

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

**UMA METODOLOGIA PARA GESTÃO DE
MANUTENÇÃO CORRETIVA E BASEADA EM CONDIÇÃO
APLICADA EM USINAS HIDRELÉTRICAS: UMA
ABORDAGEM USANDO RACIOCÍNIO BASEADO EM
CASOS**

LUIS FERNANDO ALAPE REALPE

ORIENTADOR: ALBERTO JOSE ÁLVARES

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM SISTEMAS MECATRÔNICOS

**PUBLICAÇÃO: ENM. DM – 54/12
BRASÍLIA/DF: NOVEMBRO – 2012**

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

**UMA METODOLOGIA PARA GESTÃO DE MANUTENÇÃO
CORRETIVA E BASEADA EM CONDIÇÃO APLICADA EM
USINAS HIDRELÉTRICAS: UMA ABORDAGEM USANDO
RACIOCÍNIO BASEADO EM CASOS**

LUIS FERNANDO ALAPE REALPE

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

APROVADA POR:

**Prof. Alberto Jose Álvares, Dr. Eng. (ENM- UnB)
(Orientador)**

**Prof. Li Weigang (ENM- UnB)
(Examinador Interno)**

**Prof. Lourdes Mattos Brasil (Gamma - UnB)
(Examinador Externo)**

BRASÍLIA/DF, 23 DE NOVEMBRO 2012

FICHA CATALOGRÁFICA

REALPE, LUIS FERNANDO ALAPE

Uma metodologia para gestão de manutenção corretiva e baseada em condição aplicada em usinas hidrelétricas: uma abordagem usando Raciocínio Baseado em Casos. [Distrito Federal] 2012.

xvii, 153p, 210 x 297 mm (ENM/FT/UnB, Mestre, Sistemas Mecatrônicos, 2012).

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

Departamento de Engenharia Mecânica

- | | |
|--------------------------------|----------------------------|
| 1. Raciocínio baseado em casos | 2. Manutenção industrial |
| 3. Usinas Hidrelétricas | 4. Inteligência artificial |
| I. ENE/FT/UnB | II. Título (série) |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ALAPE, L. F. (2012). Uma metodologia para gestão de manutenção corretiva e baseada em condição aplicada em usinas hidrelétricas: uma abordagem usando Raciocínio Baseado em Casos. Dissertação de Mestrado em Sistemas Mecatrônicos, Publicação ENM. DM-54/12, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 153p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Luis Fernando Alape Realpe

TÍTULO: Uma metodologia para gestão de manutenção corretiva e baseada em condição aplicada em usinas hidrelétricas: uma abordagem usando Raciocínio Baseado em Casos.

GRAU: Mestre ANO: 2012.

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 desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Luis Fernando Alape Realpe
CLN 207 BLOCO C Apt. 107
70.852-530 Brasília – DF – Brasil

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, Alfonso e Maria Luz. Obrigado pelo amor incondicional, apoio e educação exemplar que a mim concederam. Aos meus irmãos e irmãs, e a toda minha família, por acreditarem em mim e torcerem por meu sucesso.

AGRADECIMENTOS

Agradeço...

... Ao Senhor Deus. Por cuidar de meus pais e de toda a minha família. Por me cuidar, proteger e estar comigo em todos os momentos, sobretudo, nos mais difíceis.

... A minha irmã Diana. Por seu apoio, carinho e ajuda. Foram fundamentais, e, quando mais os precisava.

... Ao meu orientador, Prof. Dr. Eng. Alberto Jose Álvares. Agradeço por sua paciência, por seu tempo, pelas observações, pelas críticas fundamentais e principalmente, pela confiança em mim depositada.

... Ao Grupo de Automação e Controle (GRACO) e ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Brasília por todos os recursos e tecnologia fornecida.

... Ao Eng. Antônio Araújo, da Eletronorte, e ao pessoal da usina hidrelétrica de Balbina, pelo apoio e por fornecer as informações necessárias para o desenvolvimento de meu projeto.

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

... À CNPq, pelo apoio financeiro concedido durante os anos de pesquisa.

... A todos meus colegas, amigos e às pessoas especiais que conheci nesta etapa de grande importância em minha vida.

RESUMO

UMA METODOLOGIA PARA GESTÃO DE MANUTENÇÃO CORRETIVA E BASEADA EM CONDIÇÃO APLICADA EM USINAS HIDRELÉTRICAS: UMA ABORDAGEM USANDO RACIOCÍNIO BASEADO EM CASOS

Este trabalho apresenta uma metodologia para o desenvolvimento de um sistema de gestão de manutenção corretiva e baseada em condição no domínio de aplicação de usinas hidrelétricas, usando a técnica de IA (Inteligência Artificial) conhecida como RBC (Raciocínio Baseado em Casos). A metodologia proposta, para as duas concepções de manutenção (corretiva e baseada em condição), é apresentada segundo a modelagem IDEF0 a qual mostra todas as etapas e módulos para a concepção do sistema. O sistema proposto visa ajudar ao operador na tomada de decisão, assim como contribuir e melhorar os procedimentos de manutenção nos domínios de aplicações industriais, por meio de técnicas de IA que permitam processar e automatizar a informação disponível de planta permitindo uma gestão de manutenção mais sofisticada.

A metodologia proposta faz uso de informações disponíveis em planta como dados *on-line*, *off-line* e históricos dos equipamentos para a elaboração e documentação de casos. Essa metodologia inclui a execução do ciclo RBC, para elaborar ou construir soluções de casos similares às situações novas que se apresentem no domínio de aplicação. Na técnica RBC, as experiências passadas do domínio de aplicação podem se reusar para resolver novos problemas. Como caso de estudo foi elaborado um sistema computacional (protótipo) de gestão de manutenção corretiva, aplicado às motobombas da usina hidrelétrica de Balbina seguindo a metodologia proposta. Com auxílio do *framework* jCOLIBRI, o protótipo RBC é implementado. A partir da execução do mesmo, o sistema sugere ações de manutenção a distintas situações ou ocorrências de falhas ingressadas pelo usuário. Devido à constante interação entre o protótipo RBC e o especialista, interfaces gráficas de usuário foram desenvolvidas com o intuito de facilitar esta interação e apresentar os distintos resultados em cada uma das etapas segundo o enfoque RBC. Com a fase de testes, proposta para analisar e validar as respostas do sistema, se vê que o protótipo é muito eficaz ao sugerir as distintas recomendações de manutenção, sempre e quando os parâmetros de recuperação de casos sejam bem definidos para evitar respostas potencialmente inconsistentes.

ABSTRACT

METHODOLOGY FOR MANAGEMENT CORRECTIVE MAINTENANCE AND CONDITION BASED MAINTENANCE APPLIED IN HIDROGENERATORS MACHINERY: AN APPROACH USING CASED BASED REASONING

This work presents a methodology for developing a system for management corrective maintenance and condition based maintenance on the scope of hydroelectric plants, using the technique of Artificial Intelligence known as CBR (Case Based Reasoning). The proposed methodology for the two conceptions of maintenance (corrective and condition based) is presented according to IDEF0 modeling which shows all the steps and modules for system design. The proposed system aims help to the operator in decision making as well as contribute to improve maintenance procedures in industrial areas through the use of Artificial Intelligence techniques that enable automate the processing of plant information for a maintenance management more sophisticated.

The proposed systems makes use of the plant information as on-line data, off-line data and historical information of equipment for the preparation and documentation of cases that allowed the execution of the cycle CBR for build solutions of similar cases to new situations that occur in the application domain. In the approach CBR past experiences of the application domain can reuse to solve new problems. As a case study was developed a computational system (prototype) applied to corrective maintenance of pumps of the hydroelectric power plant of Balbina following the proposed methodology. With the help of the jCOLIBRI framework the prototype RBC is implemented, and from of the execution of the system are obtained suggests of maintenance actions to different situations or occurrences of failures entered by the user. Due to the constant interaction between the expert and the prototype RBC, graphical user interfaces were developed to facilitate this interaction and present the different results in each step according to the RBC approach. For validation and analysis of system a test phase was proposed and the result show that the prototype is very effective to suggest maintenance recommendations distinct, as long as the parameters of recovery of cases are well-defined to avoid potentially inconsistent responses.

SUMÁRIO

1 – INTRODUÇÃO	1
1.1 – DELIMITAÇÕES DO PROBLEMA	3
1.2 - OBJETIVOS	5
1.2.1 - Objetivo geral.....	5
1.2.2 - Objetivos específicos	6
1.3 - ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	6
2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA: CONTEXTO ATUAL DA MANUTENÇÃO E DISTINTOS SISTEMAS E ARQUITETURAS RBC APLICADOS À MANUTENÇÃO DE EQUIPAMENTOS	8
2.1 - BREVES CONCEITOS, IMPORTANCIA E TENDENCIA DA MANUTENÇÃO CONTEMPORÂNEAMENTE	8
2.1.1 – PAS 55 (<i>Public Available Especification 55</i>)	9
2.1.2 – Estratégias reativas e preventivas da manutenção.....	11
2.1.2.1 – Manutenção corretiva	11
2.1.2.2 – Manutenção preventiva.....	12
2.1.2.3 - A abordagem da manutenção preditiva de máquinas.....	13
2.2 - RACIOCÍNIO BASEADO EM CASOS (RBC).....	16
2.2.1 - Representação de conhecimento: casos	17
2.2.2 - Ciclo de funcionamento do RBC	18
2.2.3 - Processos de um sistema RBC.....	18
2.2.3.1 - Indexação	19
2.2.3.2 - Recuperação	21
2.2.3.3 - Reuso.....	22
2.2.3.4 - Revisão	23
2.2.3.5 - Retenção	23
2.3 - ARQUITETURAS E SISTEMAS RBC APLICADOS NO DIAGNÓSTICO DE FALHAS EM EQUIPAMENTOS	24
2.3.1 - Diversas arquiteturas e sistemas RBC no diagnóstico de falhas e manutenção de equipamentos na literatura.....	25
2.3.2 - Análise dos aspectos gerais das arquiteturas apresentadas	28

2.3.2.1 - Combinação de técnicas inteligentes.....	28
2.3.2.2 – Dados quantitativos e textuais	29
2.3.2.3 – Codificação de falhas	30
2.3.2.4 - Aspectos gerais em consideração para a estrutura e construção do sistema RBC no contexto do presente trabalho	30
2.4 - FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA A CONSTRUÇÃO DO SISTEMA RBC: jCOLIBRI.....	32
2.4.1 - Estrutura de jCOLIBRI.....	33
2.5 - CONSIDERAÇÕES E SÍNTESE DO CAPÍTULO.....	35
3 – METODOLOGIA.....	36
3.1 – MODELAGEM FUNCIONAL DE UM SISTEMA DE GESTÃO DE MANUTENÇÃO CORRETIVA E BASEADA EM CONDIÇÃO FOCADO EM RBC	36
3.1.1 - Estabelecimento do sistema de gestão de manutenção a adotar	37
3.1.2 – Definição da estrutura do caso e modelagem e elaboração da base de casos ..	37
3.1.2.1 – Estrutura do caso	37
3.1.2.2 – Elaboração da base de casos	38
3.1.3 - Ciclo RBC (4R).....	39
3.2 – MODELAGEM DO SISTEMA DE GESTÃO DE MANUTENÇÃO CORRETIVA APLICADO A USINAS HIDRELÉTRICAS USANDO RBC	39
3.2.1 – Entradas do sistema.....	40
3.2.2 – Saídas do sistema	41
3.2.3 – Controles do sistema	42
3.2.4 – Mecanismos do sistema.....	42
3.2.5 – Gestão da manutenção corretiva	45
3.2.5.1 – Codificação de falhas	48
3.2.5.2 – Representação de casos	49
3.2.5.3 – Construção e atualização da base de casos.....	51
3.3 – MODELAGEM DO SISTEMA DE MANUTENÇÃO BASEADA EM CONDIÇÃO APLICADA A USINAS HIDRELÉTRICAS USANDO RBC.....	52
3.3.1 – Entradas do sistema.....	52
3.3.2 – Saídas do sistema	53
3.3.3 – Controles	53

3.3.4 – Mecanismos.....	53
3.3.5 – Gestão da manutenção baseada em condição.....	56
3.3.5.1 – Representação de casos	60
3.4 - EXECUÇÃO DO PROCESSO RBC	60
4 – ESTUDO DE CASO: IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA DE GESTÃO DE MANUTENÇÃO CORRETIVA APLICADO ÀS MOTOBOMBAS DA USINA HIDRELÉTRICA DE BALBINA	64
4.1 - APRESENTAÇÃO DO CENÁRIO: USINA HIDRELÉTRICA DE BALBINA	64
4.1.1 - Identificação e classificação da maquinaria na UHE de Balbina	66
4.1.1.1- Definição do caso de estudo: motobombas da UHE de Balbina.....	67
4.2 – IDENTIFICAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE EVENTOS ANORMAIS NAS MOTOBOMBAS DA UHE DE BALBINA	69
4.2.1 - Abordagem FMEA para as motobombas na usina hidrelétrica de Balbina	69
4.2.2 - Análise das ordens de serviço da UHE de Balbina (anos 2004 a 2009).....	69
4.2.3 - Identificação de falhas padrão e associação das tarefas de manutenção nas MB a partir das ordens de serviço coletadas	74
4.3 – CODIFICAÇÃO DE FALHAS.....	77
4.4 – REPRESENTAÇÃO DE CASOS E CONSTRUÇÃO DA BASE DE CASOS	79
4.4.1 – Modelo relacional da base de casos	80
4.5 – EXECUÇÃO DO CICLO RBC	82
4.5.1 – Indexação	82
4.5.1.1 – Entrada do sistema.....	83
4.5.2 - Recuperação de casos	86
4.5.2.1 – Atribuição de pesos	86
4.5.2.2 – Medida de similaridade local.....	87
4.5.2.3 – Medidas de similaridade global	88
4.5.3 - Adaptação – revisão de casos	91
4.5.4 – Retenção e apresentação do caso resolvido.....	93
4.6 – CONSIDERAÇÕES E SÍNTESES DO CAPÍTULO.....	95
5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES	96
5.1 – FASE DE TESTES.....	96

5.1.1 – Etapa de recuperação de casos	97
5.1.1.1 – Teste 1: similaridade 100%	97
5.1.1.2 – Teste 2: caso não similar 100%	98
5.1.1.3 – Teste 3: ajuste de pesos	99
5.1.1.4 – Observações gerais da recuperação de casos.....	102
5.2.2 – Etapas de reuso e revisão de casos	102
5.2.2.1 – Considerações gerais	102
5.2.2.2 - Teste 1	104
5.2.2.3 - Teste 2	105
5.2.2.4 - Teste 3	106
5.2.3 – Etapa de retenção de casos	107
6 – CONCLUSÕES, CONTRIBUIÇÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	110
6.1 – CONSIDERAÇÕES FINAIS	110
6.2 – CONCLUSÕES	110
6.3 – CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO.....	111
6.4 – SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	112
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	114
APÊNDICES	119
APÊNDICE A – CONJUNTO DE CASOS PARA O PROTOTIPO RBC	120
APÊNDICE B – MOTOBOMBAS DA USINA HIDRELETRICA DE BALBINA ..	126
APÊNDICE C – IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL.....	128
C.1. REPRESENTAÇÃO DE CASOS.....	131
C.2. PERSISTÊNCIA DE DADOS E CONECTORES EM jCOLIBRI.....	132
C.3. CICLO RBC	134
C.3.1. Recuperação.....	134
C.3.2. Reuso	135
C.3.3 Retenção	135
C4. SAÍDA DA APLICAÇÃO	136

LISTA DE TABELAS

Tabela 4. 1 - OS para as motobombas nas distintas unidades geradoras no ano 2009.....	72
Tabela 4. 2 - Falhas padrão e diversas formas de expressão por parte dos operadores.....	73
Tabela 4. 3 – Códigos das 5 unidades geradoras hidráulicas	78
Tabela 4. 4 – Códigos de sistemas, subsistemas e equipamentos presentes nas 5 UGH.....	78
Tabela 4. 5 - Códigos de falhas padronizadas	78
Tabela 4. 6 – Exemplos de codificação de falhas para distintos eventos nas MB.....	79
Tabela 4. 7 - Tabela de pesos atribuídos aos índices definidos.....	86
Tabela 4. 8 - Algumas medidas de similaridade local definidas em jCOLIBRI	87
Tabela 4. 9 – Exemplo de cálculo de função de similaridade local.....	90
Tabela A. 1 – Tabela de casos para o protótipo RBC.....	120
Tabela B. 1 -Motobombas presentes em uma UGH de Balbina.....	126

LISTA DE QUADROS

Quadro 2. 1 - Exemplo de estrutura de caso.....	17
Quadro 3. 1 - Formato de caso definido para a gestão de manutenção corretiva.....	50
Quadro 3. 2 - Formato de caso para gestão da MBC.....	60
Quadro 4. 1 - Análise FMEA para as motobombas da usina de Balbina	70
Quadro 4. 2 - Formato de ordem de serviço da usina hidrelétrica de Balbina	70

LISTA DE FIGURAS

Figura 2. 1 - Estrutura do PAS 55-1:2008 (BSI, 2011)	10
Figura 2. 2- Ciclo RBC (4R) (Adaptado de Aadmont e Plaza, 1994)	18
Figura 2. 3 - Abordagem BOM (Na <i>et al.</i> , 2009)	27
Figura 2. 4 -COLIBRI Studio e jCOLIBRI plataformas para desenvolvimento de sistemas RBC criados pelo grupo GAIA	32
Figura 2. 5 - Arquitetura de jCOLIBRI 2 (Recio – Garcia, 2008)	34
Figura 3. 1 – Modelo IDEF0: Diagrama A0 do sistema de gestão de manutenção corretiva	40
Figura 3. 2 – Modelo IDEF0: Diagrama filho da função A0	43
Figura 3. 3 - Exemplo de gestão de manutenção corretiva.....	45
Figura 3. 4 – Modelo IDEF0: Diagrama filho da função A1	47
Figura 3. 5 - Formato de código de falha	49
Figura 3. 6 - Modelo relacional para a base de casos do protótipo RBC	51
Figura 3. 7 – Modelo IDEF0: Diagrama A0 do sistema de gestão de MBC	52
Figura 3. 8 – Modelo IDEF0: Diagrama filho da função A0	55
Figura 3. 9 - Exemplo de gestão de MBC	57
Figura 3. 10 – Modelo IDEF0: Diagrama filho da função A1	59
Figura 3. 11 – Modelo IDEF0: Execução do ciclo RBC para MC e MBC	61
Figura 4. 1 - Unidades Geradoras Hidráulicas de Balbina	65
Figura 4. 2 - Equipamentos típicos numa unidade geradora hidráulica	67
Figura 4. 3 - Identificação das motobombas em uma UGH de Balbina.....	68
Figura 4. 4 – Arquivo de OS do ano 2009 pertencente à UHE de Balbina	71
Figura 4. 5 – Número de ocorrências e falhas típicas acontecidas nas MB de Balbina	74
Figura 4. 6 - Número de eventos (vazamentos) nas MB na UHE de Balbina.....	75
Figura 4. 7 – Número de eventos (sucção) nas MB da UHE de Balbina	75
Figura 4. 8 - Número de eventos (ruído anormal) nas MB da UHE de Balbina	75
Figura 4. 9 - Número de eventos (defeitos elétricos) nas MB da UHE de Balbina.....	76
Figura 4. 10 - Número de eventos (partida automática) nas MB da UHE de Balbina	76
Figura 4. 11 -Exemplo de código de falha aplicado às MB da UHE de Balbina	77
Figura 4. 12 – Tabela tipo de equipamentos.....	80
Figura 4. 13 – Tabela de falhas identificadas	81

Figura 4. 14 - Tabela de decisões para as falhas padrão identificadas	81
Figura 4. 15 – Tabela de casos	82
Figura 4. 16 – Dados que definem a consulta do usuário.....	84
Figura 4. 17- Índice de entrada para o sistema RBC: UGH	84
Figura 4. 18 - - Índice de entrada para o sistema RBC: tipo de equipamento.....	85
Figura 4. 19 - Índice de entrada para o protótipo RBC: equipamento.....	85
Figura 4. 20 - Índice de entrada para o protótipo RBC: tipo de falha	85
Figura 4. 21 - Configuração da similaridade local e atribuição do valor dos pesos.....	87
Figura 4. 22 – Primeira tela do protótipo RBC.....	89
Figura 4. 23 – Tela número dois do protótipo RBC: tela de casos recuperados	90
Figura 4. 24 - Tela número três do protótipo RBC: janela de adaptação e revisão de casos	92
Figura 4. 25 – Última tela do protótipo RBC: janela de retenção de casos e apresentação	93
Figura 5. 1 -Recuperação de casos: teste 1	98
Figura 5. 2- Recuperação de casos: teste 2.....	99
Figura 5. 3- Casos recuperados com um valor de pesos inicial para o teste 3	100
Figura 5. 4- Casos recuperados com valores de pesos modificados para o teste 3	101
Figura 5. 5 - Tela de reuso-revisão de casos para o teste 1	105
Figura 5. 6 - Tela de reuso-revisão de casos para o teste 2	106
Figura 5. 7 - Tela de reuso-revisão de casos para o teste 3	107
Figura 5. 8 - Casos recuperados para o teste 4	108
Figura 5. 9 - Etapa de retenção de casos para o teste 4	109
Figura 5. 10 - Base de casos atualizada com a situação nova corrigida pelo usuário	109
Figura B. 1- Motobombas AG - AH do sistema de resfriamento do mancal escora.....	126
Figura B. 2 -Motobombas AJ – AI do sistema de resfriamento do mancal guia.....	127
Figura B. 3 -Motobombas 01 – 02 do sistema de resfriamento do mancal guia superior .	127
Figura B. 4 -Motobombas AE-AF do tanque sem pressão.....	127
Figura C. 1 - Pacotes do <i>framework</i> jCOLIBRI	128
Figura C. 2 - Estrutura da classe principal do protótipo RBC para manutenção corretiva	129
Figura C. 3 - Estrutura do método <i>main</i>	130
Figura C. 4 - Diagrama UML: representação de casos em jCOLIBRI.....	132
Figura C. 5 - Classe da descrição do caso tipo Java Bean.....	133

LISTA DE SIMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIACÕES

BC	– Base de casos
BOM	– <i>Bill of Materials</i>
BSI	– <i>British Standards Institution</i>
COBRA	– <i>Conversational Ontology-based CBR for Risk Analysis</i>
DFI	– <i>Fieldbus Universal Bridge</i>
FF	– <i>Foundation Fieldbus</i>
FMEA	– <i>Failure Mode and Effect Analysis</i>
FTA	– <i>Failure Tree Analysis</i>
GUI	– <i>Graphical User Interface</i>
IA	– Inteligência Artificial
IDEF0	– <i>Integration DEFinition Language 0</i>
MB	– Motobombas
MBC	– Manutenção Baseada em Condição
MC	– Manutenção Corretiva
MCC	– Manutenção Centrada na Confiabilidade
OPC	– <i>Object Linking and Embedding for Process Control</i>
OS	– Ordem de Serviço
OSA-CBM	– <i>Open System Architecture for Condition Based Maintenance</i>
PAS55	– <i>Publicly Available Specification 55</i>
RBC	– Raciocínio Baseado em Casos
RBR	– <i>Rules Based Reasoning</i>
RBES	– <i>Rule-Based Expert System</i>
SBC	– Sistemas Baseados em Conhecimento
SCADA	– <i>Supervision Control and Data Acquisition</i>
SE	– Sistemas Especialistas
SIMPREBAL	– Sistema Inteligente de Manutenção Preditiva de Balbina
TPM	– Manutenção Produtiva Total
UGH	– Unidade Geradora Hidráulica
UHE	– Usina Hidrelétrica

TRABALHOS PUBLICADOS PELO AUTOR

Alape, L.F., Moreno, I.P., Álvares, A.J., Amaya, E.J. (2011a). A Methodology Based In Case-Based Reasoning to Build a Knowledge-Base Applied to Failure Diagnosis System of Hydrogenerators Machinery, Proceedings of COBEM 2011, 21st Brazilian Congress of Mechanical Engineering, October 24 – 28, Natal, RN, Brazil.

Alape, L.F., Moreno, I.P., Álvares, A.J., Amaya, E.J. (2011b). Diseño y Construcción de una Base de Conocimiento para un Sistema Inteligente de Mantenimiento Aplicado a Equipos de Plantas Hidroeléctricas Basado en el Enfoque RBC, X Congresso Ibero-Americano em Engenharia Mecânica, CIBEM10, Porto, Portugal.

Moreno, I.P., Álvares, A.J., **Alape, L.F.** (2011a). Una Abordaje Metodológica para Manutenção Predictiva Basada em Lógica Fuzzy Aplicada a Plantas de Poder Hidroelétrica, X Congresso Ibero-Americano em Engenharia Mecânica, CIBEM10, Porto, Portugal.

Moreno, I.P., Álvares, A.J., **Alape, L.F.** (2011b). Methodology for the Building of a Fuzzy Expert System for Predictive Maintenance of Hydroelectric Power Plants, Proceedings of COBEM 2011, 21st Brazilian Congress of Mechanical Engineering, October 24 – 28, Natal, RN, Brazil.

1 – INTRODUÇÃO

No contexto dessa dissertação, a manutenção industrial, as pesquisas e os desenvolvimentos comerciais dos últimos anos, mostram sistemas, especificações, softwares e estratégias onde se revela a importância que o conceito de manutenção adquiriu nas últimas décadas. Não só ao nível de gerência de planta¹, mas também no âmbito acadêmico, sendo objeto de estudo de diversos grupos de pesquisa interdisciplinares em diferentes institutos no mundo. O conceito de manutenção tem evoluído junto com aspectos-chaves – como a tecnologia, as políticas das empresas e a constante atualização e aparição de abordagens e estratégias de manutenção mais eficientes – que procuram uma redução de custos e uma confiabilidade na operação da máquina ou item². Estes aspectos são analisados a seguir.

A evolução na tecnologia da informação, a qual permite disponibilizar *on-line*, a informação da planta, através da intensa instrumentação instalada nos equipamentos e sistemas – redes de comunicação, aplicações de intranet e internet, sistemas de automação, entre outros – permite que esses dados possam ser tratados automaticamente com técnicas de IA (Inteligência Artificial), ou, abordagens estatísticas ou estocásticas para gerar diagnósticos, prognósticos e sugerir ações preventivas ou de reparo (Souza, 2008). Isto revela que as ferramentas tecnológicas para modernizar e estabelecer sistemas inteligentes de manutenção são existentes.

Por outro lado, a manutenção ganhou em importância como uma função de suporte para assegurar a confiabilidade do equipamento, a qualidade do produto e a segurança na planta ou processo (Niu *et al.*, 2010). Variáveis como a alta competitividade no mercado, as normas de qualidade, a globalização industrial, os custos de uma manutenção mal planejada têm colocado a manutenção como uma parte integrante e relevante da competitividade da empresa, revelando que um aproveitamento efetivo da manutenção tem como consequência um aumento da produtividade com menor custo (Pinjala *et al.*, 2006).

¹Nesta dissertação as palavras indústria, planta, fábrica, organização serão usadas indistintamente.

²Segundo a ABNT no censo NBR-5462 (1994), item é definido como, qualquer parte, componente, dispositivo, máquina, subsistema, ativo, unidade funcional, equipamento ou sistema que possa ser considerado individualmente, eventualmente um item pode incluir pessoas.

Por último, aspectos de novas abordagens e políticas de manutenção, como a implementação de estratégias de MCC (Manutenção Centrada na Confiabilidade), MBC (Manutenção Baseada em Condição), especificações como a PAS55 (*Public Available Especification 55*) da BSI (*British Standards Institution*) os conceitos de *e-maintenance* (Muller *et al.*, 2008, Lee *et al.*, 2006), entre outras, mostram que as antigas estratégias de manutenção não são suficientes para satisfazer os cuidados e requerimentos dos equipamentos na atualidade (Yao *et al.*, 2009).

Os equipamentos e sistemas da atualidade são mais complexos e sofisticados e situações anormais não são toleradas. O estado do equipamento, ou sistema, deve ser continuamente monitorado e, caso aconteça uma falha, as ações de manutenção decididas pelo operador humano devem ser rápidas e efetivas. Este cenário se torna ainda mais complexo quando, nos diferentes processos levados a cabo no domínio de aplicação, são envolvidos equipamentos de diferente natureza e complexidade. No caso do processo ser monitorado por sensores ou instrumentação inteligente *on-line*, são muitas as variáveis que o operador deverá analisar para diagnosticar, minuciosamente, uma falha, estabelecer as respectivas relações entre as mesmas e, por fim, identificar a causa-raiz do evento anormal. Por estas razões, os procedimentos de manutenção devem se tornar ainda mais sofisticados, isto é, proporcional a medida que a complexidade dos equipamentos e sistemas aumenta.

A aplicação, cada vez mais recorrente, de técnicas de IA – no desenvolvimento de sistemas inteligentes de diagnósticos de falhas e apoio à tomada de decisão – constituem importantes ferramentas para o operador no processamento dos dados de planta e na identificação das possíveis falhas que possam acontecer nos dispositivos, assim como nas sugestões das tarefas de reparo. Os SBC (Sistemas Baseados em Conhecimento) e suas duas abordagens mais conhecidas – o enfoque RBC (Raciocínio Baseado em Casos) e o enfoque baseado em regras ou SE (Sistemas Especialistas) – são as técnicas de IA mais aplicadas na área da manutenção de equipamentos (Kim *et al.*, 2009, Yee *et al.*, 2009).

Esta integração, de novos paradigmas computacionais (RBC, *fuzzy*, redes neurais artificiais, etc.) com tecnologias convencionais, como bancos de dados e abordagens estatísticas ou estocásticas, pode permitir um tratamento mais aprimorado da informação de planta e um melhor aproveitamento dos dados, *on-line* e *off-line*, do equipamento (Souza, 2008). Estes sistemas aplicados e integrados no planejamento da gestão de

manutenção da planta, podem contribuir com o avanço e o desenvolvimento de protótipos modernos de manutenção que cumprem com os requerimentos de confiabilidade de operação nos ativos e, por consequência, na diminuição de custos de produção das empresas que dependem, fortemente, da função de manutenção.

Com estas abordagens, também é possível promover e contribuir com a capacitação e o melhoramento corriqueiro no desempenho dos operadores humanos. Isto, através do desenvolvimento de sistemas, ou protótipos que promovam efetivamente a capacitação do operador com base em situações operacionais ocorridas, simulações e modelos, assim como sistemas computacionais que auxiliem a tomada de decisão.

1.1 – DELIMITAÇÕES DO PROBLEMA

Dentro dos ambientes industriais, as tarefas de manutenção são operações rotineiras e essenciais para manter a planta em funcionamento. Por isso, devem ser tratadas com a devida importância estratégica dentro da empresa. Elas estão diretamente vinculadas à capacidade produtiva da indústria, caso contrário, podem resultar em custos extras de produção (Bosa, 2009).

É exorbitante a quantidade de peças, equipamentos, sistemas e subsistemas presentes em uma usina hidrelétrica. Isto implica que a decisão de manutenção é diferente para cada tipo de equipamento e, com isso, é necessário que se disponibilize mecanismos efetivos em que se possa selecionar ou apoiar cada tarefa de manutenção de acordo ao tipo de equipamento em questão, tendo em vista o melhoramento do planejamento das tarefas de reparos. Deste modo podem se aperfeiçoar os procedimentos de manutenção nas instalações desse porte.

Muitas das atividades da manutenção neste tipo de instalações, por exemplo, a detecção de falhas, testes, diagnósticos e reparação, são tarefas baseadas no conhecimento e a experiência do especialista (Nadakatti, 2006). Portanto, o papel desempenhado pelo operador humano, ainda é essencial para garantir uma operação segura, efetiva e eficiente na execução das tarefas de manutenção que, em suma, são atividades basicamente manuais.

É por isso que o treinamento de operadores dentro de qualquer marco ou estratégia de manutenção, é de fundamental importância para melhorar a qualidade dos serviços oferecidos.

Este processo pode ser facilitado com a ajuda de sistemas computacionais que aplicam técnicas da IA, que permitem assessorar a tomada de decisão cabível quanto ao processamento de dados de planta, qualitativos e quantitativos. As recomendações feitas pelo sistema possibilitariam:

- Minimizar o custo de treinamento dos operadores (Cunha, 2002);
- Permitir uma retroalimentação e atualização das informações no caso dos operadores mais experientes;
- Facilitar o processo de adaptação e conhecimento de planta no caso de operadores menos inexperientes;
- Preservar o conhecimento de planta dado que, as informações relevantes relacionadas a quebras e ações de manutenção ficam na base de conhecimento do sistema, além que o conhecimento passa a pertencer a toda a organização e não apenas ao especialista humano (Matelli, 2011, Cunha, 2002).

Um sistema real de apoio à decisão deve fundir vários tipos de informação, tais como: os dados da instrumentação de campo; os históricos de variáveis monitoradas; os relatórios de manutenção preventiva e corretiva. Estes dados podem ser processados, ou tratados por diferentes algoritmos ou técnicas de IA que permitam apoiar ou auxiliar a tomada de decisão em quanto às tarefas típicas de manutenção que os operadores executam no cotidiano da planta (Vachtsevanos *et al*, 2006).

No caso, por exemplo, da técnica de IA conhecida como RBC, um conjunto de dados passados do domínio de aplicação pode ser recuperado, para resolver situações atuais que possam se apresentar. Nessa técnica, aplicada no contexto deste trabalho, as situações anormais detectadas nos equipamentos, junto com a ação de reparo, podem se apresentar na forma de casos (Olsson, 2009). Um caso contextualiza uma experiência passada do domínio de aplicação, por tanto, uma situação anormal acontecida no equipamento, já identificada e detectada, e, cuja ação de manutenção é conhecida, pode representar um

caso. Um conjunto de casos reunidos em um banco de dados relacional constitui a base de conhecimento do sistema ou BC (Base de Casos) (Wangenheim e Wangenheim, 2003). Se uma falha presente é detectada, um sistema RBC recuperará um conjunto de casos mais similares em relação à situação atual. A partir das soluções dos casos recuperados, uma resposta ao problema atual pode ser elaborada ou construída. Ou seja, uma tarefa de reparo, um diagnóstico e uma causa, pode se apresentar como solução ao caso atual (falha detectada), as quais são desprendidas ou derivadas das soluções dos casos recuperados.

O operador ou especialista, realizará uma avaliação da solução proposta e, caso a situação atual forneça uma solução adequada ou razoável ao problema em questão, este novo evento será guardado na BC, permitindo a atualização do sistema e facilitando a aprendizagem do mesmo.

Dentro do contexto da atual pesquisa, a técnica da IA, conhecida como RBC, é aplicada como uma abordagem que permite a recuperação de dados de manutenção em formato de casos e, cuja informação, pode ser usada para fornecer soluções a problemas atuais que apresentem o domínio de aplicação, permitindo o conhecimento e aprendizagem dos operadores e o melhoramento dos procedimentos do sistema de gestão de manutenção a ser adotado. O objetivo é disponibilizar ferramentas atuais, tecnológicas, que auxiliem a equipe de manutenção à realização de suas respectivas tarefas – corretivas e preventivas –, e, fornecer informações precisas para a tomada de decisão no planejamento da manutenção.

Como caso de estudo deste trabalho, será desenvolvido um sistema para gestão de manutenção corretiva aplicada às motobombas da usina hidrelétrica de Balbina. O intuito é validar a metodologia proposta e uma aplicação computacional (protótipo), usando a linguagem Java, será implementada, como exemplo de aplicação do sistema proposto.

1.2 - OBJETIVOS

1.2.1 - Objetivo geral

- O objetivo geral do presente trabalho é propor uma metodologia para a concepção de um sistema de gestão de manutenção corretiva e baseada em condição aplicada a usinas

hidrelétricas, usando a técnica de IA conhecida como RBC com foco na geração de mecanismos que auxiliem a tomada de decisão do operador.

1.2.2 - Objetivos específicos

- Propor roteiro para a elaboração dos casos tanto para manutenção corretiva quanto para a MBC, incluindo o formato dos mesmos e seu armazenamento na base de casos;
- Modelagem e elaboração de uma base de dados relacional para a concepção da base de casos do sistema RBC;
- Estabelecer um formato de codificação genérica das falhas que apresentam os equipamentos da usina hidrelétrica com o fim de classificar os distintos eventos anormais e seu processamento no sistema computacional;
- Mediante a plataforma (*framework*) jCOLIBRI desenvolver um protótipo do sistema computacional RBC focado ao apoio na tomada de decisão de manutenção corretiva;
- Apresentar os conceitos, metodologias, sistemas e algoritmos de aplicação, segundo o enfoque RBC, aplicada à manutenção de equipamentos, especificamente, ao diagnóstico de falhas e apoio na tomada de decisão.

1.3 - ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O presente documento está estruturado em seis capítulos. No primeiro capítulo é apresentada uma introdução sobre o tema abordado, indicando o contexto em que se insere o trabalho, bem como os objetivos a serem alcançados e o método escolhido para atingi-los.

O segundo capítulo se constitui pela revisão bibliográfica quanto aos assuntos pertinentes ao tema da dissertação. Aqui, os conceitos relacionados com a manutenção de equipamentos, fundamentos e conceitos-chaves da técnica RBC, são apresentados junto aos sistemas e arquiteturas com foco no diagnóstico de falhas e apoio na tomada de decisão baseados na técnica RBC.

A abordagem metodológica para a concepção de um sistema de gestão de manutenção corretiva e baseada em condição aplicando a técnica RBC se apresenta no capítulo terceiro.

Os distintos itens, ou etapas, para a construção do sistema são descritas em detalhe mediante a modelagem IDEF0.

O capítulo quarto descreve o desenvolvimento de um sistema de manutenção corretiva aplicado às motobombas da usina hidrelétrica de Balbina segundo as etapas definidas no capítulo anterior. jCOLIBRI, MySQL e Java são as principais ferramentas para o desenvolvimento do sistema e a validação da metodologia proposta.

O quinto capítulo apresenta a fase de testes e validação do sistema. Nesta etapa se permitirá analisar a credibilidade e a eficiência da metodologia, a hora de sugerir as respectivas ações de manutenção a consultas feitas pelo usuário.

Finalmente, no sexto e último capítulo, apresentam-se as conclusões do trabalho, contribuições e sugestões para futuras pesquisas.

2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA: CONTEXTO ATUAL DA MANUTENÇÃO E DISTINTOS SISTEMAS E ARQUITETURAS RBC APLICADOS À MANUTENÇÃO DE EQUIPAMENTOS

Na seção 2.1 deste capítulo é discutida a importância e a tendência da manutenção nos dias atuais. É apresentada a especificação PAS 55, como uma evolução da manutenção convencional para a gestão de ativos nas empresas. Na seção 2.2, se lê os conceitos e a fundamentação teórica da técnica de IA, conhecida como RBC, aplicada nesta pesquisa. Na seção 2.3, analisa-se diferentes protótipos e arquiteturas que usam esta técnica no domínio de sistemas de diagnósticos de falhas e apoio na tarefa de manutenção de equipamentos. Por último, na seção 2.4 é analisada a plataforma jCOLIBRI para a construção de sistemas RBC.

2.1 - BREVES CONCEITOS, IMPORTANCIA E TENDENCIA DA MANUTENÇÃO CONTEMPORÂNEAMENTE

Nas últimas décadas a manutenção ganhou em importância como uma função de suporte para assegurar a confiabilidade do equipamento, a qualidade do produto e a segurança da planta ou processo (Niu *et al.*, 2010). As pesquisas demonstram que, entre 15 e 40%, do custo de produção é atribuído à manutenção; isto implica, também, que estratégias de manutenção mal planejadas geram perdas e custos de produção muito elevados (Pinjala *et al.*, 2006, Almeida *et al.*, 2007). Com a introdução de novas e mais complexas maquinarias, a manutenção se tornou mais complicada e custosa. Pesquisas atuais (Pinjala *et al.*, 2006) demonstram que parâmetros-chaves de competência no mercado –como custos, qualidade, flexibilidade e outras prioridades –dependem das capacidades da manufatura da empresa. E, mais além, a manutenção de equipamentos, sendo uma parte integral dessa manufatura, pode influenciar essas prioridades competitivas e afetar negativa ou positivamente, esses aspectos.

