanto, pode-se observar nas entrevistas realizadas que este tipo de intervenção de manutenção não é feita imediatamente quando a temperatura começa a elevar.

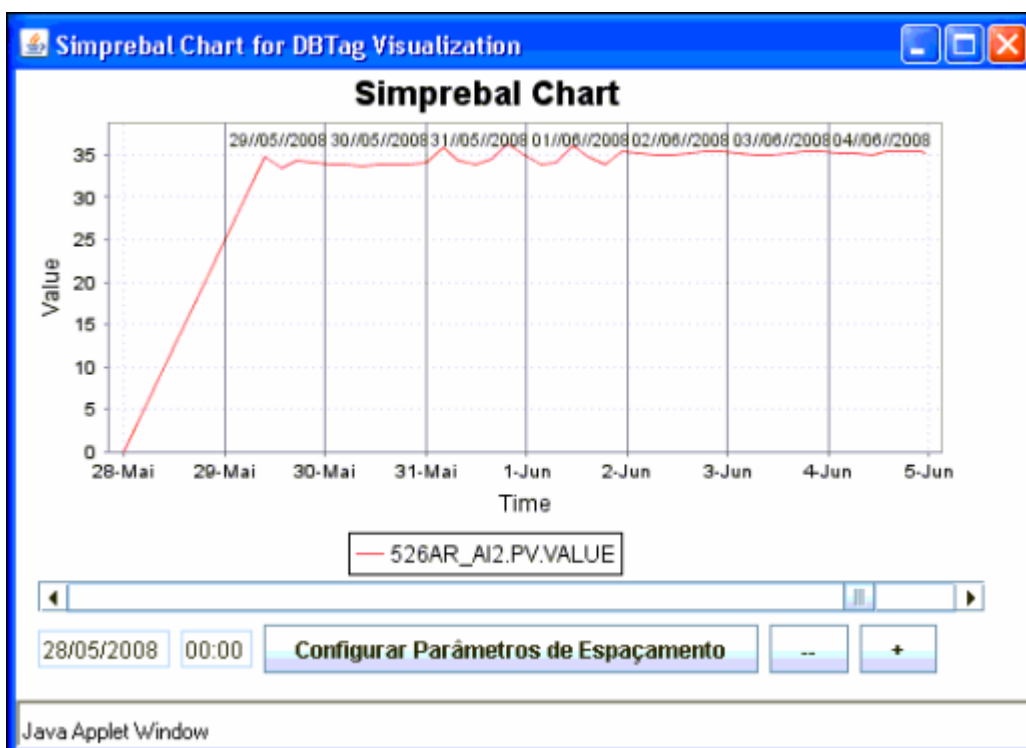


Figura 6.12: Gráfico da tag G526AR – 28/05/2008 à 04/06/2008.

Outro fator a ser observado é que as regras estão disparando à menor elevação de temperatura do sensor. Dado que a tag tem valor de alarme sua função é alertar para a elevação de temperatura isso não implica em anomalia imediata, mas futura. Diante disto, pode-se afirmar que tanto a sugestão de tomada de decisão do sistema, quanto à faixa definida para os valores de operação são muito conservadoras e possivelmente não foram adotadas pela equipe de manutenção. Não se pode afirmar que a sugestão foi adotada, pois não existe no sistema um espaço onde o usuário possa informar (para o sistema) o resultado da solução oferecida, se ela foi adota e se condiz com a realidade.

A figura 6.13 mostra o cálculo do KPI para as duas tags analisadas nesse estudo de caso. Os KPIs são medições quantificadas que antecipadamente refletem os fatores críticos de sucesso, tentando garantir: excelência operacional, excelência de serviço e confiabilidade do sistema. A figura 6.13 mostra a criticidade dos equipamentos que foram analisados, o número de sinais disparados pelo sistema, o número total de falhas ocorridas nos equipamentos, dentre outras informações.

Número de ocorrências de ALERTA: 885
 Número de ocorrências de ALARME: 687
 Número de ocorrências de TRIP: 0

Taxa de falhas: 0.229 falhas/hora
 Tempo médio entre falhas (MTBF): 4.3668 horas/falha
 Tempo médio de reparo (MTTR): 0 horas/reparo

TAG	STATUS	Número de ocorrências
G526AR	ALARME	687
G526AR	ALERTA	877
G526LK	ALERTA	8

EXCELENCIA OPERACIONAL

Número de ocorrências de FALHAS: 687

CRITICIDADE DAS FALHAS				
Defeito/Falha	Severidade	Número de ocorrências	Dificuldade de detecção	Número de prioridade de risco (NPR)
Alta temperatura da água de resfriamento	3	877	1	2631
Alta temperatura da água de resfriamento	4	687	1	2748
Alta temperatura do óleo de regulacao	3	8	1	24
Criticidade geral do equipamento: 2748				

Figura 6.13: Avaliação de saúde para o Sistema de Regulação da Velocidade.

As possíveis falhas, as regras de produção, o diagnóstico, a tomada de decisão, bem como a FMEA para esse sensor foram apresentadas neste capítulo. O objetivo foi analisar o desempenho do sistema como um todo, apresentar as falhas catalogadas, a FMEA gerada e exemplificar que a partir disto as regras foram geradas. Para tanto foi escolhido o sistema da turbina, mais especificamente o sistema de regulação da velocidade. A próxima seção apresenta a análise da metodologia apresentada no capítulo 3, suas vantagens, desvantagens e o que pode ser aprimorado.

6.4.2 – Análise da Metodologia para Desenvolvimento de Sistemas Inteligentes Aplicados à Manutenção Baseada em Condição

Conforme foi apresentado na seção 2.4.1.1 a técnica de sistema especialista é bastante usada na solução de problemas relacionados à manutenção baseada em condição. Apesar da dificuldade de gerar a base de conhecimento de um sistema especialista, a base possui informações explícitas que são a fonte do raciocínio de cada avaliação feita pelo sistema. Este nível de transparência é importante para verificar a corretude do diagnóstico proposto pelo sistema, bem como a ausência de sugestões de diagnósticos. A transparência permite, aos usuários e aos engenheiros responsáveis pela manutenção, localizar as áreas vulneráveis do sistema.

Pode-se afirmar que uma das dificuldades encontradas na elaboração do sistema foi o desenvolvimento da base de conhecimento. Até a conclusão da versão final da base várias etapas foram realizadas, incluindo: entrevistas com os especialistas, catalogação das falhas, desenvolvimento da FMEA e dos planos de manutenção, desenvolvimento da metodologia para gerar bases de conhecimento, elaboração das meta-regras e finalmente implementação e refinamento das regras. Entretanto, apesar de esta tarefa envolver outras sub tarefas e consumirem um tempo considerável do desenvolvimento do sistema, é possível afirmar que a base reflete informações reais e permite apresentar para o usuário o conhecimento de forma clara e precisa.

Outro ponto forte é a metodologia desenvolvida para gerar base de conhecimento aplicada à manutenção baseada em condição de usinas hidrelétricas. Tal metodologia oferece um padrão para desenvolvimento de bases de conhecimento, no qual o desenvolvedor tem um roteiro completo de como organizar as informações da base e o conjunto de ferramentas que podem ser usadas para gerar as regras (FMEA, Plano de Manutenção, dentre outros).

