

CESAR AUGUSTO DO CANTO VINADÉ

**SISTEMATIZAÇÃO DO PROCESSO DE PROJETO PARA CONFIABILIDADE E
MANTENABILIDADE APLICADO A SISTEMAS HIDRÁULICOS E
IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA ESPECIALISTA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Centro Tecnológico, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia

Orientador: Prof. Dr. Acires Dias

Co-Orientador: Prof Dr. Jonny Carlos da Silva

FLORIANÓPOLIS, SC

2003

Termo de Aprovação

CESAR AUGUSTO DO CANTO VINADÉ

**SISTEMATIZAÇÃO DO PROCESSO DE PROJETO PARA CONFIABILIDADE E
MANTENABILIDADE APLICADO A SISTEMAS HIDRÁULICOS E
IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA ESPECIALISTA**

Tese aprovada na sua forma final como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Centro Tecnológico, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina:

Prof. José A. Bellini da Cunha Neto, Dr.
Coordenador do Curso

Prof. Acires Dias, Dr. Eng
Orientador

BANCA EXAMINADORA

Prof. Gilberto F. Martha de Souza, Dr. Eng.
USP-Relator

Prof. Franco Giuseppe Dedini, Dr
UNICAMP

Prof. Nelson Back, Ph.D.

Prof. Victor Juliano De Negri, Dr. Eng.

Prof. Jonny Carlos da Silva, Dr. Eng
Co-Orientador

Florianópolis, Abril de 2003

DEDICATÓRIA

**Dedico este trabalho de tese à minha
esposa e aos meus pais pela paciência,
força e perseverança.**

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Santíssima Trindade e à Nossa Senhora pela proteção e inspiração nos momentos mais difíceis.

Ao CNPq pelo apoio financeiro para realização deste trabalho de tese.

À Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) pelo suporte dado com material didático através da biblioteca central aos serviços prestados pelo Hospital Universitário.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (POSMEC) pela oportunidade de integrar-me ao grupo de doutorandos.

Aos meus inestimáveis orientadores prof. Acires Dias e prof. Jonny Carlos da Silva pela orientação séria e responsável para elaboração deste trabalho de tese.

Aos membros da banca examinadora prof. Gilberto F. M. Souza, prof. Franco G. Dedini, prof. Nelson Back e prof. Victor J. De Negri por suas relevantes contribuições.

Aos especialistas Daniel Frari, Enon Nunes e Eduardo Yuji Sakurada cuja colaboração foi de extrema importância para sucesso deste trabalho.

Aos bolsistas de iniciação científica Adriane Moretti, Terêncio e Koji Sassakura pelo empenho e dedicação na realização de suas atividades.

À Associação Brasileira de Manutenção (ABRAMAN) pela oportunidade concedida na apresentação deste trabalho para profissionais na área de manutenção que proporcionaram um grande incentivo na forma de curiosidade, aceitação e elogios.

Aos professores André Ogliari e Fernando Forcellini pelo convívio e conhecimento compartilhado.

Aos contemporâneos do mestrado e doutorado Marcelo Gitirana (e Suzana) e Cristiano Ferreira, verdadeiros irmãos durante nossa convivência.

Aos colegas e amigos do Nedip Juscelino, Fonseca, Ângelo, Airton, Valdeon, Leonardo Lima, Franco, Roberto Peres, Irano, Vanessa, Valquíria, André W., Vinícius, Leila, Ivo, Claiton, Andréia, Robertão e ao estimadíssimo casal conterrâneo Leonardo e Fabiane.

Aos colegas do Laship Luiz Antônio, Fernando Furst, Guilherme Alves, Paulo Mineiro, Márcio Castellani, Alvino e Galaz.

Aos companheiros de casa Fred, Gerson, Alexandre, Tiago e Afrânio.

SUMÁRIO

1 – Introdução.....	1
1.1 – A importância do custo de operação ao longo do ciclo de vida.....	3
1.2 – Síntese de Disponibilidade e Produtividade.....	6
1.3 – Objetivos da Tese.....	8
1.3.1 – Objetivos específicos.....	9
1.4 – Justificativas da Tese.....	9
1.5 – Conteúdo dos Capítulos.....	10
2 – Sistemas Hidráulicos e Reguladores de Velocidade.....	12
2.1 – Introdução.....	13
2.2 – Processo de Projeto de Sistemas Automáticos.....	13
2.2.1 – Projeto Informacional de Sistemas Automáticos.....	16
2.2.2 – Projeto Conceitual de Sistemas Automáticos.....	17
2.2.3 – Projeto Preliminar de Sistemas Automáticos.....	19
2.2.4 – Projeto Detalhado de Sistemas Automáticos.....	20
2.3 – Concepções e Definições de Sistemas Hidráulicos Reguladores de Velocidade.....	20
2.4 – Considerações finais.....	22
3 – Métodos de Apoio ao Projeto para Confiabilidade e Manutenabilidade Aplicados a Sistemas Hidráulicos.....	23
3.1 – Introdução.....	23
3.2 – Definições.....	25
3.2.1 – Definições de confiabilidade e manutenibilidade.....	25
3.2.2 – Definição de defeito, falha e pane.....	28
3.3 – Histórico de Confiabilidade e Manutenibilidade.....	29