Pinjala *et al.* (2006) menciona como a manutenção passou de ser uma mera prática e/ou mera tática, a ser uma importante variável, em um nível mais elevado e estratégico das empresas. Pinjala relaciona a capacidade de negócio da empresa com as estratégias de manutenção adotadas por ela. O autor estabelece que, em tempos atuais, as empresas

competidoras têm mais tecnologias avançadas de manufatura; mais automação; mais pessoal capacitado; implantam mais políticas proativas de manutenção e gerenciam a manutenção mais efetivamente que seus competidores.

Dado que a manutenção tem uma relação direta com o custo de produção da empresa, ao reduzir estas despesas de manutenção, é mais do que esperado que se aumente os lucros. Diminuir os custos de manutenção e impetrar ações eficazes, que assegurem uma confiabilidade na operação do equipamento, é o ideal de qualquer empresa. Custo-eficácia e efetividade são dois critérios básicos para uma boa manutenção (Niu *et al.*, 2010).

Na atualidade, muitos dos conceitos, estratégias e abordagens da manutenção são reunidos e integrados em variadas estruturas e especificações para a busca de modelos de manutenção mais adequadas com a complexidade dos processos industriais, da redução de custos de manutenção e da disponibilidade e confiabilidade da operação da maquinaria.

Novos paradigmas para gerenciar os ativos, considerando seu ciclo de vida e colocando a manutenção com o mundo das finanças e das decisões estratégicas e, integrando várias das funções das organizações e objetivos chaves do negócio, são os últimos enfoques da manutenção. A gestão de ativos, por exemplo, são atividades mais abrangentes que as atividades de manutenção cujo objetivo é manter os equipamentos em condições de operação. A especificação PAS 55 da BSI (2011) exemplifica um destes novos paradigmas.

2.1.1 – PAS 55 (*Public Available Especification 55*)

A PAS 55 nasce como uma resposta à demanda da indústria para um padrão para gerenciamento de ativos. Ativo significa: planta, maquinaria, construções, veículos, e outro item que tenha um valor distinto na organização. Esta especificação é aplicável a qualquer organização, onde os ativos físicos são fatores críticos para o alcance dos objetivos de negócio. A gestão de ativos representa um conjunto de práticas e atividades sistemáticas e coordenadas. Com elas, uma organização administra, gradativamente, seus ativos físicos, seu desempenho associado, risco e gastos ao longo dos ciclos de vida com o objetivo de adquirir um plano estratégico organizacional (BSI, 2011).

A PAS 55 é, especificamente, destinada a cobrir o ciclo de vida da gestão de ativos e, em particular, os ativos que são fundamentais para o propósito de uma organização. Um sistema de gestão de ativos é, portanto, vital para as organizações que são dependentes das funções e desempenho de seus ativos físicos na prestação de serviços ou produtos, e onde o sucesso da organização é influenciado de forma direta pela administração dos ativos. Além disso, estes sistemas são essenciais para coordenar e otimizar a diversidade e complexidade de ativos em linha com objetivos da organização e detecção do perfil de risco. Os requerimentos chave desta especificação para a gestão de ativos, mostram-se na Figura 2.1.



Figura 2. 1 - Estrutura do PAS 55-1:2008 (BSI, 2011)

Os principais benefícios de um otimizado gerenciamento de ativos são entre outras (BSI, 2011):

- A capacidade de demonstrar melhor valor-por-dinheiro dentro de um regime de financiamento constrangido;

- Planejamento de longo prazo, confiança e desempenho de sustentabilidade;
- Melhor gerenciamento de risco e governança corporativa e uma auditoria clara para a adequação das decisões tomadas e seus riscos associados;
- Uma estrutura organizacional que facilite a aplicação dos princípios da PAS 55 através de orientações claras e de firme liderança;
- Informação adequada e conhecimento da condição de ativos, desempenho, riscos e custos, e as inter-relações entre estes.

Embora, atualmente, as novas especificações que adotam as empresas indicam uma transição de manutenção para gestão de ativos, na maioria das plantas e ambientes industriais, as estratégias reativas e preventivas de manutenção sempre foram aplicadas majoritariamente.

2.1.2 – Estratégias reativas e preventivas da manutenção

2.1.2.1 – Manutenção corretiva

As estratégias reativas de manutenção, similar a um trabalho de reparação, são efetuadas quando uma quebra, ou uma falha óbvia vem a ser localizada. A ação de manutenção ou reparação (decisão), só é tomada quando a falha acontece no equipamento ou sistema. As críticas típicas desta estratégia de manutenção são bem conhecidas. Sua forma de operar implica altos custos de trabalho extra, elevado tempo de paralisação da máquina, altos custos de estoques de peças sobressalentes e baixa disponibilidade da produção (Niu *et al.*, 2010).

Embora nenhuma empresa na atualidade implemente totalmente um tipo de gerência de manutenção reativa – visto que as plantas industriais sempre realizam tarefas preventivas básicas – a manutenção corretiva é, quase sempre, aplicada em áreas não críticas, onde o custo de capital é pequeno; as consequências de uma falha é leve; não existem riscos de seguridade imediatos e; uma rápida identificação da falha, assim como uma rápida reposta ao problema são possíveis. A manutenção corretiva é na maioria das vezes justaposta como um complemento às demais estratégias existentes de manutenção (Bosa, 2009).

A PAS 55 também programa, dentro de sua especificação, os mecanismos de ação reativos, isso, como medidas que permitam ou contribuam com o melhoramento do sistema de manutenção a adotar. As ações corretivas são importantes para eliminar as causas de mau desempenho e não conformidades identificadas a partir de pesquisas, auditorias ou avaliações de conformidade para evitarem tais ocorrências (BSI, 2011).

No contexto deste trabalho, um sistema para o gerenciamento da manutenção corretiva é desenvolvido a fim de aperfeiçoar e automatizar estas práticas, ainda latentes e importantes, nos domínios de aplicação a níveis industriais. O sistema permitirá sugerir ações de manutenção fornecendo rápidas respostas quando uma falha é detectada. O gerenciamento da decisão de manutenção é sugerido pela execução do processo RBC, o qual elabora uma resposta a partir de informações similares, recuperadas de uma base de casos. Desta forma, a resposta é mais rápida e efetiva. O operador, por sua vez, terá a opção de analisar várias opções para sanar o equipamento afetado e, ainda, aprimorar seus conhecimentos e experiência sobre o sistema e/ou máquina.

2.1.2.2 – Manutenção preventiva

As estratégias preventivas empregam dois enfoques ou políticas básicas: a manutenção programada e a manutenção baseada em condição (Niu *et al.*, 2010). Na primeira, o denominador comum que governa este tipo de estratégia é o planejamento de Manutenção vs. Tempo. As intervenções sobre o equipamento são levadas a cabo, em intervalos de tempo predeterminados, que se destinam a reduzir a probabilidade de ocorrência de falhas, ou a degradação da funcionalidade de um ativo. Esta estratégia tem como oscilo que: os programas e intervenções sobre os equipamentos e sistemas são planejados muitas vezes quando um determinado item não precisa de ditas ações que obriguem sua parada; o desmontar a máquina, a manipulação das peças e a submissão a inspeções que terminam afetando, diretamente, a vida operacional normal da maquinaria (Souza, 2008).

A PAS 55 também aborda o tema dos procedimentos preventivos como ações fundamentais para eliminar as causas potenciais de não conformidades ou operação inadequada dos ativos.

Nas últimas décadas, com o avanço e a confiabilidade nos sistemas de informação - a instrumentação inteligente, os sistemas embarcados³, as redes industriais, entre outras tecnologias - a política de manutenção preditiva ou baseada em condição ganhou uma grande importância. Isso levou à expansão e ao auge, destas abordagens, nos domínios industriais.

Nas políticas preditivas, o momento apropriado para executar a manutenção é determinado a partir de um conjunto de medidas e informações do equipamento que permitam detectar o aparecimento de mecanismos de degradação do mesmo (Souza, 2008). Estas políticas baseiam sua operação a partir do monitoramento da condição das máquinas. Este é um processo que é facilitado pela intensa instrumentação instalada em planta, os programas de automação, os bancos de dados e a facilidade no fluxo de informação da indústria. Faz parte de qualquer modelo ou estratégia de manutenção atual, no momento em que seja possível, o aproveitamento dos dados de planta. O intuito é estabelecer diagnósticos e prognósticos de falhas nos equipamentos e as possíveis sugestões de tarefas de manutenção. A seguir uma breve ênfase na tática da manutenção preditiva ou baseada em condição.

2.1.2.3 - A abordagem da manutenção preditiva de máquinas

De uma forma simples, esta abordagem da manutenção, pode se considerar como uma avaliação regular da atual condição de operação da planta para otimizar a operação total da maquinaria. Como uma ferramenta de gerencia de manutenção, a manutenção preditiva pode prever o tempo requerido para programar ações preventivas e corretivas conforme o necessário (Mobley *et al.*, 2008).

Um programa de manutenção preditiva pode minimizar as quebras inesperadas e detectar problemas que, com o tempo, tornam-se mais sérios. A maioria dos problemas tem a possibilidade de ser minimizada quando detectados a tempo. Segundo Mobley *et al.* (2008) para atingir os objetivos totais da manutenção preditiva, o programa deve identificar corretamente a causa raiz dos problemas apresentados. Muitos dos programas

³ Segundo Bosa (2009) um sistema embarcado consiste na combinação entre *hardware e software* projetados para desempenhar uma determinada aplicação. Os processadores embarcados podem ser de diversos tipos dependendo da aplicação. O *software* da aplicação pode ser composto por múltiplos processos.

estabelecidos de manutenção preditiva não consideram esse critério, que é básico. Portanto, os programas executados, ficam em simples métodos de monitoramento da condição da máquina que identificam os sintomas, mas não a causa real do problema.

Embora, principalmente, as informações a processar para detectar o estado do equipamento são os dados de sensores e instrumentação instalada no equipamento ou processo, também se dispõe de outro tipo de informação que pode ser útil e valiosa para a elaboração de diagnósticos e também para o apoio na decisão do operador. Informação histórica do ativo, alarmes registradas, ordens de serviço, observações visuais feitas pelos operadores podem ajudar também na identificação do estado do equipamento (Saxena *et al.*, 2005).

Os métodos mais comuns para monitoração de condição de máquina em usinas hidrelétricas são: análise de vibrações, análise de óleos, análise estrutural, análise de dissipação de energia e monitoramento de parâmetros de alerta os quais de forma geral monitoram parâmetros que caracterizam o estado de funcionamento dos equipamentos (Souza, 2008).

A partir destes mapeamentos da condição da máquina, *on-line* e *off-line*, é possível estabelecer os diagnósticos e prognósticos, que levarão ao operador a tomar uma decisão de manutenção. Estes três aspectos (entrada de dados, processamento da informação e decisão) constituem os pilares básicos da tática da MBC (Amaya, 2008).

Neste enfoque da manutenção, a intervenção de técnicas computacionais e modelos estatísticos, são comuns especialmente no que respeita ao diagnóstico automático de falhas e apoio na decisão do operador. A ideia central nestas técnicas é aproveitar e processar a informação proveniente de planta para gerar registros automáticos e/ou ordens de serviço ao pessoal de manutenção para com as falhas detectadas juntas às ações a serem executadas (Souza, 2008).

Técnicas de *soft computing*, como redes neurais artificiais; lógica nebulosa; algoritmos genéticos; RBC e; também modelos estocásticos; distribuições estadísticas; redes bayesianas; modelos de Markov; máquinas de estado finito; entre outras, são algumas das técnicas e modelos mais usados para o processamento de dados e elaboração de diagnósticos e prognósticos na MBC.

O aspecto importante a ressaltar é que: dentro das distintas normas ou especificações que estão evoluindo no caso, por exemplo, da gestão de ativos, os sistemas inteligentes são uma importante opção. Eles fornecem um enfoque conveniente para a execução e cumprimento dos requerimentos destas especificações, visto que, estas normas não especificam como deveria ser feito ou implementado um determinado requerimento, só são definidos os objetivos e as metas por cumprir.

Portanto, propor metodologias para desenvolvimento de distintos sistemas ou protótipos que melhorem os procedimentos típicos de certas atividades como diagnósticos de falhas, recomendações nas tarefas de manutenção ou um tratamento mais eficaz das informações históricas dos equipamentos para resolver problemas com certa similaridade, podem ser fundamentais na otimização dos procedimentos de manutenção.

Um exemplo latente destes tipos de sistemas é o sistema inteligente de MBC, SIMPREBAL (Álvares e Amaya, 2010), o qual aplica técnicas de IA, especificamente, sistemas especialistas. Uma abordagem baseada em lógica difusa foi desenvolvida por Moreno (2012) também para SIMPREBAL. Informações completas do sistema SIMPREBAL e sua integração com outras técnicas e metodologias como: FMEA (*Failure Mode and Effect Analysis*), OSA-CBM (*Open System Architecture for Condition Based Maintenance*), sistemas especialistas, lógica difusa para a criação de um sistema inteligente de MBC podem ser encontradas em: Álvares e Amaya (2010), Álvares *et al.* (2009), Álvares *et al.* (2007a), Álvares *et al.* (2007b), Amaya (2008), Souza (2008), Tonaco (2008) e Moreno (2012).

Na seção 2.3, apresentam-se outros sistemas e aplicações baseadas na abordagem RBC, a técnica analisada neste trabalho (a qual é discutida na próxima seção), especificamente no diagnóstico de falhas em equipamentos e apoio na tomada de decisão.

Dentro do contexto da MBC, um enfoque baseado na aplicação da técnica RBC para recuperação de informações que auxiliem os procedimentos típicos da abordagem preditiva de máquinas, é proposto na metodologia deste trabalho. Baseado na elaboração de casos para apoiar ao sistema na geração de diagnósticos de falhas e apoiar a tomada de decisão de manutenção, o sistema visa automatizar e melhorar estes aspectos primordiais dentro da MBC, aproveitando tanto os dados *on-line*, disponibilizados pela instrumentação de planta,

como os dados *off-line*, que se registram nos equipamentos. A seguir são expostos breves conceitos e fundamentos da técnica RBC.

2.2 - RACIOCÍNIO BASEADO EM CASOS (RBC)

O RBC, Raciocínio Baseado em Casos, propõe a reutilização de experiências passadas (casos) para resolver problemas presentes. Se alguma experiência passada é similar a uma situação atual, esta pode ser recuperada. E, a solução desta experiência pode ser adaptada ou reusada para ser aplicada à situação em andamento.

Este enfoque da IA fundamenta-se em duas premissas básicas: os problemas similares têm soluções similares e os problemas tendem a ocorrer. O RBC teve suas origens na metade da década dos anos 70, sendo consolidado depois nos anos 80 nas pesquisas e os trabalhos na área da ciência cognitiva sobre memória dinâmica. A abordagem RBC, incursiona muitos domínios de aplicação: medicina, engenharia, arquitetura, finanças e cumpre tarefas como classificação, diagnóstico, suporte à decisão, planejamento, suporte a vendas entre outros (Wangenheim e Wangenheim, 2003).

No caso da engenharia, se presta à concepção de sistemas de diagnósticos de falhas em equipamentos. Seu modelo de raciocínio está baseado em um processo cognitivo, meramente humano, para a resolução de problemas, similar a como um operador enfrenta uma situação de falha: uma falha é detectada pelo experto, então ele tenta lembrar experiências passadas de similares situações. Se o evento anormal é resolvido com êxito uma nova experiência é adquirida e seu domínio de conhecimento é ampliado.

Segundo Aadmont e Plaza (1994) o RBC é um paradigma para a resolução de problemas que resolve um novo problema a partir da lembrança de situações prévias que são similares e cujo conhecimento pode ser reusado e aplicado à situação atual. Wangenheim e Wangenheim (2003) definem o RBC como um enfoque para a solução de problemas e para o aprendizado baseado em experiência passada.

A forma de representar o conhecimento em um sistema RBC é por meio de unidades de informação chamadas **casos**, as quais tem uma determinada estrutura e conteúdo dependendo do domínio de aplicação e o objetivo do raciocínio. Um conjunto de casos

armazenados, tipicamente, em um banco de dados relacional, representa a livreria de casos, ou **base de casos** que é o modulo central do sistema RBC.

2.2.1 - Representação de conhecimento: casos

Os casos são a unidade de conhecimento dos sistemas RBC. Através de um formato definido para os casos, representa-se uma situação passada do domínio de aplicação e a informação nele inserido, é aplicável e útil para resolver uma situação similar. A estrutura dos casos varia, segundo a área da aplicação e o objetivo do raciocínio, mas o formato básico de qualquer caso, é a **descrição do problema** e a **descrição da solução**. Um novo caso sempre denota uma situação de problema, ou um evento que precisa ser resolvido, portanto, um caso de entrada ao sistema RBC, só contém a descrição do problema com os detalhes e as características da situação a resolver. Um exemplo do formato de um caso é mostrado no Quadro 2.1, com sua estrutura e os atributos do caso.

Quadro 2. 1 - Exemplo de estrutura de caso

Número de Caso: 02		Data: 30/07/2009	
Descrição do Equipamento			
Tipo de equipamento: Motobomba	Área: Unidade Hidráulica 3	Geradora	Nome do equipamento: MB01-Motobomba 01
Sistema: Mancal	Subsistema: Mancal Superior	Guia	Tempo de operação: 5 anos e 3 meses
Descrição do Problema			
Sintomas: 63B1 < 2.0-Bar (Pressão baixa à saída da MB)		Efeitos: desliga a bomba prioritária e entra em operação a bomba de reserva em baixa pressão.	
Descrição da Solução			
Causas: vazamento de óleo pelo selo mecânico. Óleo contaminado. Obstrução do filtro. Ajuste incorreto da MB.	Diagnóstico: Pressão baixa à saída da MB01. Bombeo irregular de óleo.	Ação: verificar MB 01. Efetuar manutenção preventiva ao selo mecânico. Corrigir vazamentos em tubulações. Verificar vazamentos em válvulas de entrada e saída das MB.	

A resposta para o problema em questão é construída a partir das soluções dos casos semelhantes que foram recuperados da base de casos. A descrição da solução descreve como o problema foi resolvido quando aconteceu no passado.

Depois do processo de abstração do problema, um conjunto de atributos para a construção do caso é obtido. Este conjunto de atributos são campos que descrevem um caso. Existem

diferentes formas de representar os casos, mas qualquer que seja sua representação, ele sempre consistirá de um conjunto de atributos como partes atômicas do mesmo.

2.2.2 - Ciclo de funcionamento do RBC

Segundo Aadmont e Plaza (1994), um ciclo RBC tem quatro etapas essenciais representadas na Figura 2.2. As etapas podem se descrever da seguinte forma:

1. **Recuperação** dos casos mais similares;
2. **Reuso** da informação e conhecimento dos casos recuperados para resolver o problema atual;
3. **Revisão** da solução proposta pelo sistema;
4. **Retenção** dos casos novos na base de casos, permitindo a atualizando do sistema e ficando a disposição para eventos futuros.

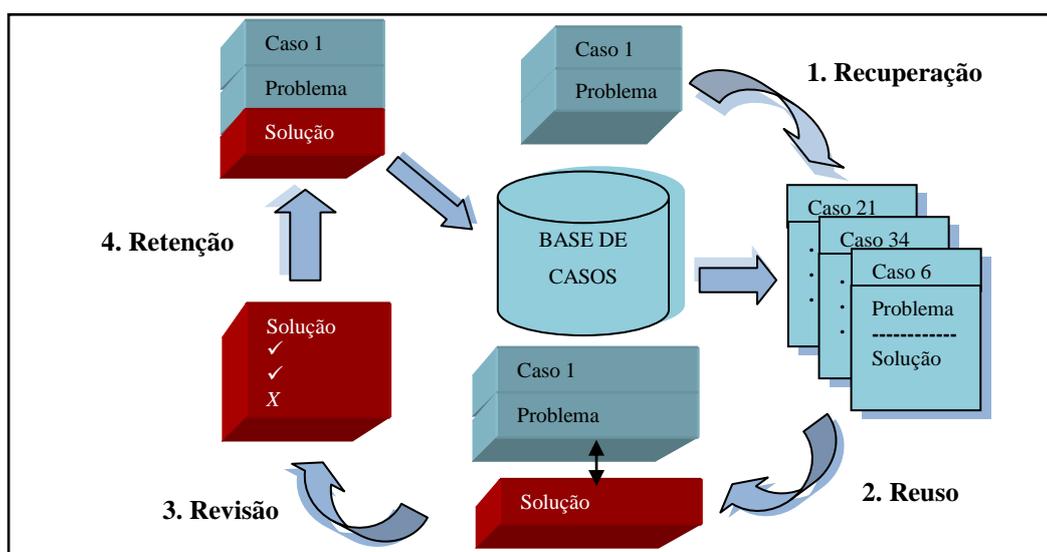


Figura 2. 2- Ciclo RBC (4R) (Adaptado de Aadmont e Plaza, 1994)

A seguir são descritas as etapas e os distintos processos executados no ciclo RBC.

2.2.3 - Processos de um sistema RBC

Em um ciclo RBC são muitos os processos que se executam desde que um novo problema é detectado, até que o sistema guarde, na base de casos, a situação de problema em questão

junto à solução elaborada. Isso, a partir dos casos recuperados que apresentam maior semelhança. Os detalhes mais importantes de cada uma das etapas do ciclo RBC são discutidos a seguir.

2.2.3.1 - Indexação

Existem duas grandes formas de representar os casos: as representações planas (atributo-valor) e as representações estruturadas (redes semânticas, árvore K-D, representações orientadas a objetos, árvores e grafos). Wangenheim e Wangenheim (2003) apresentam e discutem a maioria destas representações, mas, qualquer que seja a forma de representar os casos, sempre consistirá em um conjunto de atributos que descrevem de forma eficiente a experiência passada (caso). No processo de indexação, se decide quais desses atributos são úteis para localizar casos relevantes.

Como no caso representado na Tabela 2.1, alguns atributos do caso são: tipo de equipamento, equipamento, sistema, UGH, descrição da falha, etc. De todos estes atributos somente alguns são úteis para efetuar o processo de recuperação de casos: UGH, tipo de equipamento, equipamento e descrição da falha, poderiam ser os mais relevantes. Os demais fornecem informação contextual, mas não são úteis na recuperação de casos.

O processo de determinação dos atributos relevantes de um caso é conhecido como indexação, e os atributos selecionados são chamados índices. Uma vez identificados os índices, a base de casos pode ser organizada internamente, de acordo aos atributos escolhidos. Este processo de organizar a base de casos, de acordo aos índices, tem como objetivo uma recuperação mais eficaz, permitindo que os casos similares se localizem mais eficientemente.

A organização dos casos em memória vai, desde modelos simples como estruturas planas, onde os índices dos casos não são relevantes e ocorre um barrido linear da base de dados computando a similitude, passando por organizações hierárquicas onde os índices são utilizados para agrupar casos e permitir selecionar um subconjunto deles, até organizações mais complexas como as árvores de decisão os algoritmos ID3 e as árvores K-D.

2.2.3.2 - Similaridade

A semelhança entre os casos em RBC é determinada a partir de uma medida de similaridade. Com essa medida, obtém-se uma quantificação da similitude entre os casos que permite estabelecer que casos são úteis para fornecer uma possível solução ao problema novo em questão. A similaridade é calculada local e globalmente para um caso. Na primeira, a similaridade é calculada para cada um dos atributos do caso. Na segunda, a medida é, tipicamente, calculada com a média ponderada dos valores das similaridades locais.

Com as medidas de similaridade local são consideradas as similaridades entre os valores de um atributo. Por isso, as medidas de similaridade locais se definem segundo o tipo específico de um atributo. Os tipos de atributos que descrevem os casos geralmente são: números reais, cadeia de caracteres, hipertextos e símbolos.

Talvez, a métrica de similaridade global mais amplamente usada em sistemas RBC e inspirada geometricamente, é a conhecida como *Nearest Neighbour* ou vizinho mais próximo (Wangenheim e Wangenheim, 2003). Nesta métrica, a busca dos casos se reduz à determinação do vizinho geometricamente mais próximo. Cada caso, dentro da base de casos, seria um ponto em um espaço multidimensional cuja distância espacial, entre os casos e o caso avaliado, reflete a similaridade entre os mesmos. O cálculo das distâncias entre os casos é feito um a um, entre o caso avaliado e os casos na base de casos. Uma vez calculadas as distâncias, o vizinho mais próximo, geometricamente, é escolhido considerando o valor mínimo das distâncias calculadas. Este, então, será o caso recuperado e sua solução poderá ser reusada para fornecer uma resposta ao problema em questão.

A equação geral (Equação 2.1) para o cálculo do vizinho mais próximo é (Wangenheim e Wangenheim, 2003):

$$sim(Q, C) = \sum_{i=1}^n f(Q_i, C_i) \times W_i \quad (2.1)$$

Onde, Q é o novo caso, C é o caso recuperado, n é o número de índices identificados, i é um índice, f é uma medida de similaridade local para cada índice e W é o peso que mede a importância do atributo ou índice para o cálculo.

A similaridade é calculada geralmente em uma faixa de 0 a 1, onde 0 é a dissimilaridade total e 1 é a coincidência absoluta. O valor normalizado da similaridade é realizado com a divisão do valor da similaridade pela soma total dos pesos dos índices (Equação 2.2):

$$sim(Q, C) = \frac{\sum_{i=1}^n f(Q_i, C_i) \times W_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (2.2)$$

2.2.3.2 - Recuperação

Wangenheim e Wangenheim (2003) descrevem claramente o processo de recuperação de casos da seguinte forma:

- Seja BC a base de casos com n casos C_i : $BC = \{C_1, \dots, C_n\}$ e uma medida de similaridade sim .
- Seja Q o problema novo ou a situação para ser resolvida pelo sistema.

O objetivo da recuperação dos casos é descobrir:

- O caso mais similar C_i ou
- O conjunto de casos mais similares $\{C_1, \dots, C_n\}$ (ordenado ou não) ou
- Todos os casos $\{C_1, \dots, C_n\}$ que possuem em relação a Q pelo menos uma similaridade \geq a um limiar sim_{min} .

Este processo de recuperação de casos é composto por três processos básicos:

1. Descrição do caso de entrada. No processo de indexação é definido um conjunto de atributos chaves para a recuperação de casos, que são os índices. Os índices são os descritores de entrada, que permitem iniciar uma consulta no sistema RBC e, os quais, descrevem a situação do problema que se apresenta, de forma eficaz, para começar uma busca na base de conhecimento do sistema dos casos mais úteis e similares.
2. Uma vez identificados os parâmetros de entrada (índices) para a etapa de recuperação dos casos, a seguinte tarefa é encontrar um conjunto de casos na base úteis para a solução do problema atual. Isto é lavrado ao se comparar a descrição do problema atual com a descrição dos demais casos através da aplicação das medidas de similaridade.

3. A etapa anterior geralmente recupera um conjunto de casos mais similares. Nesta última etapa, a ideia é recuperar o caso mais similar. Este é escolhido por meio da avaliação do grau de similaridade de forma mais detalhada. Uma vez escolhido, o melhor caso a solução deste, pode ser reusada para continuar com a execução do ciclo RBC.

2.2.3.3 - Reuso

Depois da etapa de recuperação, o caso mais similar ao caso atual é objeto de uma tentativa de reutilização, para fornecer uma solução. Em muitas situações, a solução pode ser apropriada, mas, se a solução proposta é inadequada o sistema RBC pode intentar adaptar a solução proposta à situação atual. Aspectos a considerar na adaptação podem ser: que características adaptar, que modificações fazer, que método aplicar para a adaptação, entre outros. Existem várias estratégias como a adaptação hierárquica, a adaptação composicional, a adaptação nula, a adaptação transformacional e a derivacional, dentre elas, as três últimas são as mais usadas em diferentes sistemas (Wangenheim e Wangenheim, 2003):

- **Adaptação nula:** neste tipo de adaptação, a solução do caso mais similar encontrado na base de casos é tomada, total ou parcialmente, sem nenhuma modificação. No caso que alguma modificação seja necessária esta é deixada por conta do usuário.
- **Adaptação transformacional:** neste tipo de adaptação, um conjunto fixo de operadores de adaptação e/ou regras transformacionais permitem modificar a solução do caso encontrado, reorganizando, adicionando ou excluindo elementos da solução, e desta forma gerando uma nova solução para resolver o problema em questão. Na adaptação transformacional, a modificação do caso pode ir desde mudanças simples de atributos, até mudanças profundas na estrutura da solução do caso.
- **Adaptação derivacional:** neste tipo de adaptação é requerido o registro do processo que levou à solução do caso escolhido. O caso recuperado armazena o registro dos passos do processo derivacional que levou a esta determinada solução no passado. Este processo de solução de problema é repassado no contexto do problema atual, sendo as mesmas decisões ou decisões similares testadas na solução do problema atual.

2.2.3.4 - Revisão

A revisão dos casos é necessária depois do reuso de uma situação mais similar ao caso novo em questão; também, quando a solução sugerida pelo sistema, depois de aplicada, não foi correta ou não foi efetiva. Essa possibilidade de efetuar correções para os casos em função da efetividade da solução proposta para os casos consultados, fornece uma oportunidade para o sistema realizar uma retroalimentação sobre o caso e sobre o resultado da aplicação da solução fornecida. Se a solução proposta pelo sistema foi aplicada com sucesso para o caso em questão, o ciclo RBC continua com a etapa de retenção. Se não foi efetiva é submetida para revisão.

Dependendo do domínio de aplicação, a etapa de revisão do caso pode levar de algumas horas até meses para ter a avaliação adequada sobre a solução sugerida pelo sistema. Esta etapa é normalmente um passo executado externamente ao sistema RBC. No caso do diagnóstico de falhas. Esta etapa é fundamental para avaliar se realmente o diagnóstico da falha foi correto, ou se a tarefa de manutenção foi efetiva ou não.

2.2.3.5 - Retenção

Uma das grandes vantagens dos sistemas RBC é sua capacidade de aprendizagem. É nesta etapa do ciclo RBC, quando o sistema tem a oportunidade de ampliar o domínio de conhecimento da área, atualizar a base de casos do sistema e reter na base de conhecimento a novas situações de problemas junto com sua respectiva solução. Desta forma, a base de casos é atualizada, tornando seu raciocínio mais poderoso com o passar do tempo.

Cada vez que uma nova situação é resolvida, esta pode ser integrada em um caso existente, ou um novo caso pode ser construído, ou um caso similar pode ser generalizado incluindo a nova experiência adquirida para, finalmente, integrar esta informação à base de conhecimento do sistema. A retenção de casos, além da adição de novos casos, permite a modificação ou a substituição de casos antigos. A modificação da estrutura da indexação de casos existentes, ou o ajuste do valor dos pesos dos índices para melhorar a avaliação dos casos, por exemplo, são mudanças que podem ser feitas para a aprendizagem e melhora da efetividade do sistema.

A seguir são apresentadas diversas arquiteturas e sistemas que implementam a técnica de RBC para diagnóstico e recomendações de manutenção.

2.3 - ARQUITETURAS E SISTEMAS RBC APLICADOS NO DIAGNÓSTICO DE FALHAS EM EQUIPAMENTOS

Nos últimos anos, os distintos enfoques da IA têm incursionado e contribuído nas abordagens de sistemas, arquiteturas, protótipos e softwares para a área da manutenção de equipamentos em âmbitos industriais e tem aberto novas perspectivas na forma de levar a cabo as inspeções, os cuidados e o monitoramento dos dispositivos, assim como a possibilidade de aproveitar e tratar mais eficazmente a informação proveniente e disponível da planta.

Embora a aparição destes sistemas seja mais comum nos últimos anos nas distintas arquiteturas de manutenção e os benefícios destes sistemas sejam bem conhecidos, ainda não são completamente aceitos na indústria. Olsson (2009) cita que dois possíveis razões desta situação são a desconfiança das empresas em investir nestes sistemas sem saber, exatamente, quais são os resultados a ser obtidos e; a má reputação de sistemas não confiáveis gerando continuamente falsos alarmes ou errados reportes de falhas.

A confiabilidade destes sistemas passou, então, a ser parte fundamental no desenvolvimento dos mesmos. Mas o aproveitamento das informações das situações de falha acontecidas, previamente, nos equipamentos, a possibilidade dos protótipos de aprenderem a partir dos acertos, e não acertos nas alarmas, e, a facilidade na manutenção do sistema são passíveis de uma confiabilidade na operação destas arquiteturas. Da mesma forma, o uso dos dados da instrumentação instalada em planta e os demais aspectos relacionados a automatização das empresas (redes industriais, bancos de dados, instrumentação inteligente, etc.) complementam e facilitam a construção destes sistemas, cujo objetivo é identificar as situações anormais nos equipamentos e sugerir tarefas de manutenção para o operador.

A razão de que os SBC tenham uma importante aceitação na área da manutenção é devido a que muitas das atividades da manutenção como, por exemplo, a detecção de falhas, o diagnóstico das mesmas, os testes, as ações de reparação... são produtos de conhecimento

intensivo e especializado e tarefas baseadas na experiência (Nadakatti, 2006). Estes sistemas têm como objetivo adquirir, representar e manipular computacionalmente, o conhecimento do especialista para sua reprodução (Matelli, 2011).

No caso da medicina assim como da engenharia, o RBC se presta naturalmente com um sistema de diagnóstico médico ou de diagnóstico de falhas em equipamentos, respectivamente. Nestes sistemas, um conjunto de descritores de entrada, que definem claramente o caso ou problema a resolver, entra no sistema e o ciclo RBC é executado. No caso de sistemas de diagnósticos de falhas em equipamentos, a informação proveniente da instrumentação da máquina e o conjunto de sintomas irregulares (ruído anormal, operação errada, vibração excessiva, outros) definem um conjunto de descritores do problema como entrada para o sistema.

A partir dos casos mais similares recuperados, uma solução é construída para a situação atual. No caso da engenharia poderia ser a causa, o diagnóstico da falha ou uma tarefa de reparação sugerida. Depois, o especialista terá a oportunidade de avaliar o caso resolvido, inclusive fazer modificações, e, a situação resolvida será guardada na base de casos.

A seguir são apresentadas diversas arquiteturas e sistemas de diagnóstico de falhas e de suporte na tomada de decisão na área de manutenção de equipamentos encontradas na literatura. As características mais importantes desses sistemas serão ressaltadas como contribuição para o presente trabalho.

2.3.1 - Diversas arquiteturas e sistemas RBC no diagnóstico de falhas e manutenção de equipamentos na literatura

Assali *et al.* (2009), apresentam o sistema COBRA (*Conversational Ontology-based CBR for Risk Analysis*), o qual é uma plataforma para detectar falhas em sensores de gás baseado em RBC e ontologias. O objetivo do sistema é capitalizar o conhecimento sobre o domínio de aplicação e reusar passadas experiências das falhas, baseado em modelos ontológicos que descrevem o domínio e a estrutura dos casos.

Uma ontologia é uma forma de representar o conhecimento de uma área ou domínio de aplicação em particular. Segundo a definição formal, uma ontologia é a conceptualização

de uma generalização. Uma ontologia descreve os conceitos e as relações que existem entre os distintos conceitos. Também permite definir um dicionário de conceitos sobre o domínio de aplicação em estudo (Gruber, 1993).

A ontologia para o sistema COBRA é desenvolvida para permitir a representação do conhecimento em uma eficiente estrutura, que prove poderosas capacidades de raciocínio ao sistema. Uma das características de COBRA é que a base de casos é heterogênea. O modelo do caso é representado mediante uma ontologia que integra o domínio do modelo. Os casos são instâncias da ontologia. A plataforma COBRA foi feita em Java e baseada no *framework* jCOLIBRI para desenvolvimento de aplicações de RBC.

Um intento de integrar os conceitos de ontologias com RBC aplicado no domínio de manutenção de equipamentos em usinas hidrelétricas, é estudado por Alape *et al.* (2011).

Yao *et al.* (2009), apresentam outro sistema híbrido baseado em RBR e RBC aplicado a máquinas de complexa constituição. A estrutura do sistema inteligente de manutenção esta baseado em três camadas: camada de execução, camada lógica e a camada de dados. A primeira camada interatua com o usuário e transforma as consultas da equipe de manutenção às formas que o sistema possa entender. A camada lógica é o núcleo do sistema e executa as funções do sistema híbrido. A camada de dados é responsável pelos aspectos de manutenção de bancos de dados, base de casos e mecanismos de raciocínio. O sistema transforma os eventos produzidos na manutenção dos equipamentos em informação e conhecimento. Isso proporcionará sugestões ao usuário nas tomadas de decisões e na gestão da planta.

Kim *et al.* (2009) propõem um sistema híbrido de diagnóstico de falhas baseado em regras ou RBR (*Rules Based Reasoning*) e baseado em casos (RBC) para sistemas veiculares. O autor propõe uma codificação de falhas, a construção de um sistema BOM (*Bill of Materials*) e a criação de uma base de conhecimento a partir da informação histórica sobre falhas e manuais de manutenção do domínio de aplicação. O BOM é uma importante metodologia no qual os componentes, partes, ou estrutura de um produto são representados e modelados mediante uma representação hierárquica (Figura 2.3). O código de falhas consta de oito dígitos, o qual revela a informação sobre sistemas principais e subsistemas, o modo, a causa e a severidade da falha.

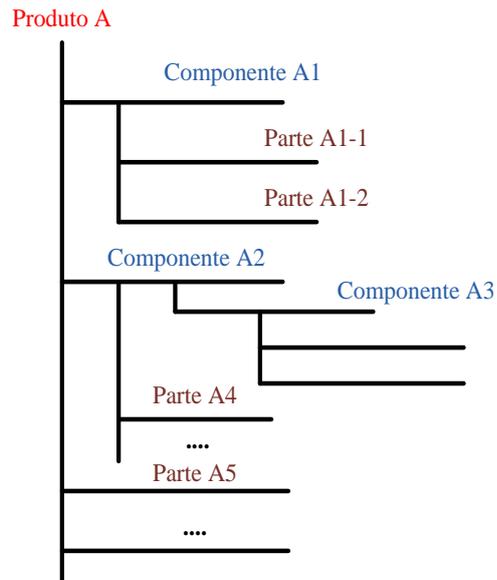


Figura 2. 3 - Abordagem BOM (Na *et al.*, 2009)

Na *et al.* (2009) propõem um sistema inteligente de diagnóstico de falhas baseado em RBC e BOM. Três são as camadas do sistema: a primeira camada recebe os sintomas de falha do processo; a segunda camada tem o motor de inferência, a recuperação de casos e a manutenção do sistema. Inclui também dois bancos de dados: a base de casos e o banco de dados do BOM. Na última camada, o usuário interage com o sistema. Nele são mostrados os resultados do diagnóstico. Na última fase do raciocínio, o sistema combina o BOM do produto com os diagnósticos gerados definindo que tipo de manutenção deve ser estabelecido.

Por outro lado, Begum *et al.* (2011) e Nilsson e Sollenborn (2004) apresentam uma revisão bibliográfica dos diferentes sistemas RBC aplicados nos diagnósticos de doenças e demais aplicações na área médica; Recio-Garcia (2008) apresenta a *framework* jCOLIBRI, uma ferramenta para o desenvolvimento e desenho de sistemas RBC; Kraus (2009) criou uma ferramenta para o desenvolvimento de sistemas RBC com foco no ensino da técnica, que possibilite o ensino nas disciplinas de IA.

Matelli *et al.* (2011), propõem um enfoque heurístico baseado em RBES (*Rule-Based Expert System*) e RBC proposto para o desenho de uma planta de cogeração de gás natural; Olsson (2009) apresenta um enfoque para diagnóstico de falhas de máquinas industriais usando sinais de sensores com métodos e algoritmos baseados em processamento de sinais

e RBC e, Plotegher e Fernandes (2009), apresentam um sistema de diagnóstico remoto para ambiente industrial aplicados a máquinas usando o enfoque do RBC.

2.3.2 - Análise dos aspectos gerais das arquiteturas apresentadas

A seguir se apresenta um resumo com os detalhes mais característicos e sobressalentes das arquiteturas apresentadas.

2.3.2.1 - Combinação de técnicas inteligentes

Os distintos sistemas apresentados mostram como as técnicas de IA – especificamente, os SBC (as técnicas RBC e RBR) e outras técnicas como as redes neurais artificiais, *fuzzy logic* e os enfoques de árvores de falhas – são os mais comuns e usados no campo específico de diagnósticos de falhas e apoio na tomada de decisão a nível industrial.