O sistema permite monitorar as tags dos sensores ligados às UGHs e oferece um sinótico no qual o usuário pode acessar informações relevantes sobre os sistemas monitorados. Tais informações estão disponíveis na forma de gráficos de tendências e monitoração das tags em tempo real o que possibilita a identificação imediata de alguma alteração nos valores de operação e, quando alguma alteração ocorre, o sistema fornece a tag onde ocorreu o problema e a descrição da falha. O sistema ainda oferece um *browser web* no qual o

usuário pode acessar os históricos de todas as anomalias ocorridas em cada sistema e das tomadas de decisão, as informações estão armazenadas no banco de dados do sistema e poderão ser usadas futuramente.

A versão implementada do sistema não incluiu a tarefa de aprendizado, um sistema inteligente típico realiza três tarefas básicas: aquisição de dados, raciocínio e aprendizado. O sistema inteligente apresentado neste trabalho realiza apenas as tarefas de aquisição de dados e raciocínio, de acordo com a técnica de IA adotada (Sistema Especialista). Portanto, caso aconteça alguma situação (falha) não prevista nas regras, além de não resolver o problema o sistema não poderá aprender a nova situação. Para solucionar esta deficiência será proposta uma sugestão de solução com a qual é possível implementar o módulo de aprendizado preservando a metodologia para desenvolvimento de base de conhecimento proposta no capítulo 3 do presente trabalho. A proposta será apresentada na próxima seção.

6.4.3 – Sugestão de Solução

É importante ressaltar que as falhas armazenadas na base de conhecimento do sistema são as falhas já ocorridas. Caso ocorra uma falha que não está armazenada na base de conhecimento o sistema fornecerá um dos diagnósticos armazenados mesmo que esse não se encaixe na nova falha, veja figura 6.14. O ciclo de processamento do sistema inteligente apresentado no presente trabalho compreende dois passos, a saber: aquisição de dados e raciocínio. Na versão implementada, o sistema não tem a capacidade de aprender novas falhas, para solucionar este problema esta seção apresenta uma sugestão de solução que viabiliza o aprendizado do sistema inteligente.

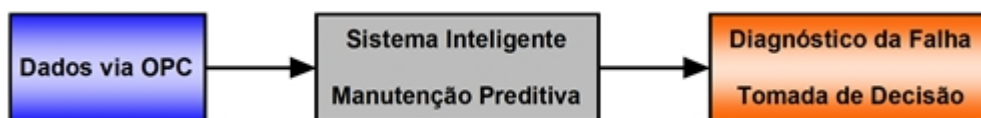


Figura 6.14: Visão geral do sistema inteligente de manutenção preditiva – entrada e saída de informação.

A proposta é aproveitar a metodologia para desenvolvimento de base de conhecimento, apresentada no capítulo 3 e a partir dela desenvolver um módulo que seja capaz de gerar novas regras usando a estrutura definida na metodologia. Assim, sempre que ocorrer uma nova falha o sistema armazena a descrição da situação (cenário em que a falha ocorreu)

valor de operação que desencadeou a falha, o diagnóstico da mesma e a tomada de decisão. Então, a nova proposta de arquitetura do sistema inclui um módulo de aprendizado responsável por desenvolver as tarefas descritas nesse parágrafo. A figura 6.15 apresenta a nova arquitetura do sistema inteligente.

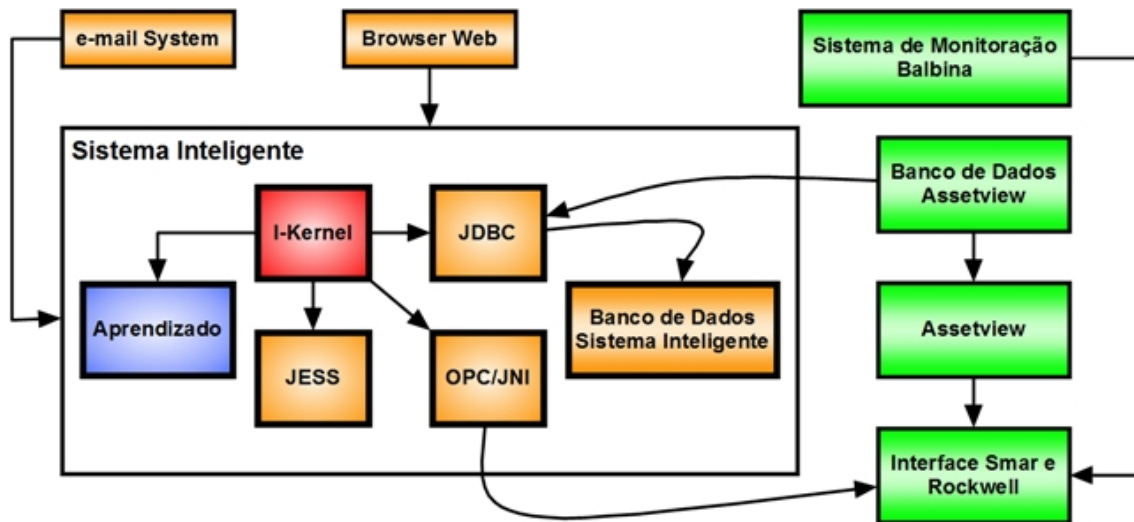


Figura 6.15: Arquitetura do sistema inteligente – incluindo módulo de aprendizado.

A única informação armazenada direto do sistema seria a descrição da situação (acrescentada na camada de monitoração de condição) o diagnóstico da falha e a tomada de decisão deveriam ser informados pelo usuário e o sistema se encarregaria de converter para o formato definido na metodologia e em seguida armazenar as informações nas regras e arquivos de falhas e decisão. Entretanto, a chance de ocorrer um cenário diferente dos que já estão armazenados na camada de monitoração de condição é pequena. Isto ocorre porque as faixas de operação descritas na camada de monitoração de condição englobam todas as possibilidades de valores de operação.

O que pode ocorrer de fato é: um cenário já catalogado na camada de monitoração de condição levar a uma falha não especificada no diagnóstico. Assim, o sistema forneceria um diagnóstico existente na base de conhecimento, mas este não se enquadraria na situação real que seria detectada pelos operadores. O resultado então seria: diagnóstico e tomada de decisão que não refletem a realidade. Neste caso, o sistema não seria capaz de resolver o problema. Entretanto, se for desenvolvido um módulo de aprendizado o usuário (operadores e equipe de manutenção) informariam ao sistema o diagnóstico da nova falha e

a tomada de decisão adotada e o sistema armazenaria essas informações seguindo a metodologia para gerar base de conhecimento proposta no presente trabalho.

Como existe uma metodologia bem definida para gerar a base de conhecimento, e cada camada de processamento possui particularidades que foram implementadas nas regras, pode se afirmar que existe um padrão a ser seguido. Tal padrão pode ser observado na seção 3.2.1.

As regras possuem comandos que se repetem e cada camada possui uma estrutura definida. Então, seria necessário desenvolver um módulo que fosse capaz de gerar as regras automaticamente a partir das informações fornecidas pelo usuário. Essas informações são:

- Diagnóstico: tag, modo da falha, e causa da falha;
- Tomada de decisão: tag, modo da falha, intervenção de manutenção adotada.

Com essas informações é possível gerar as regras para diagnóstico, atualizar o arquivo de falhas e o arquivo de tomada de decisão. Assim, a nova falha seria armazenada aumentando o conhecimento do sistema. O ciclo do processamento inteligente da proposta de solução pode ser observada na figura 6.16.