3.4 – Modelagem e análise de confiabilidade.....	32
3.4.1 – Modelo confiabilístico do sistema hidráulico.....	36
3.4.2 - Método do grupo mínimo de corte.....	41
3.4.3 – Método grupo mínimo de corte em sistemas hidráulicos.....	42
3.5 – Análise dos modos de falha, seus efeitos (FMEA).....	43
3.5.1 – Definições em FMEA.....	44
3.5.2 - FMEA em vários níveis.....	45
3.5.3 - Abordagens estrutural e funcional.....	47
3.5.4 - Aplicação do FMEA em Sistemas Hidráulicos.....	47
3.5.5 - FMEA x FMECA.....	49
3.6 – Ações de Diagnóstico de Falha em Sistemas Hidráulicos e Reguladores de Velocidade.....	49
3.7 – Manutenções Controladas Aplicadas nas Causas Raízes das Falhas..	51
3.8 – Diagrama lógico de decisão.....	54
3.8.1 – Seleção de tarefas.....	56
3.9 – Considerações finais.....	60
4 – Sistema Especialista.....	62
4.1 – Introdução.....	62
4.2 – Definição de sistema especialista.....	62
4.3 – Histórico e Estado-da-Arte dos Sistemas Especialistas.....	64
4.4 – Características de um sistema especialista.....	66
4.5 – Engenharia do conhecimento.....	71
4.6 – Técnicas de representação do conhecimento.....	72
4.6.1 – Regras.....	73
4.6.2 – Redes Semânticas.....	74
4.6.3 – Orientada a objeto.....	76
4.7 – Modelagem orientada a objeto e regras para representação da estratégia de manutenção centrada na confiabilidade.....	82
4.8 – Considerações finais.....	83

5 – Processo de Aquisição do Conhecimento Baseado no Método

Indutivo	85
5.1 – Introdução.....	85
5.2 – Obtenção do conhecimento sobre Sistemas Hidráulicos Reguladores de Velocidade.....	86
5.3 – Método da Indução.....	90
5.3.1 – Integrando Modelagem confiabilística de Sistemas Hidráulicos com Método Indutivo.....	90
5.3.2 - Aplicação do Método Indutivo na Modelagem Confiabilístico em Sistemas Hidráulicos.....	92
5.3.3 - Diretrizes para Estabelecimento das Manutenções.....	98
5.4 – Representação Computacional.....	99
5.5 – Considerações Finais.....	100

6 – Seleção de Tarefas de Manutenção Baseada no Modelo

Confiabilístico e FMEA	101
6.1 – Introdução.....	101
6.2 – Modificação no Modelo Confiabilístico baseado nos Efeitos Não Isolados.....	101
6.3 – Classificação dos Efeitos Quanto ao Comprometimento da Segurança, Desempenho e Economia.....	105
6.4 – Efeitos de Aviso para Auxiliar na Manutenção Controlada.....	108
6.5 – Efeitos Primários para Auxiliar na Manutenção Controlada.....	110
6.6 – Tecnologias de Monitoramento.....	113
6.7 – Seleção de Manutenções para Grupos de Corte de Primeira Ordem e Regras para Seleção da Tecnologia de Monitoramento.....	115
6.8 – Seleção de Manutenções para Grupos de Corte de Segunda Ordem	117
6.8.1 – Seleção de Manutenções para Grupos de Corte de Segunda Ordem com Falha Segura.....	118
6.8.2 – Seleção de Manutenções para Grupos de Corte de Segunda Ordem com Falha Insegura.....	119
6.9 – Considerações Finais.....	123