Outra grande característica é que a combinação de técnicas, por exemplo, os sistemas híbridos, aportam mais eficiência e qualidade no raciocínio do sistema inteligente. No caso dos sistemas RBC e RBR, estas tendem a se complementar, basicamente, pelo domínio de conhecimento onde melhor se desempenham. As informações mais úteis dos sistemas RBC são as situações específicas do campo de aplicação (situações passadas resolvidas) e o RBR tem melhor desempenho no domínio geral de conhecimento da aplicação. Prentzas e Hatzilygeroudis (2007), apresentam uma análise destas técnicas, seus principais diferenciais, contribuições e aspectos complementários que existem entre estas abordagens.

No caso de outros sistemas, a aplicação de uma técnica depende de sua eficiência na resolução de problemas, como no caso de Wang e Qi (2011). Por exemplo, se ante uma situação nova, não foi possível encontrar uma regra na base de conhecimento, então o módulo referente ao enfoque RBC é ativado. Se o sistema não consegue recuperar casos mais similares, ou se a descrição do problema é pobre ainda, então o usuário pode enriquecer a descrição do problema adicionando mais informações, ou um novo caso pode ser construído.

As principais vantagens da aplicação das técnicas de IA na área da manutenção de equipamentos são:

- Rapidez na detecção da falha, diagnóstico da mesma e identificação das causas ou origem da falha a partir do processamento de informação *online* e informação histórica do domínio de aplicação (Souza, 2008);
- O conhecimento do domínio de aplicação fica representado em formato de regras, casos, ou outro tipo de abordagem, permitindo a continuidade da informação (Matelli, 2011, Cunha, 2002);
- A eficiência e complexidade que aporta um sistema digital na detecção de falhas processando informações de planta de todo tipo, estabelecendo relações entre elas, e associando possíveis respostas ou sugestões de manutenção;
- Em alguns sistemas, a possibilidade de “aprender” diante de situações novas, o que viabiliza a atualização do mesmo. E, também, a possibilidade de fornecer uma explicação à solução construída ou elaborada e mostrar os resultados obtidos destas respostas aplicadas ao domínio de aplicação (Olsson, 2009).

2.3.2.2 – Dados quantitativos e textuais

Além da informação quantitativa de sensores e instrumentação inteligente que entra ao sistema, os domínios de aplicação industriais também tem informação qualitativa, textual que é de fundamental importância para os diagnósticos de falhas e decisões de manutenção. Os dois tipos de informações, quantitativas e qualitativas, são de igual importância no momento de ingressar ao sistema inteligente (Saxena *et al.*, 2005).

Muitas vezes, só a informação quantitativa é levada em conta para o raciocínio do sistema. No entanto, muitas informações sobre o estado da máquina são obtidas em termos de observações do operador, expressadas como descrições textuais, as quais são poucas vezes usadas nos processos de detecção de falhas e apoio na tomada de decisão de reparação e que, na maioria das ocasiões, contêm informação que não é evidente a partir das medidas dos sensores.

Este tipo de informação se encontra, por exemplo, nas ordens de serviço onde são registradas as situações de falha e as decisões executadas pelo pessoal de manutenção; as inspeções visuais feitas pelos operadores aos equipamentos também são descritas de maneira textual, entre outras.

2.3.2.3 – Codificação de falhas

Um aspecto muito importante dentro dos ambientes industriais é o estabelecimento de uma linguagem padronizada para se referir às formas de descrever as falhas, as tarefas de manutenção, as inspeções, a severidade, etc.

O estabelecimento de uma linguagem formal e padrão, ou codificação, fornece muitas vantagens: reduzir os erros de comunicação evitando ambiguidades e simplificando a transferência de informação entre fabricantes, usuários e operadores e evitando também a redundância nas descrições das falhas, dado que estas podem ser descritas de várias maneiras segundo a percepção do operador.

Na codificação de falhas é possível recopilar a informação do equipamento, o problema que esta acontecendo, a severidade e a decisão, entre outras informações básicas. Este processo de codificação poderia facilitar o processamento de informação a nível computacional e, inclusive, facilitar o fluxo da informação entre os distintos níveis da arquitetura do sistema.

2.3.2.4 - Aspectos gerais em consideração para a estrutura e construção do sistema RBC no contexto do presente trabalho

Segundo o supracitado quanto às distintas arquiteturas, várias características devem ser consideradas na hora de estabelecer a estrutura do sistema RBC e a implementação do mesmo. Alguns pontos característicos podem ser listados, a partir das referências anteriormente citadas:

- Classificação da informação de planta. Verificar os dados de planta tanto quantitativos como textuais, históricos ou qualitativos. Fazer ênfase em aqueles dados ou situações que revelem informação sobre falhas acontecidas nos dispositivos e sua respectiva ação de manutenção. Verificar modos de falhas nos equipamentos a partir de informações da planta, aplicando técnicas ou metodologias para reconhecimento das mesmas;
- Definir estrutura de caso. Um formato de caso deve ser definido. O problema deve ser submetido a um processo de abstração e é necessário identificar os atributos e

características que permitam descrever um determinado problema com quantidades suficientes de detalhes.

- Hierarquias e taxonomias de equipamentos. Uma classificação, segundo um contexto funcional, operacional ou de acordo ao tipo de máquina pode ser feito. Isto, com o fim de classificar e definir os procedimentos de manutenção de acordo com o tipo de equipamento e simplificar a análise e a classificação da informação em domínios de aplicação que apresentem diversos tipos, ou classes de maquinaria complexa.
- Definir um código de falha-decisão para o evento anormal identificado.
- Representação de casos e construção da base de casos do sistema. As situações identificadas são representadas em formato de casos e armazenadas em um banco de dados relacional constituindo a base de conhecimento do sistema.
- Execução do ciclo RBC. As etapas de recuperação, reuso, revisão e retenção são realizadas e uma resposta ao caso de entrada pode ser construída. O caso de entrada poderia ser uma consulta feita pelo usuário ingressando os descritores do caso. Ou, também, uma detecção automática de eventos, por exemplo. Quando a medida de um sensor instalado em planta revela uma leitura errada, fora da condição normal de operação, e, faz com que o ciclo 4R seja executado, automaticamente, com a procura por uma solução à condição anormal em questão.
- Uma resposta/solução pode ser elaborada a partir dos casos recuperados por parte do sistema RBC. Ela pode ser apresentada em um formato típico de OS para ser executada pelo operador. Uma avaliação do caso resolvido será feita depois da aplicação da ação sugerida.

Na seção anterior foram analisados distintas arquiteturas e sistemas enfocados à área de manutenção de equipamentos, especificamente, para o caso de diagnóstico de falhas e apoio nas tarefas de reparação. As contribuições e as características mais importantes das diversas aplicações para o presente trabalho foram mencionadas. A seguir é apresentada a ferramenta jCOLIBRI para a criação de sistemas RBC.

2.4 - FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA A CONSTRUÇÃO DO SISTEMA RBC: jCOLIBRI

Em Kraus (2009), um importante estudo sobre as principais ferramentas computacionais para o desenvolvimento de aplicações baseadas no processo RBC é encontrado.

jCOLIBRI é uma *framework* desenvolvida em Java pelo grupo GAIA⁴ (*Group of Artificial Intelligence Applications*) da Faculdade de Informática, da Universidade Complutense de Madri (Espanha), cujo principal objetivo para seu desenvolvimento é uma plataforma de referência para o desenvolvimento de aplicações RBC. Embora jCOLIBRI esteja focalizado à comunidade científica, numerosas aplicações comerciais tem sido desenvolvidos e aplicadas em cenários reais com a ferramenta jCOLIBRI.

O grupo GAIA, criador de jCOLIBRI, lançou em 2011 sua mais atual plataforma para desenvolvimento de software RBC acadêmico, chamado COLIBRI Studio, incluindo a atualização mais recente de jCOLIBRI: a versão 2.3 (Figura 2.4). COLIBRI Studio inclui ferramentas gráficas de desenvolvimento que ajudam o usuário na construção de sistemas RBC.



Figura 2. 4 -COLIBRI Studio e jCOLIBRI plataformas para desenvolvimento de sistemas RBC criados pelo grupo GAIA

COLIBRI Studio e jCOLIBRI estão disponibilizados via pagina web, pelo grupo GAIA assim como publicações, eventos, notícias, atualizações e outras pesquisas e projetos levadas a cabo pelo grupo. Contribuições a jCOLIBRI, em todo o mundo, têm sido feitas.

⁴<http://gaia.fdi.ucm.es/>

Com isso melhoras e variações tem aparecido e contribuído ao conhecimento e expansão do jCOLIBRI. As razões principais para usar a plataforma jCOLIBRI para a construção do protótipo RBC neste trabalho são:

- Sua característica de software livre e ser amplamente usada em aplicações comerciais, apesar de ser criada, a princípio, como uma ferramenta para o âmbito acadêmico;
- Por existir poucas ferramentas atuais e flexíveis para o desenho ou desenvolvimento de sistemas RBC;
- Por sua documentação através da tese de doutorado e tutorias do autor Recio-Garcia (2008) e Recio-Garcia *et al.* (2008), assim como atualizações e notícias através da página web;
- Por suas publicações e por ser uma ferramenta que tem servido para desenhos e testes em variadas aplicações no âmbito científico (Bottrighi, *et al.*, 2009, Recio-Garcia, *et al.*, 2009, Sanz, 2009);
- Por sua arquitetura e construção orientada a projetistas (*framework* caixa preta) e também a programadores (*framework* caixa branca) o qual permite que uma aplicação RBC, que deseja ser construída por algum desenvolvedor Java, adicione as características de jCOLIBRI em sua aplicação (Recio-Garcia, 2008, Recio-Garcia *et al.* 2008).

Esta ferramenta será utilizada para a implementação computacional, teste e validação do protótipo RBC aplicado à tomada de decisão associada à gestão da manutenção da usina hidrelétrica de Balbina.

2.4.1 - Estrutura de jCOLIBRI

jCOLIBRI é um *framework* orientada a objetos desenvolvido em Java para a construção de sistemas RBC. Por *framework*, entende-se um “conjunto de classes que incorpora uma concepção abstrata para a solução de uma família de problemas relacionados”. Ou seja, um desenho e implementação parcial para uma aplicação em um domínio de aplicação (Recio-Garcia *et al.*, 2008). Um *framework* se classifica em duas arquiteturas básicas: uma arquitetura caixa branca e uma caixa preta.

O *framework* caixa branca está orientado a programadores que lidam diretamente com o código fonte da aplicação, portanto, esperam herdar e estender as classes e interfaces do código. O desenvolvedor conhece todos os detalhes de funcionamento interno dos componentes e pode controlar todos os aspectos relacionados com sua aplicação mediante o código fonte do *framework*.

O *framework* caixa preta está orientado a projetistas, ou seja, aqueles que não querem entrar em detalhes do código e preferem modelar o sistema rapidamente e para isso usam ferramentas de composição. Nesta arquitetura, os componentes e classes são instanciados e configurados pelos desenvolvedores. A vantagem deste *framework* é a facilidade de uso. Usualmente este tipo de arquitetura dispõe de uma interface gráfica que apóia ao usuário durante a configuração de sua aplicação. Na Figura 2.5 pode se observar a arquitetura de jCOLIBRI (Recio-Garcia *et al.* 2008).

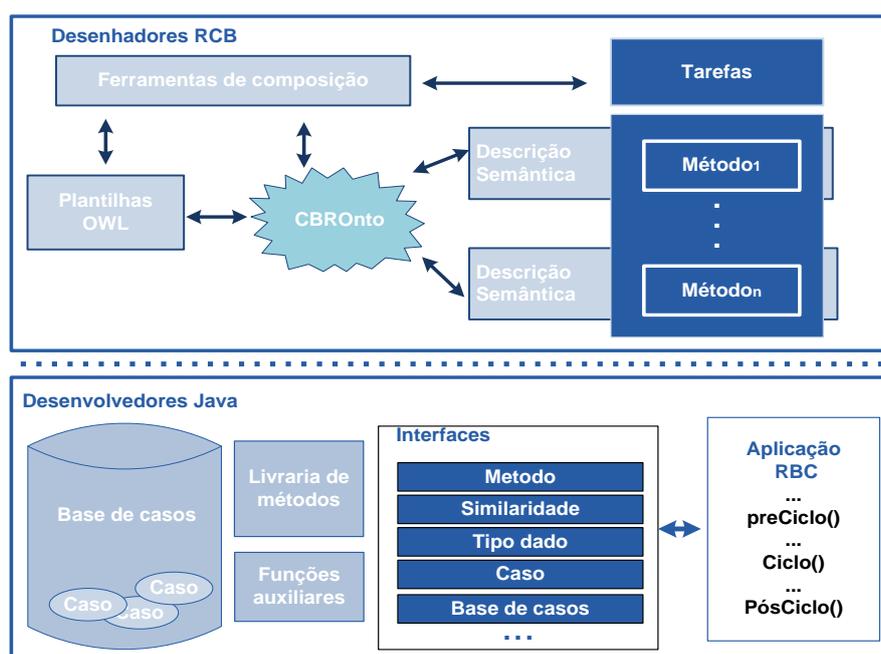


Figura 2. 5 - Arquitetura de jCOLIBRI 2 (Recio – Garcia, 2008)

A arquitetura da versão 2 de jCOLIBRI, consta de duas camadas que abarcam as necessidades, tanto de desenvolvedores como de projetistas. Esta arquitetura apresenta uma *framework* caixa branca (orientada a programadores) e a uma *framework* caixa preta (orientada a projetistas através de construtores). A ideia chave no novo desenho consiste

em separar as classes núcleo (*core*) e a interface do usuário, através de duas camadas conforme apresentado na Figura 2.5.

A camada inferior corresponde à caixa branca e contém os componentes básicos do *framework* com interfaces claras e bem definidas. Esta camada não tem nenhum tipo de ferramenta gráfica para o desenvolvimento de aplicações RBC, é só um *framework* caixa branca, orientada a objetos, para ser usada por programadores. A camada superior tem as descrições semânticas dos componentes e várias ferramentas para auxiliar os usuários no desenvolvimento de aplicações RBC, correspondendo à versão caixa preta do *framework* (Recio-Garcia *et al.*, 2008). No momento que o jCOLIBRI 2 foi lançado, esta camada ainda estava em desenvolvimento, mas agora, com o lançamento da ferramenta COLIBRI Studio, esta camada esta disponível.

O *framework* jCOLIBRI 2 implementa todo o ciclo RBC. Por ser desenvolvido em Java é preciso ter instalado o Kit de desenvolvimento de Java (Java SDK). O pacote jCOLIBRI disponibiliza, juntamente com todo o código fonte do *framework*, um conjunto de 30 exemplos que podem ser visualizados através de uma interface gráfica, onde é possível avaliar o funcionamento e desempenho do *framework*, também disponibilizando toda a documentação dos exemplos (Kraus, 2009).

2.5 - CONSIDERAÇÕES E SÍNTESE DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram apresentados os conceitos básicos da técnica de IA conhecida como RBC. Diversas arquiteturas de diagnósticos de falhas e apoio na tomada de decisão de manutenção, encontradas na literatura, foram apresentadas. Seus aspectos mais relevantes foram destacados, assim como suas contribuições à atual pesquisa. Foi apresentada a ferramenta jCOLIBRI para a construção de sistemas RBC que, atualmente, é a ferramenta mais versátil e importante para a construção deste tipos de sistemas.

As abordagens de manutenção corretiva e baseada em condição, dentro do contexto do atual trabalho, foram discutidas. Assim como a especificação PAS 55, que são os enfoques mais atuais e abrangentes que tem a manutenção de ativos na atualidade. A incursão das técnicas da IA, para sugerir procedimentos e ações de manutenção e diagnosticar falhas nos equipamentos, constituem uma das áreas de estudo mais exploradas hoje em dia.

3 – METODOLOGIA

Este capítulo tem como objetivo descrever a metodologia proposta para o desenvolvimento de um sistema de apoio na tomada de decisão baseado na técnica de IA (Inteligência Artificial) conhecida como RBC (Raciocínio Baseado em Casos), dentro do contexto da MC (Manutenção Corretiva) e a MBC (Manutenção Baseada em Condição).

No capítulo três foi apresentada a técnica RBC e suas inúmeras aplicações e sistemas no domínio de trabalho da manutenção de equipamentos. As características mais importantes destes sistemas foram analisadas e serão pontos importantes na construção da metodologia que é apresentada neste capítulo. Para mais clareza, rigorosidade e efetividade na apresentação e explicação do sistema, foi usada a metodologia IDEF0 (*Integration DEFinition Language 0*) para o modelamento do mesmo.

3.1 – MODELAGEM FUNCIONAL DE UM SISTEMA DE GESTÃO DE MANUTENÇÃO CORRETIVA E BASEADA EM CONDIÇÃO FOCADO EM RBC

A aplicação da técnica da IA, RBC, nas abordagens da manutenção corretiva e a baseada em condição, visa auxiliar e automatizar os procedimentos típicos destes paradigmas de manutenção: associar adequadas tarefas de reparo ou preventivas no caso da manutenção corretiva e o estabelecimento de diagnósticos de falha, prognósticos, causas da falha e decisões no caso da manutenção baseada em condição.

A modelagem funcional do sistema foi elaborada segundo a abordagem IDEF0. O IDEF0 pode ser utilizado para modelar as decisões, ações e atividades de um sistema de forma gráfica e estruturada. Um diagrama de IDEF0 consta de caixas, linhas e setas. Estes definem os elementos básicos deste tipo de diagramas. As caixas representam funções, atividades ou processos. As setas representam objetos ou dados relacionados com as caixas (Kim *et al.*, 2002).

Cada modelo possui um nível superior, chamado de A0, que contém todas as características gerais do sistema sem detalhar os módulos de seu desenvolvimento, senão, só sua visão geral. Este diagrama consta de uma só caixa, junto com as entradas (setas

entrando pelo lado esquerdo), mecanismos (setas entrando pelo abaixo da caixa), controles (setas entrando pelo encima da caixa) e saídas (setas saindo pelo lado direito da caixa).

Os controles são as condições ou circunstancias que governam a execução da atividade representada. Os mecanismos são as ferramentas, pessoas, dispositivos ou softwares que permitem a execução da função em questão.

A construção do sistema de gestão de manutenção corretiva e baseado em condição enfocada em RBC, pode se dividir em três grandes concepções ou procedimentos analisados nas seguintes subseções.

3.1.1 - Estabelecimento do sistema de gestão de manutenção a adotar

Esta concepção dará como resultado o formato e a estrutura de um caso, assim como a base de casos do sistema na qual estão armazenadas as situações de possíveis eventos anormais ou situações de falhas já identificadas que acontecem nos equipamentos, junto com distintas informações relacionadas com os procedimentos do sistema de manutenção a adotar. De acordo ao tipo de gestão de manutenção a adotar são processadas as informações mais importantes de planta (dados *on-line*, dados históricos, etc.), transformando esses dados em informações valiosas para geração de sugestões de manutenção, diagnósticos e prognósticos de falhas. As informações contidas nos casos, assim como a estrutura dos mesmos, variam de acordo ao enfoque de manutenção adotado.

3.1.2 – Definição da estrutura do caso e modelagem e elaboração da base de casos

3.1.2.1 – Estrutura do caso

Embora o formato de caso mais básico é o de problema-solução, sua definição e estrutura dependem do objetivo da aplicação do sistema RBC e do domínio de aplicação tratado. O formato de caso não necessariamente deve ser único, pois, existem abordagens onde os casos são heterogêneos e a base de casos é dinâmica como em Assali *et al.* (2009).

No contexto deste trabalho, o formato do caso depende do enfoque da manutenção que esteja sendo adotada e do objetivo do raciocínio. O objetivo do raciocínio é estabelecer ou

encontrar uma ação de manutenção acorde com a falha detectada, ou os sintomas apresentados. Além disso, deve-se ter a possibilidade de avaliar a solução proposta pelo sistema, isto é, analisar se a resposta, quando foi aplicada ao equipamento ou processo, foi efetiva ou não.

Os componentes do caso devem ser precisos na descrição do caso. Aqui o conceito de abstração assume uma grande importância pois, os componentes do caso identificados devem ser suficientes e precisos para a completa descrição do caso. A abstração nesta parte do desenho está relacionada como o fato de “reduzir” o problema para identificar as características mais importantes deste e incluir suficientes detalhes para identificar o problema. Representar os casos em níveis apropriados de detalhes é um verdadeiro desafio. A capacidade de abstração do desenvolvedor determinará quantos detalhes são necessários para a representação do problema (Zhou *et al.*, 2010).

A estrutura de caso definida neste trabalho é: a descrição do equipamento, a descrição do problema apresentado, a descrição da solução e o resultado da aplicação da resposta elaborada pelo sistema.

3.1.2.2 – Elaboração da base de casos

Depois de obter o conjunto de casos, eles serão armazenados em um banco de dados relacional, a qual será a base de casos do sistema. Segundo Na *et al.* (2008), a construção de um sistema RBC consiste em identificar os campos mais relevantes do domínio do problema. O modelo relacional facilita a representação e implementação da base de casos em qualquer banco de dados, comercial ou disponível para a aplicação. Segundo esta representação, a informação dos casos é armazenada em tabelas, mediante linhas e colunas, e cada uma das tabelas estão relacionadas através de chaves primárias (*primary key*), secundárias e índices.

Cada tabela deve ter uma chave primária que assegure que cada registro seja único dentro da tabela. A chave primária pode ser construída com uma combinação de colunas da tabela ou, mesmo por uma coluna só, sempre assegurando que cada registro seja único. As tabelas se relacionam entre si, mediante as chaves primárias e também mediante as chaves secundárias ou *foreign keys*.

Cada linha representa um caso com um identificador único. Cada coluna da linha corresponde a um atributo ou entidade de informação do caso (Elmasri e Navathe, 2000). A representação da base de casos mediante os bancos de dados relacionais é muito importante. Ela permite, entre outras coisas (Vachtsevanos *et al.*, 2006, Elmasri e Navathe, 2000): uma fácil compreensão da estrutura da base de conhecimento; a manutenção da base de dados é mais eficiente; mediante o processo conhecido como “normalização” pode-se ganhar mais espaço para o armazenamento e evitar redundância da informação; podem-se aplicar técnicas de recuperação da informação nos bancos de dados. O último tópico é essencial no RBC. Portanto, um modelo de banco de dados baseado no modelo relacional é proposto para a construção da base de casos do sistema.

3.1.3 - Ciclo RBC (4R)

Nos dois enfoques da manutenção, a execução do ciclo RBC é realizada da mesma forma, tal como corresponde com o ciclo 4R (seção 2.2.2): um caso atual (evento anormal) é detectado pelo sistema por monitoração de condição (no caso da MBC) ou através de uma situação ingressada pelo usuário (no caso da MC); um conjunto de casos é recuperado da base de casos segundo o valor da similaridade; uma solução é elaborada a partir dos casos recuperados; o especialista avalia se a solução proposta pelo sistema é adequada; se é assim o processo continua e o caso com a solução elaborada pelo sistema é armazenado na base de casos; por fim, a resposta é apresentada ao usuário. A seguir se analisa as duas concepções baseadas na aplicação da técnica RBC para a concepção de sistemas de gestão de manutenção corretiva e baseada em condição.

3.2 – MODELAGEM DO SISTEMA DE GESTÃO DE MANUTENÇÃO CORRETIVA APLICADO A USINAS HIDRELÉTRICAS USANDO RBC

O diagrama A0 proposto para a concepção do sistema de gestão de manutenção corretiva usando RBC é proposto na Figura 3.1.

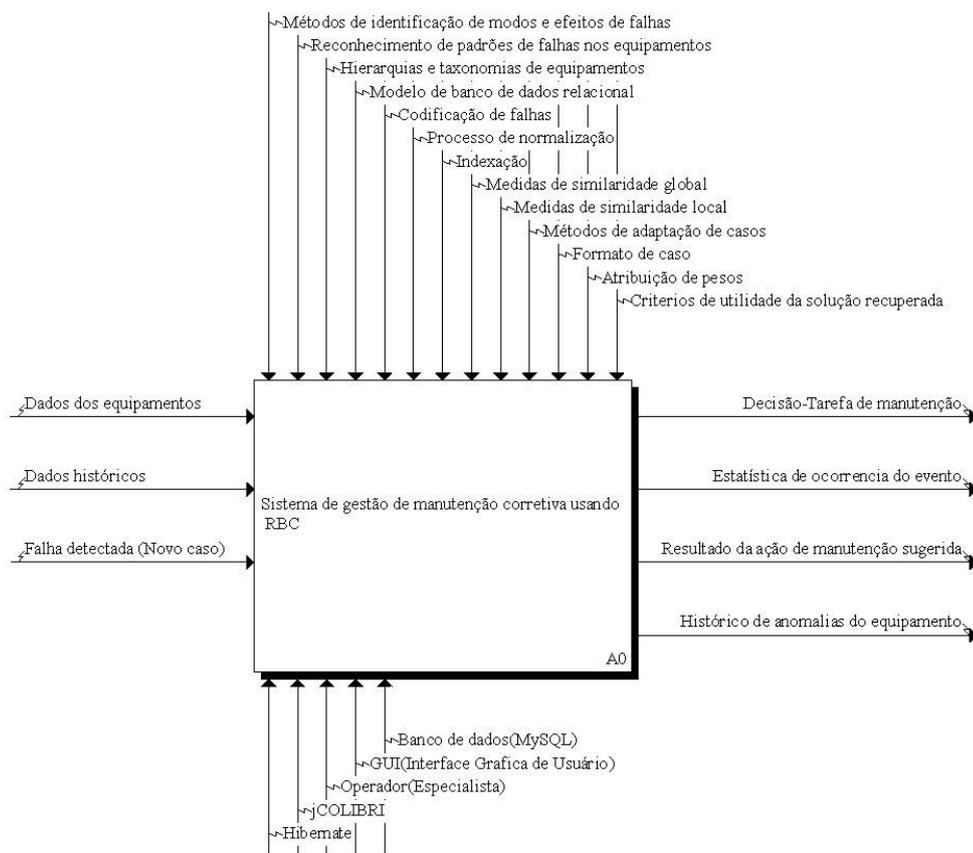


Figura 3. 1 – Modelo IDEF0: Diagrama A0 do sistema de gestão de manutenção corretiva

Nas seguintes seções são analisadas as distintas entradas, saídas, controles e mecanismos do sistema de manutenção corretiva usando o enfoque RBC.

3.2.1 – Entradas do sistema

As seguintes entradas são processadas pelo sistema de manutenção corretiva:

- **Dados dos equipamentos.** Esta informação é fundamental para a classificação e identificação dos ativos que operam em uma usina hidrelétrica de acordo com a complexidade do domínio de aplicação. Isto também permite que as falhas identificadas sejam classificadas de acordo a cada família de equipamentos definida, gerando, desta forma, um pequeno domínio de conhecimento onde são agrupados, reunidos e identificados os distintos modos de falha identificados nos equipamentos.

- **Dados históricos.** Esta informação está relacionada com todos os dados, métodos e documentos disponíveis sobre os equipamentos que tenham sido registrados e que permita identificar padrões de falhas, recorrência de avarias em relação ao tempo e identificação das tarefas de manutenção mais comuns e habituais na ocorrência dos sintomas de alertas e falhas. Dentro deste tipo de informação se classificam entre outras informações: as ordens de serviço, os bancos de dados, softwares SCADA que registram alarmes e alertas do processo monitorado.
- **Falha detectada (novo caso):** dado que na manutenção corretiva a falha já foi localizada ou identificada, devido a sintomas observados pelos operadores ou funcionamento errado do equipamento que coincidem com algum padrão de falha identificado, a falha detectada é ingressada pelo usuário, em forma de caso, para procurar na base de conhecimento o melhor procedimento para enfrentar essa situação anormal.

3.2.2 – Saídas do sistema

As saídas do sistema de manutenção corretiva são, basicamente, um conjunto de informações que fornecem uma resposta ou solução ao caso atual (evento anormal detectado) ingressado pelo usuário. A resposta é obtida através da execução do ciclo RBC, onde uma ação de manutenção é associada pelo sistema em base a situações anteriores armazenadas na BC (Base de Casos).

A resposta à consulta feita pelo usuário pode ser apresentada com um conjunto de dados principais que informem e reflitam as operações básicas e os procedimentos típicos da manutenção corretiva: características básicas do equipamento que apresenta a falha; o evento anormal que está acontecendo; a tarefa ou decisão recomendada pelo sistema; o operador ou equipe de manutenção que atendeu o evento e a efetividade da manobra realizada. Outras informações podem ser adicionadas, como o número de ocorrências do evento anormal apresentado e uma estatística do evento, mostrando, a frequência com a que dita ocorrência se apresenta em equipamentos similares.

3.2.3 – Controles do sistema

Quanto aos controles do sistema, um conjunto de métodos, enfoques e paradigmas são indispensáveis para o correto funcionamento do sistema de MC. Os mais importantes são:

- Definição do formato e estrutura do caso;
- Definição de código de falha-decisão;
- Aspectos típicos do ciclo RBC como medidas de similaridade global-local, atribuição de pesos aos atributos, os métodos de adaptação de casos, etc.;
- Hierarquias e taxonomias de equipamentos para a classificação das máquinas presentes na usina hidrelétrica e facilitar a recopilação de informações de acordo com o tipo de equipamento.

3.2.4 – Mecanismos do sistema

Por último, os mecanismos que permitem a execução da atividade representada e a elaboração do sistema proposto são:

- A ferramenta jCOLIBRI para a construção do sistema RBC;
- O banco de dados MySQL para a construção da base de casos do sistema e informações sobre as estatísticas, históricos de anomalias e dados dos equipamentos presentes da usina hidrelétrica;
- A ferramenta mapeo-relacional Hibernate, para a comunicação entre a aplicação e o banco de dados;
- A experiência e o conhecimento do especialista para o assessoramento e apoio em quase todas as tarefas do desenvolvimento do sistema;
- Interfaces Gráficas de Usuário (GUI) para a apresentação dos resultados e interação com o usuário e a plataforma Java na qual todo o protótipo é desenvolvido.

No diagrama A1 da Figura 3.2 se apresentam, com mais detalhes, as distintas atividades ou funções deste módulo geral.

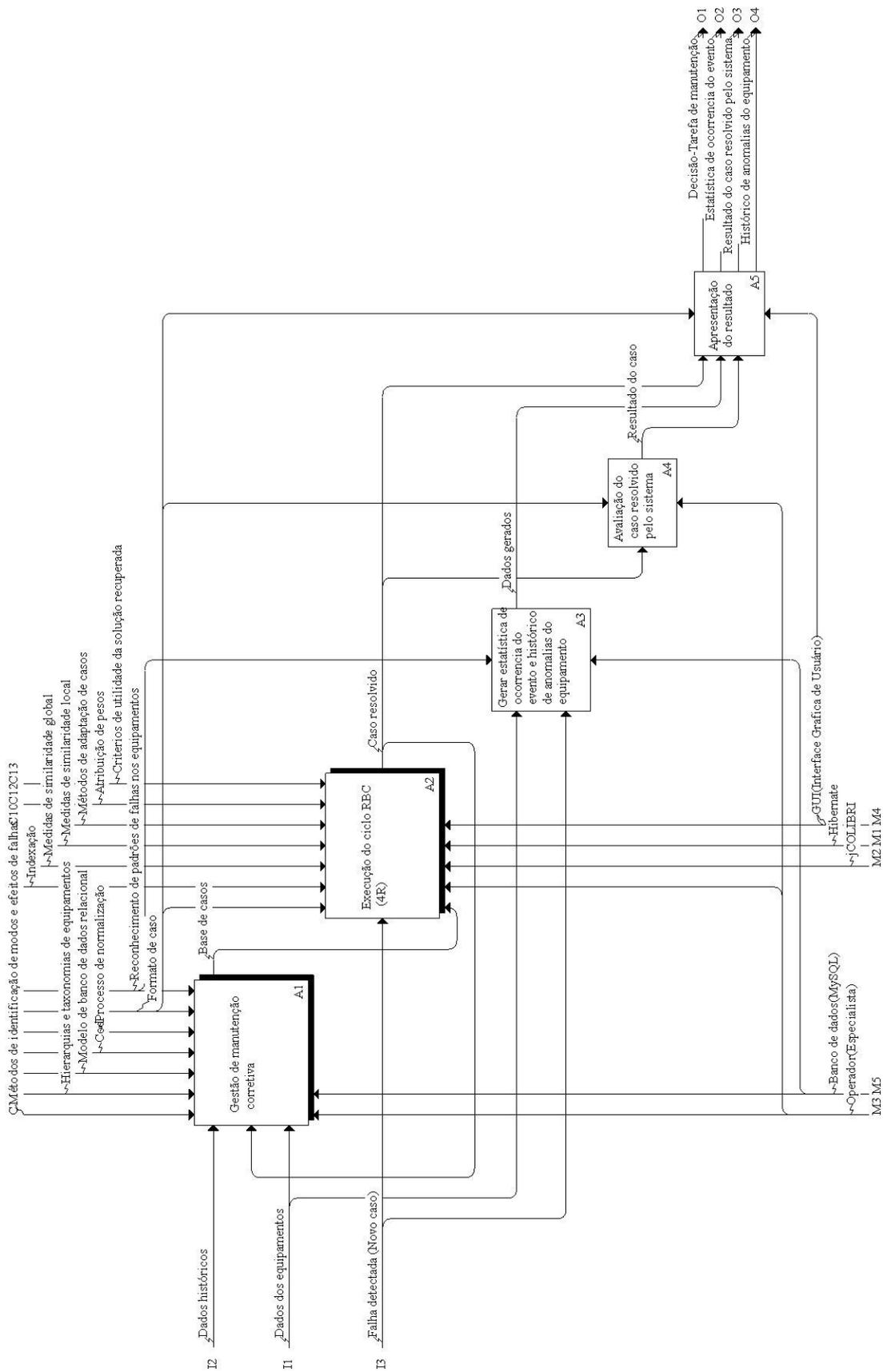


Figura 3. 2 – Modelo IDEF0: Diagrama filho da função A0

Neste diagrama se observam cinco atividades principais do desenvolvimento do sistema de manutenção corretiva aplicando RBC: gestão da manutenção corretiva, execução do ciclo RBC (4R), estatísticas de ocorrência do evento e históricos de anomalias do equipamento, avaliação do caso resolvido pelo sistema e apresentação do resultado. A seguir se descreverá, rapidamente, cada uma destas atividades.

- ✓ Gestão de manutenção corretiva. Este módulo processa as informações históricas e os dados dos equipamentos do domínio de aplicação, depois, as acondiciona e as representa em formato de casos que constituem a base de casos do sistema. A saída deste módulo é a base de casos do sistema RBC. Na seção 3.2.5 é descrito com mais detalhes o desenvolvimento deste módulo.
- ✓ Execução do ciclo RBC (4R). Aqui se dá a execução do ciclo RBC, conhecido como 4R, que será descrito com mais detalhes na seção 3.4. O ciclo RBC é executado com o objetivo de elaborar uma resposta ao caso atual ingressado pelo usuário. A resposta é construída a partir dos eventos recuperados da base de casos que tenham uma similaridade com o caso atual. A resposta consiste em identificar a tarefa de manutenção ou de reparo para a situação detectada.
- ✓ Estatísticas de ocorrência do evento e históricos de anomalias do equipamento. Este módulo registra as estatísticas da ocorrência de uma determinada anomalia, assim como os registros de eventos anormais que se apresentam no equipamento. Isto, com o objetivo de analisar as evoluções das falhas, e de se aprofundar nas razões em que uma determinada falha se apresenta com mais frequência e ser mais efetivo na aplicação e melhoramento dos procedimentos de manutenção.
- ✓ Avaliação do caso resolvido pelo sistema. Esta função permite avaliar a resposta dada pelo sistema. Consente verificar se a decisão sugerida pelo protótipo e executada pelo operador foi efetiva ou não, além de identificar informações a ser corrigidas no caso e na situação anormal detectada. Esta é uma etapa que pode levar tempo, pois se executa quando o procedimento já foi aplicado e se espera o resultado da aplicação sugerida.

- ✓ Apresentação do resultado. Aqui são apresentados ao usuário, mediante típicas aplicações gráficas de Java como *frames*, *applets*, etc., os principais resultados de todo o processamento do sistema. Especificamente, são mostrados os campos que do caso, como a informação do equipamento que apresenta a falha, a falha que é ingressada pelo usuário, a decisão sugerida pelo sistema, o resultado da aplicação em campo da solução recomendada pelo sistema e os dados que informam sobre as estatísticas e históricos das anomalias apresentadas e, por fim, as informações que resultam da aplicação de cada uma das etapas quando se aplica o ciclo 4R.

De acordo com estes módulos, as funções de “Gestão de manutenção corretiva” e a “Execução do ciclo RBC” são desenvolvidas com maior detalhe. O módulo correspondente ao desenvolvimento da “Gestão de manutenção corretiva” é analisado na seção 3.2.5 e o correspondente a “Execução do ciclo RBC” é analisado na seção 3.4.

3.2.5 – Gestão da manutenção corretiva

Na Figura 3.3, ilustra-se os procedimentos típicos da gestão de manutenção corretiva.

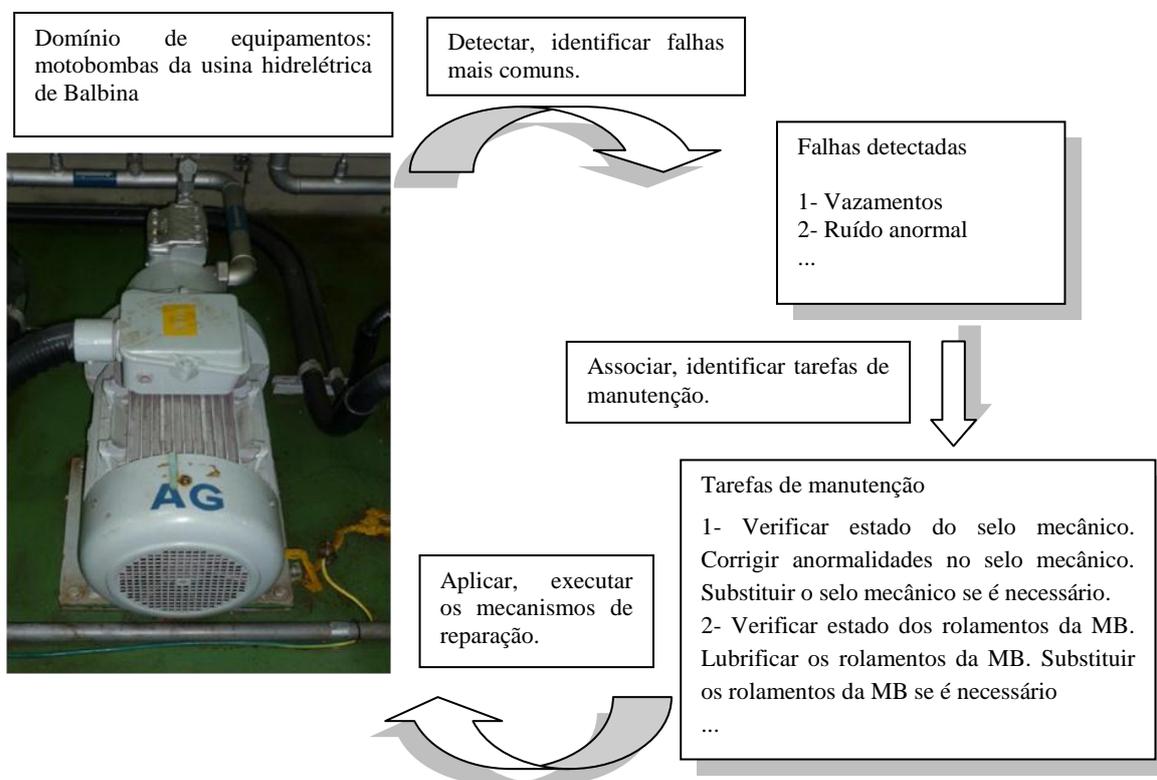


Figura 3. 3 - Exemplo de gestão de manutenção corretiva

A gestão da manutenção corretiva proposto neste trabalho se apresenta em 7 atividades: classificação dos equipamentos; identificação de falhas mais recorrentes nos equipamentos; associação da tarefa de reparo; associação do código falha-decisão; representação de casos e construção e atualização de casos, como mostrado no diagrama IDEF0 na Figura 3.4.