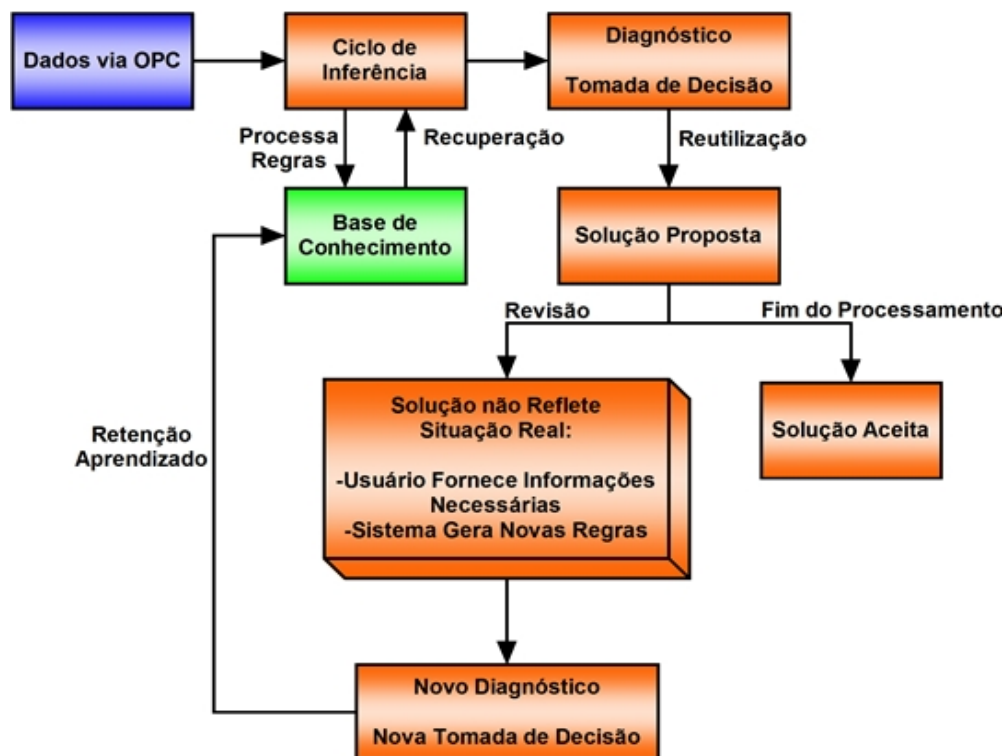


Figura 6.16: Ciclo dos sistema inteligente baseado no ciclo do RBC.

Essa proposta segue a idéia do Raciocínio baseado em casos, com algumas alterações:

- O processamento inteligente, que equivale à tarefa de *recuperação* do caso em RBC, será executado pelo Jess, que executa as regras existentes (realiza uma busca para encontrar nas regras um caso onde a situação atual se encaixe, essa tarefa é feita na camada de monitoração de condição);
- *Reutilização* do conhecimento recuperado que vem na forma de diagnóstico da falha e tomada de decisão sugerida;
- *Revisão* do conhecimento fornecido, esta tarefa é feita pelo usuário do sistema. É nesta etapa que o usuário pode perceber se a solução fornecida pelo sistema reflete a situação real. Caso isso não ocorra o usuário fornece as informações necessárias e o sistema as converte em regras;
- *Retenção* do conhecimento (aprendizado) nesta etapa o sistema armazena o novo diagnóstico e a nova tomada de decisão para a nova falha.

A proposta apresentada nesse seção tem o objetivo de oferecer uma metodologia para desenvolvimento do módulo de aprendizado, visto que a primeira versão do sistema não aprende novas falhas. Com este intuito foi desenvolvida uma metodologia capaz de combinar a metodologia existente (que utiliza técnicas de Sistema Especialista) com outra metodologia (Raciocínio Baseado em Casos). Tal proposta permite que o novo sistema realize o aprendizado de novas falhas e novas tomadas de decisão. Entretanto, vale ressaltar que a mesma não foi implementada no presente trabalho, o objetivo é propor uma forma de implementar o aprendizado do sistema.

7 – CONCLUSÕES, CONTRIBUIÇÕES E TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo são apresentadas as considerações finais sobre a metodologia proposta, as conclusões sobre os principais resultados alcançados e as contribuições associadas ao trabalho de mestrado. Como último assunto, são propostas sugestões para trabalhos futuros que visam primordialmente complementar o desenvolvimento computacional do sistema inteligente de manutenção preditiva.

7.1 – CONCLUSÕES

Durante a etapa de desenvolvimento e teste da metodologia pode-se concluir que:

- As faixas de valores das regras estão muito conservadoras. Quando ocorre uma variação no valores de operação dos equipamentos, em alguns casos, os operadores não tomam medidas imediatas porque existe (de acordo com a experiência deles) um limite de tolerância até que a intervenção de manutenção seja adotada. Esse limite de tolerância não foi previsto no sistema, por isso as regras estão conservadoras.
- No sinal de alerta o sistema está sugerindo tomada de decisão imediata o que não é necessário. As tomadas de decisão são as mesmas para os sinais de alerta, alarme e trip. Entretanto, o sinal de alerta tem o objetivo, apenas, de avisar que existe uma variação que pode acarretar em falha. O que deve ser feito é alterar a tomada de decisão do sinal de alerta para que o operador fique atento à variação do valor, e informar quais problemas essa variação pode acarretar.
- A metodologia proposta é capaz de englobar todas as informações necessárias para a base de conhecimento, organizando o conhecimento adquirido a partir dos especialistas.
- A base possui estrutura definida e de fácil alteração.
- Desenvolvimento de métodos para implementação de sistemas inteligentes aplicados à manutenção preditiva de usinas hidrelétricas. Para tanto, foram apresentados os métodos usados na implementação do sistema, especialmente a combinação da metodologia OSA-CBM com Sistemas Especialistas. As principais classes do sistema foram apresentadas através de diagramas UML, que permitem maior compreensão das funções desenvolvidas.

- Desenvolvimento de métodos para implementação de bases de conhecimento aplicadas aos sistemas inteligentes. Todos os passos realizados no desenvolvimento, incluindo a coleta de dados, os critérios usados para definir as regras e a estrutura da base, foram apresentados com o objetivo de detalhar esse procedimento e auxiliar trabalhos futuros que possam utilizar este trabalho como fonte de referência.
- Métodos para realizar manutenção preditiva de turbinas hidráulicas utilizando o sistema especialista e a base de conhecimento, que foram desenvolvidos. No sistema a manutenção preditiva é realizada a partir do conhecimento das falhas, das medidas de manutenção adotadas, e da compreensão do funcionamento dos equipamentos.
- Implantação do sistema inteligente para que se possa melhorar a eficiência na detecção de falhas e reparos dos equipamentos da usina de Balbina.
- Testes exaustivos das regras e do sistema inteligente, incluindo testes reais e simulados.
- Monitoramento dos dados dos sensores instalados nos equipamentos da usina através das regras que compreendem a camada de monitoração de condição da base de regras.
- Aumento da qualidade do processo de detecção das falhas, fornecendo diagnósticos das anomalias e sugerindo tomadas de decisão.
- Suporte à decisão das equipes de operação e manutenção na tomada de decisão sugerindo intervenções de manutenção.
- Tratamento e interpretação das informações adquiridas a partir dos sensores instalados nos equipamentos que foram monitorados pelo sistema.

A partir dessas conclusões é possível identificar as contribuições do trabalho, bem como os trabalhos futuros que complementarão o que já foi desenvolvido.