7 – Descrição do Protótipo	124
7.1 – Introdução.....	124
7.2 – Base do Conhecimento.....	124
7.2.1 – Classe: Sistemas.....	126
7.2.2 – Classe: Circuito.....	127
7.2.3 – Classe: Componente.....	131
7.2.4 – Classe: Falha.....	132
7.2.5 – Classe: Manutenção.....	133
7.2.6 – Controle de Ativação de Regras.....	134
7.3 –Arquivo HTML com Resultados.....	135
7.3.1 – Entrada de dados.....	135
7.3.2 – Apresentação dos Resultados.....	138
7.4 – Consideração Finais.....	141
8 – Validação do Protótipo	143
8.1 – Introdução.....	143
8.2 – Validação.....	143
8.2.1 – Validação dos Resultados.....	144
8.2.2 – Validação do Processo de Obtenção dos Resultados.....	145
8.3 – Verificação do Caso Teste Usado para Validação.....	146
8.3.1 – Verificação dos Resultados do Protótipo Usando o Sistema com Redundância Ativa.....	148
8.3.2 – Verificação dos Resultados do Protótipo Usando Sistema com Redundância Passiva.....	152
8.4 – Validação do Especialista Avaliador.....	153
8.4.1 – Validação dos Resultados pelo Avaliador.....	154
8.4.2 – Validação do Processo de Obtenção dos Resultados.....	155
8.5 – Aceitação do usuário.....	157
8.6 – Validação do Especialista na Área de Projeto de Sistemas Hidráulicos Reguladores de Velocidade.....	158
8.7 – Considerações Finais.....	160

9 – Conclusões e Recomendações.....	161
Glossário.....	166
Referências.....	168
Apêndice A - Princípios de funcionamento de circuitos Óleo- Hidráulicos de Reguladores de Velocidade.....	178
Apêndice B - Relação Idade Confiabilidade e Exploração de Idade.....	200
Apêndice C - Análise dos Modos de falha e seus Efeitos (FMEA).....	204
Apêndice D - Passos para Execução da Segunda Versão do Protótipo.....	215

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Distribuição do custo do ciclo de vida (Rossi, 1999).....	4
Figura 1.2 - Comprometimento do custo do ciclo de vida (Blanchard et al,1995).....	5
Figura 1.3 – Síntese da Disponibilidade e Produtividade.....	7
Figura 2.1 – Modelo de desenvolvimento integrado do produto (adaptado de Araújo et al, 2001).....	15
Figura 2.2 – Sistemática para processo de projeto de sistemas automáticos (adaptado de De Negri, 1996 e Furst, 2001).....	16
Figura 2.3 - Diagrama de fluxo funcional de um circuito de controle de posição (adaptado de Furts, 2001).....	18
Figura 3.1 - Componentes em série.....	33
Figura 3.2 - Componentes em paralelo.....	33
Figura 3.3 – a) Conexão delta-estrela; b) Conexão R-em-N; c) Conexão trimodular; d) Conexão standby;.....	34
Figura 3.4 – a) Sistema de bombeamento fisicamente montado; b) Modelo confiabilístico paralelo com redundância ativa; c) Modelo série.	35
Figura 3.5 - Configuração complexa convencional; b) configuração complexa não convencional tipo "Ponte"; c,d) configurações complexas não convencionais tipo "Ponte Dupla" (Billinton & Allan, 1983)	35
Figura 3.6 - Sistema hidráulico para deslocar carga em dois níveis de velocidades.....	37
Figura 3.7 - Função síntese do sistema da figura 3.6.....	38
Figura 3.8 - Diagramas de fluxos funcionais com duas velocidades.....	39
Figura 3.9 - Modelos confiabilísticos dos circuitos da figura 3.6.....	40
Figura 3.10- Modelos confiabilísticos da figura 3.6.....	41
Figura 3.11 - Obtenção dos grupos mínimos de corte.....	41
Figura 3.12 – Modelagem da figura 3.11 pelo método grupo mínimo de corte, no modelo série e paralelo.....	42
Figura 3.13 - Modelo confiabilístico da figura 3.6 após aplicação do método grupo mínimo de corte.....	43
Figura 3.14 - Análises em níveis sucessivos (Moretti, 2001).....	45