A seguir os detalhes mais importantes destes módulos.

- ✓ Classificação dos equipamentos. Este módulo tem como função organizar os dispositivos segundo sua funcionalidade, localização, importância ou criticidade. Permite gerar níveis hierárquicos ou taxonomias de equipamentos, segundo o critério definido, facilitando sua identificação, a definição de tarefas de manutenção preventiva, a definição de uma equipe de trabalho que irá monitorar o ativo, a identificação de falhas mais comuns que acontecem neste e outras vantagens. Com este módulo, o objetivo é identificar as famílias de equipamentos que existem em um domínio industrial complexo, como o de usinas hidrelétricas, e classificar cada um dos ativos presentes de acordo à família de máquina identificada.
- ✓ Identificação de falhas nos equipamentos. O objetivo é identificar as falhas ou eventos anormais que, com mais frequência, acontecem nos equipamentos. O intuito é estabelecer um padrão de falhas sobre a família à qual pertence a máquina. Este padrão de falhas pode ser determinado a partir da análise da informação histórica do equipamento e baseado em modelos ou metodologias de identificação de falhas como a FMEA ou FTA que, além de permitir identificar os eventos anormais, podem estabelecer as causas e efeitos do evento anormal. A informação histórica a analisar pode ser os registros de bancos de dados ou ordens de serviço que possibilitam o estabelecimento e a identificação de modos de falhas nos equipamentos.
- ✓ Associação da tarefa de manutenção. Uma vez estabelecido o padrão de falhas, uma tarefa de manutenção deve ser associada. Na associação da tarefa de reparo, o especialista, assim como o método de identificação de falhas, é de fundamental importância para a determinação da tarefa de reparo. Cada padrão de falha identificado deverá ter associado uma respectiva ação de manutenção.

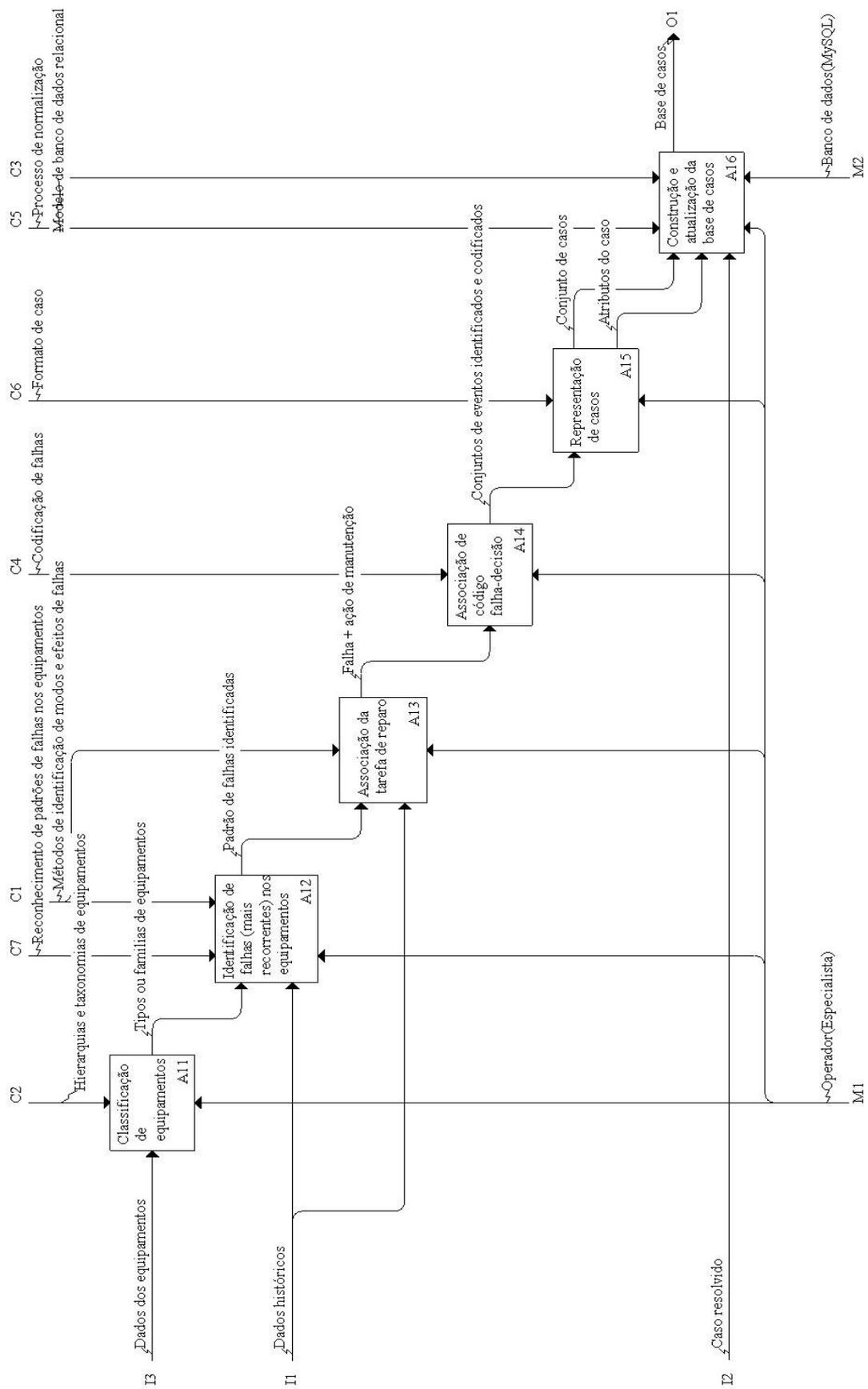


Figura 3. 4 – Modelo IDEF0: Diagrama filho da função A1

Devido a sua importância, as três atividades restantes são analisadas nas seguintes subseções.

3.2.5.1 – Codificação de falhas

Aqui, as falhas identificadas com sua respectiva ação de manutenção são codificadas. O objetivo de codificar os eventos anormais detectados e de estabelecer um formato de código padrão consiste em organizar e gerenciar, eficientemente, a informação e permitir um tratamento e análise mais ordenados das falhas e; facilitar a identificação dos procedimentos de manutenção. A codificação de falhas é um aspecto muito importante nos sistemas de diagnósticos de falhas, este, também é abordado e proposto por Kim *et al.* (2009).

No aspecto computacional, a criação de um código claro e simples para padronizar as falhas visa melhorar o processamento e rapidez na execução dos algoritmos próprios das técnicas de IA e, naturalmente, dos procedimentos do RBC. O código proposto tem em conta os seguintes aspectos de codificação (Kendall e Kendall, 2005):

- Os códigos longos podem suscitar erros e ocupam mais memória na base de dados.
- O código deve ser adaptável, tendo em conta que o sistema pode mudar com o transcurso do tempo.
- O código proposto deve ser entendível por parte do usuário.
- Evitar o uso de caracteres que sejam ou pareçam iguais.
- Garantir que os códigos sejam únicos.

As vantagens da codificação de falhas são:

- A identificação e padronização do evento anormal com sua(s) respectiva(s) tarefa(s) de reparo;
- O estabelecimento de uma linguagem comum dentro do âmbito industrial, não ficando sujeito aos critérios próprios dos operadores da planta;
- Facilidade na aquisição e representação de informações da planta;

- Rapidez na identificação da falha e efetividade na decisão de manutenção e rapidez no fluxo de informações a nível computacional.

O código proposto é alfanumérico. Contem 6 campos que, por sua vez, identificam a informação mais relevante do equipamento e a falha que esta acontecendo. O formato do código é ilustrado na Figura 3.5.

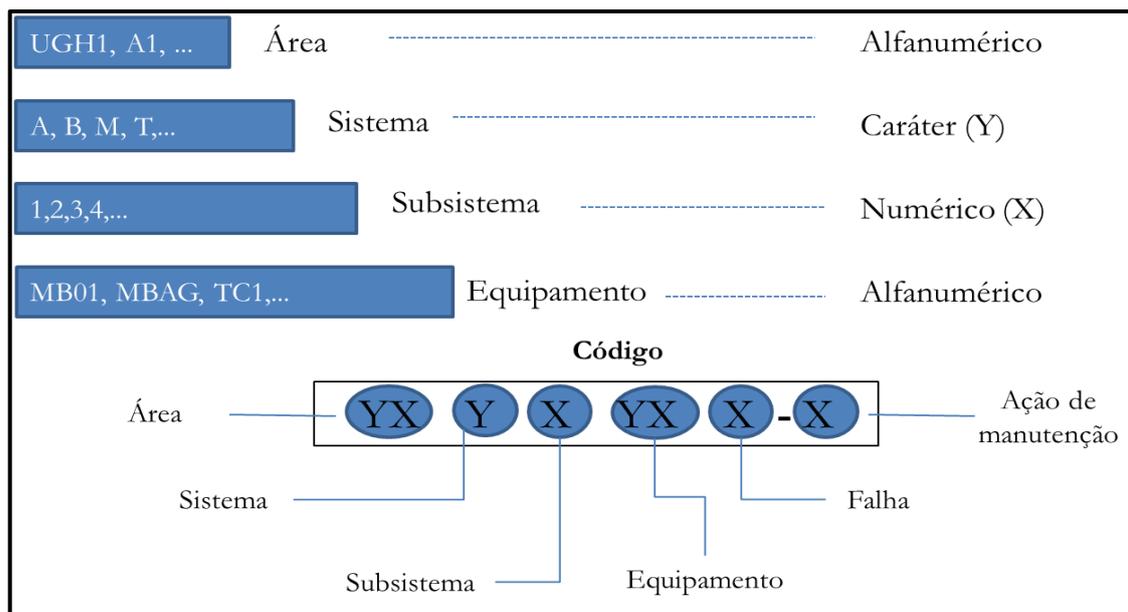


Figura 3. 5 - Formato de código de falha

3.2.5.2 – Representação de casos

A informação anterior é apresentada na forma de casos, segundo a estrutura definida na seção 3.1.2.1. No Quadro 3.1 são ressaltadas as características mais importantes dos componentes do caso e, a seguir, são descritos cada um destes componentes que compõem o caso.

- ✓ Descrição do equipamento. Este campo especifica um código único de identificação do caso, a data de ocorrência do evento e toda a informação relacionada como os detalhes da máquina: unidade geradora hidráulica à qual pertence, fabricante, modelo, serie, marca, provedor, data de compra, data de inicio de operação, tempo de operação, dentre outras informações.

Quadro 3. 1 - Formato de caso definido para a gestão de manutenção corretiva

Caso: código único de caso		Data de ocorrência: data do acontecimento
Descrição do equipamento	Neste campo especificam-se os atributos típicos para a descrição do equipamento: unidade geradora, sistema, subsistema, fabricante, provedor, manutenção preventiva entre outras informações que permitem uma descrição detalhada do equipamento.	
Descrição do problema	Falha típica	Neste campo é especificada a falha identificada. A partir do padrão de falhas determinado, classificam-se cada uma das falhas apresentadas, segundo seu nível de ocorrência
	Efeitos	O que aconteceria se a falha apresenta-se.
Descrição da solução	Causas	As causas da falha.
	Decisão	É a ação de manutenção ou alguma sugestão corretiva para solucionar a falha apresentada.
Resultados	O especialista avalia se a informação contida no caso corresponde com a realidade da falha. Se o diagnóstico foi correto, se as causas são realmente certas e se a ação corretiva foi efetiva ou não.	

- ✓ **Descrição do problema.** Este campo especifica o tipo de evento anormal que está acontecendo no equipamento e que é detectado pelo operador, ou especialista, que supervisa o equipamento como, por exemplo, em situações de ruído anormal nas máquinas, funcionamento errado nas mesmas. Também, existem outros sintomas de falhas que podem ser determinadas pela informação de planta, mas que são perfeitamente identificáveis e só se procura uma solução rápida baseada em históricos de fatos acontecidos, que facilitem os mecanismos de atendimento do problema e apoiar na aprendizagem do operador que trabalha no domínio de aplicação.

- ✓ **Descrição da solução.** Na solução do caso, identificam-se dois campos: sugestão de manutenção e as causas do problema. Uma ação preventiva ou de reparo é sugerida pelo sistema. Este apoio na tomada de decisão, é uma das mais importantes características de um sistema de manutenção inteligente. Ele permite sugerir uma ação de manutenção ao operador para ser executada no equipamento ou planta industrial. A identificação das causas do problema apresentado, também, faz parte da solução.

- ✓ **Resultados.** Este campo permite avaliar se o diagnóstico sugerido pelo sistema foi correto, ou se a ação de manutenção foi efetiva ou não. Aqui é apresentado o que aconteceu quando foi executada a solução proposta, se a solução elaborada pelo

sistema foi exitosa ou não. Com esta informação, o especialista pode antecipar problemas potenciais e prever as consequências de uma particular solução sugerida. Este campo também faz parte da aprendizagem do sistema (Wangenheim e Wangenheim, 2003). Avaliar o resultado de um caso pode levar tempo. O caso pode permanecer na base de casos e ser reusada para novas situações, mas a avaliação é feita uma vez que a solução proposta pelo sistema foi aplicada no equipamento ou planta (Aadmont e Plaza, 1994).

3.2.5.3 – Construção e atualização da base de casos

Depois de obter o conjunto de casos, a partir das situações identificadas, elas são armazenadas em um banco de dados relacional conforme foi mencionado na seção 3.1.2. No caso para a gestão de manutenção corretiva é proposto, a seguir, na Figura 3.6 um modelo relacional de base de dados.

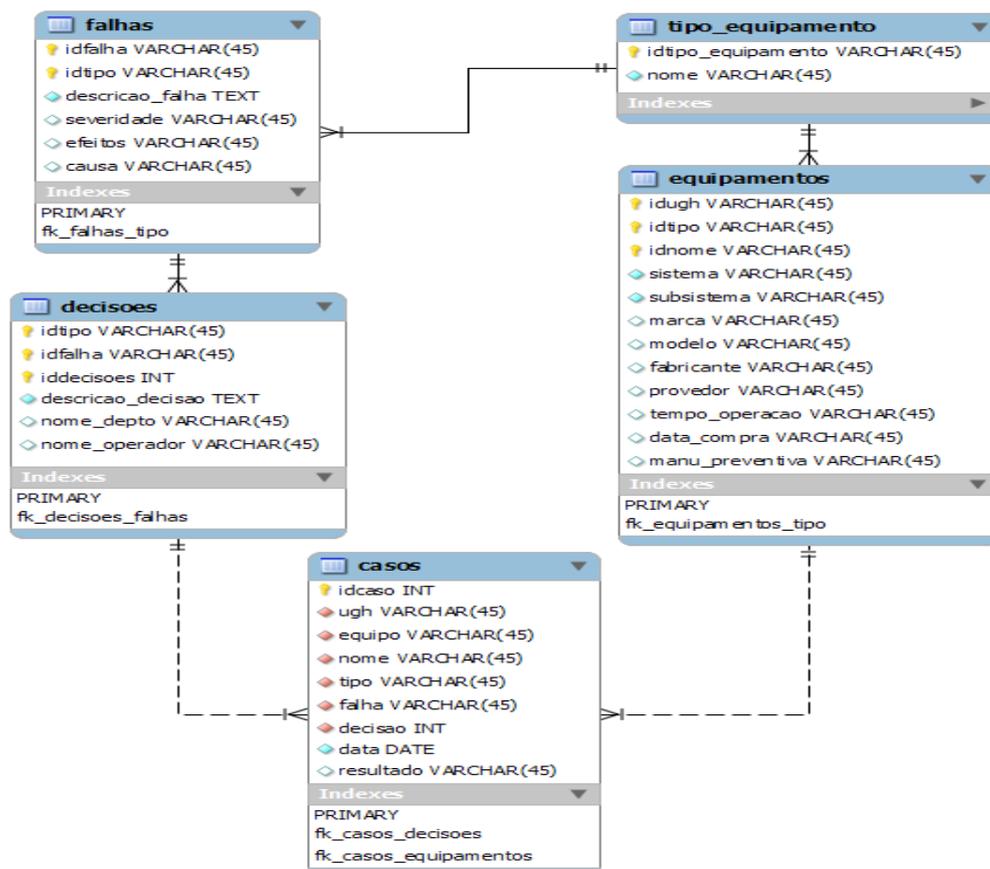


Figura 3. 6 - Modelo relacional para a base de casos do protótipo RBC

3.3 – MODELAGEM DO SISTEMA DE MANUTENÇÃO BASEADA EM CONDIÇÃO APLICADA A USINAS HIDRELÉTRICAS USANDO RBC

O diagrama, A0, proposto para a concepção do sistema de gestão de MBC usando RBC é proposto na Figura 3.7.

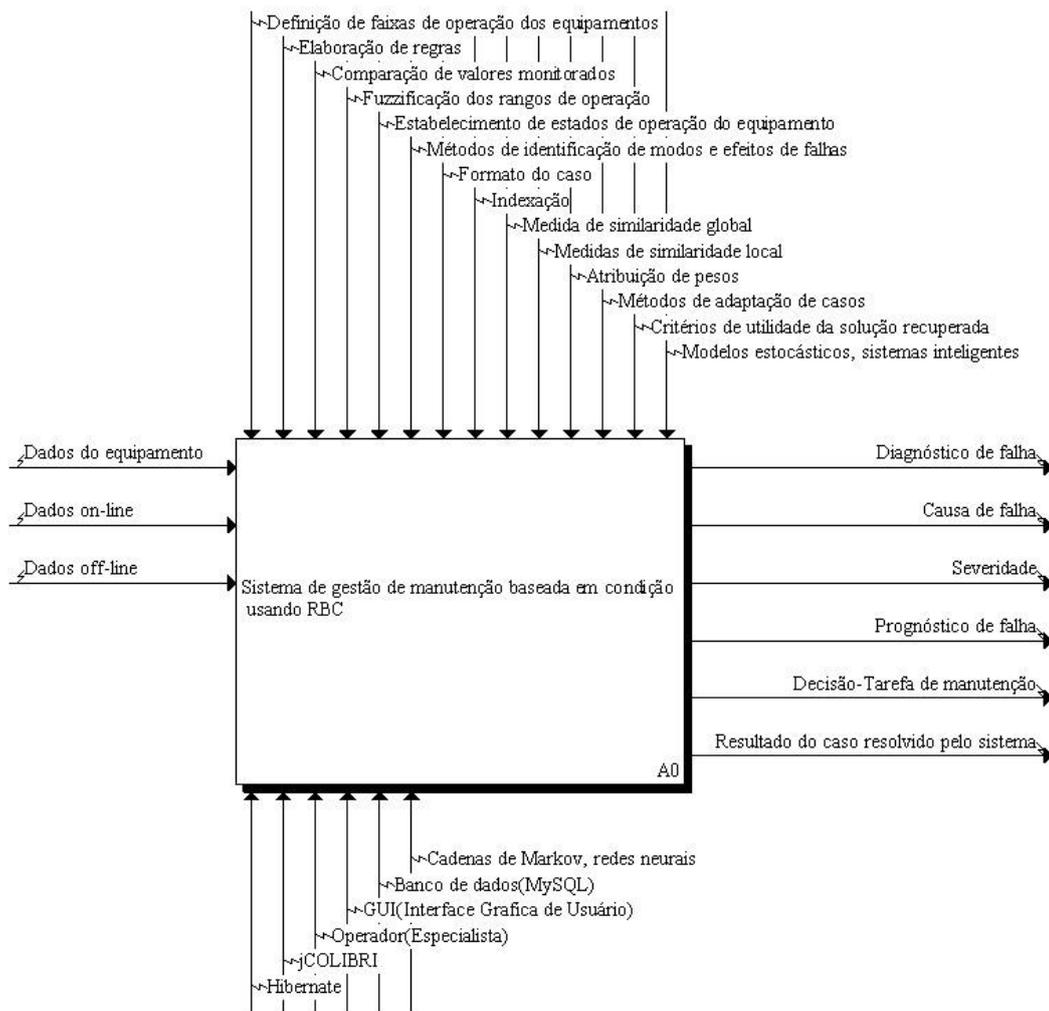


Figura 3. 7 – Modelo IDEF0: Diagrama A0 do sistema de gestão de MBC

3.3.1 – Entradas do sistema

Como entradas do sistema são definidos 3 tipos de entrada: a informação dos equipamentos, os dados *on-line* de planta e as informações *off-line* da mesma. Os dados *on-line* da planta podem ser capturados via servidores OPC, ou banco de dados, a partir da instrumentação instalada na planta ou processo e, é talvez, a informação mais importante

na MBC, já que estes dados podem ser processados para estabelecer a condição de estado do equipamento e decidir se este precisa ser intervindo, ou, se alguma anormalidade deve ser corrigida.

Como informações *off-line*, definem-se aqueles dados que são capturados do equipamento ou processo, mas que não são tomados diretamente da informação *on-line* de planta. Senão, através de outro tipo de procedimentos próprios da MBC, como registros de mostras de material, análises de vibrações, análises de óleos, análises estrutural, análises de dissipação de energias, entre outros, que também podem ser processados para realizar as respectivas comparações entre outros casos e construir análises ou respostas a partir delas.

3.3.2 – Saídas do sistema

As saídas do sistema estão relacionadas com as informações próprias da MBC, como diagnóstico de falha ante um eventual funcionamento errado, a causa da falha, a severidade no qual está classificada a falha, os efeitos da falha se está evolui, um prognóstico de falha, a decisão ou tarefa de manutenção e o resultado da aplicação da solução recomendada pelo sistema.

3.3.3 – Controles

Como controles estão os paradigmas típicos do processo RBC como medidas de similaridade (global e local), os métodos de adaptação de casos, o processo de indexação e a definição do formato de caso de MBC. Para o caso da gestão da MBC aspectos como a definição dos estados de operação dos equipamentos, a elaboração de regras, a fuzzificação dos rangos de operação e os métodos de análise de modos e efeitos de falhas permitem o tratamento da informação de entrada.

3.3.4 – Mecanismos

Por último, os mecanismos que permitem a execução do sistema de MBC são os mesmos planejados para construção do sistema de manutenção corretiva (jCOLIBRI, MySQL, etc.).

Para o módulo de prognóstico de falhas é possível aplicar as abordagens estocásticas como cadeias de Markov, ou abordagens baseadas em sistemas inteligentes, como as redes neurais que permitem as sugestões dos prognósticos de falhas. Nos trabalhos de Amaya (2008) e Souza (2008), se mostram exemplos de aplicação destas abordagens para elaboração de prognósticos.

No diagrama A1 da Figura 3.8 se apresentam, com mais detalhes, as distintas atividades ou funções deste módulo geral. Neste diagrama se identificam 6 atividades principais: gestão da MBC, monitoração de condição, a execução do ciclo RBC, adição de prognósticos de falha, a avaliação do caso resolvido e a apresentação de resultados.

A seguir se descrevem, rapidamente, as funções a cumprir por cada uma destas atividades principais.

- ✓ Gestão da manutenção baseada em condição. Na gestão de MBC é obtida a base de casos a partir da análise da informação *on-line* – *off-line*, da instrumentação instalada em planta. Na seção 3.3.5 é analisada a abordagem do sistema de manutenção corretiva.
- ✓ Monitoração de casos. Esta atividade permite a detecção de sintomas e definição dos estados de operação dos equipamentos a partir da informação, *on-line* e *off-line*, que ingressa ao sistema. Esta atividade pode ser executada a partir da definição de regras, ou sistemas especialistas, que permitam a comparação das grandezas monitoradas com os valores estabelecidos na gestão da MBC.
- ✓ Execução do ciclo RBC. Neste modulo se dá a execução do ciclo RBC descrito em detalhes na seção 3.4, cuja função é elaborar uma resposta ao caso atual detectado pelo sistema a partir da monitoração de condição.
- ✓ Adicionar prognósticos de falhas. Esta atividade é característica da MBC e consiste em calcular a partir de diversas informações sobre o equipamento, o tempo médio entre falhas e, de quanto tempo se dispõe para realizar ou aplicar uma determinada ação corretiva.

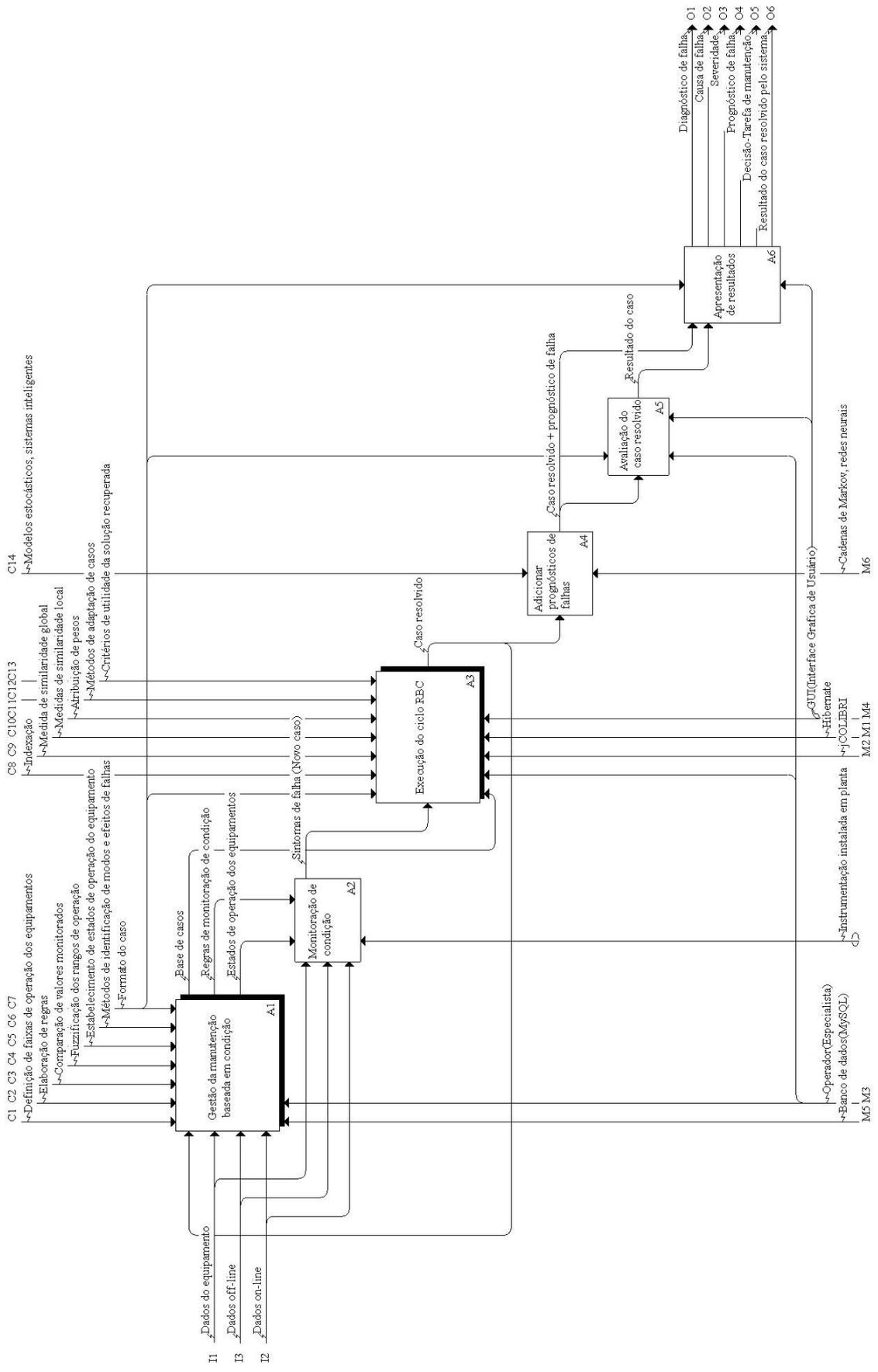


Figura 3. 8 – Modelo IDEF0: Diagrama filho da função A0

- ✓ Avaliação do caso resolvido. Esta função permite avaliar a resposta dada pelo sistema. Possibilita verificar se a decisão sugerida pelo protótipo e executada pelo operador, foi efetiva, além de identificar informações a ser corrigidas no caso e na situação identificada. Esta é uma etapa que pode levar tempo, pois é executada quando o procedimento já foi aplicado e se espera qual é o resultado da situação sugerida. Avaliar se o diagnóstico foi o correto, se a tarefa de manutenção foi efetiva, se a causa é verdadeira, entre outras informações, é a função que cumpre esta atividade.

- ✓ Apresentação de resultados. Neste módulo são apresentados ao usuário mediante típicas aplicações gráficas de Java como *frames*, *applets* os principais resultados de todo o processamento do sistema. Especificamente, são mostrados os atributos do caso: a informação do equipamento que apresenta a falha, os sintomas da falha detectados pelo sistema, a decisão sugerida pelo sistema e o resultado da aplicação da solução sugerida pelo protótipo em campo, também, os dados que informam sobre as causas, os efeitos da falha e a severidade da mesma, assim como as informações que resultam da aplicação de cada uma das etapas quando se aplica o ciclo 4R.

Destes módulos apresentados as funções de “Gestão da manutenção baseada em condição” e a “Execução do ciclo RBC” são desenvolvidas com maior detalhe. Na seção 3.3.5 é apresentado o módulo de “Gestão da manutenção baseada em condição” e na seção 3.4 é apresentado o módulo de “Execução do ciclo RBC”.

3.3.5 – Gestão da manutenção baseada em condição

A prática da MBC envolve três fases: detecção do defeito, estabelecimento de um diagnóstico e o estabelecimento de um prognóstico. Um esquema de MBC é mostrado na Figura 3.9.

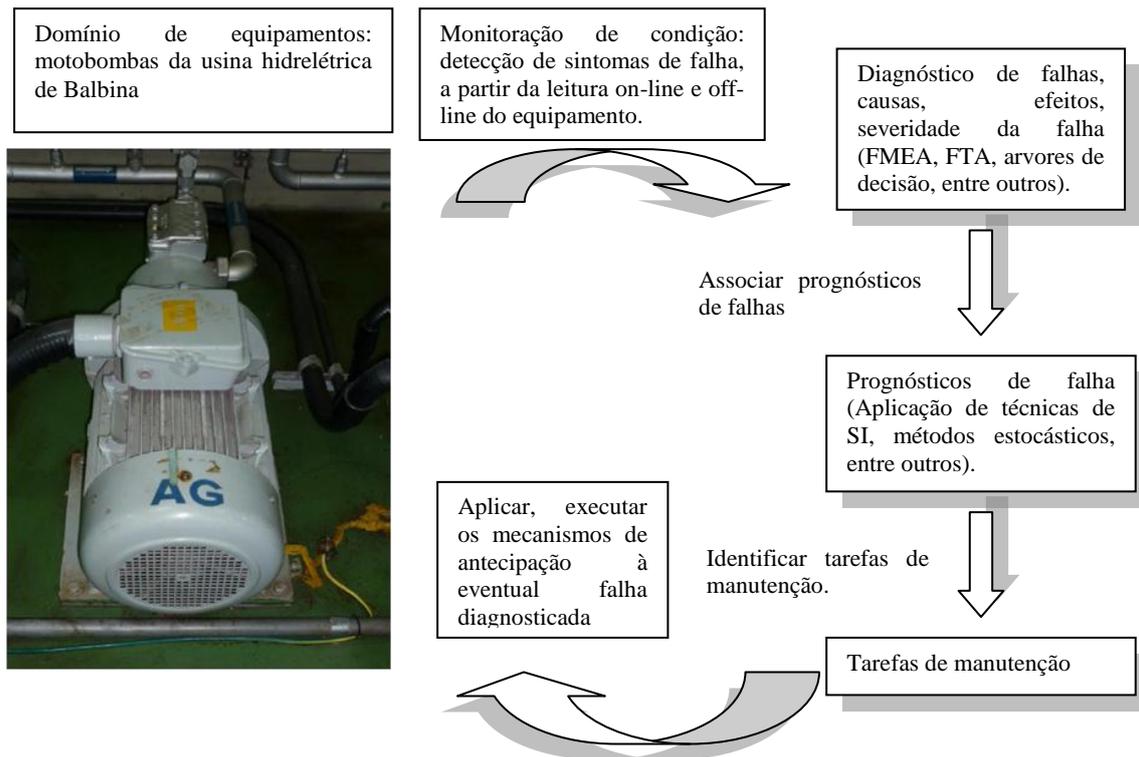


Figura 3. 9 - Exemplo de gestão de MBC

Na gestão da MBC é analisada a informação que permite monitorar a atual condição do equipamento. A análise da informação viabiliza a definição de estados de operação dos equipamentos a partir das faixas de operação normais do mesmo, definindo estados de funcionamento do sistema. Como uma etapa posterior, pode-se definir conjuntos *fuzzy* para aprofundá-lo na definição destes estados. Cada caso definido contém informações sobre diversos estados identificadas no equipamento no qual um diagnóstico foi estabelecido, assim como uma causa, um efeito e/ou uma severidade da mesma.

A aplicação de metodologias para a identificação de modos de efeitos e falhas potenciais como a FMEA ou FTA, permite elaborar os diagnósticos e identificar as causas, efeitos e severidades das potenciais falhas, assim como na identificação das tarefas de manutenção e experiência e conhecimento do especialista. À saída desta atividade se obtém um conjunto de regras e estados do equipamento, que vão permitir a monitoração de condição do equipamento assim como a base de casos do sistema com os casos que tem a informação típica do enfoque da MBC.

A gestão da MBC proposto neste trabalho tem 7 atividades, tal como se mostra na Figura 3.10: determinação de modos de falhas; classificação dos modos de operação do equipamento; estabelecimento de diagnósticos; identificação da tarefa de manutenção; representação de casos e; construção e atualização da base de casos. A seguir os detalhes mais importantes destes módulos.

- ✓ Determinação de modos de falhas. Aqui são definidas as faixas de operação dos equipamentos. É elaborado um conjunto de regras e definidos distintos estados de operação dos equipamentos. Tem como função definir quais são os sintomas ou os modos de operação anormais quando alguma informação esta errada, comparando esta informação com dados predefinidos. Esta informação é elaborada a partir dos dados, *on-line* e *off-line*, do equipamento.
- ✓ Classificação dos estados de operação do equipamento. Estes estados são definidos a partir das faixas de operação dos equipamentos. Processos de fuzzificação que permitam definir melhor os rangos de operação podem ser definidos. Segundo a etapa anterior, se uma situação anormal é registrada, os sintomas do problema são identificados e o estado do equipamento pode ser estabelecido à saída desta atividade.
- ✓ Estabelecimento do diagnóstico. Depois de definido o estado do equipamento na etapa anterior, um diagnóstico do evento anormal pode ser estabelecido. Este diagnóstico pode ser determinado com ajuda da metodologia de identificação de modos e efeitos de falha (FMEA) aplicada ao equipamento em questão. Também: a severidade, a causa e os efeitos da mesma podem ser identificados.
- ✓ Identificação da tarefa de manutenção. Nesta atividade e também com ajuda da metodologia FMEA e a experiência do especialista as respectivas ações de manutenção são definidas, associando a cada falha diagnosticada uma tarefa a ser executada.

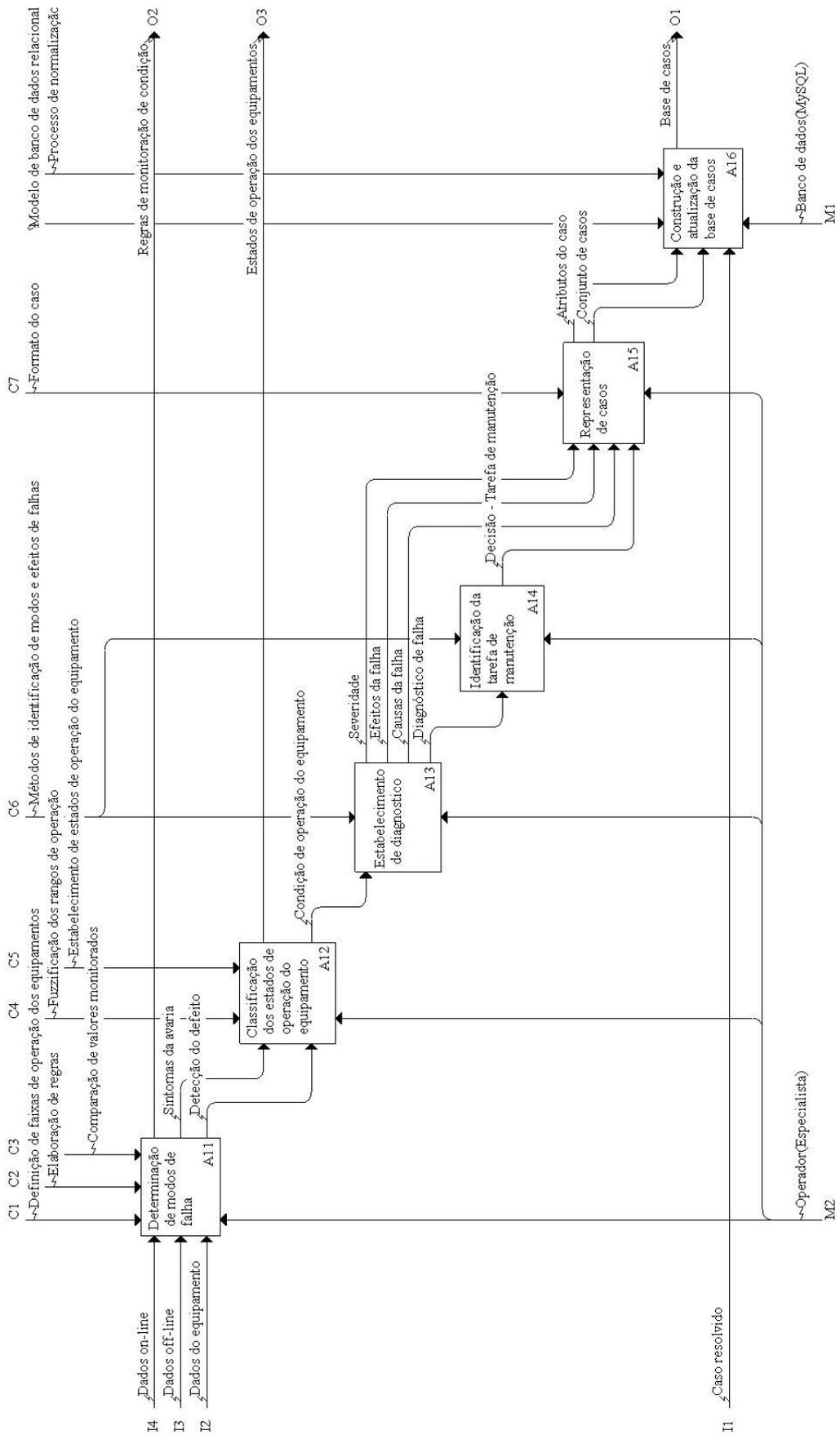


Figura 3. 10 – Modelo IDEF0: Diagrama filho da função A1

A representação de casos e a construção do modelo relacional da base de casos são analisadas nas seguintes subseções.

3.3.5.1 – Representação de casos

As informações anteriores, produto das etapas supracitadas, se representam em um formato de caso mostrado no Quadro 3.2 de acordo com a estrutura do caso definido na seção 3.1.2.1.

Quadro 3. 2 - Formato de caso para gestão da MBC

Caso: código único de caso		Data de ocorrência: data do acontecimento
Descrição do equipamento	Neste campo se especificam os atributos típicos para a descrição do equipamento: unidade geradora, sistema, subsistema, fabricante, provedor, manutenção preventiva entre outras informações que permitem uma descrição detalhada do equipamento.	
Descrição do problema	Sintomas da falha	Neste campo são especificados os sintomas da avaria assim como o estado do equipamento definido na monitoração de condição.
	Falha típica	Neste campo é especificada a falha identificada. A partir do padrão de falhas determinado, classificam-se cada uma das falhas apresentadas, segundo seu nível de ocorrência
	Efeitos	O que aconteceria se a falha apresenta-se.
Descrição da solução	Causas	As causas da falha.
	Diagnóstico	Identificação da falha
	Decisão	É a ação de manutenção ou alguma sugestão corretiva para solucionar a falha apresentada.
Resultados	O especialista avalia se a informação contida no caso corresponde com a realidade da falha. Se o diagnóstico foi correto, se as causas são realmente certas e se a ação corretiva foi efetiva ou não.	