7.2 – CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO

Este projeto resultou em uma metodologia para desenvolvimento de base de conhecimento aplicada à manutenção baseada em condição em que se utiliza a metodologia OSA-CBM como base para metodologia proposta no trabalho. Foi apresentado um roteiro detalhado para o desenvolvimento de bases de conhecimento utilizadas em sistemas inteligentes

aplicados na solução de problemas de manutenção baseada em condição de turbinas hidráulicas, para tanto foi desenvolvido um sistema inteligente que possui uma base de conhecimento desenvolvida a partir da metodologia sugerida no capítulo 3.

A metodologia pode ser empregada tanto na área acadêmica quanto na indústria. Na área acadêmica oferece uma sistemática para a elaboração de bases de conhecimento para auxiliar o desenvolvimento de sistemas inteligentes aplicados a manutenção preditiva. Na indústria, concede as empresas (aqui representadas pela UHE Balbina) à possibilidade de monitorarem seus equipamentos com o objetivo de prevenir falhas e defeitos.

A principal contribuição deste trabalho constitui na proposição de métodos baseados em aspectos de modelagem e implementação. Em se tratando de contribuições específicas relacionadas ao projeto e implementação do sistema, podem-se citar:

- Especificação e projeto de um sistema inteligente genérico que pode ser aplicado na manutenção baseada em condição de equipamentos;
- Monitoração das tags dos sensores instalados na turbina;
- Diagnóstico das possíveis falhas para todos os equipamentos, mesmo aqueles que ainda não possuem instrumentação instalada;
- Tomada de decisão que fornece sugestões de manutenção para as falhas diagnosticadas;
- Implementação de um sistema supervisorio que permite ao usuário acompanhar os processos da planta;
- Tratamento dos dados monitorados. As informações monitoradas são tratadas e traduzidas na forma de gráfico de tendências, históricos de anomalias, históricos de tomada de decisão, e inspeção de variáveis. Assim, o usuário poderá realizar uma avaliação mais precisa do que está ocorrendo nos equipamentos.
- Tradução do conhecimento do especialista em regras de produção, que puderam ser utilizadas como fonte de raciocínio para o sistema inteligente;
- Desenvolvimento da FMEA para todos os sistemas analisados (sistema de mancais, sistema da turbina e sistema do gerador);
- Implementação de um banco de dados relacional: Projeto e construção de um banco de dados relacional utilizado para armazenar a informação dos históricos de anomalia e tomada de decisão dos equipamentos. Esta é a principal função do

banco de dados, porém ainda são armazenados os cadastros dos funcionários da usina (aqueles que têm permissão para acessar o sistema) e arquivo de log que armazena os acessos ao sistema.

7.3 - TRABALHOS FUTUROS

Embora o sistema inteligente esteja operando com boa parte das funcionalidades necessárias, existe ainda muito trabalho a ser realizado para que este opere com todas as funcionalidades descritas na arquitetura gerada por esta metodologia. A seguir estão relacionadas as principais propostas de trabalhos futuros que visam complementar a implementação do sistema inteligente:

- Implementação do módulo de aprendizado do sistema. Uma alternativa seria implementar o módulo a partir da proposta apresentada na seção 6.4.3 do presente trabalho. Entretanto, outras técnicas de IA podem ser utilizadas, como Redes Neurais;
- Expansão da base de conhecimento para que sejam inseridas regras para os transformadores elevadores da usina;
- Atualizar a implementação atual de modo a criar um espaço no qual o usuário pode informar se o diagnóstico da falha e a tomada de decisão foram aceitos e resultaram na solução do problema. Esse retorno do usuário será de grande importância para a implementação do módulo de aprendizado do sistema;
- Criação de um *help* para documentar a utilização das funcionalidades: Este documento constitui a criação de um *help* para que os usuários utilizem as funcionalidades disponibilizadas pelo sistema. Um pequeno tutorial descreveria passo a passo como executar o sistema inteligente utilizando as funcionalidades oferecidas. O que existe hoje são manuais de instalação, operação e manutenção das regras, o *help* acoplado ao sistema facilitaria a solução de possíveis dúvidas dos usuários.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aamodt, A.; Plaza, E. Case-based reasoning: foundational issues, methodological variations, and system approaches. *Artificial Intelligence Communications*, Vol. 7, No 1.
- Alkaim, J. L. Metodologia para Incorporar Conhecimento Intensivo às Tarefas de Manutenção Centrada na Confiabilidade Aplicada em Ativos de Sistemas Elétricos. *Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, UFSC. Florianópolis, 2003.*
- Álvares, A. J. Uma Metodologia para Integração CAD/CAPP/CAM Voltada para Manufatura Remota de Peças Rotacionais Baseada na Internet. *Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, UFSC. Florianópolis, SC, 2005.*
- Álvares, A. J. SIMPREBAL: Metodologia do Sistema de Manutenção Preditiva da Usina de Balbina Baseado dos Dados Monitorados do Sistema de Supervisão e Controle Smar E Rockwell. *Relatório Técnico de Pesquisa*. Brasília, DF, 2006.
- Álvares, A. J.; Siméon, E. A.; Tonaco R. P. Sistema de Manutenção Baseada Em Condição para Usina Hidrelétrica de Balbina. *Congresso de Computación Aplicada, CAIP*. Assunción, Paraguai, 2007.
- Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/>. Acesso: 17 de junho de 2008.
- Amaya, E. J.; Tonaco R. P., Álvares, A. J. Sistema Inteligente de Manutenção Baseada Em Condição para Usina Hidrelétrica de Balbina. *8º Congresso Iberoamericano de Engenharia Mecânica*. Cusco, Peru, 2007.
- Arato Jr., A. Manutenção preditiva usando análise de vibrações. *Ed. Manole*. Barueri, SP, 2004.
- Bengtsson, M. Condition Based Maintenance System Technology – Where is Development Heading? *Euromaintenance 2004 – Proceedings of the 17th European Maintenance Congress*. Barcelona, Espanha, 2004.
- Beck, R.; Oliver, R.; Selecting key performance indicators for strategy. *Meridium Inc*. PTQ Winter 2004.
- Branco Filho, G. Dicionário de termos de Manutenção, Confiabilidade e Qualidade. *Ed. ABRAMAN*. Rio de Janeiro, RJ, 1996.

- Ciarapica, F.E; Giacchetta, G. Managing the condition-based maintenance of a combined-cycle power plant: An approach using soft computing techniques. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 19, 2006.
- Cugnasca, C. E.; Saraiva, A. M. Disciplina de instrumentação inteligente. Disponível em: <https://sistemas.usp.br/fenixweb/fexDisciplina?sgldis=PCS5713>. Acesso: 17 de maio de 2008.
- Cunha, F. S. Um Sistema Especialista para Previdência Privada. *Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, UFSC. Florianópolis, SC, 1995.*
- David, J. M.; Krivine, J. P. Augmenting Eexperience-based Diagnosis with Causal Reasoning. *Appl. Artif. Intell.*, vol. 3, no. 2/3, 1989.
- Diaper, D., Knowledge Elicitation: Principles, Techniques and Applications. *Ellis Horwood Limited, 1989.*
- Dunn, S., “Maintenance Terminology – Some Key Terms”. Disponível em: <http://www.maintenanceresources.com/ReferenceLibrary>. Acesso em: 10 de junho de 2006.
- Eckerson, W., “Ten Characteristics of a Good KPI”, *The Data Warehousing Institute, 2006.*
- ELETRONORTE – Centrais Elétricas do Norte do Brasil S/A. Programa de Manutenção Planejada, Gerência de Engenharia de Operação e Manutenção da Geração Hidráulica. *Centro de Análise e Monitoração de Máquinas do COGH. Brasília, DF, 2006.*
- Emmanouilidis, C.; Jantunen, E.; MacIntyre, J. Flexible software for condition monitoring, incorporating novelty detection and diagnostics. *Computers in Industry, 2006.*
- Fleming, P. V.; Oliveira, L. F. S. de; França, S. R. Aplicações de manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC) em instalações da Petrobrás. *In: V Encontro Técnico sobre Engenharia de Confiabilidade e Análise de Risco, Petrobrás. Rio de Janeiro, RJ, 1997.*
- Friedman-Hill, E. Jess in Action: Rule-Based Systems in Java. *Editores Manning 1ª ed. Greenwich, CT 2003.*
- Giacomet, L. F. Um Método para Determinação Qualitativa de Sobressalentes para Hidrogeradores. *Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, UFSC. Florianópolis, SC, 2001.*