A estrutura do caso é definida de acordo ao enfoque de manutenção adotado neste caso a MBC, integrando as informações das etapas anteriores.

3.4 - EXECUÇÃO DO PROCESSO RBC

No módulo chamado “Execução do algoritmo RBC” das Figuras 3.2 e 3.8, representa-se a execução do ciclo RBC, tanto para o enfoque da manutenção corretiva como para a baseada em condição. O processo 4R é executado da mesma forma nos dois enfoques, o que muda são as entradas, o formato do caso e a modelagem da base de casos. Portanto,

nesta seção se analisará a realização desta função aplicada nas duas abordagens de manutenção. Na Figura 3.11 se mostra o modelo IDEF0 do modulo RBC.

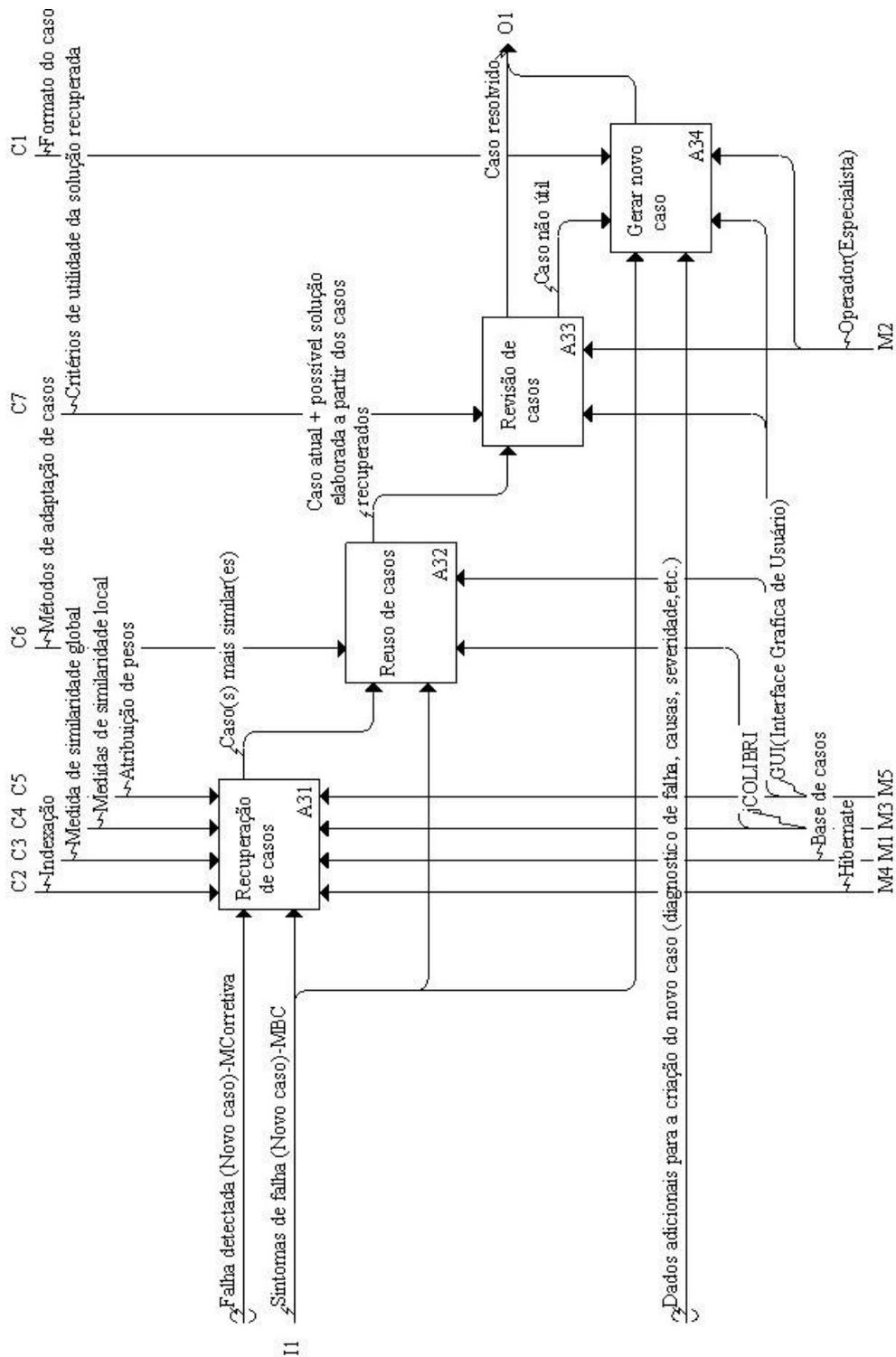


Figura 3. 11 – Modelo IDEF0: Execução do ciclo RBC para MC e MBC

O caso de entrada ao sistema pode ser detectado pelo sistema de duas formas que dependem do enfoque de manutenção: de forma manual, o qual é ingressado pelo usuário, e, é tipicamente usado na manutenção corretiva ou de forma automática na manutenção baseada em condição quando, a partir da monitoração de condição, se detecta uma condição anormal no sistema ou equipamento.

No caso da consulta definida pelo usuário sobre algum evento anormal na manutenção corretiva a entrada para o módulo são os índices definidos no processo de indexação. A saída deste módulo é a solução elaborada a partir dos casos mais similares em relação ao caso que ingressa ao sistema.

No caso da manutenção baseada em condição, depois da monitoração de condição e da análise dos parâmetros, *on-line* e *off-line*, um novo caso é detectado automaticamente. Por exemplo, quando uma determinada regra se cumpre, ou quando um parâmetro monitorado está por fora do rango ou da faixa definida como operação normal. Então o modulo RBC se executa e um caso similar, segundo as condições e parâmetros de entrada, é procurado na base de casos para a elaboração da resposta.

Os controles são, tipicamente, todos os detalhes relacionados com o algoritmo RBC: medidas de similaridade, indexação, métodos de adaptação, etc. As ferramentas das quais será possível a execução do algoritmo são: o *framework* jCOLIBRI, o banco de dados MySQL, a ferramenta Hibernate, as GUI e a base de casos do sistema.

O funcionamento e processamento do algoritmo RBC é, basicamente, a execução de seus 4 etapas (recuperação, reuso, revisão e retenção de casos). A ferramenta jCOLIBRI, discutida na seção 2.7, implementa todos os aspectos e detalhes básicos dos sistemas RBC. Por isso, jCOLIBRI é o principal mecanismo para a execução da função do sistema, conforme é mostrado na Figura 3.11.

A seguir são apresentadas as principais atividades da função da execução do algoritmo RBC.

1. *Recuperação*. Uma vez que o novo caso é ingressado pelo usuário (MC) ou detectado pelo processo de monitoração de condição (MBC) se iniciará o processo de

recuperação. O processo de recuperação de casos se dá, a partir da aplicação de medidas de similaridade (locais e globais), para estabelecer uma medida de semelhança entre um caso da base de casos e o caso atual. Um adequado valor de pesos definidos para os atributos deve ser estabelecido para o cálculo destas medidas. Finalmente, depois do processo de recuperação é (são) recuperado (s) os casos com um valor de similaridade maior.

2. *Reuso*. Quando o conjunto de casos mais similares é recuperado se continua com o processo de reuso ou adaptação da solução dos casos recuperados ao caso atual. jCOLIBRI fornece algumas funções e classes para a adaptação de casos: a substituição de certos parâmetros da consulta atual, a adaptação da consulta à solução do caso recuperado, entre outras.
3. *Revisão*. A revisão de casos é feita pelo especialista. Ele determinará se o caso atual resolvido é útil ou não. Se na avaliação o especialista considera que a solução proposta pelo sistema para o caso atual é apropriada, ou satisfaz os requerimentos da consulta, o caso resolvido será retido na base de casos. Se o especialista considera que o caso não é útil, ou se a solução não satisfaz os requerimentos da consulta, será criado um novo caso a partir desta informação e por meio de novos dados, possivelmente, fornecidos pelo especialista e da análise da situação não resolvida em questão.
4. *Retenção*. A retenção de casos consiste em guardar na base de casos a situação resolvida, ou a situação nova, criada e complementada com a informação do especialista. Este processo, da retenção de casos, permite atualizar a base de casos e aumentar a alicerce base de conhecimento do sistema. Esta etapa de retenção pode ser observada melhor nos diagramas 3.2 e 3.8 - com o atributo “Caso resolvido” - que sai do módulo RBC e vai como entrada ao módulo de gestão de manutenção permitindo a retroalimentação do sistema.

Com a execução destas etapas, através principalmente de jCOLIBRI, o algoritmo RBC é implementado e a resposta ao caso atual pode ser apresentada através de uma OS, que mostre a tarefa recomendada, assim como os dados fundamentais de acordo ao enfoque de manutenção adotado. As ferramentas de aplicações gráficas fornecidas pelo Java como *applets*, *frames*, *dialogs*, etc., serão fundamentais para apresentação das informações fornecidas pelo sistema, assim como as distintas informações na execução das etapas do ciclo RBC.

4 – ESTUDO DE CASO: IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA DE GESTÃO DE MANUTENÇÃO CORRETIVA APLICADO ÀS MOTOBOMBAS DA USINA HIDRELÉTRICA DE BALBINA

Neste capítulo é apresentado, como estudo de caso, a construção de um sistema de gestão de MC (Manutenção Corretiva) usando o enfoque RBC aplicado à usina hidrelétrica de Balbina, segundo a modelagem IDEF0 definida na metodologia proposta. O objetivo deste capítulo é descrever em detalhe, o desenvolvimento de um sistema de MC que, em primeira instância, está focalizado em fazer uso da informação histórica da usina de Balbina, especificamente, as ordens de serviço para a construção dos casos.

A base de casos foi construída com a ferramenta MySQL depois de um modelamento relacional de banco de dados. A inferência do ciclo RBC é executada a partir do software jCOLIBRI. Devido a sua arquitetura de *framework* caixa preta e uma bem definida caixa branca, (explicado na seção 2.4), é permitido o acesso e a modificação do código fonte da ferramenta para adaptá-lo à aplicação atual, segundo os requisitos. As interfaces gráficas de usuário e o sistema em geral foram construídos na plataforma Java. Fazendo uso da tecnologia *Java Web Start*, a aplicação desenvolvida nesta dissertação, esta disponibilizada no seguinte endereço: <http://164.41.17.25/RBCBalbina/ModuloRBCBalbina.jnlp>

4.1 - APRESENTAÇÃO DO CENÁRIO: USINA HIDRELÉTRICA DE BALBINA

A UHE (usina hidrelétrica) de Balbina está localizada no estado do Amazonas, a 180 km da cidade de Manaus, no rio Uatumã, um dos afluentes do rio Amazonas. A UHE de Balbina opera com 5 conjuntos Turbina-Gerador, acoplados mediante um eixo vertical, que geram 50MW cada um, para um total de 250MW de energia elétrica produzida pela instalação elétrica. As turbinas hidráulicas são de tipo Kaplan, de eixo vertical, com pás em formato de hélice de avião. Os geradores são de tipo Umbrella de baixa rotação com capacidade nominal de 55,5MVA e tensão nominal de 13,8 kV, numerados de 1 a 5 (Figura 4.1).



Figura 4. 1 - Unidades Geradoras Hidráulicas de Balbina

A geração da energia elétrica da UHE de Balbina depende da carga solicitada em Manaus. Essa necessidade define quantos conjuntos de turbinas irão funcionar por vez. E, também, a velocidade de rotação do conjunto Turbina-Gerador depende da carga solicitada.

A UHE de Balbina, como uma instalação típica para a geração de energia elétrica, tem instalações próprias destes tipos de construções: barragem, sistemas de captação e adução de água, casa de força e sistemas de restituição de água ao rio. O curso natural do rio Uatumã é interrompido pela barragem que provoca um lago artificial chamado reservatório.

A água represada no reservatório é captada e conduzida até a casa de força, onde a par Turbina – Gerador gira, conjuntamente, quando a água entra e passa pela turbina hidráulica. Neste processo, o potencial hidráulico é convertido em potencial mecânico e este, convertido em potencial elétrico por meio do gerador, permitindo o aproveitamento da energia potencial dos rios para a geração da energia elétrica. A energia elétrica obtida depois é enviada por meio do sistema de transmissão ao sistema interligado e a água é restituída ao leito natural do rio.

Em Balbina, as UGH (unidades geradoras hidráulicas) têm estrutura e construções similares. Portanto, os equipamentos e sistemas presentes nas 5 UGH são semelhantes. A

UHE de Balbina possui instrumentação da SMAR⁵ que supervisiona distintos processos e equipamentos nas UGHs. Na revisão bibliográfica foi mencionado o sistema SIMPREBAL. Ele aproveita a informação da instrumentação SMAR e a tecnologia OPC (*OLE for Process Control*) para estabelecer a monitoração de condição e avaliação de saúde dos equipamentos, segundo o padrão OSA-CBM.

Uma usina hidrelétrica é uma instalação muito complexa, devido à grande presença de equipamentos, sistemas e processos que ocorrem dentro dela. Esta complexidade latente em quanto à presença de equipamentos, funcionalidade da usina, necessidade de organização da informação e identificação de falhas, levou-a a ser considerada a etapa número um do sistema de gestão de MC (seção 3.2.5), ou seja, propôs uma classificação dos equipamentos por tipos ou famílias para simplificar a compreensão do sistema e facilitar a organização da informação do domínio de estudo em questão.

4.1.1 - Identificação e classificação da maquinaria na UHE de Balbina

Dentro da casa de força, e fazendo parte do conjunto Turbina-Gerador, se encontram muitos componentes e sistemas: máquinas hidráulicas, máquinas pneumáticas, sistemas de lubrificação e resfriamento, sistemas de mancais, reguladores de tensão, linhas de transmissão de energia elétrica, motobombas, fluídos para acionamento e lubrificação como óleo, ar e água, entre muitos outros sistemas e elementos que fazem parte do complexo arquitetônico e que interatuam entre si, e são necessários e vitais para a normal operação da planta.

Nas unidades geradoras é possível identificar equipamentos mecânicos (motobombas, compressores, mancais, sistemas de frenagem, tubulações, etc.), equipamentos elétricos (transformadores, disjuntores, subestações, painéis de controle, etc.), equipamentos eletrônicos (sistemas embebidos, processadores, controladores, controladores lógicos programáveis, etc.), equipamentos de controle e proteção (reles, contadores), entre outros.

Algumas destas famílias identificadas se mostram na Figura 4.2.

⁵ <http://www.smar.com/en/>

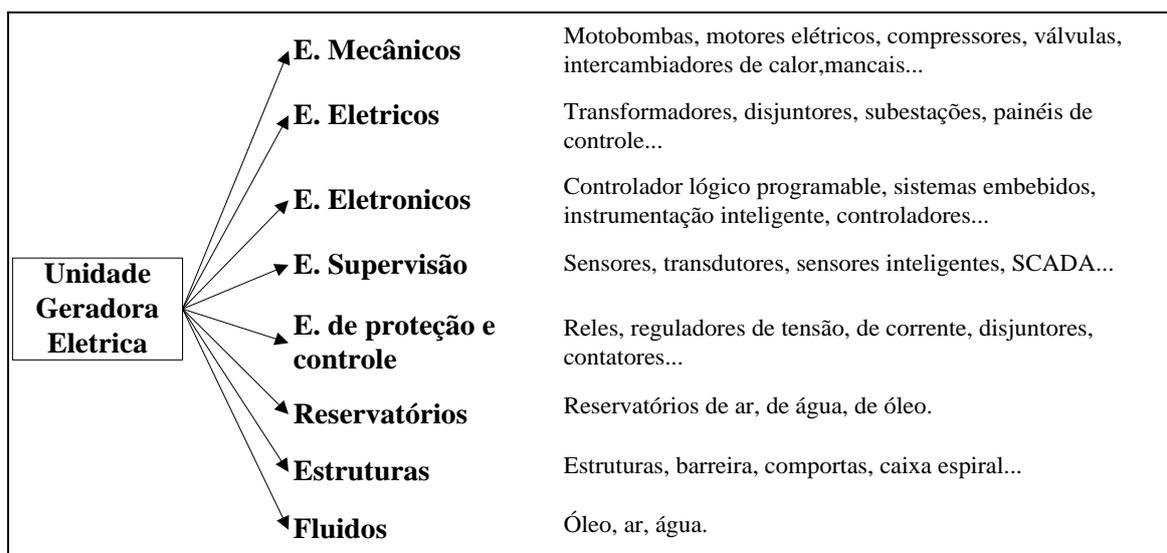


Figura 4. 2 - Equipamentos típicos numa unidade geradora hidráulica

Segundo a seção 3.2.5 da abordagem metodológica, os equipamentos devem ser organizados ou classificados por famílias ou tipos. Portanto, segundo este tópico, classes de máquinas como, “motobombas”, “transformadores”, “motores”, “painéis de controle” etc., são identificadas.

Dado que, em uma usina hidrelétrica, são muitos os equipamentos presentes que pertencem a diferentes tipos, opta-se por escolher um caso de estudo para a construção do sistema. As demais etapas descritas na metodologia são, também, aplicáveis a qualquer tipo de equipamento. Neste caso, só será aplicada a metodologia a um tipo de equipamento que permita demonstrar a validade da metodologia proposta. A aplicação da metodologia proposta é indiferente do tipo de equipamento escolhido, e pode depender mais bem da quantidade de dados que este disponha para a construção dos casos. Deste modo, a metodologia alvitre no capítulo anterior, a partir deste tópico, será aplicada ao caso de estudo definido na seção a seguir.

4.1.1.1- Definição do caso de estudo: motobombas da UHE de Balbina

As motobombas (MB) nas unidades geradoras hidráulicas são fundamentais na circulação de fluidos como o óleo e a água. A circulação ou injeção destes fluidos têm como objetivos, em alguns casos, o recalque dos fluidos nos reservatórios de água ou óleo, a

circulação de óleo nos sistemas de refrigeração e lubrificação, a circulação da água nos poços da usina, entre outras funções principais. As MB presentes nos distintos sistemas da UHE de Balbina são de diferentes características dependendo do tipo de fluido a circular e o objetivo do sistema onde estão instaladas. Em todos os sistemas onde operam as MB, sempre se encontram instaladas um par destas: uma é a MB normal de operação e a outra fica como reserva e entrará a atuação no momento em que a MB operante apresentar problemas.

As motobombas presentes em uma unidade geradora em Balbina estão listadas na Figura 4.3 e são apresentadas no Anexo B desta dissertação. Dado que a estrutura e organização dos equipamentos em uma UGH se repetem nas outras UGH, o mesmo tipo de MB, com o mesmo nome e pertencentes aos mesmos sistemas, aparece nas restantes unidades geradoras.

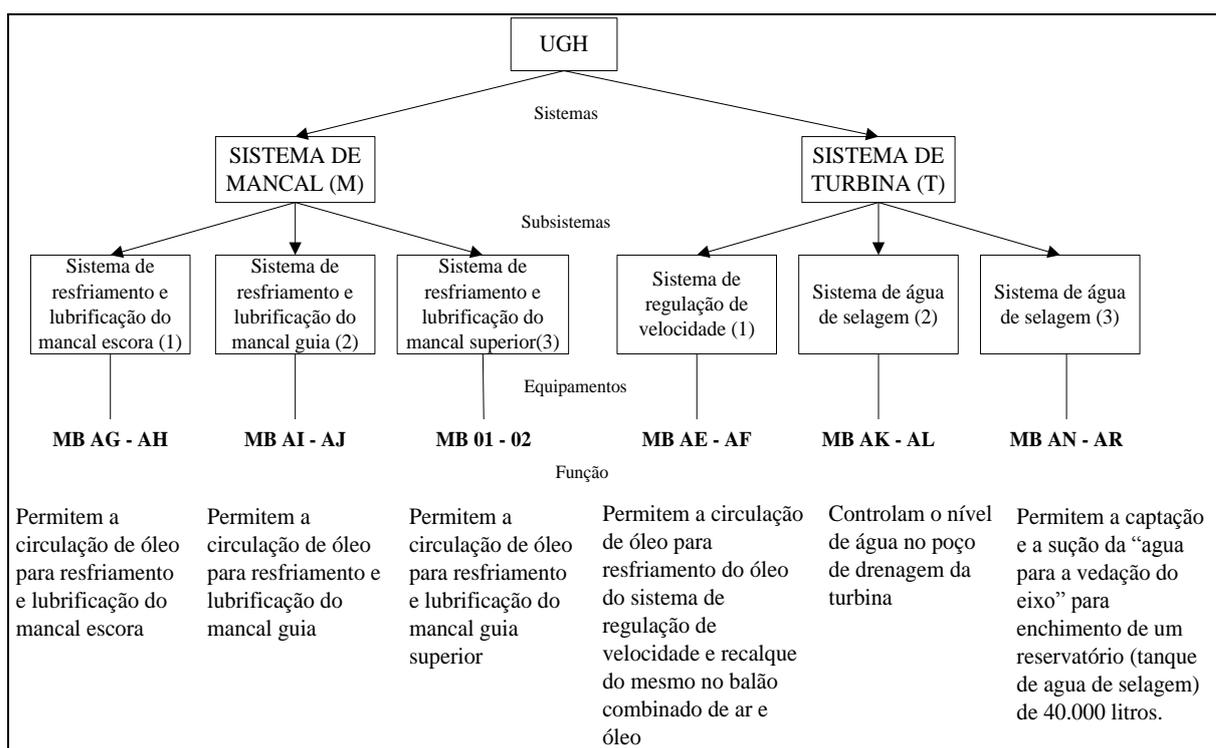


Figura 4. 3 - Identificação das motobombas em uma UGH de Balbina

As motobombas da UHE de Balbina dispõem de instrumentação SMAR instalada especialmente à saída destas. Transmissores de pressão que monitoram a pressão de saída

do fluido que está sendo bombeado estão instalados nas MB. A partir desta informação é possível realizar a monitoração de condição que permitira a gestão da MBC.

4.2 – IDENTIFICAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE EVENTOS ANORMAIS NAS MOTOBOMBAS DA UHE DE BALBINA

Como foi proposta na modelagem IDEF0 da gestão da MC (seção 3.2.5), uma vez reunidas informações dos equipamentos por famílias, começa o processo de identificação das falhas mais comuns, de acordo com o tipo de equipamento. Dado que um caso contextualiza uma experiência passada, só serão levadas em conta para a elaboração dos casos as situações prévias que ocorreram nos equipamentos referentes a falhas e ações executadas para a correção e eliminação das mesmas. As OS da UHE de Balbina relacionadas com as motobombas são a principal fonte de informação para a construção dos casos. Esta informação é organizada e complementada com as sugestões e experiência do especialista. Como referência para a identificação das falhas será empregada a metodologia FMEA, abordada a seguir.

4.2.1 - Abordagem FMEA para as motobombas na usina hidrelétrica de Balbina

O levantamento das tabelas FMEA se baseia, principalmente, na identificação dos modos funcionais de falha. Estes podem ser determinados a partir da informação da instrumentação instalada nos equipamentos. Uma aplicação de FMEA em turbinas hidráulicas é analisado em Álvares *et al.* (2007c).

Um exemplo de aplicação da metodologia FMEA aplicado ao tipo de equipamentos motobombas se mostra no Quadro 4.1, e está baseado na identificação dos modos de falha, de acordo o valor do parâmetro monitorado à saída do equipamento.

4.2.2 - Análise das ordens de serviço da UHE de Balbina (anos 2004 a 2009)

As ordens de serviço são as atividades de manutenção registradas, pelo pessoal da usina hidrelétrica, em documentos que, por sua vez, detalham o evento anormal que está acontecendo e a respectiva ação (decisão) executada pelo operador - como o tipo de OS, a data de início, a data final e a hora de início e término de atenção do problema.

Quadro 4. 1 - Análise FMEA para as motobombas da usina de Balbina

Componente	Modo potencial de falha	Efeito potencial de falha	Causa potencial de falha
Motobombas	Baixa pressão do fluido à saída das MBs	- Desliga a bomba prioritária e liga a bomba reserva na pressão baixa. -Distúrbio no funcionamento normal do sistema (falha na lubrificação e resfriamento)	Vazamento de óleo pelo selo mecânico
			Danificação do acoplamento
			Corrosão por óleo contaminado ou de má qualidade
	Cavitação por presença de ar no óleo		
	Alta pressão do fluido à saída das MBs	- Desliga a bomba prioritária e liga a bomba reserva na pressão alta. - Risco de quebra da motobomba - Risco de rompimento das vedações e conexões da tubulação, ocasionando vazamentos. - Distúrbio no funcionamento normal do sistema (falha no resfriamento)	Ajuste incorreto das MB
	Ruído anormal	- Risco de quebra da motobomba	Desgaste dos rolamentos Má lubrificação dos rolamentos

Uma ordem de serviço da usina hidrelétrica de Balbina tem o formato mostrado no Quadro 4.2.

Quadro 4. 2 - Formato de ordem de serviço da usina hidrelétrica de Balbina

Ordem	Decisão	Número	Tipo	Data início	Hora início	Data final	Hora final
-------	---------	--------	------	-------------	-------------	------------	------------

Onde,

Ordem: é a situação anormal que o dispositivo esta apresentando, o qual requer de uma ação para ser executada; **Decisão:** é a ação que foi executada pelo operador para dar solução à situação anormal apresentada pelo dispositivo; **Número:** é o código da OS; **Data e hora iniciais:** é a data e hora que inicio a execução da ação corretiva; **Data e hora final:** é a data e hora final da ação corretiva.

O campo **Tipo** do formato de OS definido na Tabela 4.2 faz referência a três tipos de OS: O – ordinária, E - extraordinário e D - desligamento imediato. O tipo de OS, O, faz referência a se a ação a executar por parte do pessoal responsável sobre o equipamento implica uma ação comum (ordinária) que não implica grandes riscos sobre o equipamento; uma ação extraordinária (E) são aquelas situações que implicam um desligamento do

equipamento ou uma reação imediata; a OS mais grave é o “desligamento imediato”. Neste, o equipamento deve ser parado e uma ação determinada deve ser executada imediatamente.

Em cada ano é registrado em arquivos Excel (Figura 4.4) as ordens de serviço da usina hidrelétrica de Balbina. Isso constitui uma fonte essencial de informação histórica para a construção dos casos.

	B	C	D	E	F	G	H	I
	Ordem	Decisao	nro	tipo	data inicio	hora inicio	data termino	hora termino
1								
2	Normalizar nível de óleo do tanque sem pressão do regulador de	foi colocado 200 litros de óleo TR-86 completando o nível do tanque	30025857	O	5/1/2009	14:05:00	5/1/2009	16:20:00
3	efetuar limpeza no anel coletor	feito limpeza do anel coletor e porta escovas com quantidade consid	30025886	D	7/1/2009	05:35:00	7/1/2009	09:09:00
4	efetuar inspeção e limpeza na plataforma do mancal combinado	Foi efetuado inspeção no MC e nas bandejas dos radiadores , onde	30025946	D	7/1/2009	08:00:00	7/1/2009	09:00:00
5	Verificar vazamento de óleo pelos filtros das MBs AG/AH	verificado o vazamento de óleo pelos filtros das MBs AG/AH sendo s	30025933	O	7/1/2009	08:15:00	7/1/2009	09:05:00
6		Foi normalizado a campainha e a buzina de a buzina do QLC-01. ficou	30026485	O			16/1/2009	11:10:00
7	Realizar medição de descargas parciais no enrolamento do esta	Realizado os testes com tensão 13,8 kV, reativo -1 MVAR e ativa 46	30026691	E	26/1/2009	11:05:00	26/1/2009	18:20:00
8	Adequação do relé 2TRP (supervisão de tensão 220)	substituído o relé ficando normal	30026787	O	27/1/2009	15:44:00	27/1/2009	15:48:00
9	verificar nível de óleo na cuba do MGS	completado o nível de óleo na cuba do MGS com 15 litros TR-86	30027227	O	23/2/2009	10:00:00	23/2/2009	12:17:00
10	efetuar limpeza no anel coletor	efetuada a limpeza no anel coletor	30027231	O	24/2/2009	06:01:00	24/2/2009	07:43:00
11	completar nível de óleo na cuba do mancal combinado	completado com 60 litros o nível de óleo na cuba do MC	30027232	O	24/2/2009	06:45:00	24/2/2009	07:40:00
12	completar nível de óleo do tanque sem pressão	foi completado com 200 litros o nível de óleo do tanque sem pressã	30027233	O	24/2/2009	08:30:00	24/2/2009	09:24:00
13	verificar vazamento no filtro auto limpante	vazamento detectado e sanado, junta de vedação danificada e troc	30027319	O	6/3/2009	08:32:00	10/3/2009	15:35:00
14	Realizar MNT preventiva nas MBs AI e AJ	Foi realizada a lubrificação, inspeção e limpeza das MBs AI e AJ, se	30027368	O	6/3/2009	14:31:00	6/3/2009	16:25:00
15	efetuar inspeção C2M no sistema de regulação de tensão	Foi executada inspeção bial e limpeza nos cubiculos do regulador	30027121	D	8/3/2009	08:31:00	8/3/2009	23:19:00
16	efetuar inspeção C2M nas proteções principais do gerador	foi efetuado os testes nas proteções 59G1 Ø A,B e V, 59G2 Ø A,B	30027387	D	8/3/2009	08:32:00	8/3/2009	23:05:00
17	verificar vazamento de óleo na MB AE	foi corrigido vazamento de óleo pela MB AE, com a substituição do	30027394	O	8/3/2009	08:36:00	8/3/2009	22:15:00
18	desativar painel da soft start das MBs AI e AJ	foi isolado eletricamente o painel da soft start e posteriormente desc	30027396	O	8/3/2009	08:37:00	9/3/2009	01:00:00
19	Verificar contadora XG1 que não está desenergizando no PRATE	retirado a contadora e substituída por uma contadora principal com ur	30025611	O	8/3/2009	09:07:00	8/3/2009	11:34:00
20	verificar contadora C1A vibrando no demarador da MB AI	Substituída a contadora C1A verificando que o problema de vibração	30025612	O	8/3/2009	09:10:00	8/3/2009	18:45:00
21	verificar contadora X2A2 no PRATE que não esta desenergizand	Instalado uma nova contadora, feito repeto em todas as conexões, r	30025613	O	8/3/2009	09:34:00	8/3/2009	18:50:00
22	Normalizar vazamento de óleo pelos filtros das MBs AG e AH d	Foi corrigido o vazamento na válvula de comutação do filtro duplex, r	30027403	O	8/3/2009	18:20:00	8/3/2009	22:10:00
23	Verificar contadora AR que não está energizando completamente	feito a substituição da contadora, a que foi retirada não tinha recuper	30025614	O	8/3/2009	18:30:00	8/3/2009	20:05:00
24	efetuar inspeção nos circuitos de alimentação de 125 Vcc	Foram abertos todos os circuitos de alimentação de 125 Vcc não se	30027392	O	8/3/2009	21:20:00	9/3/2009	00:50:00
25	efetuar inspeção C2M no sistema de abertura / fechamento do d	Substituído os bomes de ligação da caixa de interligação do distribu	30027393	O	8/3/2009	21:25:00	8/3/2009	22:00:00
26	retirada física do painel da soft start das MBs AI/AJ	foi efetuada a retirada do painel do local	30027409	O	9/3/2009	14:02:00	10/3/2009	13:52:00
27	Normalizar painel elétrico das motobombas de injeção	foi trocado dois fusíveis NH da MB AG e uma micro, o equipamento	30027429	O	9/3/2009	14:31:00	9/3/2009	16:00:00
28	retirar óleo acumulado sob os servos motores identificar vazam	realizado a limpeza, retirado óleo da area dos servo motores, sem an	30027435	O	10/3/2009	09:00:00	11/3/2009	14:50:00
29	Realizar substituição e melhorias no filtro hidrociclone	não foi possível concluir o serviço devido fatores exernos, será abert	30027591	O	16/3/2009	09:30:00	31/3/2009	08:28:00
30	Realizar MNT preventiva nas MB AG	efetuada a lubrificação dos rolamentos da MB AG e feito limpeza do	30027594	O	19/3/2009	08:45:00	19/3/2009	10:20:00
31	Realizar MNT preventiva nas MB AH	efetuada a lubrificação dos rolamentos da MB AH e feito limpeza do	30027595	O	19/3/2009	09:08:00	19/3/2009	10:20:00
32	completar nível de óleo do tanque sem pressão	adicionado 240 litros do óleo TR-86 no tanque sem pressão. Serviço	30028366	O	23/4/2009	09:22:00	23/4/2009	16:40:00

Figura 4. 4 – Arquivo de OS do ano 2009 pertencente à UHE de Balbina

A informação das OS é sumamente valiosa, ela constitui a principal fonte de dados para a criação dos casos. Nestes arquivos são registrados os procedimentos de manutenção e as situações que precisam ser resolvidas nos equipamentos no cotidiano da planta, portanto, resulta conveniente primeiro classificar ou selecionar a informação correspondente ao caso de estudo em questão.

As ordens de serviço dos anos 2004 a 2009 foram analisadas. Só foram selecionadas as OS relacionadas com as MB da UHE de Balbina encontrando um total de 148 ordens para as MB. Mas, depois de analisar esta informação, se encontra que nem todos estes dados são úteis ou proveitosos para a elaboração da base de conhecimento do sistema (livraria de casos).

Algumas das OS encontradas estão relacionadas com a instalação de equipamentos, troca de peças, instalação de novos componentes e procedimentos de manutenção preventiva a executar na maquinaria como: “substituir o pressostato da MB”; “montar estrutura para desmontagem da MB”; “instalar 3 MB de drenagem”; “normalizar suporte quebrado da MB”; “efetuar limpeza na MB”, entre outras.

Logo, esta informação deverá ser submetida a um novo processo de seleção, e, só serão escolhidas aquelas OS que informarem ou relatarem um tipo de falha, sintoma ou observação defeituosa encontrada no equipamento, que descreva a ação ou decisão tomada pelo operador para fazer frente à condição de falha.

Como exemplo de OS selecionados como validas na Tabela 4.1 se apresentam 14 OS do ano 2009. Na tabela é apresentada a ordem, a data de ocorrência do evento, o tipo de ordem e a unidade geradora na qual aconteceu o evento anormal.

Tabela 4. 1 - OS para as motobombas nas distintas unidades geradoras no ano 2009

Numero de OS	Data	UGH	Ordem
1	7/1/2009	1	Verificar vazamento de óleo pelos filtros das MBs AG/AH.
2	8/3/2009	1	Normalizar vazamento de óleo pelos filtros das MBs AG e AH do sistema de injeção de óleo no MGS.
3	8/3/2009	1	Verificar vazamento de óleo na MB AE.
4	16/11/2009	1	Verificar ruído anormal e vazamento excessivo de óleo na MB AJ.
5	12/12/2009	1	Trocar selo mecânico da MB AE que apresenta vazamento de óleo por selo mecânico novo. Efetuar testes de funcionamento, caso haja vazamento, voltar selo mecânico antigo.
6	8/5/2009	1	Verificar comutação automática da MB AJ para MB AI na partida da unidade.
7	9/5/2009	4	Verificar comutação automática da MB AJ para MB AI na partida.
8	4/12/2009	5	Verificar defeito na partida da MB 02 do MGS.
9	26/4/2009	1	Verificar MB AL que não está succionando
10	26/8/2009	2	Verificar anomalia no succionamento da MB AL da UGH-02
11	5/7/2009	3	Verificar MB AL que esta com problema de sucção
12	27/10/2009	5	Verificar ruído anormal na MB AK
13	29/10/2009	5	Verificar ruído anormal na MB AJ
14	9/3/2009	1	Normalizar painel elétrico das motobombas de injeção

Ao analisar as informações das ordens de serviço das MB e os outros equipamentos, encontra-se uma critica ao procedimento de manutenção implantado na usina hidrelétrica: o departamento de manutenção da usina não tem um planejamento ou identificação das

falhas que diariamente acontecem nos equipamentos e sistemas da usina hidrelétrica. Isto leva ao seguinte inconveniente: cada operador, ao registrar a ordem e a decisão a executar, emprega sua própria percepção e vocabulário para descrever os sintomas detectados, o qual gera falta de uniformidade na informação, falta de clareza nos procedimentos de manutenção e confusão ao tratar as falhas que acontecem. Um exemplo deste fato é mostrado na Tabela 4.2.

Tabela 4. 2 - Falhas padrão e diversas formas de expressão por parte dos operadores

Evento padrão: Ruído anormal nas motobombas	
Data	Ordem
25/3/2006	MB AL: Verificar <u>barulho anormal</u> na MB AL
24/1/2006	Verificar <u>ruído estranho</u> na MB AF
29/10/2009	Verificar <u>ruído anormal</u> na MB AJ
Evento padrão: Vazamentos (de água ou óleo) nas MB	
26/12/2009	Verificar MB AL que está com vazamento excessivo de água pela gaxeta a mesma <u>não está succionando</u> 100%
12/10/2009	<u>Sanar vazamento</u> pela válvula de entrada de óleo das MB's AI/AJ da UGH05
15/8/2009	<u>Remover vazamentos</u> de óleo dos conjuntos MB 1 e 2 do mancal guia do gerador.
18/7/2009	<u>Eliminar vazamento</u> de óleo pelo selo mecânico das MBs AI e AJ do sistema de lubrificação e refrigeração do MC
4/7/2009	<u>Corrigir vazamento</u> excessivo de óleo pelo pressotato da MB n° 02 MGS
8/3/2009	<u>Normalizar vazamento</u> de óleo pelos filtros das MBs AG e AH do sistema de injeção de óleo no MGS
Evento padrão: defeitos na partida automática da MB	
26/2/2008	<u>Normalizar MB n02</u> do MGS que não esta aceitando comando de partida.
28/2/2008	<u>Corrigir o defeito</u> do comando de partida da MB 02 do MGS.
6/4/2008	<u>Verificar defeito</u> na partida automática da MB AK quando esta como prioritária
Evento padrão: defeitos na sucção da MB	
27/10/2009	Verificar MB AK que <u>não está succionando</u>
30/7/2009	Verificar motobomba AL que esta com <u>problemas de sucção</u>
26/8/2009	<u>Verificar anomalia no succionamento</u> da MB AL da BAUGH-02
25/7/2007	<u>Normalizar sucção da MB</u> reserva ligada a MB AL.
1/8/2006	<u>Normalizar funcionamento</u> da MB-AK <u>que não succionando</u> .

A tabela revela a falta de clareza na identificação das falhas que acontecem nos equipamentos da usina hidrelétrica. Essa problemática pode ser revertida com o processo de reconhecimento, identificação e codificação das falhas mais recorrentes que acontecem nos equipamentos.

4.2.3 - Identificação de falhas padrão e associação das tarefas de manutenção nas MB a partir das ordens de serviço coletadas

Depois do processo de seleção da informação útil pode se estabelecer um padrão de falhas a partir dos eventos anormais mais recorrentes dos equipamentos. No caso de estudo escolhido para a validação da metodologia proposta neste trabalho (motobombas da usina hidrelétrica de Balbina) as falhas típicas que ocorrem com mais frequência, desde o ano 2004 até o ano 2009, são: vazamentos de óleo ou água (pelo selo mecânico, válvulas, pressotatos, filtros), problemas na sucção do fluido a circular, problemas elétricos das MB (problemas na partida e comutação automática das MB, defeitos nas contadoras) e ruído anormal.

Na Figura 4.5, mostram-se as falhas típicas e o número de eventos sucedidos desde o ano 2004 até o ano 2009 nas MB.

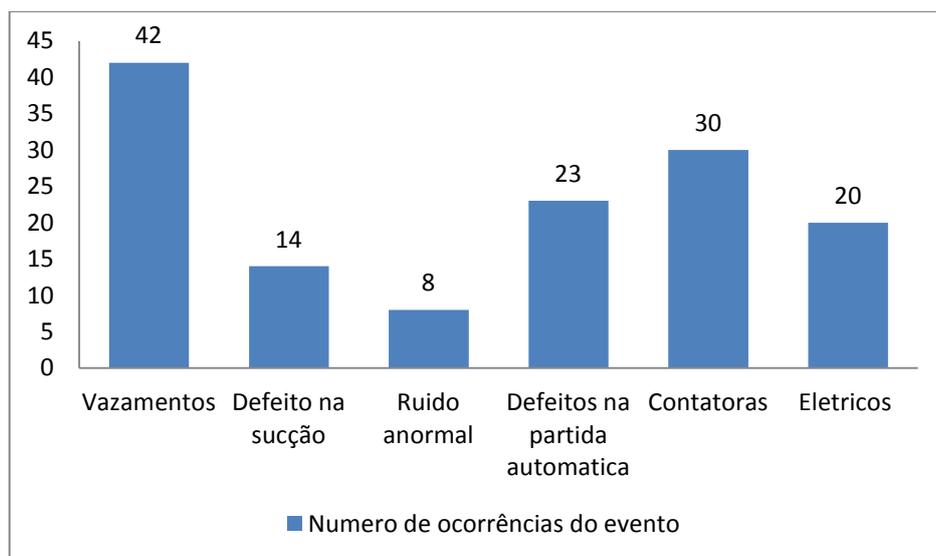


Figura 4. 5 - Número de ocorrências e falhas típicas acontecidas nas MB de Balbina

A seguir nas Figuras 4.6 a 4.10, se mostra o número de ocorrências de falhas por ano (2004 a 2009) nas MBs da UHE de Balbina.

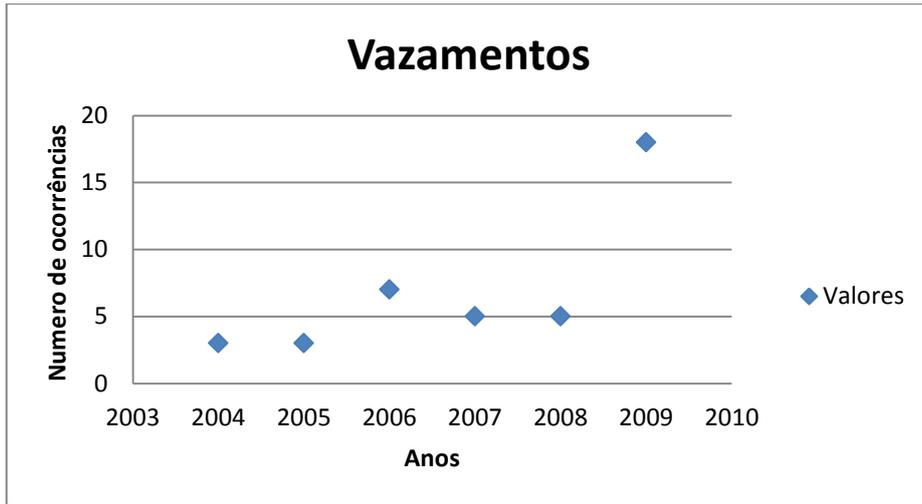


Figura 4. 6 - Número de eventos (vazamentos) nas MB na UHE de Balbina



Figura 4. 7 – Número de eventos (sucção) nas MB da UHE de Balbina

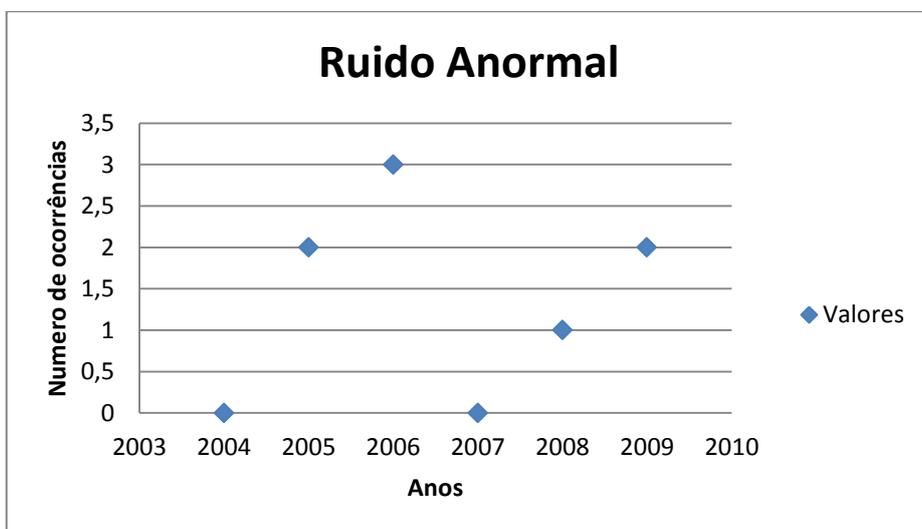


Figura 4. 8 - Número de eventos (ruído anormal) nas MB da UHE de Balbina

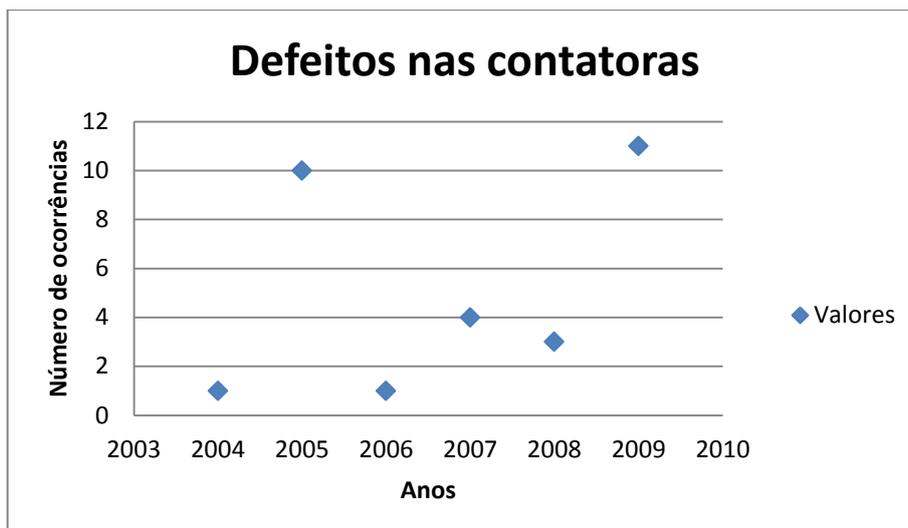


Figura 4. 9 - Número de eventos (defeitos elétricos) nas MB da UHE de Balbina

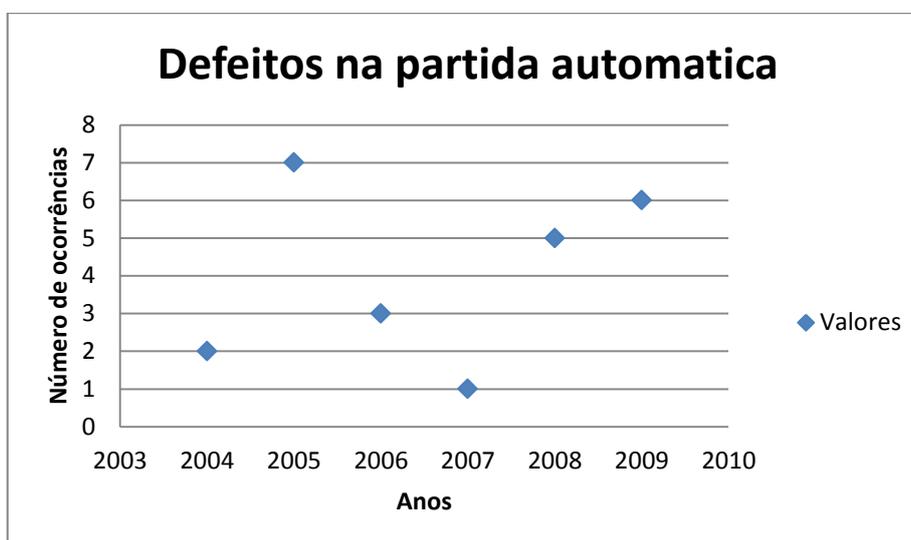


Figura 4. 10 - Número de eventos (partida automática) nas MB da UHE de Balbina

A análise dos gráficos revela: segundo a gráfica da Figura 4.5 dois dos eventos mais comuns acontecidos nas MB são os vazamentos de óleo e os problemas elétricos. Os problemas elétricos se apresentam, principalmente, na partida e comutação automática das MB e nas contadoras, disjuntores, painéis elétricos e demais componentes elétricos do arranque e controle das MB.

Os gráficos das Figuras 4.6 a 4.10 revelam que, em todas as situações de falhas identificadas para as MB no ano 2009, as ocorrências destes eventos aumentaram, ou seu nível alto foi mantido. A partir destas ocorrências, fatos concretos são criados para documentar os casos da base de conhecimento do sistema RBC. Ao selecionar as

informações e escolher os dados relacionados aos distintos defeitos nas MB, encontra-se que alguns dos defeitos mais recorrentes nestes equipamentos apresentam a mesma tarefa de manutenção. Neste sentido, casos concretos e gerais são criados, os quais contêm a informação mais completa e específica para o tratamento das falhas identificadas.

A tarefa de manutenção associada, também pode ser definida a partir da informação da decisão que foi tomada pelo operador com o arremate de solucionar o problema apresentado. Estes dados são complementados com a experiência do especialista na análise do evento em questão e, além disso, baseado na metodologia FMEA analisada anteriormente.

4.3 – CODIFICAÇÃO DE FALHAS

Uma vez detectados os eventos anormais mais recorrentes no equipamento (MB) com sua respectiva tarefa de manutenção, começa o processo de padronização de falhas (seção 3.2.5.1). A partir do código definido na seção 3.2.5.1 um código único é atribuído a cada evento falha - decisão. Se a falha implica mais de uma tarefa de manutenção, esta também é indicada. O código padrão fornece informação básica sobre: a unidade geradora no qual está o equipamento, o sistema-subsistema ao qual pertence, o tipo-nome do equipamento e a falha-ação de manutenção (Figura 4.11).

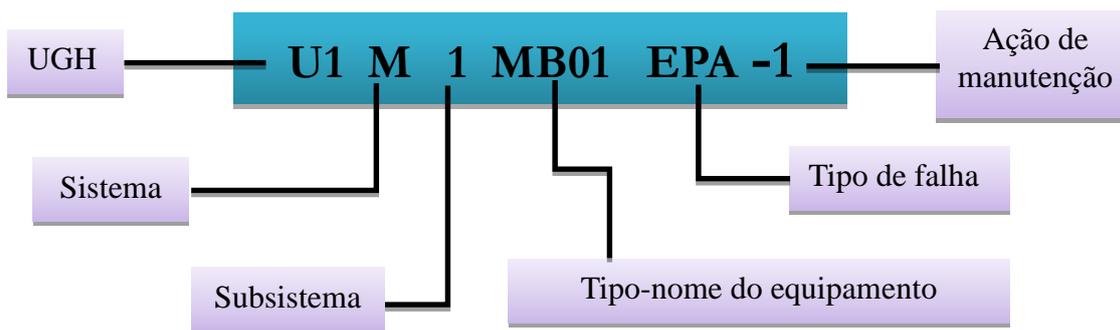


Figura 4. 11 -Exemplo de código de falha aplicado às MB da UHE de Balbina

Os códigos usados para representar os distintos campos que definem o código geral se apresentam na Tabela 4.3 e Tabela 4.4.

Tabela 4. 3 – Códigos das 5 unidades geradoras hidráulicas

UGH	Unidade geradora hidráulica 1	Unidade geradora hidráulica 2	Unidade geradora hidráulica 3	Unidade geradora hidráulica 4	Unidade geradora hidráulica 5
Código	U1	U2	U3	U4	U5

Tabela 4. 4 – Códigos de sistemas, subsistemas e equipamentos presentes nas 5 UGH

Sistema	Sistema de mancal			Sistema de turbina hidráulica	
Código	M			T	
Subsistema	Resfriamento e lubrificação do mancal escora	Resfriamento e lubrificação do mancal guia	Resfriamento e lubrificação do mancal superior	Regulação de velocidade	Água de selagem
Código	1	2	3	1	2
Equipamento	MB AG-AH	MB AI-AJ	MB 01-02	MB AE-AF	MB AK-AL
Código	MBAG-MBAH	MBAI-MBAJ	MB01-MB02	MBAE-MBAF	MBAK-MBAL

Os eventos anormais nas MBs definidos como eventos padrão identificados na seção anterior estão devidamente codificados na Tabela 4.5.

Tabela 4. 5 - Códigos de falhas padronizadas

	Padrão de falha	Código
VAZAMENTOS	Pelos filtros	VF
	Pela gaxeta	VG
	Pelo pressostato	VP
	Pelo selo mecânico	VSM
	Pelas válvulas	VV
RUÍDO ANORMAL		RA
PROBLEMAS NA SUCCÃO		S
ELÉTRICOS	Defeitos nas contadoras	EC
	Defeitos na partida automática	EPA
	Defeito na comutação automática	ECO

A seguir na Tabela 4.6, apresenta-se um exemplo de codificação de falhas para o evento “vazamentos pelo selo mecânico” e “ruído anormal” nas MB da usina hidrelétrica.

Tabela 4. 6 – Exemplos de codificação de falhas para distintos eventos nas MB

Numero	Código	Falha padrão	Decisão
1	U1T1MBAEVSM-1 U2M3MB01VSM-3	Verificar vazamento pelo selo mecânico da MB	Verificar estado do selo mecânico. Corrigir anormalidades no selo mecânico. Substituir o selo mecânico se é necessário Verificar os retentores do acoplamento da MB. Substituir se é necessário.
2	U2M2MBAJEC-1	Defeito elétrico. Verificar defeitos nas contadoras das MB	Foram substituídas as contadoras 63LYX1 e X2C2. Foram efetuados testes funcionais e de operação.
3	U3T1MBAFRA-1	Verificar ruído anormal na MB	Verificar estado dos rolamentos da MB. Lubrificar os rolamentos da MB. Substituir os rolamentos da MB se é necessário.
4	U3T2MBALS-3	Verificar problemas de sucção na MB	Verificar estado da válvula de retenção tipo Flape na entrada de água da MB. Corrigir os defeitos. Substituir a válvula se é necessário.
5	U2M1MBAGEPA-1	Verificar defeito no comando de partida da MB	Verificar conexões nos bornes da contadora de partida automática da MB
6	U4M3MB02ECO-1	Verificar defeito na comutação da MB 02 para MB 01	Foi substituído o relé temporizado 3Do normalizando parcialmente a seqüência da motobomba. Foi trocado a contadora D6 de falta pressão para a motobomba.

Os exemplos anteriores mostram 6 eventos correspondentes a distintas falhas padrão detectadas. O código revela o equipamento onde ocorre o evento, sua localização, a falha e a decisão recomendada. No exemplo da Tabela 4.6, se mostra a codificação de dois eventos VSM. No primeiro, a tarefa recomendada está enumerada como um 1(VSM-1) e na outra como 3 (VSM-3). Isto quer dizer que o evento identificado como VSM tem várias ações de manutenção e será aplicada a adequada decisão, de acordo a caso específico que está acontecendo. Ou seja, uma falha identificada pode ter várias ações de manutenção, como no exemplo 4, nele é aplicada a ação enumerada como 3 (S-3) para o tipo de falha identificada como S.

4.4 – REPRESENTAÇÃO DE CASOS E CONSTRUÇÃO DA BASE DE CASOS

O formato de caso foi definido na seção 3.5.1. A estrutura do caso contém 4 campos definidos como: descrição do equipamento, descrição do problema, descrição da solução e resultado. Segundo a metodologia proposta, uma vez identificada as falhas e associadas às

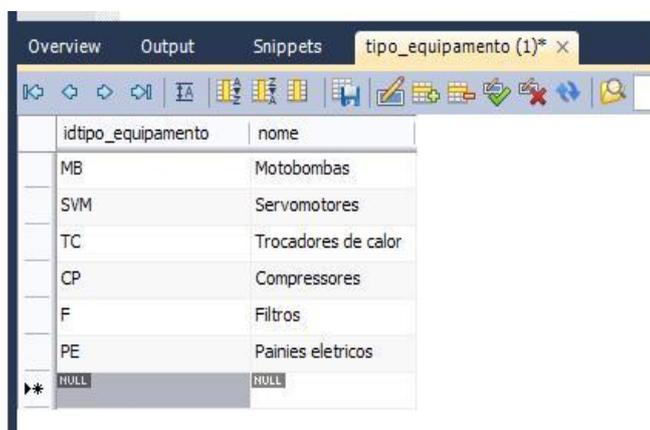
respectivas ações de manutenção, esta informação deve ser representada mediante casos. Assim, a informação obtida na seção anterior é representada segundo o formato de caso definido.

No Apêndice B são mostrados os 65 casos construídos a partir das ordens de serviço da usina hidrelétrica. Ela é a principal fonte de informação histórica para a construção dos casos. O campo “Resultados” é preenchido pelo usuário, depois da avaliação por parte do especialista, se a tarefa de manutenção foi adequada ou não, ou, se é preciso adicionar novas sugestões ou novas ações. Uma vez construídos os casos, eles são armazenados em um banco de dados relacional que é a base de conhecimento do sistema ficando a disposição da execução do ciclo RBC, analisado nas próximas seções.

4.4.1 – Modelo relacional da base de casos

O modelo relacional da base de casos foi proposto na Figura 3.6. Este modelo relacional de base de casos é construído com o banco de dados MySQL usando a ferramenta MySQL *Workbench* (GUI Tool) disponível no *website* da mencionada ferramenta⁶.

A base de casos proposta tem 5 tabelas, cada uma delas se relaciona dentre elas mesmas. A tabela “tipo_equipamento” armazena todos os tipos ou famílias de equipamentos encontrados no domínio de aplicação. Na Figura 4.12 são mostrados alguns dos tipos de equipamentos registrados na tabela.



idtipo_equipamento	nome
MB	Motobombas
SVM	Servomotores
TC	Trocadores de calor
CP	Compressores
F	Filtros
PE	Painies eletricos
HULL	HULL

Figura 4. 12 – Tabela tipo de equipamentos

⁶<http://www.mysql.com/>

Na tabela “falhas” se encontram as falhas padrão identificadas no processo de seleção dos eventos anormais mais recorrentes. Desta forma, na Figura 4.13, se apresentam as falhas registradas para o caso de estudo motobombas da usina hidrelétrica de Balbina.

idtipo	idfalhas	descricao_falha	severidade	efeitos	causa
MB	EC	Defeito elétrico. Verificar defeitos nas contoras das MB	NULL	NULL	NULL
MB	ECO	Verificar defeito na comutação automática da MB	NULL	NULL	NULL
MB	EPA	Verificar defeito na partida automática da MB	NULL	NULL	NULL
MB	RA	Verificar ruído anormal na MB	NULL	NULL	NULL
MB	S	Verificar problemas na sucção da MB	NULL	NULL	NULL
MB	VF	Verificar vazamento de óleo pelo filtro da MB	NULL	NULL	NULL
MB	VG	Verificar vazamentos pela gaxeta da MB	NULL	NULL	NULL
MB	VP	Vazamento excessivo de óleo pelo pressotato da MB	NULL	NULL	NULL
MB	VSM	Verificar vazamento pelo selo mecânico da MB	NULL	NULL	NULL
MB	VV	Verificar vazamentos na válvula de entrada da MB	NULL	NULL	NULL
* NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL

Figura 4. 13 – Tabela de falhas identificadas

Na Figura 4.14 são mostrados os dados da tabela “decisões”. Eles são as decisões de manutenção mais comuns para as falhas mostradas na Figura 4.13. Para algumas falhas, existe mais de uma decisão de manutenção que correspondem a situações específicas determinadas a partir das OS.

idtipo	idfalha	iddecisoes	descricao_decisao	nome_depto	nome_operador
MB	VP	2	Verificar vazamentos pelos pressotatos da MB. Substituir se é necessário.	NULL	NULL
MB	VSM	11	Verificar vazamentos pelos pressotatos da MB. Substituir se é necessário.	NULL	NULL
MB	VF	1	Verificar vazamentos pelos filtros da MB. Verificar e corrigir vazamentos pela válvula de comutação do filtro.	NULL	NULL
MB	VSM	2	Verificar os retentores do acoplamento da MB. Substituir se é necessário.	NULL	NULL
MB	RA	1	Verificar estado dos rolamentos da MB. Lubrificar os rolamentos da MB. Substituir os rolamentos da MB se é necessari...	NULL	NULL
MB	VSM	1	Verificar estado do selo mecânico. Corrigir anormalidades no selo mecânico. Substituir o selo mecânico se é necessário.	NULL	NULL
MB	S	6	Verificar estado das gaxetas. Substituir se é necessário.	NULL	NULL
MB	S	3	Verificar estado da válvula de retenção tipo Flape na entrada de água da MB. Corrigir os defeitos. Substituir a válvul...	NULL	NULL
MB	VG	1	Verificar estado da gaxeta da MB. Fazer ajustes e corrigir vazamentos pela mesma. Substituir as gaxetas se é necess...	NULL	NULL
MB	VP	1	Verificar a película do pressotato. Verificar e substituir se é necessária a película do pressotato.	NULL	NULL
MB	VSM	12	Verificar a película do pressotato. Verificar e substituir se é necessária a película do pressotato.	NULL	NULL
MB	VSM	6	Verificar a borracha de vedação do selo mecânico. Substituir a borracha de vedação se é necessário.	NULL	NULL
MB	VSM	10	Verificar a borracha de vedação do selo mecânico. Substituir a borracha de vedação se é necessário.	NULL	NULL
MB	VSM	13	Inspeccionar as válvulas de entrada e saída de óleo na MB. Substituir válvulas se é necessário.	NULL	NULL
MB	VSM	4	Foram substituídos os o-rings, feito acabamento nas superfícies vedantes e colididos dados diagonais do selo mecani...	NULL	NULL

Figura 4. 14 - Tabela de decisões para as falhas padrão identificadas

Na tabela “equipamentos” se encontram armazenadas todas as informações relevantes sobre o equipamento. Na tabela de “casos” (Figura 4.15) se encontra a estrutura dos casos com as informações provenientes das outras tabelas.

idcasos	ugh	equipo	nome	data	falha	descricao_falha	descricao_decisao
14	U4	MB	O2	2005-10-29	ECO	Verificar defeito na comutação automa...	Foi substituído o relé temporizado 3Do normalizando parcialmente a sequência da motobomba. Foi t
7	U5	MB	AJ	2009-10-29	RA	Verificar ruído anormal na MB	Verificar estado dos rolamentos da MB. Lubrificar os rolamentos da MB. Substituir os rolamentos da
11	U5	MB	AK	2009-10-27	RA	Verificar ruído anormal na MB	Foi identificado o defeito no acoplamento da motobomba. Inspeccionar e corrigir defeitos no acoplan
10	U3	MB	AL	2009-7-30	S	Verificar problemas na sucção da MB	Verificar estado da válvula de retenção tipo Flape na entrada de água da MB. Corrigir os defeitos. I
6	U3	MB	AK	2007-1-1	S	Verificar problemas na sucção da MB	Foi efetuada manutenção preventiva na MB e substituído a gaxeta da MB.
8	U5	MB	AK	2009-10-27	S	Verificar problemas na sucção da MB	Foi trocado o acoplamento 4F da motobomba e feita lubrificação da mesma
1	U1	MB	AG	2009-3-8	VF	Verificar vazamento de óleo pelo filtro d...	Verificar vazamentos pelos filtros da MB. Verificar e corrigir vazamentos pela válvula de comutação
2	U2	MB	AL	2009-12-26	VG	Verificar vazamentos pela gaxeta da MB	Verificar estado da gaxeta da MB. Fazer ajustes e corrigir vazamentos pela mesma. Substituir as g
3	U3	MB	O2	2008-7-26	VG	Verificar vazamentos pela gaxeta da MB	Verificar estado da gaxeta da MB. Fazer ajustes e corrigir vazamentos pela mesma. Substituir as g
13	U1	MB	O2	2008-2-28	VP	Vazamento excessivo de óleo pelo press...	Verificar a película do pressotato. Verificar e substituir se é necessária a película do pressotato.
4	U2	MB	O2	2008-2-21	VP	Vazamento excessivo de óleo pelo press...	Verificar vazamentos pelos pressotatos da MB. Substituir se é necessário.
5	U2	MB	AI	2006-5-6	VSM	Verificar vazamento pelo selo mecânico ...	Foi efetuada a manutenção corretiva no selo mecânico das MB. Foi feito acabamento nas partes gir
9	U1	MB	AJ	2004-1-11	VSM	Verificar vazamento pelo selo mecânico ...	Foi efetuada a manutenção corretiva no selo mecânico das MB. Foi feito acabamento nas partes gir

Figura 4. 15 – Tabela de casos

4.5 – EXECUÇÃO DO CICLO RBC

Segundo a metodologia proposta, depois de obtida a base de casos do protótipo produto da elaboração do sistema de gestão de manutenção corretiva, o ciclo RBC pode ser executado como o intuito de elaborar uma solução ou resposta ao caso atual ingressado pelo usuário (seção 3.4). Com a ajuda da ferramenta jCOLIBRI, o processo de recuperação de informações, adaptação de soluções, revisão de casos e retenção dos mesmos pode ser realizado. A grande vantagem do jCOLIBRI é a documentação existente sobre a ferramenta, a disponibilidade do código fonte para fazer modificações de acordo à aplicação e a clara arquitetura de sua construção (*framework* caixa branca - preta). Tanto as interfaces gráficas de usuário assim com a inferência do ciclo RBC, e todo o projeto em geral, foi construído em Java. A seguir são apresentados alguns conceitos básicos da implementação do processo RBC segundo as definições do enfoque.

4.5.1 – Indexação

No processo de indexação são identificados os atributos relevantes para a recuperação de casos. Como pode se observar na Figura 4.15, a tabela dos casos contém os atributos de

sua descrição. Mas, são poucos os atributos que realmente são importantes ao efetuar as medidas de similaridade.

Os outros atributos são importantes, mas só fornecem informação contextual sobre o domínio de aplicação. No caso de estudo em questão se identificam 4 atributos como mais relevantes para o processo de recuperação de casos, estes são:

1. O tipo de equipamento ao qual pertence o dispositivo
2. O tipo de falha que apresenta o dispositivo
3. O nome ou referencia do equipamento em questão
4. A UGH à qual pertence o dispositivo.

Os itens um e dois são talvez os mais importantes, já que o primeiro localiza a consulta dentro de um domínio específico de equipamentos e o segundo especifica a falha que acontece no dispositivo dentro do mencionado domínio. Os itens três e quatro complementam a busca de casos apontando se o nome do equipamento coincide, assim como a UGH à qual pertence.

4.5.1.1 – Entrada do sistema

No caso da implementação do sistema de gestão de manutenção corretiva analisado como caso de estudo nesta seção, o caso de entrada é ingressado pelo usuário. Como o enfoque é de manutenção corretiva, a falha ou os sintomas da falha já estão identificados e se procura a ação de manutenção a partir das informações recuperadas da BC.

A identificação dos atributos relevantes como os mais apropriados dentro do processo de recuperação de casos, define praticamente, a entrada ao sistema RBC: à hora que o usuário ingressa a consulta ao sistema, deverá especificar esses atributos à entrada. O usuário poderá ingressar outros atributos, mas só serão tidos em conta para a recuperação de casos os índices definidos.

Segundo o anterior uma primeira interface gráfica é definida para o protótipo, nela, apresenta-se, ao usuário, os dados a ser ingressados (Figura 4.16).

Descrição do caso

Unidade Geradora Hidráulica (UGH): Seleccione a UGH... ▼

Tipo de equipamento: Seleccione o tipo de equipamento (MB)... ▼

Equipamento: Selecionar MB... ▼

Descrição da falha: Selecionar tipo de falha... ▼

Data de ocorrência do evento: 2012-10-05

Descrição particular do problema

Figura 4. 16 – Dados que definem a consulta do usuário

Na Figura 4.16 se mostram os dados a ingressar por parte do usuário. Os dados mostrados são obrigatórios a se definirem, pois, especificam a consulta à base de casos. Na tela proposta, também se observa um campo de “Descrição particular do problema” cuja função ainda não está em andamento, mas cujo objetivo é adicionar uma funcionalidade de RBC textual ao protótipo (também implementada em jCOLIBRI) e que permitiria uma descrição textual do problema em questão.

A seguir, nas Figuras 4.17 a 4.20 são mostrados, em detalhes, os campos de entrada a serem preenchidos pelo usuário no sistema de gestão de manutenção corretiva aplicado às motobombas da UHE de Balbina.

Descrição do caso

Unidade Geradora Hidráulica (UGH): Seleccione a UGH... ▼

Tipo de equipamento: Seleccione o tipo de equipamento (MB)... ▼

Equipamento: Selecionar MB... ▼

Descrição da falha: Selecionar tipo de falha... ▼

Data de ocorrência do evento: 2012-09-20

Seleccione a UGH...

- Unidade Geradora Hidráulica-U1
- Unidade Geradora Hidráulica-U2
- Unidade Geradora Hidráulica-U3
- Unidade Geradora Hidráulica-U4
- Unidade Geradora Hidráulica-U5

Figura 4. 17- Índice de entrada para o sistema RBC: UGH

Descrição do caso

Unidade Geradora Hidráulica (UGH): Unidade Geradora Hidráulica-U2

Tipo de equipamento: Seleccione o tipo de equipamento (MB)...

Equipamento: Seleccione o tipo de equipamento (MB)...

Descrição da falha: MB-Motobombas

Data de ocorrência do evento: TC-Trocadores de Calor

C-Compressores

F-Filtros

SM-Servomotor

...

Figura 4. 18 - Índice de entrada para o sistema RBC: tipo de equipamento

Descrição do caso

Unidade Geradora Hidráulica (UGH): Unidade Geradora Hidráulica-U2

Tipo de equipamento: MB-Motobombas

Equipamento: Selecionar equipamento...

Descrição da falha: Selecionar equipamento...

Data de ocorrência do evento: MB-AE

MB-AF

MB-01

MB-02

MB-AG

MB-AH

MB-AI

Descrição particular do problema

Figura 4. 19 - Índice de entrada para o protótipo RBC: equipamento

Descrição do caso

Unidade Geradora Hidráulica (UGH): Unidade Geradora Hidráulica-U2

Tipo de equipamento: MB-Motobombas

Equipamento: Selecionar equipamento...

Descrição da falha: Selecionar tipo de falha...

Data de ocorrência do evento: Selecionar tipo de falha...

VSM-Vazamentos pelo selo mecanico

EC-Defeito eletrico nas contadoras

EPA-Defeito na partida automatica

ECO-Defeito na comutacao automatica

RA-Ruido Anormal

VP-Vazamentos pelo pressostato

S-Defeito na succao

Configuração da simulação

Descrição particular do problema

Figura 4. 20 - Índice de entrada para o protótipo RBC: tipo de falha

4.5.2 - Recuperação de casos

Definida a consulta por parte do usuário, inicia-se o processo de recuperação de casos. Este processo consiste na aplicação de medidas de similaridade (local e global) para determinar quais casos, da livreria de casos, são úteis para construir uma solução ao evento atual definido pelo usuário. Através da aplicação das medidas de similaridade é possível medir ou quantificar a utilidade de uma solução a ser aplicada no caso atual.

O cálculo da medida de similaridade global, segundo a equação 2.2, implica definir um valor de pesos para os atributos, segundo a importância destes para a recuperação de casos. Esta atribuição de um valor de pesos aos índices é transcendental à hora de efetuar o cálculo desta medida: o valor obtido do cálculo desta função é a que determina a similaridade de um caso em relação ao caso atual e pode ser condicionado pelos valores dos pesos atribuídos aos índices.

4.5.2.1 – Atribuição de pesos

No contexto deste trabalho, o valor dos pesos para os índices definidos são atribuídos de acordo com o seguinte critério: os índices de maior peso são o tipo de equipamento e a falha detectada, já que por eles, pode-se situar o equipamento dentro de um domínio específico de máquina e associar uma determinada falha padrão detectada. Os outros atributos, mesmo assim importantes, complementam a busca e, portanto, têm um peso menor, ou seja, permitem aproximar mais o caso à consulta estabelecida pelo usuário. Se o equipamento é o mesmo, coincidir com o nome e a unidade geradora à qual pertence. Na Tabela 4.7, define-se o valor dos pesos para os índices definidos.

Tabela 4. 7 - Tabela de pesos atribuídos aos índices definidos

Atributo	Descrição	Peso
tipo_equipamento	Define a família à qual pertence o equipamento	1.0
tipo_falha	Define o tipo de falha que apresenta o equipamento	1.0
nome_equipamento	Especifica o nome do equipamento	0.6
UGH	Especifica a unidade geradora hidroelétrica à qual pertence o equipamento	0.3

Na maioria das vezes a atribuição do valor dos pesos depende do critério do especialista ou usuário, é por isso que na GUI mostrada na Figura 4.21, o valor dos pesos para os atributos podem ser modificados ou ajustados, de acordo ao critério de busca por parte do operador.

Configuração da similaridade

Similaridade global: Algoritmo do vizinho mais proximo

ATRIBUTO	PESO	FUNÇÃO LOCAL
UGH	0,3	Função equals
TIPO DE EQUIPAMENTO	1	Função equals
EQUIPAMENTO	0,6	Função equals
TIPO DE FALHA	1	Função equals

Número de casos a recuperar: 3

Figura 4. 21 - Configuração da similaridade local e atribuição do valor dos pesos

4.5.2.2 – Medida de similaridade local

A aplicação de uma medida de similaridade local depende do tipo de atributo do caso, ou seja, se o atributo é *string*, *float*, *int*, *text*, entre outros, se aplicará uma medida correspondente com a natureza do atributo (Wangenheim e Wangenheim, 2003).

Segundo Recio-Garcia *et al.*, (2008), em jCOLIBRI, no pacote definido como `jcolibri.method.retrieve.NNretrieval.similarity.local` são definidas algumas classes que permitem o cálculo da similaridade local dependendo do tipo de atributo. Algumas delas estão mencionadas na Tabela 4.8.

Tabela 4. 8 - Algumas medidas de similaridade local definidas em jCOLIBRI

equal	Esta função retorna 1 se os objetos são iguais de outra forma retorna zero.
equalsStringIgnoreCase	Esta função retorna 1 se os <i>strings</i> têm a mesmas letras.
Interval	Esta função retorna a similaridade de dois números dentro de um intervalo.
Threshold	Esta função retorna 1 se a diferencia entre dois números é menor que um nível. Retorna zero em caso contrario.

Neste trabalho será usada a função de similaridade local *equals*, para os quatro atributos definidos como índices no processo de indexação (*tipo_equipamento*, *tipo_falha*, *nome_equipamento*, *ugh*) e a qual devolve 1 se o valor do atributo é exato, em relação ao valor do atributo do caso atual, ou zero se não coincidem. A definição formal da função *equals*, usada como similaridade local para o protótipo RBC desenvolvido nesta dissertação, mostra-se a seguir (Wangenheim e Wangenheim, 2003).

$$f(Q_i, C_i) = \begin{cases} 1, & Q_i = C_i \\ 0, & Q_i \neq C_i \end{cases}$$

Onde, Q é o caso atual, C é um caso da base de casos e i o índice.

Na Figura 4.21 é possível apreciar quatro *checkbox's* para a escolha da função de similaridade local, dado que é possível fazer uso de outras funções definidas em jCOLIBRI ou funções que possa criar ou definir o próprio usuário. Mas, neste projeto, só esta definida a função *equals* descrita anteriormente. Também nesta janela, o usuário pode definir o número de casos a recuperar por parte do sistema.

4.5.2.3 – Medidas de similaridade global

No pacote `jcolibri.method.retrieve.NNretrieval.similarity.global` (Recio-Garcia *et al.*, 2008), encontra-se a classe que calcula o valor da similaridade global segundo o algoritmo *Nearest Neighbour* definido na Equação 2.2. O jCOLIBRI recupera os casos segundo este algoritmo e, além disso, seleciona as situações que estão no topo dos casos recuperados de acordo a seu valor mais alto de similaridade. Este processo de recuperação, que aplica *Nearest Neighbour* e seleciona os casos do topo da seleção, é chamado de *K-NN Retrieval*. A classe `jcolibri.method.retrieve.selection.SelectedCases`, permite essa seleção a partir do número de casos a recuperar, definido pelo usuário na Figura 4.21.

Finalmente, a primeira janela do protótipo RBC que permite definir a consulta do usuário, assim como definir os parâmetros de similaridade e as funções para as medidas de similaridade local, mostra-se na Figura 4.22. Nesta figura o botão chamado “Executar ciclo RBC” inicia o processo de recuperação de casos. Este processo é feito por jCOLIBRI a

partir do método `evaluateSimilarity` da classe `jcolibri.method.retrieve.NNretrieval.NNConfig` (Recio-Garcia *et al.*, 2008).

ATRIBUTO	PESO	FUNÇÃO LOCAL
UGH	0,3	Função equals
TIPO DE EQUIPAMENTO	1	Função equals
EQUIPAMENTO	0,6	Função equals
TIPO DE FALHA	1	Função equals

Figura 4. 22 – Primeira tela do protótipo RBC

O método `jcolibri.method.retrieve.NNretrieval.NNConfig` recebe como parâmetros o conjunto de casos armazenados na base de casos, a consulta efetuada pelo usuário e os parâmetros de similaridade, também definidos pelo usuário. Como retorno se obtém o conjunto de casos recuperados.

Uma vez o processo de recuperação de casos é executado pelo jCOLIBRI, o número de casos que foi definido pelo usuário lhe retornam de acordo com o valor de similaridade mais alta. Estes casos recuperados são mostrados em uma tabela Java tal como se mostra na Figura 4.23.



Figura 4. 23 – Tela número dois do protótipo RBC: tela de casos recuperados

Um exemplo do cálculo da medida de similaridade local entre dois casos se mostra na Tabela 4. 24. Um caso atual é definido pelo usuário com os seguintes atributos (Figura 4.23): UGH: U2; T. Equipamento: MB; Equipamento: 02; Código de falha: VSM; depois do processo de recuperação, o melhor caso encontrado, com similaridade 0.7931, tem os seguintes atributos: ID: 15 e atributos UGH: U2; T. Equipamento: MB; Equipamento: 01; Código de falha: VSM. O cálculo da similaridade local para estes atributos, aplicando a função *equals*, mostra-se na Tabela 4.9.

Tabela 4. 9 – Exemplo de cálculo de função de similaridade local

Caso ID: atual			Caso ID: 15			Data: 2009-06-3		
Descrição do equipamento			Função de similaridade local $f(Q_i, C_i)$	Descrição do problema				
Peso	Atributo	Valor		Valor	Atributo	Peso		
1	T. Equipamento	MB	$f(Q, C)_{t.equip} = 1$	MB	T. Equipamento	1.0		
0.6	N. Equipamento	02	$f(Q, C)_{n.equip} = 0$	01	N. Equipamento	0.6		
0.3	UGH	U2	$f(Q, C)_{UGH} = 1$	U2	UGH	0.3		
Descrição do problema			Função de similaridade local $f(Q, C)_{t.falha} = 1$	Descrição do problema				
1	T. Falha	VSM		VSM	T. Falha	1		

Com a função de similaridade local calculada para cada atributo e o valor dos pesos definidos, pode-se aplicar a equação 2.2, o qual revela o valor de similaridade total para os dois casos.

$$\text{sim}(Q, C) = \frac{\sum_{i=1}^n f(Q_i, C_i) \times W_i}{\sum_{i=1}^n W_i} = \frac{1 \times 1 + 0 \times 0.6 + 1 \times 0.3 + 1 * 1}{1 + 1 + 0.3 + 0.6} = 0.7931$$

4.5.3 - Adaptação – revisão de casos

O processo de reuso ou adaptação consiste em usar as soluções dos casos recuperados no processo anterior para fornecer uma solução ao caso definido pelo usuário. Como foi mencionado na seção 2.2.3.4, a solução de um caso pode ser reusada, total ou parcialmente, sendo condicionada ou adaptada à consulta atual em questão.

jCOLIBRI fornece duas opções básicas de métodos de adaptação:

- `jcolibri.method.reuse.DirectAttributeCopyMethod`. Este método copia o valor de um atributo da consulta definida pelo usuário em um atributo de um caso recuperado.
- `jcolibri.method.reuse.NumericDirectProportionMethod`. Executa um cálculo numérico de proporção direta entre os atributos da consulta e o caso armazenado.