- Gudwin, R. Especificação do Sistema - Sistema I-Kernel: Um Kernel Inteligente para o SIMPREBAL - Sistema de Manutenção Preditiva de Balbina. *Relatório Técnico*. Brasília, DF, 2006.
- Helman, H.; Andery, P. R. P. Análise de Falhas (Aplicação dos Métodos de FMEA – FTA). *Série Ferramentas da Qualidade – Volume 11. Fundação Christiano Ottoni, Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais*. Belo Horizonte, MG, 1995.
- IEEE STD 610.12-1990: Standard Glossary of Software Engineering Terminology.
- IEEE STD 830-1998: IEEE Recommended Practice for Software Requirements Specifications.
- Industry/University Cooperative Research Center for Intelligent Maintenance Systems – IMS. Disponível em: <http://www.imscenter.net>. Acesso: 09 de abril de 2008.
- International Organization for Standardization – International Standards for Business, Government and Society. Disponível em: <http://www.iso.org>. Acesso: 10 de maio de 2008.
- Jardine, A. K. S.; Lin, D.; Banjevic, D.. A Review on Machinery Diagnostics and Prognostics Implementing Condition-based Maintenance. *Mechanical Systems and Signal Processing*, v. 20, n. 7, 2006.
- Jacobson, I.; Booch, G.; Rumbaugh, J. The Unified Software Development Process. *Addison Wesley*, 1999.
- Lages, W. F. FieldBus Foundation: dedicated to a single international fieldbus. *Slides de aula*, 2006.
- Mateli, J. A.; Bazzo, E.; Silva, J. C. A Combined Expert System/Case-Based Reasoning Approach for Cogeneration Plant Design. *Proceedings of 19th International Congress of Mechanical Engineering*. Brasília, DF, 2007.
- McArthur, S. D. J.; Strachan, S. M.; Jahn, G. The Design of a Multiagent Transformer Condition Monitoring System. *IEEE Trans. Power, Syst.*, vol. 19, no. 4, 2004.
- Mecabô, L. Desenvolvimento de um Protótipo de Sistema Especialista para Apoio à Manutenção de Turbocompressores Centrífugos de Gás Natural. *Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, UFSC*. Florianópolis, SC, 2007.
- Memória Técnica, Usina Hidrelétrica de Balbina. Centrais Elétricas do Norte do Brasil – ELETRONORTE. *Diretoria de Engenharia - DE, Superintendência de Projeto - EE*. Brasília: Coordenação Técnica do Departamento do Projeto Civil-EEC, 1997.

- Milne, R.; Nicol, C.; Trave-Massuyes, L. TIGER with model based diagnosis: Initial deployment. *Knowl.-Based Syst., vol. 14, nos. 3/4, 2001.*
- Molina, J. M.; Isasi, P.; Berlanga, A.; Sanchis, A. Hydroelectric Power Plant Management Relying on Neural Networks and Expert System Integration. *Pergamon. Engineering Applications of Artificial Intelligence 13, 2000.*
- Monchy, F. A Função Manutenção: Formação para a Gerência da Manutenção Industrial. *EBRAS Editora Brasileira. São Paulo, 1989.*
- Moss, M. A. Designing for minimal maintenance expense: the practical application of reliability. *Marcel Dekker Inc. New York, 1985.*
- Moubray, John. RCM II – Reliability – centered Maintenance. *Second Edition, Industrial Press Inc. New York, 1997.*
- Paula Filho, W. P. Engenharia de Software: Fundamentos, Métodos e Padrões. *Rio de Janeiro: LTC, 2003.*
- Pirttioja, T. Agent-Augmented Process Automation System. *Master's Thesis (Master in Electrical and Communications Engineering) – Department of Electrical and Communications. Helsinki University of Technology, Finland, 2002.*
- Pressman, R. S. Engenharia de Software. *Pearson Education . São Paulo, 1995.*
- Programa de Manutenção Planejada, Gerência de Engenharia de Operação e Manutenção da Geração Hidráulica. *Centrais Elétricas do Norte do Brasil – ELETRONORTE, Brasília: Centro de Análise e Monitoração de Máquinas do COGH, 2006.*
- Russel, S.; Norvig, P. Inteligência Artificial. *2ª ed. Editora Campus, 2003.*
- Scarpin, C. A. Análise Sistêmica de Falhas. *Editora Desenvolvimento Gerencial, 1999.*
- Simeon, E. J. A.; Tonaco, R. P.; Álvares, A. J.; Gudwin, R. R.; Souza, R. Q. An Intelligent Kernel For The Maintenance System of a Hydroelectric Power Plant. *In: 19th International Congress of Mechanical Engineering, 2007, Brasília - DF.*
- Simeón, E. A. Aplicação de Técnicas de Inteligência Artificial no Desenvolvimento de um Sistema de Manutenção Baseada em Condição. *Dissertação de Mestrado (Mestre em Sistemas Mecatrônicos) - Departamento de Engenharia Mecânica. UnB, Brasília, 2008.*
- Silva, W. T., Tonaco, R. P., Ladeira, M. Função de Suporte Simples e Politômica para Recuperação de Soluções em uma Base de Casos. *In: IV Encontro Nacional de Inteligência Artificial, XXIII Congresso da Sociedade Brasileira de Ciência da Computação. Campinas, SP, 2003.*
- Smar – Equipamentos Industriais. O Livro de Referências para FieldBus. SP, 2002.