Para o protótipo RBC proposto neste trabalho as etapas de reuso e revisão de casos são apresentadas ao usuário sobre uma mesma tela. O processo de reuso se executa aplicando o método `DirectAttributeCopyMethod`, ele é responsável por copiar o valor do atributo da consulta no caso recuperado, adaptando-o, desta forma, segundo os parâmetros da consulta e fazendo uso da solução proposta pelo caso. Os atributos a serem trocados por parte do método `DirectAttributeCopyMethod`, são o nome do equipamento e a UGH à qual pertence. Os atributos de tipo de equipamento e falha localizada devem coincidir exatamente com o do caso ingressado pelo usuário. Este último detalhe faz parte do processo de revisão de casos levado a cabo pelo usuário e é analisado no seguinte capítulo.

Na Figura 4.24, mostra-se a janela onde se levam a cabo as etapas de adaptação e revisão de casos.



Figura 4. 24 - Tela número três do protótipo RBC: janela de adaptação e revisão de casos

Nesta tela se mostram os atributos de cada um dos casos (o caso atual e os casos recuperados). Os eventos recuperados da base de casos aparecem com seus respectivos números identificadores (ID), o qual é único na tabela de casos. Quando o *radiobutton* que representa um caso é selecionado, os atributos do caso se ativam e o usuário pode comparar, parâmetro a parâmetro, os atributos do caso recuperado com os do caso atual. Também, quando um caso for selecionado através do *radiobutton*, no espaço correspondente à *textarea* é mostrada a decisão correspondente ao caso.

A janela proposta mostra, também, o valor da similaridade para cada caso recuperado, isso permite ordenar de maior a menor, os casos recuperados, segundo o melhor valor de similaridade. Na tela proposta também aparecem duas opções (*checkboxes*) “descartar caso” e “caso útil” cabe ao usuário decidir se o caso é totalmente descartável ou se o caso é útil para fornecer uma possível solução ao problema. Na situação apresentada na tela da Figura 4.25, o usuário decidiu que o caso com ID 23 não é útil para a situação em questão.

O caso com ID 25 fornece uma solução que pode ser reusada ou aplicada à situação atual. À medida que um caso é selecionado através do *radiobutton*, sua correspondente ação de manutenção é mostrada na parte de abaixo da tela, na *textarea* (Decisão-Caso ID) como acontece com o caso ID 15, que esta sendo analisado. Quando o usuário seleciona os casos que fornecem uma resposta útil ao evento atual, a etapa de adaptação é completada e, finalmente, o caso com a solução reusada é apresentado. Quando um caso é útil ou não? Essa problemática será analisada no seguinte capítulo

4.5.4 – Retenção e apresentação do caso resolvido

Finalmente, a última janela do protótipo RBC proposto neste trabalho tem a ver com a etapa de retenção de casos e com a apresentação do evento resolvido. Na Figura 4.25, mostra-se a última janela do protótipo RBC.

Retenção de casos

Caso ID: 15 adaptado ao caso atual

Descrição do problema

Dados de entrada

Unidade Geradora:	U2	Tipo de falha:	VSM
T. Equipamento:	MB	Descrição da falha:	Vazamento pelo selo mecanico
Equipamento:	02	Data:	2012-10-05

Descrição do problema

A motobomba MB - 02 localizada na unidade geradora elétrica U2 apresenta um problema de ' Vazamento pelo selo mecanico '

Decisão proposta

Verificar os retentores do acoplamento da MB. Substituir retentores se é necessario.

Resultado

Operador: Departamento:

Data Inicio: Data Final:

Hora Inicio: Hora Final:

Decisão efetiva: Sim Nao Sugestoes:

Padrão de falha correito: Sim Nao Sugestoes:

Retenção

Caso adaptado:1 Guardar caso com ID: 59

Figura 4. 25 – Última tela do protótipo RBC: janela de retenção de casos e apresentação

Na janela proposta, a ideia é efetuar o processo de retenção de casos o qual são passíveis de atualização da base de casos, assim como o processo de aprendizagem do sistema inteligente. O caso ingressado pelo usuário é mostrado nesta janela adaptado ao(s) caso(s) recuperado(s) junto com a respectiva solução do evento recuperado.

Na primeira parte da janela são mostrados os atributos chaves (os índices) do caso ingressado pelo usuário: tipo de equipamento; UGH; nome do equipamento; data de ocorrência do evento e; a falha apresentada. Note-se que, ao invés de aparecer os valores dos atributos do caso recuperado, aparecem os valores da consulta, tal como foi ingressado pelo usuário. Ou seja, o processo de adaptação de casos foi completado. Como foi dito na seção anterior, só os atributos correspondentes com a UGH e o nome do equipamento podem ser adaptados. Os atributos restantes devem coincidir, exatamente, com a consulta definida pelo usuário.

Na sequência aparece a decisão ou tarefa de manutenção do caso mais similar recuperado, o qual foi analisado na etapa de revisão de casos por parte do especialista. A importância desta tarefa, recomendada para ser executada sobre o equipamento, radica em que está baseada em um fato real armazenado na base de conhecimento do sistema, cuja solução foi real no domínio de aplicação.

As informações seguintes, que aparecem na janela, estão relacionadas com o campo “Resultados” que complementa a estrutura do caso: o nome do operador que executa ou leva a cabo a ação recomendada, o tempo que demora a execução da ação e um campo que avalia se a decisão recomendada foi efetiva ou não. Assim mesmo, se na etapa anterior o operador considera que a respectiva ação de manutenção recuperada contém informação insuficiente, ou que deve ser complementada com outras informações, são considerações que, igualmente, serão apresentadas no caso em questão.

Finalmente, o caso resolvido pode ser armazenado na base de casos, com um novo identificador (ID) segundo a sequência de chaves na base de dados, completando o ciclo RBC e estabelecendo uma solução ao caso inicial, ingressado pelo usuário, onde a solução é a respectiva ação de manutenção de um caso mais similar encontrado na base de casos.

4.6 – CONSIDERAÇÕES E SÍNTESES DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram apresentados os detalhes da implementação de um sistema de gestão de manutenção corretiva usando RBC aplicado à usina hidrelétrica de Balbina, baseada na metodologia proposta no capítulo 3. A execução do processo RBC foi construído a partir da ferramenta jCOLIBRI, o qual implementa os detalhes e as características próprias deste tipo de sistemas, facilitando o desenvolvimento do mesmo e adaptando-o à aplicação atual e ao domínio de trabalho desta pesquisa (manutenção de equipamentos).

Para facilitar a análise e a construção, foi definida como caso de estudo as motobombas da usina hidrelétrica, sendo a metodologia perfeitamente válida para qualquer tipo de equipamento da usina. Todo o processo de construção do protótipo foi detalhado: começado pela classificação e identificação de equipamentos presentes na usina, seguindo com a aquisição do conhecimento do sistema e identificação das fontes de informação; a construção dos casos a partir, principalmente, das OS do equipamento do caso de estudo; a elaboração da base de casos em MySQL e as respectivas modificações do código fonte do jCOLIBRI para a construção do protótipo. Para facilitar a interação com o usuário foram desenvolvidas distintas GUI, que mostram todo o processo e execução do ciclo, assim como finalmente o resultado obtido.

A aplicação obtida nesta dissertação (módulo RBC para gestão de manutenção corretiva aplicada às MB da UHE de Balbina) está disponibilizada no endereço: <http://164.41.17.25/RBCBalbina/ModuloRBCBalbina.jnlp> através da tecnologia *Java Web Start* da plataforma Java.

Mais detalhes da estrutura do *framework* jCOLIBRI e a implementação do sistema se encontram no Apêndice C.

No capítulo seguinte, são apresentados os resultados obtidos e a análise do mesmo com o uso do protótipo RBC desenvolvido para apoio na tomada de decisão e recomendação de tarefas de manutenção.

5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

No capítulo anterior foi mostrado a implementação do protótipo RBC para a usina hidrelétrica de Balbina, segundo a metodologia proposta no capítulo 3, a qual foi apresentada mediante o modelamento IDEF0. Com a ajuda do *framework* jCOLIBRI, a inferência e a execução do ciclo RBC foi implementada, e um conjunto de GUI foram construídas para facilitar a interação com o usuário e apresentar os resultados das distintas etapas, segundo o processo RBC.

Nesta seção são analisados os resultados obtidos quando uma consulta é feita pelo usuário com o fim de validar o protótipo implementado. Uma fase de testes foi definida para analisar o rendimento do sistema e verificar se o protótipo cumpre com os objetivos para o qual foi criado e verificar sua utilidade e, sugerir ou recomendar ações de manutenção a situações ingressadas pelo usuário. Vantagens e desvantagens do sistema, assim como sua credibilidade, seu rendimento e eficácia serão analisadas. A seguir, uma fase de testes é definida.

5.1 – FASE DE TESTES

Segundo Matelli (2009), a validação em um sistema RBC deve se realizar analisando cada solução gerada a partir da recuperação de um caso. Se a situação é satisfatória, deve ser retida na base de casos para uso futuro.

Nesta etapa da validação do sistema é preciso mencionar que, talvez, a melhor e mais indicada forma de estudar o sistema é instalando o protótipo e analisando as respectivas consultas com os operadores da usina. Mas, por ora, é praticamente impossível este tipo de validação.

Todavia, deve-se lembrar que o sistema foi construído com as OS da usina hidrelétrica, que são as ações que eles mesmos definiram, executaram e registraram quando um determinado problema foi detectado e, portanto, as recomendações do sistema tem um alto grau de validade. Talvez, o necessário é contar com a avaliação do caso por parte do operador, ou seja, o preenchimento do campo resultados para avaliar se as ações são

efetivas e determinar o tempo de execução da ação. A forma de avaliar o sistema será estudando o comportamento do mesmo, etapa por etapa, segundo a metodologia RBC. Em cada etapa, a partir de um conjunto de testes planejados, serão analisadas as repostas do sistema às consultas definidas pelo usuário.

5.1.1 – Etapa de recuperação de casos

Nesta seção se ponderará a etapa correspondente à recuperação de casos do protótipo RBC. Esta etapa é sumamente importante, dado que uma boa seleção de casos por parte do sistema permitirá que adequadas repostas sejam elaboradas para o caso novo em questão.

É importante lembrar que, para este processo, a similaridade local é calculada segundo a função *equals* e a similaridade global é calculada segundo o algoritmo do vizinho mais próximo.

5.1.1.1 – Teste 1: similaridade 100%

Quando um caso coincide 100% com outro, armazenado na base de casos, o valor da similaridade é 1, e o evento constitui a melhor situação para fornecer uma solução ao caso atual em questão. Neste teste se faz coincidir, exatamente, um caso armazenado na BC com uma consulta feita pelo usuário. Os pesos definidos para este teste são os estabelecidos na Tabela 4.10: tipo de equipamento (1), falha (1), equipamento (0.6), UGH (0.3). Seja o seguinte caso de entrada:

- Tipo de equipamento: MB; falha: VSM; nome do equipamento: MB-01; UGH: 2;

Esta entrada, definida pelo usuário, diz o seguinte: a motobomba MB-01, do sistema de resfriamento do mancal superior, localizado na Unidade Geradora Hidráulica 2 (UGH 2), apresenta um Vazamento no Selo Mecânico (VSM) e se deseja saber quais são as respectivas ações de manutenção a ser efetuadas sobre o equipamento.

Depois de definir a entrada e os pesos para os índices na tela da Figura 4.23, os casos recuperados pelo sistema se mostram na Figura 5.1.

Consulta (caso atual)

UGH: U2 T.Equipamento: MB Equipamento: MB - 01 Código: VSM * Data: 2012-10-01

* Vazamentos pelo selo mecanico

Casos mais similares recuperados

Cas...	Similaridade	UGH	Equipame...	Data	Descricao da Fa...	Decisao
15	1.0	U2	MB - 01	2009-06-30	VSM - Vazamento pelo ...	Verificar os retentores do acoplamento da MB. Substituir retentores se é necessario.
3	0.689655172413...	U1	MB - AE	2008-03-30	VSM - Vazamentos pelo...	Efetuar manutenção corretiva no selo mecanico da MB. Efetuar inspeções nas tubulações di
4	0.689655172413...	U1	MB - AE	2009-12-12	VSM - Vazamentos pelo...	Verificar estado do selo mecanico. Corrigir anormalidades no selo mecanico. Substituir o selc

Figura 5. 1 -Recuperação de casos: teste 1

Nas 3 situações recuperadas pelo sistema, o primeiro caso ocorreu em 2009-06-30 e coincide, totalmente, com a consulta feita pelo usuário, por isso seu valor de similaridade é um: os parâmetros do caso são exatamente iguais ao procurada. A ação de manutenção que reporta dito caso, tal como é mostrada na tela da Figura 5.1 é:

- Verificar os retentores do acoplamento da motobomba. Substituir se é necessário.

Os casos restantes recuperados têm similaridade 0.6896 e coincidem com o tipo de equipamento e a descrição da falha, mas diferem na UGH e o nome do equipamento. O caso consultado tem uma probabilidade muito alta de que seja a mesma situação do caso recuperado com ID 15, e, portanto, sua solução poderá ser reutilizada totalmente com mais confiabilidade e efetividade na decisão.

5.1.1.2 – Teste 2: caso não similar 100%

Talvez uma das vantagens mais importantes de um sistema RBC é a capacidade de encontrar uma solução a situações que não estejam presentes na sua base de casos (BC). Neste teste se analisa um caso que não coincide, exatamente, com algum outro na BC do sistema. Seja a seguinte consulta definida pelo usuário:

- Tipo de equipamento: MB; nome do equipamento: MB-AI; tipo de falha: S; UGH: 2.

Este evento diz que a motobomba MB-AI, do sistema de resfriamento do mancal escora, localizada na unidade geradora hidráulica 2 (UGH 2), apresenta um problema no bombeo

ou sucção do fluido a circular. Deseja-se saber quais são as respectivas ações de manutenção a ser efetuadas sobre o equipamento. Os valores dos pesos para esta consulta estão definidos na Tabela 4.10. Segundo o sistema implementado, os casos mais similares encontrados na BC se mostram na Figura 5.2.

Consulta (caso atual)

UGH: U2 T.Equipamento: MB Equipamento: MB - AI Código: S * Data: 2012-10-04

* Defeito na succao

Casos mais similares recuperados

Cas...	Similaridade	UGH	Equipame...	Data	Descrica...	Decisao
20	0.79310344827...	U2	MB - AL	2009-08-26	5 - Defeito na...	Verificar a gaxeta da MB. Verificar a vedação da mesma. Efetuar aperto na gaxeta da MB. Verificar o
12	0.68965517241...	U1	MB - AL	2009-04-26	5 - Defeito na...	Verificar eixo da MB. Verificar estado do rotor e parafusos de fixação do rotor.
35	0.68965517241...	U3	MB - AK	2006-08-01	5 - Defeito na...	Verificar defeitos na valvula de retenção. Foi confeccionado parte da valvula de retenção que esta

Figura 5. 2- Recuperação de casos: teste 2

Os casos recuperados estão relacionados à mesma falha, mas diferem em seus atributos principais e tem similaridades diferentes. As decisões de manutenção são diferentes nos três casos e nenhum dos casos coincide com o nome de equipamento. O primeiro caso tem melhor similaridade, já que coincide com a UGH do caso consultado pelo usuário, o que o aproxima mais à consulta atual em questão.

Os casos restantes têm similaridades iguais, mas depende do critério do especialista, na etapa de revisão de casos, decidir qual das respostas (decisão) se aplica melhor à situação atual que está se apresentando. A decisão do caso com melhor similaridade, segundo a Figura 5.2, é:

- Verificar a gaxeta da MB. Verificar a vedação da mesma. Efetuar aperto na gaxeta da MB. Verificar obstruções na tubulação de sucção. Trocar a gaxeta se é necessário.

5.1.1.3 – Teste 3: ajuste de pesos

Este é um dos fatos com mais transcendência na recuperação de casos. A literatura de RBC sempre indica que os pesos devem ser atribuídos com ajuda do especialista da área. Ele ajudará a identificar, em determinadas situações, qual atributo é mais importante que outro.

No entanto, nesta pesquisa, os pesos definidos aos índices foram estabelecidos pelo próprio autor deste trabalho. O valor dos pesos foi definido a partir do critério que os casos recuperados devem coincidir com o tipo de equipamento e com o padrão de falha estabelecido na consulta. Neste teste se demonstrará como uma variação no ajuste de pesos implica uma modificação total na recuperação de casos. Seja a seguinte consulta definida pelo usuário:

- Tipo de equipamento: MB; nome do equipamento: MB-AL; falha: RA; UGH: 1;

Esta consulta diz que, na motobomba MB-AL, do sistema de água de selagem, localizada na unidade geradora hidráulica 1 (UGH 1), foi detectado um problema de ruído anormal (RA) e se deseja saber quais são as respectivas ações de manutenção a serem efetuadas sobre o equipamento.

Para esta consulta se definem os seguintes valores de pesos para os respectivos índices: tipo de equipamento: 0.9; tipo de falha: 0.9; UGH: 0.4 e equipamento: 0.6. Os casos recuperados pelo sistema se mostram na Figura 5.3.

Consulta (caso atual)

UGH: U1 T.Equipamento: MB Equipamento: MB - AL Código: RA * Data: 2012-10-04

* Ruído Anormal

Casos mais similares recuperados

Cas...	Similari...	UGH	Equipame...	Data	Descrição da F...	Decisão
11	0.67857142...	U1	MB - AL	2005-07-07	EPA - Defeito na parti...	Verificar a bobina da contatora XA4. Substituí-la se é necessário. Efetuar testes de operação.
12	0.67857142...	U1	MB - AL	2009-04-26	S - Defeito na sucção	Verificar eixo da MB. Verificar estado do rotor e parafusos de fixação do rotor.
51	0.64285714...	U5	MB - AJ	2009-10-29	RA - Ruído anormal	Verificar estado dos rolamentos da MB. Lubrificar os rolamentos da MB. Substituir os rolamentos

Figura 5. 3- Casos recuperados com um valor de pesos inicial para o teste 3

Nas situações recuperadas se observa que, se bem é certo, o último caso recuperado coincide com o tipo de evento anormal do caso em questão, este deveria ser o primeiro na escala com melhor valor de similaridade.

Os dois primeiros casos não correspondem com o tipo de falha do caso em questão e seriam descartados na etapa de revisão de casos. O cálculo da similaridade para estes casos (casos 11 e 12) se dá da seguinte forma:

Similaridade local (caso 11, 12): tipo de equipamento: 1; equipamento:1; UGH: 1; falha: 0;

A similaridade global para os dois casos seria calculada com base na Equação 2.2:

$$\begin{aligned} sim(Q, C) &= \frac{\sum_{i=1}^n f(Q_i, C_i) \times W_i}{\sum_{i=1}^n W_i} = \frac{1 \times 0.9 + 0 \times 0.9 + 1 \times 0.6 + 1 * 0.4}{0.9 + 0.9 + 0.4 + 0.6} \\ &= 0.6785 \end{aligned}$$

Para a mesma consulta, se os pesos são modificados assim: tipo de equipamento: 1.0; tipo de falha: 1.0; UGH: 0.3 e equipamento: 0.6; tem-se uma recuperação de casos como os mostrados na Figura 5.4.

Consulta (caso atual)

UGH: U1 T.Equipamento: MB Equipamento: MB - AL Código: RA * Data: 2012-10-01

* Ruido Anormal

Casos mais similares recuperados

Cas...	Similaridade	UGH	Equipame...	Data	Descricao da Falha	Decisao
51	0.689655172413...	U5	MB - AJ	2009-10-29	RA - Ruido anormal	Verificar estado dos rolamentos da MB. Lubrificar os rolamentos da MB. Substit
54	0.689655172413...	U5	MB - AK	2009-10-27	RA - Ruido anormal	Verificar e corrigir defeitos no acoplamento da MB.
11	0.655172413793...	U1	MB - AL	2005-07-07	EPA - Defeito na partida automatica	Verificar a bobina da contatora XA4. Substituí-la se é necessário. Efetuar teste

Figura 5. 4- Casos recuperados com valores de pesos modificados para o teste 3

Nesta nova recuperação de casos se assegura que as situações retornadas, com melhor similaridade, estejam dentro do domínio do equipamento e do evento anormal que procura o usuário, estabelecendo que adequadas repostas sejam fornecidas pelo sistema, aumentando a credibilidade do mesmo. No caso ID 11, com similaridade (0.65) o tipo de falha não coincide e, portanto, no processo de revisão o caso será descartado.

5.1.1.4 – Observações gerais da recuperação de casos

Nos três testes apresentados, a recuperação de casos foi ótima. A importância de definir poucos atributos como índices, ajuda que a busca de casos seja mais simples. Quando o caso coincide 100%, a recuperação foi ótima, o caso 100% similar foi encontrado em sua totalidade.

O segundo teste mostrou uma das grandes vantagens dos sistemas RBC: a capacidade de procurar ou construir soluções em situações que não estejam na base de conhecimento do sistema. Baseado no conceito de similaridade, o sistema RBC procura não só os casos que correspondem completamente a uma consulta dada como no teste 1, também recupera casos cuja utilidade possa ser quantificável e sua solução aplicável ao caso em questão. Isto é uma diferença clara entre uma consulta direta no banco de dados e uma consulta no sistema RBC: para que uma situação seja recuperada no banco de dados, ela deve coincidir, exatamente, com alguma informação contida no banco, se a informação requerida não está no banco de dados nenhum dado é retornado.

A importância do valor de pesos é fundamental na hora da recuperação de casos. Qualquer modificação no valor dos pesos implica uma alteração nos casos recuperados. O fato é que, os índices de tipo de equipamento e o tipo de falha, tenham o peso mais alto radica na sua importância e, também, no fato que a coincidência nestes atributos implica assegurar o 66% da similaridade de um caso. Isto, porque se estes atributos coincidem entre um caso e a consulta atual, implicará que a consulta se localize em um domínio de equipamentos e se associe um tipo de falha padrão definido no conjunto dos eventos anormais registrados e que, seguramente, terá uma falha registrada no domínio de tarefas de manutenção. Os outros atributos permitem aproximar, ainda mais, a consulta definida com algum caso na livreria de casos.

5.2.2 – Etapas de reuso e revisão de casos

5.2.2.1 – Considerações gerais

No processo de reuso ou adaptação de casos, está implícita a reputação do sistema RBC, já que é aqui onde se constrói uma resposta à consulta feita pelo usuário. Como foi visto no

capítulo 2, existem muitos algoritmos para executar esta etapa, que vão desde um reuso direto da solução do caso, uma mudança simples de atributos ou a implementação de regras complexas de adaptação que permitam modificar o caso à situação em análise.

No sistema proposto neste trabalho, a etapa de reuso se realiza adaptando totalmente a resposta que fornece o melhor caso. A aproximação total à solução do problema, segundo este critério, é muito alta. Se a falha está registrada no domínio específico de eventos anormais do equipamento, tal situação deverá ter uma ação corretiva, também, registrada no conjunto das soluções. Além disso, o emprego das OS para a construção dos casos lhe fornecerá uma credibilidade muito grande ao sistema, pois são as ações com as que lidam diariamente os operadores na usina.

O anterior implica que o sistema se torna muito eficaz na recuperação de situações similares, mas, ao mesmo tempo, o sistema se torna rígido, pois, só as falhas registradas poderão ser associadas à sua respectiva ação de manutenção; se algum evento não pertence ao domínio de falhas definidas, uma ação corretiva não poderá ser associada a ele. As seguintes são também outras razões para considerar o reuso total da solução:

- Os equipamentos foram classificados segundo um tipo de máquina e, portanto, muitas das OS aplicadas em um determinado equipamento são também aplicáveis a outro, mesmo assim, tenham diferentes características, tal como foi visto na seleção das informações das OS, onde uma determinada OS era executada em similares dispositivos.
- Como mencionado, os sistemas e subsistemas, nas 5 unidades geradoras em Balbina são exatamente iguais e, assim sendo, os equipamentos que fazem parte destes sistemas são similares, de tal forma que: se uma falha foi detectada em uma MB-01 da UGH, esta pode ser tratada com uma ação similar a como foi tratada uma falha que aconteceu na MB - 01 da UGH 4.
- Por último, o fato da padronização de falhas identificadas nos equipamentos, facilita o reconhecimento das ações que permitiram reverter os eventos anormais apresentados.

Essas razões, principais, fazem com que a resposta final do sistema, ante um caso consultado, possa ser aproximada em seu total com a solução do melhor caso recuperado. É por isso que a percepção do operador ou especialista é importante na etapa de revisão de

casos, já que permitirá descartar alguns casos recuperados cuja solução não seja suficiente, não complementar ou, não satisfaça completamente o evento em questão.

No protótipo implementado, as etapas de reuso e revisão se realizam na mesma tela. Os casos recuperados e o caso atual são mostrados na tela com seus respectivos atributos, admitindo comparar, atributo por atributo, as situações recuperadas com a situação em questão. No sistema, antes de continuar completamente com o processo de reuso, primeiro o usuário analisa as possíveis soluções que pode fornecer o protótipo. Se as soluções são viáveis, o processo continua, e, o caso recuperado é adaptado à consulta definida. Em caso contrário, o usuário descarta os casos e pode criar um evento novo ou sugerir tarefas de manutenção para o caso em questão.

Embora a solução do melhor caso recuperado seja totalmente reusada, alguns atributos do evento retornado são adaptados à situação atual. Ditos atributos são o nome do equipamento e a unidade geradora hidráulica reportada. Os outros atributos de tipo de equipamento e o evento anormal reportado não podem ser modificados, estes asseguram que a resposta esteja dentro do domínio de pesquisa do usuário pelas razões já analisadas. Se, por exemplo, o tipo de falha pudesse ser adaptado, haveria uma grande incongruência na resposta do sistema, já que seria reusada uma solução de um tipo de falha a outro tipo de falha diferente, isso afetaria, diretamente, a credibilidade do sistema. É por isso que, qualquer caso recuperado e cujo evento anormal não coincida com o caso em questão, deverá ser descartado.

5.2.2.2 - Teste 1

Analisando as etapas de reuso e revisão de casos no teste 1 definido na seção anterior, os três casos com melhores casamentos se mostram na tela da Figura 5.1. Continuando com o processo de reuso e revisão de casos para este teste, se obtém a tela da Figura 5.5.

Nesta situação, os casos 3 e 4 foram descartados pelo usuário tendo em vista que, segundo a premissa anterior, ao não coincidirem com o tipo de falha, estes casos se escapam do escopo da consulta. O caso 15, o evento com similaridade total, tem uma alta probabilidade de ser a mesma situação e, assim, a solução é muito confiável e será reusada 100% segundo o critério do operador.



Figura 5. 5 - Tela de reuso-revisão de casos para o teste 1

5.2.2.3 - Teste 2

Neste teste se tem 3 casos recuperados, mostrados na tela da Figura 5.6. O caso com melhor valor de similaridade (0.79) fornece a solução mais útil para o caso em questão. No entanto, tal como se observam na figura, os seguintes casos (15 e 35) também registram eventos de problema na sucção na motobomba, em diferentes equipamentos e UGH.

Nestas situações, quando se coincide com o tipo de falha, fica a critério de o operador analisar se a solução também é viável. No caso do evento com melhor similaridade, tem um valor maior, dado que a busca de casos coincidiu com a unidade geradora onde ocorreu o evento, o qual o acerca mais ao evento de estudo em questão.

Adaptação de casos

Descrição do caso

Atributos	UGH	T.Equipamento	Equipamento	Codigo	Similaridade	Descartar caso	Caso util
Caso atual:	U2	MB	MB - AI	S	-	-	-

Casos recuperados - Selecionar caso...

<input type="radio"/>	20	U2	MB	MB - AL	S	0.793103448...	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
<input type="radio"/>	12	U1	MB	MB - AL	S	0.689655172...	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="radio"/>	35	U3	MB	MB - AK	S	0.689655172...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Decisao - Caso ID: 35

Verificar defeitos na valvula de retenção. Foi confeccionado parte da valvula de retenção que estava danificado.

Figura 5. 6 - Tela de reuso-revisão de casos para o teste 2

5.2.2.4 - Teste 3

No último teste (teste 3), se os valores dos pesos se mantiveram fixos, os dois primeiros casos deveriam ser descartados pelo usuário, pois, nenhum deles fornece uma correspondência direta em relação ao tipo de falha do caso em questão e, por isso, haveria uma incongruência com o tipo de falha, a pesar de que o sistema recupera os casos com melhor similaridade.

Quando o valor dos pesos foi modificado, se obteve a tela da Figura 5.7. Neste caso, a recuperação dos eventos anormais foi melhorada e, pelo menos, se assegurou que os casos recuperados correspondam com o tipo de evento anormal registrado no caso. Aqui, como já foi mencionado dependendo do contexto do evento anormal, alguns dos casos recuperados deverão coincidir com o caso atual.



Figura 5. 7 - Tela de reuso-revisão de casos para o teste 3

5.2.3 – Etapa de retenção de casos

Nesta seção será analisada a etapa de retenção de casos. Ela consiste em guardar na base de conhecimento do sistema um caso que tenha sido resolvido e, cuja solução satisfaça ao usuário e ao evento em questão. No protótipo RBC apresentado neste trabalho, se mostrará, por meio, de um teste, como se executa este processo. jCOLIBRI facilita este processo com o uso da ferramenta mapeo-relacional, Hibernate. Seja a seguinte consulta definida pelo usuário:

- Tipo de equipamento: MB; falha: VF; nome do equipamento: MB-AG; UGH: 3;

A motobomba MB-AG, localizada na unidade geradora hidráulica 3 (UGH 3) do sistema de regulação de velocidade, apresenta um problema de vazamento de óleo pelos filtros. Deseja-se saber qual é a melhor ação, mais habitual, para a solução deste problema. Os casos recuperados se mostram na Figura 5.8.



Figura 5. 8 - Casos recuperados para o teste 4

A decisão é muito simples, portanto, o usuário deseja adicionar mais informações que complementem a decisão do caso. O usuário adiciona, então, a informação que complementar à ação de manutenção sugerida pelo sistema: “Verificar e corrigir vazamentos pela válvula de comutação do filtro da MB”, tal como se mostra no texto ressaltado na tela da Figura 5.9. Na mesma tela se mostra a consulta feita pelo usuário e a solução reusada do caso recuperado e revisado pelo especialista.

Como foi dito, o objetivo da recuperação de casos é conseguir que o novo caso, ou o caso complementado fique disponível na base de casos, a disposição de novas consultas que permitam a solução de outras situações similares. Ao fazer *click* no botão “aplicar” o caso é guardado na base de conhecimento do sistema. O novo caso aparece na base de casos do sistema, com seu respectivo ID e o campo decisão, modificado com as respectivas sugestões feitas pelo usuário que permitem a retroalimentação do sistema (Figura 5.10).

Caso ID: 6 adaptado ao caso atual

Descrição do problema

Dados de entrada

Unidade Geradora:	U3	Tipo de falha:	VF
T. Equipamento:	MB	Descrição da falha:	Vazamentos pelo filtro
Equipamento:	AG	Data:	2012-10-04

Descrição do problema

A motobomba MB - AG localizada na unidade geradora elétrica U3 apresenta um problema de 'Vazamentos pelo filtro'

Decisão proposta

Verificar vazamentos pelos filtros da MB. **Verificar e corrigir vazamentos pela válvula de comutação do filtro da MB.**

Resultado

Operador: Departamento:

Data Inicio: Data Final:

Hora Inicio: Hora Final:

Decisão efetiva: Sim Não Sugestões:

Padrão de falha correito: Sim Não Sugestões:

Retenção

Caso adaptado:1 Guardar caso com ID:

Figura 5. 9 - Etapa de retenção de casos para o teste 4

MySQL Query Browser - Connection: alvares@ 164.41.17.25:3306 / simprebal

Arquivo Editar View Query Script Ferramentas Janela MySQL Enterprise Ajuda

Go back Next Refresh Execute

Resultset 2

id...	ugh	tip...	no...	tipo...	descricao_falha	data	decisao	result
58	U3	MB	AG	VF	Vazamentos pel...	2012-10-04	Verificar vazamentos pelos filtros da MB. Verificar e corrigir vazamentos pela válvula de comutação do filtro da MB.	NULL
57	U5	MB	AL	S	Defeito na sucção	2006-01-09	Efetuar aperto na gaxeta da MB e verificar obstruções na tubulação de sucção.	NULL
56	U5	MB	AL	EPA	Defeito na partid...	2009-07-19	Verificar defeitos na contatora de intertravamento na interligação da MB. Substitui-la se é necessário. Efetuar testes	NULL
55	U5	MB	AK	S	Defeito na sucção	2009-10-27	Verificar o acoplamento 4F da MB e trocá-lo se é necessário. Fazer lubrificação da mesma.	NULL
54	U5	MB	AK	RA	Ruido anormal	2009-10-27	Verificar e corrigir defeitos no acoplamento da MB.	NULL
53	U5	MB	AK	EC	Defeito elétrico	2006-06-01	Verificar a bobina da contatora XAL-D. Efetuar testes de operação.	NULL
52	U5	MB	AK	EC	Defeito elétrico	2007-08-27	Verificar a contatora XA4. Substituir a contatora se é necessário. Efetuar testes funcionais e de operação.	NULL
51	U5	MB	AJ	RA	Ruido anormal	2009-10-29	Verificar estado dos rolamentos da MB. Lubrificar os rolamentos da MB. Substituir os rolamentos da MB se é necess...	NULL
50	U5	MB	AI	VSM	Vazamento pelo...	2009-07-18	Verificar estado das válvulas borboletas na entrada e retorno da tubulação de óleo. Substitui-las se é necessário.	NULL
49	U5	MB	AI	VSM	Vazamento pelo...	2008-11-20	Efetuar a usinagem do espelho do selo mecânico. Verificar rolamentos SKF 6313Z, o anel de vedação e o-ring da M...	NULL
48	U5	MB	AF	EC	Defeito elétrico	2009-05-24	Verificar a contatora C2A. Substituir a contatora se é necessário. Efetuar testes funcionais e de operação.	NULL
47	U5	MB	AE	EC	Defeito elétrico	2009-07-18	Verificar a contatora C1A. Substituir a contatora se é necessário. Efetuar testes funcionais e de operação.	NULL
46	U4	MB	AL	EC	Defeito elétrico	2005-08-25	Verificar a contatora XA4. Substituir a contatora se é necessário. Efetuar testes funcionais e de operação.	NULL
45	U4	MB	AK	FPA	Defeito na partid...	2008-04-06	Verificar a contatora XF4. Substituir a contatora se é necessário. Efetuar testes operacionais	NULL

Figura 5. 10 - Base de casos atualizada com a situação nova corrigida pelo usuário

6 – CONCLUSÕES, CONTRIBUIÇÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

6.1 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta dissertação explorou a técnica de IA conhecida como RBC enfocada ao desenvolvimento de um sistema de gestão de manutenção corretiva e baseada em condição aplicada à usina hidrelétrica de Balbina. Como caso de estudo foi analisado o desenvolvimento de um protótipo RBC como exemplo da implementação do sistema de manutenção corretiva aplicada a motobombas da usina hidrelétrica de Balbina. O protótipo permite sugerir ou recomendar tarefas de manutenção ao operador a partir de um conjunto de eventos anormais, identificados como os mais recorrentes nos equipamentos de uma usina hidrelétrica.

A base de conhecimento do sistema foi construída a partir das informações históricas do domínio de aplicação, fornecendo credibilidade e validade às tarefas de manutenção sugeridas pelo sistema. Os diferentes testes realizados mostram a execução das distintas etapas típicas do RBC, revelando uma adequada resposta de acordo com os objetivos sugeridos para sua implementação.

6.2 – CONCLUSÕES

- Foi demonstrado, através da metodologia proposta e o protótipo implementado, que a manutenção de equipamentos é um domínio adequado para a aplicação de técnicas de IA, em especial, a técnica RBC, devido sua alta presença de dados históricos, dados em tempo real da planta e, além disso, é uma técnica que simula fielmente a forma em que um operador resolve um problema baseado na experiência ou em situações passadas.
- A representação do conhecimento do sistema fica mais fácil por meio de casos, sem chegar ao ponto de ser trivial (dado que a identificação dos atributos do caso e a estrutura do mesmo dependem fortemente da capacidade de abstração do projetista). No entanto, resulta mais fácil preencher campos relacionados com os atributos específicos de um problema (como o tipo de equipamento, tipo de falha, decisão, data de ocorrência do evento, entre outros) que a rigurosidade típica de outras sintaxes (por

exemplo, regras) para representar estas mesmas situações no domínio de aplicação tratado neste trabalho.

- O fato de usar as ordens de serviço da usina hidrelétrica para elaborar e documentar os casos aporta credibilidade e veracidade nas repostas do sistema, pois são essas ações que registram, aplicam e executam os operadores no cotidiano da planta.
- Para que o sistema RBC forneça soluções adequadas e confiáveis, uma boa etapa de recuperação deve ser feita; isto alude muitas variáveis como: a aplicação das medidas de similaridade; a organização dos casos em memória e; como foi visto na etapa de testes, uma adequada atribuição de valores de pesos aos atributos correspondentes. Se estes fatores não estão bem definidos, as soluções do sistema serão, potencialmente inconsistentes.
- O fato de que novos casos possam ser guardados na base de dados - assim como alterações, atualizações e demais modificações na informação contida nos mesmos - implica uma grande vantagem em relação à aprendizagem do sistema: os casos guardados ficam na base de conhecimento do sistema disponíveis para fornecer soluções a novas consultas solicitadas pelo usuário.

6.3 – CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO

- ✓ O aproveitamento da informação histórica do domínio de aplicação (ordens de serviço). Neste trabalho serviram como informação principal para a documentação dos casos, identificação de padrões de falhas e estabelecimentos das decisões de manutenção.
- ✓ A padronização e codificação de falhas identificadas nas OS da usina hidrelétrica, o qual permite resolver muitos problemas relacionados com o registro e documentação dos eventos anormais e as distintas tarefas de manutenção a ser executadas, dado que nos documentos analisados não existe um consenso geral à hora de registrar estas situações gerando falta de uniformidade na informação registrada, e todos os eventos que podem ser considerados padrões são descritos segundo cada percepção do operador.
- ✓ O desenvolvimento das distintas GUI para o protótipo RBC implementado neste trabalho, permite a fácil interação do usuário com o sistema proposto, dado que o RBC é uma abordagem que implica e requer a interação com o mesmo. Além disso, o enfoque RBC é uma metodologia que, ao longe de seus estágios, vai retornando informações que são importantes apresentar e seguir por parte do usuário.

- ✓ Tendo em conta que quantidade de casos de casos recuperados pode ser definida pelo usuário, tem-se mais opções para analisar por parte do especialista durante a revisão de casos. Isto é importante, dado que uma determinada falha pode ter duas ou mais tarefas de manutenção.

6.4 – SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Em relação à metodologia:

- A forma de agrupar equipamentos de acordo às famílias identificadas na usina hidrelétrica estabelece um domínio de conhecimento sobre um tipo de equipamento. Mas, deve-se aprofundar e aplicar mais metodologias de identificação de falhas, como árvores de decisão, FTA, e, por exemplo, focar o estudo analisando os componentes e partes que compõem o equipamento. A abordagem BOM, analisada na seção 2.3.1, por exemplo, poderia ser aplicada analisando as distintas peças e partes da máquina e identificando falhas e as respectivas ações corretivas para ser contextualizados na forma de casos.

Em relação à representação de conhecimento:

- Ao estabelecer um domínio de conhecimento sobre um tipo de equipamento se facilita a identificação de um vocabulário de conceitos e a criação de todo um domínio de termos relacionados com a identificação de falhas e tarefas de manutenção, podendo estabelecer-se uma ontologia. jCOLIBRI facilita e dispõe de módulos para representação de conhecimento mediante ontologias que facilitam a implementação do mesmo.

Em relação ao algoritmo RBC:

- Podem ser testados novos algoritmos para recuperação de casos, como testar novas medidas de similaridade tanto locais como globais. Podem-se testar também organizações em memória dos casos baseados em árvores, hierarquias ou árvores K-D.