- Smith, A. M. Reliability-centered maintenance. *McGraw-Hill*. California, USA, 1992.
- Siqueira, I. P. Manutenção Centrada na Confiabilidade – Manual de Implementação. *Qualitymark*. Rio de Janeiro, RJ, 2005.
- Souza, R. Q.; Álvares, A. J. FMEA and FTA Analysis for Applications of the Reliability-centered Maintenance Methodology: case study on Hydraulic Turbines. *In: 19th International Congress of Mechanical Engineering, 2007, Brasília - DF*.
- Souza, R. Q. Metodologia e Desenvolvimento de um Sistema de Manutenção Preditiva Visando à Melhoria da Confiabilidade de Ativos de Usinas Hidrelétricas. *Dissertação de Mestrado (Mestre em Sistemas Mecatrônicos) - Departamento de Engenharia Mecânica*. UnB, Brasília, 2008.
- Stanek, M.; Morari, M.; Frohlich, K. Model-aided diagnosis: An inexpensive combination of model-based and case-based condition assessment. *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern. C*, vol. 31, no. 2, 2001.
- Tavares, L. A. Excelência na Manutenção – Estratégias, Otimização e Gerenciamento. *Casa da Qualidade Editora Ltda*. Salvador, BA, 1996.
- The OPC Foundation – Dedicated to Interoperability in Automation. Disponível em: <http://www.opcfoundation.org/>. Acesso: 27 de maio de 2008.
- Todd, M.; McArthur, S. D. J.; McDonald, J. R.; Shaw, S. J. A Semiautomatic Approach to Deriving Turbine Generator Diagnostic Knowledge. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part C: Applications and Reviews*, vol. 37, no. 5, september 2007.
- Tonaco R. P.; Fernandes, L.; Álvares, A. J. Sistema Especialista, Baseado Em Regras a partir da FMEA, para Avaliação de Saúde de Equipamentos de Malhas Industriais. *8º Congresso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica, CIBIM*. Cusco, Peru, 2007.
- Waterman, D. A Guide to Expert Systems. *Addison-Wesley*, 1986.
- Wang, Z.; Liu, Y.; Griffin, P. J. Neural Net and Expert System Diagnose Transformer Faults. *IEEE Comput. Appl. Power*, vol. 13, no. 1, 2000.
- Wangenheim, C. G.; Wangenheim, A. Case-based reasoning. *Editora Manole*, 2003.
- Wazlawick, R. S. Análise e Projeto de Sistemas de Informação Orientados a Objetos. *Editora Campus*, 2006. Disponível em: <http://www.inf.ufsc.br/~raul/livro/page4.html>. Acesso: 16 de maio de 2008.
- Wyrebski, J. Manutenção Produtiva Total – Um Modelo Adaptado. *Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, UFSC*. Florianópolis, SC, 1998.

ANEXO A

ANEXO A – QUESTIONÁRIO SOBRE INTERVEÇÕES DE MANUTENÇÃO

O objetivo desse questionário é coletar dados sobre as causas dos defeitos/falhas e as ações para resolver tais problemas.

1. Nome completo:
2. Função:
3. Há quanto tempo trabalha nessa função?
4. Turno de operação especifique sua turma (A, B, C ou D):

Sobre os sistemas/equipamentos da UHE Balbina:

5. Mancal Guia inferior:

- 5.1. Quais são as falhas já ocorridas nesse sistema/equipamento?
- 5.2. Quais as prováveis causas?
- 5.3. Quais dessas falhas são as mais frequentes e com que frequência elas ocorrem?
- 5.4. Qual o procedimento de manutenção/operação para resolver a falha/defeito?
- 5.5 Existe algum outro equipamento que apresenta falha nesse sistema? Que tipo falha? Qual a causa desta falha?

6. Mancal Combinado:

- 6.1. Quais são as falhas já ocorridas nesse sistema/equipamento?
- 6.2. Quais as prováveis causas?
- 6.3. Quais dessas falhas são as mais frequentes e com que frequência elas ocorrem?
- 6.4. Qual o procedimento de manutenção/operação para resolver a falha/defeito?
- 6.5 Existe algum outro equipamento que apresenta falha nesse sistema? Que tipo falha? Qual a causa desta falha?

7. Mancal Guia Superior:

- 7.1. Quais são as falhas já ocorridas nesse sistema/equipamento?
- 7.2. Quais as prováveis causas?
- 7.3. Quais dessas falhas são as mais frequentes e com que frequência elas ocorrem?
- 7.4. Qual o procedimento de manutenção/operação para resolver a falha/defeito?
- 7.5 Existe algum outro equipamento que apresenta falha nesse sistema? Que tipo falha? Qual a causa desta falha?

8. Distribuidor da Turbina

- 8.1. Quais são as falhas já ocorridas nesse sistema/equipamento?

- 8.2. Quais as prováveis causas?
- 8.3. Quais dessas falhas são as mais frequentes e com que frequência elas ocorrem?
- 8.4. Qual o procedimento de manutenção/operação para resolver a falha/defeito?

9. Sistema de Resfriamento e alimentação de óleo de regulação da Turbina:

Equipamentos:

9.1. Tanque sem pressão:

- 9.1.1. Quais são as falhas já ocorridas nesse equipamento?
- 9.1.2. Quais as prováveis causas?
- 9.1.3. Quais dessas falhas são as mais frequentes e com que frequência elas ocorrem?
- 9.1.4. Qual o procedimento de manutenção/operação para resolver a falha/defeito?

9.2 Trocador de calor:

- 9.2.1. Quais são as falhas já ocorridas nesse equipamento?
- 9.2.2. Quais as prováveis causas?
- 9.2.3. Quais dessas falhas são as mais frequentes e com que frequência elas ocorrem?
- 9.2.4. Qual o procedimento de manutenção/operação para resolver a falha/defeito?

9.3 Filtros:

- 9.3.1. Quais são as falhas já ocorridas nesse equipamento?
- 9.3.2. Quais as prováveis causas?
- 9.3.3. Quais dessas falhas são as mais frequentes e com que frequência elas ocorrem?
- 9.3.4. Qual o procedimento de manutenção/operação para resolver a falha/defeito?

9.4. Motobombas AE e AF:

- 9.4.1. Quais são as falhas já ocorridas nesse equipamento?
- 9.4.2. Quais as prováveis causas?
- 9.4.3. Quais dessas falhas são as mais frequentes e com que frequência elas ocorrem?
- 9.4.4. Qual o procedimento de manutenção/operação para resolver a falha/defeito?

9.5. Acumulador ar/óleo:

9.5.1. Quais são as falhas já ocorridas nesse equipamento?

9.5.2. Quais as prováveis causas?

9.5.3. Quais dessas falhas são as mais freqüentes e com que freqüência elas ocorrem?

9.5.4. Qual o procedimento de manutenção/operação para resolver a falha/defeito?

9.6 existe algum outro equipamento que apresenta falha nesse sistema? Que tipo falha? Qual a causa desta falha?

10. Sistema de ar de regulação da Turbina:

Equipamentos:

10.1. Balão de ar de regulação:

10.1.1 Quais são as falhas já ocorridas nesse equipamento?

10.1.2. Quais as prováveis causas?

10.1.3. Quais dessas falhas são as mais freqüentes e com que freqüência elas ocorrem?

10.1.4. Qual o procedimento de manutenção/operação para resolver a falha/defeito?

10.2. Compressor de ar de regulação:

10.2.1. Quais são as falhas já ocorridas nesse equipamento?

10.2.2. Quais as prováveis causas?

10.2.3. Quais dessas falhas são as mais freqüentes e com que freqüência elas ocorrem?

10.2.4. Qual o procedimento de manutenção/operação para resolver a falha/defeito?

10.3 Existe algum outro equipamento que apresenta falha nesse sistema? Que tipo falha? Qual a causa desta falha?

11. Sistema de vedação do eixo da Turbina:

Equipamentos:

11.1. Tanque de água de Selagem:

11.1.1. Quais são as falhas já ocorridas nesse equipamento?

11.1.2. Quais as prováveis causas?

11.1.3. Quais dessas falhas são as mais freqüentes e com que freqüência elas ocorrem?

11.1.4. Qual o procedimento de manutenção/operação para resolver a falha/defeito?

11.2. Motobombas AN e AR:

11.2.1. Quais são as falhas já ocorridas nesse equipamento?

11.2.2. Quais as prováveis causas?

11.2.3. Quais dessas falhas são as mais frequentes e com que frequência elas ocorrem?

11.2.4. Qual o procedimento de manutenção/operação para resolver a falha/defeito?

11.3. Junta Carbônica:

11.3.1. Quais são as falhas já ocorridas nesse equipamento?

11.3.2. Quais as prováveis causas?

11.3.3. Quais dessas falhas são as mais frequentes e com que frequência elas ocorrem?

11.3.4. Qual o procedimento de manutenção/operação para resolver a falha/defeito?

11.4. Junta de Manutenção:

11.4.1. Quais são as falhas já ocorridas nesse equipamento?

11.4.2. Quais as prováveis causas?

11.4.3. Quais dessas falhas são as mais frequentes e com que frequência elas ocorrem?

11.4.4. Qual o procedimento de manutenção/operação para resolver a falha/defeito?

11.5 Existe algum outro equipamento que apresenta falha nesse sistema? Que tipo falha? Qual a causa desta falha?

12. Drenagem da tampa da turbina:

Equipamentos:

12.1 Motobomba AK e AL:

12.1.1. Quais são as falhas já ocorridas nesse equipamento?

12.1.2. Quais as prováveis causas?

12.1.3. Quais dessas falhas são as mais frequentes e com que frequência elas ocorrem?

12.1.4. Qual o procedimento de manutenção/operação para resolver a falha/defeito?

12.2 Existe algum outro equipamento que apresenta falha nesse sistema? Que tipo falha? Qual a causa desta falha?

ANEXO B

ANEXO B – REGRAS EM ALTO NÍVEL PARA O SISTEMA DA TURBINA

Sistema de Regulação de Velocidade

Sistema de Resfriamento

se G180MN > 40

então

condição = NORMAL

se G180MN 40 < & > 35

então

condição = BAIXO

Falha G180MNF1: deficiência na refrigeração. Trocador de calor sujo. Tubulação obstruída. Redução na vazão de água.

se G180MN < 35

então

condição = ALARME

Falha G180MNF2: deficiência na refrigeração. Trocador de calor sujo. Tubulação obstruída. Redução na vazão de água.

se G126AR < 34.5

então

condição = NORMAL

se G126AR 34.5 > & < 35

então

condição = ALTO

Falha G126ARF1: deficiência na refrigeração. Trocador de calor sujo. Tubulação obstruída. Redução na vazão de água.

se G126AR > 35

então

condição = ALARME

Falha G126ARF2: deficiência na refrigeração. Trocador de calor sujo. Tubulação obstruída. Redução na vazão de água.

se G126LK < 47

então

condição = NORMAL

se G126LK 47 > & < 48

então

condição = ALTO

Falha G126LKF1: sem a informação de nível não há como abrir a escotilha da caixa espiral.

se G126LK 48 > & < 55

então

condição = ALARME

Falha G126LKF2: sem a informação de nível não há como abrir a escotilha da caixa espiral.

se G126LK > 55

então

condição = TRIP

Falha G126LKF3: sem a informação de nível não há como abrir a escotilha da caixa espiral.

Sistema de Alimentação de Óleo

se G171LI > 425

então

condição = NORMAL

se G171LI 425 < & > 450

então

condição = BAIXO

Falha G171LIF1: vazamento de óleo pela turbina (ogiva) e pelo servo motor do distribuidor.

se G171LI 450 < & > 350

então

condição = ALARME

Falha G171LIF2: vazamento de óleo pela turbina (ogiva) e pelo servo motor do distribuidor.

se G171LI < 350

então

condição = TRIP

Falha G171LIF3: vazamento de óleo pela turbina (ogiva) e pelo servo motor do distribuidor.

se G163CR >

então

condição = NORMAL

se G163CR < & >

então

condição = BAIXO

Falha G163CRF1: falta de sincronismo para abertura e fechamento das pás do distribuidor.
Problema na MB ou na válvula de pé da MB.

se G163CR < & >

então

condição = ALARME

Falha G163CRF2: falta de sincronismo para abertura e fechamento das pás do distribuidor.
Problema na MB ou na válvula de pé da MB.

se G163CR <

então

condição = TRIP

Falha G163CRF3: falta de sincronismo para abertura e fechamento das pás do distribuidor.

Problema na MB ou na válvula de pé da MB.

se G1DTOR >

então

condição = NORMAL

se G1DTOR < & >

então

condição = NÃO DEFINIDA

Falha G1DTORF1: mistura de água e óleo.

se G1DTOR < & >

então

condição = ALARME

Falha G1DTORF2: mistura de água e óleo.

Decisão G1DTORD2:

se G1DTOR <

então

condição = TRIP

Falha G1DTORF3: mistura de água e óleo.

Decisão G1DTORD3:

Sistema de Comando Hidráulico

se G171LA >

então

condição = NORMAL

se G171LA < & >

então

condição = ALTO

Falha G171LAF1: perda de recalque nas bombas, ou excesso de ar no acumulador ar/óleo. sistema de regulação da velocidade não funciona corretamente.

se G171LA < & >

então

condição = ALARME

Falha G171LAF2: perda de recalque nas bombas, ou excesso de ar no acumulador ar/óleo. sistema de regulação da velocidade não funciona corretamente.

se G171LA <

então

condição = TRIP

Falha G171LAF3: perda de recalque nas bombas, ou excesso de ar no acumulador ar/óleo. sistema de regulação da velocidade não funciona corretamente.

se G163LGF > 36

então

condição = NORMAL

se G163LGF 36 < & > 34

então

condição = BAIXO

Falha G163LGFF1: excesso de ar no sistema. falha na injeção de ar. eletroválvula queimada. compressor com defeito. sistema de regulação da velocidade não funciona corretamente.

se G163LGF 34 < & > 31

então

condição = ALARME

Falha G163LGFF2: excesso de ar no sistema. falha na injeção de ar. eletroválvula queimada. compressor com defeito. sistema de regulação da velocidade não funciona corretamente.

se $G163LGF < 31$

então

condição = TRIP

Falha G163LGFF3: excesso de ar no sistema. falha na injeção de ar. eletroválvula queimada. compressor com defeito. sistema de regulação da velocidade não funciona corretamente.

Sistema de Drenagem da Tampa da Turbina

se $G163BAKL > 2.15$

então

condição = NORMAL

se $G163BAKL < 2.15 \ \& \ > 2$

então

condição = BAIXO

Falha G163BAKLF1: fechamento das válvulas de saída. defeito na válvula de retenção. sujeira na sucção das MBs. Aumento de temperatura na MB AK.

se $G163BAKL < 2 \ \& \ > 1.5$

então

condição = ALARME

Falha G163BAKLF2: fechamento das válvulas de saída. defeito na válvula de retenção. sujeira na sucção das MBs. Aumento de temperatura na MB AK.

se $G163BAKL > 1.5$

então

condição = TRIP

Falha G163BAKLF3: fechamento das válvulas de saída. defeito na válvula de retenção. sujeira na sucção das MBs. Aumento de temperatura na MB AK.

se $G171SDT > 225$

então

condição = NORMAL

se $G171SDT < 225 \ \& \ > 250$

então

condição = ALTO

Falha G171SDTF1: vazamento pelo selo interno da junta de vedação. alagamento da máquina.

se $G171SDT < 250 \ \& \ > 300$

então

condição = ALARME

Falha G171SDTF2: vazamento pelo selo interno da junta de vedação. alagamento da máquina.

se $G171SDT > 300$

então

condição = TRIP

Falha G171SDTF3: vazamento pelo selo interno da junta de vedação. alagamento da máquina.