- Podem-se elaborar casos baseados na informação *on-line* disponível em planta.
- Pode-se implementar um modulo de RBC textual, que não baseia sua descrição através de atributos como foi feito neste trabalho, senão, através da descrição textual do problema ou observação feita pelo usuário.
- Para melhorar o processo de aprendizagem do sistema RBC, o sistema deveria ser validado, diretamente, na usina hidrelétrica, avaliado pelos operadores da mesma, preenchendo o campo “Resultados”, o qual é fundamental para avaliar as recomendações de manutenção sugeridas pelo sistema, e assim, tendo mais certeza nas recomendações de manutenção sugeridas pelo sistema e completando a informação relativa aos casos.

Em relação à aplicação de técnicas da IA:

- Pode-se analisar a possibilidade de integrar ou combinar o módulo RBC com outra técnica da IA, por exemplo, os sistemas especialistas ou baseados em regras, para constituir um tipo de raciocínio mais robusto e completo, aumentando as situações armazenadas na base de conhecimento e o domínio de alcance do sistema. As redes neurais artificiais também são uma importante opção para o reconhecimento e padronização de falhas, dado que permitiriam verificar, através de padrões de falhas, se um equipamento está em um estado de risco, ou submetido a algum processo de degradação que precise uma determinada ação de manutenção a ser tomada pelo usuário.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aadmodt, A. e Plaza, E. (1994). “Case-Based Reasoning: Foundational Issues, Methodological Variations, and System Approaches.” *AI Communications*. IOS Press, Vol. 7: 1, pp. 39-59.
- Alape, L.F., Moreno, I.P., Álvares, A.J., Amaya, E.J. (2011a). “A Methodology Based In Case-Based Reasoning to Build a Knowledge-Base Applied to Failure Diagnosis System of Hidrogenerators Machinery.” *Proceedings of COBEM 2011, 21st Brazilian Congress of Mechanical Engineering*, october 24 – 28, Natal, RN, Brazil.
- Alape, L.F. Moreno, I.P., Álvares, A.J., Amaya, E.J., (2011b). “Diseño y Construcción de una Base de Conocimiento para un Sistema Inteligente de Mantenimiento Aplicado a Equipos de Plantas Hidroeléctricas Basado en el Enfoque RBC”, *X Congresso Ibero-Americano em Engenharia Mecânica, CIBEM10*, Porto, Portugal.
- Almeida, M. T. (2007). “Manutenção Preditiva: Confiabilidade e Qualidade”. MTA Engenharia de Vibrações. <http://www.mtaev.com.br/download/mmt1.pdf>.
- Álvares, A.J., Amaya, E.J. (2010). “SIMPREGAL: An Expert System for Real-Time Fault Diagnosis of Hydrogenerators Machinery.” *Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), IEEE Conference*, 13 – 16 September.
- Álvares, A.J., Amaya, E.J., Souza, R.Q., Tonaco, R.P., Lima, A.A., (2009). “Sistema Inteligente de Manutenção Baseada em Condição para Usina Hidrelétrica de Balbina.” *Anais do V congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica – V CITENEL*, Belém/PA, 22 a 24 de Junho.
- Álvares, A.J., Amaya, E.J., Tonaco, R.P. (2007a). “Sistema de Manutenção Baseada em Condição para Usina Hidrelétrica de Balbina.” *Congresso de Computação Aplicada CAIP'2007*.
- Álvares, A.J., Gudwin, R.R., Souza, R.Q., Amaya, E.J., Tonaco, R.P. (2007b). “An Intelligent Kernel for Maintenance System of a Hydroelectric Power Plant”, In: *COBEM 2007 – 19th International Congress of Mechanical Engineering: TT1681*, Anais, Brasília, Brazil.
- Álvares, A.J., Amaya, E.J., (2007), “Different control strategies used in didactic plant PD-3 of SMAR through OPC technology.” *19th International Congress of Mechanical Engineering*, november 5 – 9, Brasília, DF.

- Amaya, E.J. (2008). “Aplicação de Técnicas de Inteligência Artificial no Desenvolvimento de um Sistema de Manutenção Baseada em Condição.” Dissertação de Mestrado em Sistemas Mecatrônicos, Publicação ENM.DM-21A/08, Departamento de Engenharia Mecânica, UnB, Brasília, DF, 172p.
- Assali, A. A., Lenne, D. e Debray, B. (2009). “Heterogeneity in Ontology-Based CBR Systems.” In: *Information Reuse & Integration, 2009. IRI'09*, Las Vegas, NV, pp. 324-329.
- Begum, S., Ahmed, M.U., Funk, P., Xoing, N. e Folke, M. (2011). “Case-Based Reasoning Systems in the Health Sciences: A Survey of Recent Trends and Developments.” In: *Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews*, vol. 41, pp. 421-434.
- Berenji, H. R. e Wang, Y. (2006). “Case-Based Reasoning for Fault Diagnosis and Prognosis.” In: *IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, pp. 1316-1321.
- Bottrighi, A., Leonardi, G., Montani, S., Portinale, L. (2009). “Extending the jCOLIBRI Open Source Architecture for Managing High-Dimensional Data and Large Case Bases.” In: *21st IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence*, pp. 269-275.
- BSI, (2011), “Web site: <http://www.standardscentre.co.uk>”, British Standard Institution.
- Bosa, J. L. (2009). “Sistema Embarcado para a Manutenção Inteligente de Atuadores Elétricos.” Dissertação de mestrado. Programa de Pós-graduação em Computação. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Cunha, J. B. (2002), “Raciocínio Baseado em Caso: Uma Aplicação em Manutenção de Maquinas e Equipamentos.” Dissertação de mestrado profissionalizante em engenharia, Escola de engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Elmasri, R. e Navathe, S. (2000). “Sistemas de Bases de Dados. Conceptos Fundamentales.” Ed. Addison-Wesley Iberoamericana. Segunda Edición, pp. 887.
- Gruber T.R., “A Translation Approach to Portable Ontology Specifications,” *Knowledge Acquisition*, 5:199-220, 1993.
- Gu, Y.-J., Dong, X.-F. e Yang, K. (2009). “Study on Maintenance Method Intelligent Decision Support System Used for Power Plant Equipment.” In: *2009 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*, pp. 1-4.
- Kendall, K. E., e Kendall, J. A. (2005). “Systems Analysis e Design.” Pearson prentice Hall, pp 572.

- Khazraei, K. e Deuse, J. (2011). “A Strategic Standpoint on Maintenance Taxonomy.” *Journal of Facilities Management*, vol. 9, pp. 96-113.
- Kim, H.J., Bae, C.H., Kim, S.H., Lee, H.Y., Park, K.J., Suh, M.W. (2009). “Development of a Knowledge-Based Hybrid Failure Diagnosis System for Urban Transit.” In: *International Journal of Automotive Technology*, vol. 10, pp. 123-129.
- Kim, C., Weston, R. H., Hodgson, A., Lee, K. (2002). “The Complementary Use of IDEF and UML Modeling Approaches.” In: *Computers in Industry* 50, pp.35 – 56.
- Kraus, H., M. (2009). “Ferramenta para Desenvolvimento de Sistema de Raciocínio Baseado em Casos.” Dissertação de Mestrado em Computação Aplicada. Universidade do Vale do Itajaí.
- Lee, J., Ni, J., Djurdjanovic, D., Qiu, H., Liao, H. (2006). “Intelligent prognostics tools and e-maintenance.” *Journal Computers in Industry*, vol. 57, pp. 476-489.
- Matelli, J.A., Bazzo, E., Silva, J.C. (2011). “Development of a Case-Based Reasoning Prototype for Cogeneration Plant Design.” *Applied Energy*, vol.88, pp. 3030-3041.
- Mobley, K. R., Higgins, L.R., Wikoff, D. J. (2008). “Maintenance Engineering Handbook.” McGrawHill, Estados Unidos da America, 7 Edição.
- Moreno, I.P. (2012). “Metodologia para Monitoramento Inteligente de Condição de Máquina: Uma Abordagem Usando Funções de Pertinência Fuzzy” Dissertação de Mestrado em Sistemas Mecatrônicas. Departamento de Mecânica, UnB, Brasília, 153p.
- Muller, A., Marquez, A. C., Iung, B. (2008). “On the concept of e-maintenance: Review and current research.” *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 93, pp. 1165-1187.
- Na, G., Songzheng, Z. e Heng, X. (2008). “Research of Fault Diagnosis Technology Based on BOM and CBR.” In: *International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCOM'08)*, Dalian, China, pp. 1-4.
- Nadakatti, M.M. (2006). “A Knowledge Based Approach.” In: *Manufacturing Engineer*, vol.85, pp. 24-47.
- NBR-5462 (1994). “Confiabilidade e Mantenabilidade.” Terminologia, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, Brasil.
- Nilsson, M. e Sollenborn, M. (2004). “Advancements and Trends in Medical Case-Based Reasoning: An Overview of Systems and System Development.” In: *Proceedings of the 17th International Flairs Conference (Flairs'04)*.

- Niu, G., Yang, Bo-Suk., Pecht, M. (2010). “Development of an Optimized Condition-Based Maintenance System by Data Fusion Reliability-Centered Maintenance.” *Reliability Engineering and System Safety*, vol. 95, pp. 786 – 796.
- Olsson, E. (2009). “Fault Diagnosis of Industrial Machines using Sensor Signals and Case-Based Reasoning.” School of Innovation, Design and Engineering. Malardalen University, Vasteras, Sweden.
- Pinjala, S.K., Pintelon, L., Vereecke, A. (2006). “An Empirical Investigation on the Relationship Between Business and Maintenance Strategies.” *International Journal of Production Economics*, vol. 104, pp. 214-229.
- Plotegher, S., L., Fernandes, M., M. “Raciocínio Baseado em Casos Aplicado a um Sistema de Diagnóstico Remoto.” *XXV Congresso da Sociedade Brasileira de Computação*.
- Prentzas, J. e Hatzilygeroudis, I. (2007). “Categorizing Approaches Combining Rule-Based and Case-Based Reasoning.” In: *Expert System*, vol.24, pp. 97-122.
- Quingfeng, W., Wenbin, L., Xin, Z., Jianfeng, Y., Quingbin, Y. (2011). “Development and Application of Equipment Maintenance and Safety Integrity Management System.” *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 24, pp. 321-332.
- Recio-Garcia, J., A. (2008). “jCOLIBRI: Una Plataforma Multi-Nivel para la Construcción y Generación de Sistemas de Razonamiento Basado en Casos.” Tesis doctoral en informática. Facultad de Informática. Universidad Complutense de Madrid, Espanha, 333p.
- Recio-Garcia, J. A., Diaz-Agudo, B., Gonzalez-Calero, P. (2008). jCOLIBRI 2 Tutorial. *Group for Artificial Intelligence Applications*. Universidad Complutense de Madrid.
- Sanz, S.G. (2009). “D²ISCO: Diseño de Sistemas CBR Deliberativos Distribuidos con jCOLIBRI.” Proyecto Fin de Master en Sistemas Inteligentes. Universidad Complutense de Madrid.
- Saxena, A., Wu, B. e Vachtsevanos, G. (2005). “Integrated Diagnosis and Prognosis Architecture for Fleet Vehicles Using Dynamic Case-Based Reasoning.” In: *Autotestcon, 2005. IEEE*, pp. 96-102.
- Souza, Q. (2008). “Metodologia e Desenvolvimento de um Sistema de Manutenção Preditiva Visando à Melhoria da Confiabilidade de Ativos de Usinas Hidrelétricas.” Dissertação de Mestrado em Sistemas Mecatrônicas. Departamento de Mecânica, UnB, Brasília, 179p.

- Souza, R. Q. e Álvares, A. (2007) “FMEA and FTA Analysis for Application of the Reliability-Centered Maintenance Methodology: Case Study On Hydraulic Turbines.” *COBEM 2007*, Brasilia, DF.
- Tonaco, R.P. (2008). “Metodologia para Desenvolvimento de Base de Conhecimento Aplicada à Manutenção Baseada em Condição de Usinas Hidrelétricas.” Dissertação de Mestrado em Sistemas Mecatrônicas. Departamento de Mecânica, UnB, Brasília, 179p.
- Vachtsevanos, G., Lewis, F. L., Roemer, M., Hess, A., Wu, B. (2006). “Intelligent Fault Diagnosis and Prognosis for Engineering Systems.” Jhon Wiley & Sons, Inc., Estados Unidos da America, pp. 434.
- Wang, J. e Qi, M. (2011). “Application of Intelligent Fault Diagnosis Technology in NC Machine Tool Fault Diagnosis.” In: *International conference on electronics and optoelectronics (ICEOE 2011)*, Dalian, China, pp. V4-424 – V4-427.
- Wangenheim, C.H. e Wangenheim, A. (2003). “Raciocínio Baseado em Casos.” Ed. Manole, São Pablo, Brazil, pp. 293.
- Yao, Ch., Chen, X., Wang, X., Zhou, Y. (2009). “Research on RBC-Based Intelligent System’s Application in Equipment Intelligent Maintenance.” In: *Second International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation, ICICTA '09*, Changsha, China, vol.1, pp. 456-459.
- Yee, P.S., Kiong, L., Ch., Soong, L., W. (2009). “Adaptive Case-Base Reasoning for Fault Diagnosis.” In: *International Conference of Soft Computing Recognition, SOCPAR '09*. Malacca, Malaysia, pp. 678-681.
- Zhou, M., Chen, Z., He, W., Chen, X. (2010). “Representing and Matching Simulation Cases: A Case-Based Reasoning Approach.” *Computer and Industrial Engineering*, vol.59, pp. 115-125.

APÊNDICES

APÊNDICE A – CONJUNTO DE CASOS PARA O PROTÓTIPO RBC

Na Tabela A.1, encontra-se o conjunto de casos definidos para a construção da base de casos do sistema RBC, baseados na identificação – a partir das ordens de serviço - das situações de falha com sua respectiva decisão.

Tabela A. 1 – Tabela de casos para o protótipo RBC⁷

Descrição do equipamento					Descrição do problema		Descrição da solução
ID	UGH	Tipo	Nome	Data	Código	Evento	Decisão
1	U1	MB	02	2008-02-28	EPA	Defeito na partida automática	Verificar a contatora D32 da MB. Substituir a contatora se é necessário. Efetuar testes funcionais e de operação.
2	U1	MB	02	2008-02-28	VP	Vazamentos pelo pressotato	Verificar a película do pressotato. Substituir a película do pressotato se é necessário. Verificar estado do pressotato.
3	U1	MB	AE	2008-03-30	VSM	Vazamentos pelo selo mecânico	Efetuar manutenção corretiva no selo mecânico da MB. Efetuar inspeções nas tubulações de entrada de água dos alfa-lavais. Verificar o estado das mesmas.
4	U1	MB	AE	2009-12-12	VSM	Vazamentos pelo selo mecânico	Verificar estado do selo mecânico. Corrigir anormalidades no selo mecânico. Substituir o selo mecânico se é necessário. Efetuar acabamento nas partes girantes.
5	U1	MB	AF	2008-04-26	VSM	Vazamentos pelo selo mecânico	Verificar os o-rings da MB. Foi feito acabamento nas superfícies vedantes e colhidos dados diagonais do selo mecânico da MB.
6	U1	MB	AG	2009-03-08	VF	Vazamentos pelo filtro	Verificar vazamentos pelos filtros da MB.

⁷No formato de caso falta o campo Resultados o qual no aparece devido a que o sistema ainda não foi testado pelos operadores da usina hidrelétrica

7	U1	MB	AI	2009-11-01	EC	Defeito elétrico nas contoras	Verificar contatora 63LY.X1. Substituir a contatora se é necessário. Realizar testes funcionais e de operação
8	U1	MB	AI	2009-03-08	EC	Defeito elétrico nas contoras	Verificar contatora C1A. Substituir a contatora se é necessário. Realizar testes funcionais e de operação
9	U1	MB	AJ	2006-01-03	ECO	Defeito na comutação automática	Verificar a bobina da contatora XT1C1. Efetuar testes funcionais e de operação.
10	U1	MB	AJ	2009-05-08	ECO	Defeito na comutação automática	Verificar a bobina da contatora 63LYX1. Efetuar testes funcionais e de operação.
11	U1	MB	AL	2005-07-07	EPA	Defeito na partida automática	Verificar a bobina da contatora XA4. Substituí-la se é necessário. Efetuar testes de operação.
12	U1	MB	AL	2009-04-26	S	Defeito na sucção	Verificar eixo da MB. Verificar estado do rotor e parafusos de fixação do rotor.
13	U2	MB	01	2006-09-03	EPA	Defeito na partida automática	Verificar defeito na chave normal/teste. Substituir a mesma se é necessário.
14	U2	MB	01	2005-07-24	EPA	Defeito na partida automática	Verificar a bobina da contatora 1C1. Substituí-la se é necessário. Efetuar testes de operação.
15	U2	MB	01	2009-06-30	VSM	Vazamento pelo selo mecânico	Verificar os retentores do acoplamento da MB. Substituir retentores se é necessário.
16	U2	MB	AE	2005-02-12	EC	Defeito elétrico nas contadoras	Verificar atuação da proteção 94XK na MB. Verificar a contatora X2A2, substituí-la se é necessário
17	U2	MB	AE	2009-12-05	EC	Defeito elétrico nas contadoras	Verificar ruído anormal na contatora C2 da MB. Verificar se é núcleo do contator está enferrujado. Realizar a respectiva limpeza no núcleo do contator.

18	U2	MB	AG	2005-02-21	EPA	Defeito na partida automática	Verificar conexões nos bornes da contatora de partida automática da MB
19	U2	MB	AJ	2009-07-04	EC	Defeito elétrico nas contadoras	Verificar as contadoras 63LYX1 e X2C2. Substituí-las se é necessário. Efetuar testes funcionais e de operação.
20	U2	MB	AL	2009-08-26	S	Defeito na sucção	Verificar a gaxeta da MB. Verificar a vedação da mesma. Efetuar aperto na gaxeta da MB. Verificar obstruções na tubulação de sucção. Trocar a gaxeta se é necessário.
21	U2	MB	AL	2009-12-26	VG	Vazamentos pela gaxeta	Verificar estado da gaxeta da MB. Fazer ajustes e corrigir vazamentos pela mesma. Substituir as gaxetas se é necessário
22	U3	MB	02	2007-11-10	EC	Defeito elétrico nas contadoras	Verificar o contator 1d27.1. Substituir o contator se é necessário. Realizar testes funcionais e de operação
23	U3	MB	02	2005-10-02	EC	Defeito elétrico nas contadoras	Verificar o contator 2C2. Substituir o contator se é necessário. Realizar testes funcionais e de operação
24	U3	MB	02	2005-01-13	ECO	Defeito na comutação automática	Verificar rele D31. Efetuar testes para verificação de operação normal.
25	U3	MB	AE	2004-08-20	ECO	Defeito na comutação automática	Verificar inversão de cabo da contatora X4A1 com X2A1. Verificar bobinas das contadoras. Efetuar testes de operação.
26	U3	MB	AF	2009-10-25	EC	Defeito elétrico nas contadoras	Verificar o contator X2C2. Substituir o contator se é necessário. Realizar testes funcionais e de operação
27	U3	MB	AF	2009-10-25	EC	Defeito elétrico nas contadoras	Verificar o contator XT1A2. Substituir o contator se é necessário. Realizar testes funcionais e de operação
28	U3	MB	AF	2005-03-01	EC	Defeito elétrico nas contadoras	Verificar defeitos no núcleo da contatora de força da MB AF. Substituir a contatora se é necessário

29	U3	MB	AF	2007-07-20	VSM	Vazamento pelo selo mecânico	Verificar a borracha de vedação do selo mecânico. Substituir a borracha de vedação se é necessário
30	U3	MB	AG	2005-09-23	EC	Defeito elétrico nas contadoras	Verificar o contator 63LV. Substituir o contator se é necessário. Realizar testes funcionais e de operação
31	U3	MB	AI	2005-10-02	EC	Defeito elétrico nas contadoras	Verificar o contator C2A. Substituir o contator se é necessário. Realizar testes funcionais e de operação
32	U3	MB	AI	2004-11-29	ECO	Defeito na comutação automática	Verificar núcleo enferrujado da contadora C2A. Efetuar limpeza no núcleo da contadora e realizar testes de operação.
33	U3	MB	AI	2005-01-28	EPA	Defeito na partida automática	Verificar defeitos na contadora C1A. Substituir a mesma se é necessário e realizar testes de operação.
34	U3	MB	AK	2007-10-30	EC	Defeito elétrico nas contadoras	Verificar o contator XF4. Substituir o contator se é necessário. Realizar testes funcionais e de operação
35	U3	MB	AK	2006-08-01	S	Defeito na sucção	Verificar defeitos na válvula de retenção. Foi confeccionado parte da válvula de retenção que estava danificado.
36	U3	MB	AL	2009-07-30	S	Defeito na sucção	Verificar estado da válvula de retenção tipo Flape na entrada de água da MB. Corrigir os defeitos. Substituir a válvula se é necessário
37	U4	MB	02	2005-10-17	EC	Defeito elétrico nas contadoras	Verificar o contator 2C1. Substituir o contator se é necessário. Realizar testes funcionais e de operação
38	U4	MB	02	2005-10-29	ECO	Defeito na comutação automática	Verificar o rele temporizado 3DO da motobomba. Verificar a contadora D6 de falta pressão da MB.
39	U4	MB	02	2009-12-04	EPA	Defeito na partida automática	Reajustar o pressostato de falta de pressão normal da MB e efetuar reaperto das conexões do mesmo.
40	U4	MB	02	2009-07-27	VV	Vazamentos pelas	Inspeccionar as válvulas de entrada e saída de óleo na MB. Substituir

						válvulas	válvulas se é necessário
41	U4	MB	AF	2008-04-06	EC	Defeito elétrico nas contadoras	Verificar a contadora XT1A2. Substituir a contadora se é necessário. Efetuar testes funcionais e de operação.
42	U4	MB	AI	2005-04-07	EC	Defeito elétrico nas contadoras	Verificar a contadora 27.1. Substituir a contadora se é necessário. Efetuar testes funcionais e de operação.
43	U4	MB	AJ	2009-05-09	EC	Defeito elétrico nas contadoras	Verificar a contadora XT1C2. Substituir a contadora se é necessário. Efetuar testes funcionais e de operação.
44	U4	MB	AJ	2009-05-09	ECO	Defeito na comutação automática	Verificar a contadora X2C2 de resposta da MB. Substituí-la se é necessário. Efetuar testes de operação.
45	U4	MB	AK	2008-04-06	EPA	Defeito na partida automática	Verificar a contadora XF4. Substituir a contadora se é necessário. Efetuar testes operacionais.
46	U4	MB	AL	2005-08-25	EC	Defeito elétrico nas contadoras	Verificar a contadora XA4. Substituir a contadora se é necessário. Efetuar testes funcionais e de operação.
47	U5	MB	AE	2009-07-18	EC	Defeito elétrico nas contadoras	Verificar a contadora C1A. Substituir a contadora se é necessário. Efetuar testes funcionais e de operação.
48	U5	MB	AF	2009-05-24	EC	Defeito elétrico nas contadoras	Verificar a contadora C2A. Substituir a contadora se é necessário. Efetuar testes funcionais e de operação.
49	U5	MB	AI	2008-11-20	VSM	Vazamento pelo selo mecânico	Efetuar a usinagem do espelho do selo mecânico. Verificar rolamentos SKF 6313Z, o anel de vedação e o-ring da MB.
50	U5	MB	AI	2009-07-18	VSM	Vazamento pelo selo mecânico	Verificar estado das válvulas borboletas na entrada e retorno da tubulação de óleo. Substituí-las se é necessário.
51	U5	MB	AJ	2009-10-29	RA	Ruído anormal	Verificar estado dos rolamentos da MB. Lubrificar os rolamentos da MB. Substituir os rolamentos da MB se é necessário

52	U5	MB	AK	2007-08-27	EC	Defeito elétrico nas contadoras	Verificar a contadora XA4. Substituir a contadora se é necessário. Efetuar testes funcionais e de operação.
53	U5	MB	AK	2006-06-01	EC	Defeito elétrico nas contadoras	Verificar a bobina da contadora XAL-D. Efetuar testes de operação.
54	U5	MB	AK	2009-10-27	RA	Ruído anormal	Verificar e corrigir defeitos no acoplamento da MB.
55	U5	MB	AK	2009-10-27	S	Defeito na sucção	Verificar o acoplamento 4F da MB e trocá-lo se é necessário. Fazer lubrificação da mesma.
56	U5	MB	AL	2009-07-19	EPA	Defeito na partida automática	Verificar defeitos na contadora de intertravamento na interligação da MB. Substituí-la se é necessário. Efetuar testes de operação.
57	U5	MB	AL	2006-01-09	S	Defeito na sucção	Efetuar aperto na gaxeta da MB e verificar obstruções na tubulação de sucção.

APÊNDICE B – MOTOBOMBAS DA USINA HIDRELETRICA DE BALBINA

Neste apêndice são apresentadas as distintas motobombas correspondentes ao caso de estúdio em questão analisado nesta dissertação.

Tabela B. 1 -Motobombas presentes em uma UGH de Balbina

Sistema	Subsistema	Motobombas	Função
Sistema de mancal	Sistema de lubrificação e resfriamento do mancal escora	MB – AG	Permitem a circulação de óleo para resfriamento e lubrificação do mancal escora (Figura C.1)
		MB – AH	
Sistema de mancal	Sistema de resfriamento e lubrificação do mancal guia	MB - AI	Permitem a circulação de óleo para resfriamento e lubrificação do mancal guia (Figura C.2)
		MB - AJ	
Sistema de mancal	Sistema de resfriamento e lubrificação do mancal guia superior	MB - 01	Permitem a circulação de óleo para resfriamento e lubrificação do mancal guia superior (Figura C.3)
		MB - 02	
Turbina hidráulica principal	Sistema de regulação de velocidade	MB - AE	Permitem a circulação de óleo para resfriamento do óleo do sistema de regulação de velocidade e recalque do mesmo no balão combinado de ar e óleo (Figura C.4)
		MB – AF	
Turbina hidráulica principal	Sistema de agua de selagem	MB - AK MB - AL	Controlam o nível de água no poço de drenagem da turbina



Figura B. 1- Motobombas AG - AH do sistema de resfriamento do mancal escora



Figura B. 2 -Motobombas AJ – AI do sistema de resfriamento do mancal guia



Figura B. 3 -Motobombas 01 – 02 do sistema de resfriamento do mancal guia superior



Figura B. 4 -Motobombas AE-AF do tanque sem pressão

APÊNDICE C – IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL

O protótipo RBC implementado para a gestão de manutenção corretiva foi construído baseado na plataforma jCOLIBRI a qual contém todos os arquivos necessários, classes, interfaces, livrarias, arquivos .jar, tutoriais, exemplos, e toda a informação disponível para a correta criação de um novo modelo ou aplicação RBC sem importar o domínio de aplicação e o objetivo do sistema. Na Figura C.1, observam-se os pacotes e arquivos do *framework* jCOLIBRI disponíveis para a construção de qualquer aplicação baseada no paradigma de raciocínio baseado em casos. Todo o projeto em geral do protótipo implementado neste trabalho, assim como as interfaces gráficas de usuário propostas foram elaboradas no IDE ECLIPSE.

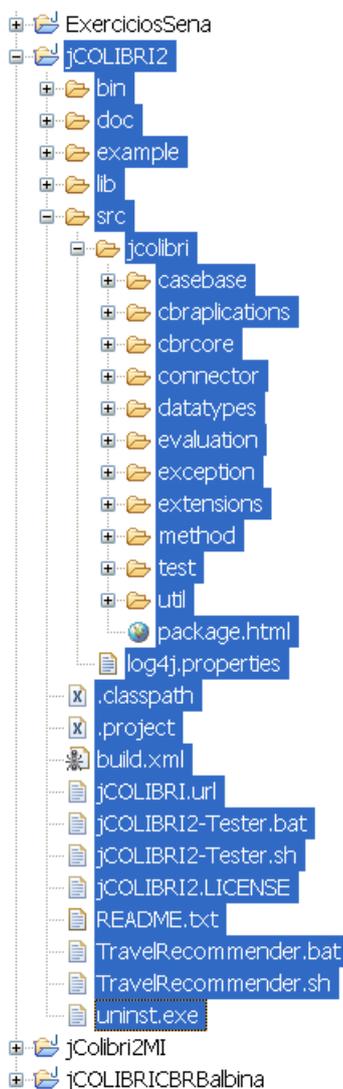


Figura C. 1 - Pacotes do *framework* jCOLIBRI

Este apêndice está baseado, principalmente, na informação contida no tutorial da ferramenta: Recio-Garcia *et al.* (2008).

A partir das classes, interfaces e pacotes do *framework* jCOLIBRI, a implementação do sistema iniciou-se modificando as respectivas classes e adaptando-as aos requerimentos da aplicação atual.

O *framework* jCOLIBRI pode ser descarregado desde o *web site* do grupo GAIA e pode ser importado como um projeto na IDE ECLIPSE. O projeto principal para o desenvolvimento do protótipo RBC construído neste trabalho tem o nome de jCOLIBRIBalbina. A classe principal do projeto desenvolvido é chamada jcolibri.balbina.motobombas.BalbinaMotobombas a qual, como é próprio de uma classe principal em Java implementa o método *main* da aplicação. Esta classe principal deve herdar e implementar os métodos da interface jcolibri.cbrapplications.standardCBRAApplication. A estrutura básica desta classe principal se mostra na Figura C2.

```
public class BalbinaMotobombas implements StandardCBRAApplication {  
  
    public void configure( ) throws ExecutionException {}  
    public CBRCaseBase preCycle() throws ExecutionException {}  
  
    public void cycle (CBRQuery query) throws ExecutionException{ }  
  
    public void postCycle() throws ExecutionException { }  
  
    public static void main(String[] args) { }  
  
}
```

Figura C. 2 - Estrutura da classe principal do protótipo RBC para manutenção corretiva

Os métodos que deve implementar a classe principal e que herda da interface jcolibri.cbrapplications.standardCBRAApplication são:

- *configure()*: responsável por realizar as configurações do sistema RBC, definir os conectores e a base de casos.
- *precycle()*: inicializa a aplicação RBC, carregando a base de casos e distintos processos do programa. Este processo é executado só uma vez.
- *cycle(CBRQuery query)*: executa o ciclo RBC. Este processo pode ser executado várias vezes.
- *post-cycle()*: é executado quando é encerrada a aplicação, utilizado tipicamente para fechar o conector.

A estrutura do método principal, o *main*, se mostra na figura C.3.

```

publicstaticvoid main(String[] args) {
    BalbinaMotobombas motobombas = getInstance();
    try {
        motobombas.configure();
        motobombas.preCycle();

        QueryDialogFinal qdf = new QueryDialogFinal(main);

        boolean cont = true;

        while (cont)
        {
            qdf.setVisible(true);
            CBRQuery q = qdf.getQuery();
            motobombas.cycle(q);
        }

        motobombas.postCycle();
    } catch (Exception e) {
        org.apache.commons.logging.LogFactory.getLog(
            BalbinaMotobombas.class).error(e);
    }
}

```

Figura C. 3 - Estrutura do método *main*

C.1. REPRESENTAÇÃO DE CASOS

jCOLIBRI representa os casos usando a tecnologia de Java Beans que também é chamada *Intronspection*. Uma classe Java Bean é uma classe que implementa métodos `get ()` e `set ()` para cada atributo publico. Java Bean usa a tecnologia Hibernate para armazenar a informação na base de dados.

O Hibernate é uma ferramenta de mapeamento objeto/relacional para Java. Ela transforma os dados tabulares de um banco de dados em um grafo de objetos definido pelo desenvolvedor. Usando o Hibernate, o desenvolvedor evita escrever muito do código de acesso a banco de dados e de SQL que ele escreveria não usando a ferramenta, acelerando a velocidade do seu desenvolvimento de uma forma fantástica (Kraus, 2009).

Java Beans e Hibernate são tecnologias da plataforma *Java 2 Enterprise Edition* a qual estão orientadas às aplicações de negócios. Usando estas tecnologias em jCOLIBRI garante-se o desenvolvimento das aplicações comerciais com RBC.

Em jCOLIBRI um caso é dividido em quatro componentes: descrição do problema; solução do problema; resultado de aplicar a solução; justificação da solução (porque a solução foi escolhida).

Estes campos do caso foram modificados de acordo às especificações deste trabalho pelos seguintes campos: descrição do equipamento; descrição do problema; solução do problema; resultado da aplicação da solução.

Cada um destes componentes pode ser representado por um ou mais atributos e para isso jCOLIBRI disponibiliza uma estrutura de classes, que deve ser utilizada, conforme apresentada no diagrama UML da Figura C.4 a qual mostra a relação entre casos, consultas e os componentes do caso.

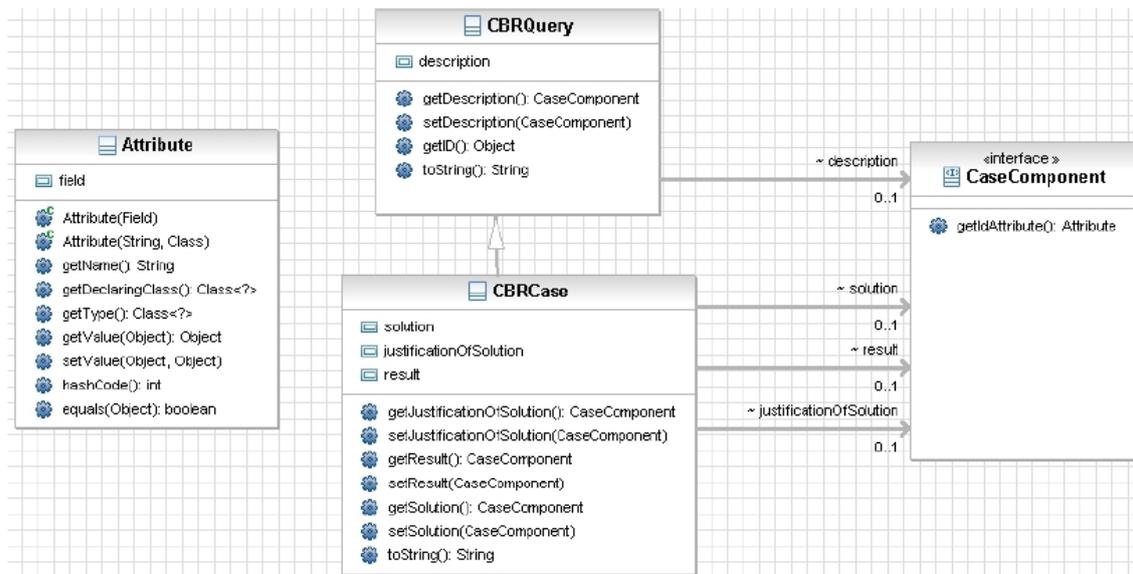


Figura C. 4 - Diagrama UML: representação de casos em jCOLIBRI

Em sistemas RBC o acesso e a persistência dos dados devem ser realizados de forma eficiente dado a importante relação e interação que tem o banco de dados dentro do processo RBC.

C.2. PERSISTÊNCIA DE DADOS E CONECTORES EM jCOLIBRI

O acesso, a recuperação e a gravação de casos no meio físico são realizados através de conectores. Os conectores são objetos que sabem como aceder e recuperar casos do meio e retornar esses casos ao sistema RBC em uma via uniforme. jCOLIBRI inclui os seguintes conectores:

- *jcolibri.connectors.DataBaseConnector*. Gerencia a persistência de casos na base de dados. Internamente usa livrarias de Hibernate.
- *jcolibri.connectors.PlainTextConnector*. Gerencia a persistência de casos em arquivos textuais.
- *jcolibri.connectors.OntologyConnector*. Usa *ontobridge* para gerenciar bases de casos armazenadas em ontologias.

A descrição do caso é feita implementando a classe Java Bean, que contem os atributos e herda da principal interface CaseComponent. Para o projeto desenvolvido a classe que

descreve o modelo do caso assim como os atributos do mesmo tem a seguinte estrutura (Figura C5):

```
public class CaseDescription implements
java.io.Serializable, jcolibri.cbrcore.CaseComponent {

    private int id;
    private String ugh;
    private String tipoEquipamento;
    private String nomeEquipamento;
    private String tipoFalha;
    private Date data;
    private String descricaoFalha;
    private String nomeOperador;

    public CaseDescription() {
    }
    public String getNomeOperador() {
        return nomeOperador;
    }
    public void setNomeOperador(String nomeOperador) {
        this.nomeOperador = nomeOperador;
    }
    public int getId() {
        return id;
    }
    public void setId(int id) {
        this.id = id;
    }
    // ...outros atributos tipoFalha, descricaoFalha...
    public Attribute getIdAttribute(){
        return new Attribute ("id", this.getClass());
    }
}
```

Figura C. 5 - Classe da descrição do caso tipo Java Bean

No caso da implementação do protótipo deste trabalho foi usado o conector de banco de dados usando Hibernate. O Hibernate precisa de um arquivo para a configuração e para acessar o banco de dados. Neste arquivo típico se configuram os parâmetros básicos da conexão com o servidor do banco de dados como o servidor de banco de dados, o nome usuário, senha de acesso ao banco de dados, etc. Para configurar o conector de banco de dados é necessário configurar os seguintes arquivos:

- *databaseconfig.xml*. Neste arquivo se configuram os arquivos de mapeamento das classes que descrevem os campos da estrutura do caso, como descrição do problema, descrição da solução, solução, justificativa da solução.
- *hibernate.cfg.xml*. Este arquivo configura os parâmetros típicos para a conexão da aplicação com qualquer servidor de banco de dados.
- Arquivos de mapeamento. Estes arquivos definem como mapear o Java Bean com uma tabela do banco de dados. Deve-se definir qual tabela é usada para armazenar o Bean, depois se configura qual coluna da tabela contém cada atributo do Bean.

C.3. CICLO RBC

C.3.1. Recuperação

A etapa de recuperação obtém os casos mais similares segundo o caso atual ou a consulta do usuário. O principal método de jCOLIBRI para a recuperação de casos é:

- *jcolibri.method.retrieve.NNretrieval.NNScoringMethod*. Este método executa um cálculo do tipo *Nearest Neighbor* para determinar a medida de similaridade global. Esta função computa a similaridade de cada atributo simples e computa a similaridade global: a média de cada similaridade simples.
- A configuração das funções de similaridade são armazenadas em um objeto *jcolibri.method.retrieve.NNretrieval.NNConfig*. Os valores configurados neste objeto são:

- Função de similaridade global para a descrição
- Funções de similaridade local para cada atributo composto
- Peso para cada atributo

C.3.2. Reuso

Continuando com a etapa de reuso ou adaptação de casos, jCOLIBRI disponibiliza dois métodos de adaptação:

- *jcolibri.method.reuse.DirectAttributeCopyMethod*. Este método copia os valores de um atributo na consulta a um atributo a um atributo de um caso.
- *jcolibri.method.reuse.NumericDirectProportionMethod*. Este método executa uma proporção numérica direta entre os atributos de uma consulta e o caso.

Uma vez os casos recuperados são adaptados, sua descrição pode ser substituída pela descrição da consulta. Desta forma obtém-se uma lista de casos com a mesma descrição da consulta. A etapa anterior é executada pelo método *jcolibri.method.Reuse.CombineQueryAndCasesMethod* e é opcional dependendo da aplicação.

Depois deste processo e como é típico do ciclo 4R, o sistema RBC estabelece uma solução ao problema em questão, e o especialista poderá revisar e analisar a solução na etapa de revisão. A etapa de revisão é feita diretamente pelo operador, o qual tem a opção de analisar dentre os casos recuperados com melhor similaridade, qual das soluções propostas se ajustam melhor ao problema ou fornecem melhores e adequadas respostas ao problema em questão.

C.3.3 Retenção

Nesta etapa os novos casos ou as situações de entrada ao sistema são armazenados na base de casos para uso futuro. Desta forma o sistema RBC adquire uma nova experiência.

O método `jcolibri.method.Retain.StoreCasesMethod` permite a adição de novos casos na base de casos. Os novos casos adicionados serão armazenados no meio de persistência escolhida e usada na aplicação.

C4. SAÍDA DA APLICAÇÃO

O método `postCycle()` de `jCOLIBRI`, finaliza a aplicação RBC ou invoca tarefas de manutenção para o sistema. Este método usualmente chama ao método `close()` do conector para armazenar (se é requerido) os casos aprendidos no meio de persistência.