APÊNDICE A

APÊNDICE A – Plano de Manutenção para o Sistema da Turbina.

SISTEMA DE REGULAÇÃO DE VELOCIDADE – SISTEMA DO DISTRIBUIDOR	
COMPONENTE	TAREFA PROPOSTA PARA MANUTENÇÃO
1. Servomotor	<ul style="list-style-type: none"> - Verificar estanqueidade e estado geral de limpeza e pintura das tubulações, servomotores e garfos de articulação e substituir as gaxetas chevron quando necessário (5A) - Verificar fixação dos servomotores à blindagem do poço (5A) - Verificar a estanqueidade entre câmaras com servomotres, verificar existência de arranhões, trincas e empenamento das hastes e substituir as gaxetas solosene quando necessário (5A)
2. Palheta diretriz	<ul style="list-style-type: none"> - Inspeccionar quanto ao estado de pintura e corrosão (5A) - Ajustar as folgas inferiores e superiores das palhetas em relação a tampa inferior e superior (5A) - Verificar o travamento do parafuso de levantamento das palhetas (5A) - Verificar a ocorrência de cavitação nas palhetas diretrizes (10A)
3. Bucha	<ul style="list-style-type: none"> - Avaliar o desgaste da bucha (5A)
4. Vedações	<ul style="list-style-type: none"> - Substituir gaxetas solosene e chevron quando necessário - Substituir as gaxetas de vedação e o cordão calibrado dos mancais superiores e inferiores das palhetas diretrizes (10A)
5. Anel de sincronismo	<ul style="list-style-type: none"> - Inspeccionar quanto ao estado de pintura e corrosão do anel de comando, bielas, manivelas (5A) - Medir nível de desgaste dos setores de guia dos anéis de comando (10A) - Conferir a perfeita montagem dos pinos cônicos (5A) - Medir desgaste dos setores autolubrificantes de apoio das alavancas do distribuidor (10A)
6. Pino de cisalhamento	<ul style="list-style-type: none"> - Conferir o torque dos pinos de cisalhamento
7. Travas de segurança	<ul style="list-style-type: none"> - Verificar o estado de conservação das travas mecânicas manuais e hidráulicas (5A) - Verificar estanqueidade das travas (5A) - Confirmar a perfeita montagem e verificar a fixação dos contatos fim de curso CC/CD de indicação de trava aplicada ou desaplicada com distribuidor fechado, e do contato fim de curso CB de indicação de trava aplicada ou desaplicada com distribuidor aberto (5A) - Verificar estado de limpeza e conservação da válvula BC (1A) - Verificar o estado e medir o diafragma da válvula BC (10 A)
SISTEMA DE REGULAÇÃO DE VELOCIDADE – SISTEMA DE RESFRIAMENTO	
COMPONENTE	TAREFA PROPOSTA PARA MANUTENÇÃO
1. Trocador de	<ul style="list-style-type: none"> - Verificar estado de funcionalidade dos instrumentos de medição

calor	(temperatura e vazão) (1A) - Inspeccionar os tubos e espelhos (1A)
2. Válvulas	- Verificar estanqueidade, estado de limpeza (1A)

SISTEMA DE REGULAÇÃO DE VELOCIDADE – SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO DE ÓLEO	
COMPONENTE	TAREFA PROPOSTA PARA MANUTENÇÃO
1. Tanque sem pressão	- Verificar estanqueidade, estado geral de limpeza e pintura e fixação às bases (1A) - Verificar as condições dos nivelstatos (1A)
2. Motobombas AE e AF	- Verificar ajuste do pressostato de alta pressão das bombas AE e AF (1A) - Realizar ensaios funcionais nas motobombas (medição de corrente e pressão de recalque) (1A) - Verificar estanqueidade das vedações e o estado de conservação do acoplamento (1A) - Lubrificar o acoplamento (1A) - Verificar as folgas dos mancais dos rolamentos dos motores das motobombas AE/AF (5A) - Medir resistência de aquecimento do motor das motobombas AE/AF (5A) - Verificar estado e medir o diafragma das bombas (5A) - Verificar a fixação das motobombas às bases (10A)
3. Válvula de intermitência	- Verificar estado de limpeza e conservação das válvulas CN/CO e da válvula de intermitência (1A) - Verificar o estado e medir o diafragma da válvula de intermitência (5A)
4. Válvula de isolamento	- Verificar estado de limpeza e conservação da válvula BB e da válvula de isolamento (1A) - Verificar o estado e medir o diafragma da válvula BB (5A)
5. Válvula detetora de pressão	- Verificar o estado de limpeza dos pistões e agulha da válvula detetora de pressão (1A) - Ajustar a faixa de recomposição do acumulador ar/óleo para travamento da mola da válvula detetora de pressão, caso necessário (1A) - Verificar o estado e medir o diafragma da válvula (5A)
6. Filtro	- Verificar estado de limpeza e fixação dos elementos filtrantes (5A)
7. Painel de comando, controle e soft sart	- Efetuar limpeza (1A) - Verificar estado geral dos contatores (1A) - Reapertar os bornes e conexões (1A) - Verificar estado de limpeza e conservação no cubículo dos relés auxiliares, régua de bornes e rack das cartelas eletrônicas (1A) - Efetuar testes operacionais nos relés instantâneos do sistema de comando e controle (5A) - Verificar as condições do circuito de carregamento das baterias e o banco de baterias (5A)

SISTEMA DE REGULAÇÃO DE VELOCIDADE – SISTEMA DE COMANDO HIDRÁULICO

COMPONENTE	TAREFA PROPOSTA PARA MANUTENÇÃO
1. Acumulador ar/óleo	<ul style="list-style-type: none"> - Registrar as pressões de início e término para recomposição do acumulador ar/óleo (1A) - Cronometrar o intervalo de tempo entre duas recomposições sucessivas (1A) - Efetuar teste de estanqueidade das válvulas e das retenções (1A) - Mapeamento do estado de corrosão por ultra-som (5A) - Ajustar a faixa de recomposição do acumulador (5A) - Teste funcional das válvulas (5A) - Inspeccionar o estado geral da bóia de nível (10A) - Calibrar as válvulas de segurança (10A)
2. Válvula distribuidora	<ul style="list-style-type: none"> - Verificar estado de limpeza e conservação das válvulas BA, BW e da válvula distribuidora (1A) - Verificar o estado e medir o diafragma das válvulas BA e BW (5A) - Verificar o estado de limpeza dos gíglas dos transdutores eletro-hidráulicos (5A)

SISTEMA DE REGULAÇÃO DE VELOCIDADE – SISTEMA DE AR DE REGULAÇÃO

COMPONENTE	TAREFA PROPOSTA PARA MANUTENÇÃO
1. Acumulador de ar	<ul style="list-style-type: none"> - Verificar fixação à base (1A) - Efetuar teste de estanqueidade das válvulas e das retenções (1A) - Mapeamento do estado de corrosão por ultra-som (5A) - Ajustar a faixa de recomposição do acumulador (5A) - Teste funcional das válvulas (5A) - Inspeccionar o estado geral da bóia de nível (10A) - Calibrar as válvulas de segurança (10A)
2. Eletroválvula BV	<ul style="list-style-type: none"> - Medir o diafragma da válvula (5A) - Verificar o estado de limpeza dos gíglas do transdutor eletro-hidráulico (5A) - Verificar o estado geral do pistão da eletroválvula BV (10A)