Figura 3.15 – Seqüências de degradação até a falha.....	52
Figura 3.16 - Classificação dos modos de falha (Smith, 1993).....	54
Figura 3.17 - Diagrama para seleção de tarefas (Smith, 1993).....	57
Figura 3.18 - Diagrama de seleção de tarefas de manutenção (Moubray,1997).....	59
Figura 4.1 - Diagrama de bloco de um sistema especialista.....	63
Figura 4.2 - Exemplos de redes semânticas: (a) relações tipo "é-um", (b) relação tipo "tem-parte".....	75
Figura 4.3 - Redes Semânticas para estratégia de manutenção.....	75
Figura 4.4 - Exemplo de representação Frame.....	77
Figura 4.5 - Exemplo de estrutura todo-parte.....	78
Figura 4.6 - Exemplo de estrutura generalização-especificação.....	79
Figura 4.7 - Representação de dois assuntos: modelagem confiabilística e análise de modos de falha.....	80
Figura 4.8 - Estrutura orientação objeto para os métodos da confiabilidade e mantenabilidade em sistemas hidráulicos.....	82
Figura 4.9 - Combinação de possíveis soluções.....	83
Figura 5.1 - Circuito de bombeamento usado na entrevista.....	87
Figura 5.2 - Diagrama de fluxo funcional do circuito da figura 5.1.....	87
Figura 5.3 - Circuito hidráulico modificado de acordo com as observações do especialista.....	89
Figura 5.4 - Diagrama do fluxo funcional da figura 5.3.....	89
Figura 5.5 - Diagrama do fluxo funcional de um regulador simples para uma turbina.....	93
Figura 5.6 - Primeiro estágio do algoritmo indutivo para modelagem confiabilística....	94
Figura 5.7 - Ramo do algoritmo para componentes com mesma entrada e saída.....	94
Figura 5.8 - Ramo do algoritmo indutivo para componentes com mesma entrada.....	95
Figura 5.9 - Algoritmo indutivo tratando componentes de conexões distintas e de mesma saída.....	97
Figura 5.10 - Modelo resultante após aplicação do algoritmo indutivo.....	98
Figura 5.11 – Representação Computacional do modelo confiabilístico do circuito através de uma lista de fatos.....	99
Figura 6.1 – Gráfico da relação entre componentes x número de modos de falha induzidos (Vinadé et al, 2001b).....	102
Figura 6.2 - Influência de um efeito não isolado em um componente em série.....	104
Figura 6.3 - Substituição de grupos de corte de 2 ^a ordem por grupos de 1 ^a ordem devido à presença de efeitos não isolados.....	104

Figura 6.4 - Gráfico de pareto entre efeitos e o número de modos de falha a serem controlados (Vinadé et al, 2001b).....	106
Figura 6.5 – Modo de falha e efeitos de aviso possível de detecção humana (Vinadé et al, 2001b).....	110
Figura 6.6 – Relação entre número de modos de falha e os respectivos efeitos primários (Vinadé et al, 2001b).....	111
Figura 6.7 - Degradação de dois sistemas idênticos com desempenhos desejados diferentes (Adaptado de Moubray, 1997).....	112
Figura 6.8 - Curva PF (Moubray, 1997).....	114
Figura 6.9 - Tolerabilidade de risco econômico (Moubray, 1997).....	121
Figura 7.1 – Estrutura funcional do protótipo de sistema especialista para estabelecimento de estratégia de manutenção.....	125
Figura 7.2 - Circuitos Potência de grande porte.....	128
Figura 7.3 - Circuito de Potência de pequeno porte.....	129
Figura 7.4 – Circuito de atuação de pequeno porte.....	129
Figura 7.5 – Circuitos de atuação de grande porte.....	130
Figura 7.6 - Primeira apresentação do arquivo saida.htm.....	136
Figura 7.7 - Primeira atualização do arquivo saida.htm, mostrando as opções de circuitos de bombeamento.....	137
Figura 7.8 - Segunda atualização do arquivo saida.htm, mostrando as opções de circuitos de atuação.....	138
Figura 7.9 - Apresentação do sistema selecionado e a proposta de inspeções periódicas para evitar falha múltipla.....	139
Figura 8.1 - Sistema usado para validação dos resultados.....	147
Figura 8.2 – Número de modos de falha do tipo A e respectivas técnicas de detecção...	149
Figura 8.3 –Número de modos de falha do tipo B abordadas por técnicas e ações de manutenções preventivas.....	150
Figura 8.4 – Número de modos de falha do tipo C abordadas por cada técnica, inspeção e por ações de manutenções corretivas.....	150
Figura 8.5 – Número de modos de falha alocadas para técnicas, inspeções e ações de manutenções preventivas e corretivas.....	152
Figura 8.6 – Número de modos de falha controlados por técnicas, inspeções e por ações de manutenções preventivas e corretivas, com presença de redundâncias passivas.....	153

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Grupos Mínimos da figura 3.11.....	42
Tabela 3.2 – FMEA da Bomba de engrenagem como sistema.....	46
Tabela 3.3 – FMEA da Bomba de engrenagem como componente.....	46
Tabela 3.4 – Parte da Análise dos modos de falha e seus efeitos do filtro.....	48
Tabela 4.1 – Tabela OAV.....	76
Tabela 5.1. Componentes hidráulicos e suas respectivas funções.....	93
Tabela 6.1 – Exemplo de influência de um efeito não isolado nas causas externas de um modo de falha	103
Tabela 6.2 – Classificação dos efeitos dos modos de falha de componentes hidráulicos.....	107
Tabela 6.3 - Eficiência das técnicas de monitoração conforme condição a ser monitorada (Troyer, 1999).....	114
Tabela 7.1 – Alocação de tarefas de manutenção para modos de falha de componentes em funcionamento.....	141

Lista de Abreviaturas

CD	- <i>Condition-Directed</i>
DoD	- <i>Department of Defense</i>
FF	- <i>Failure-Finding</i>
FMEA	- Análise de Modos de Falha e seus Efeitos
FMECA	- Análise dos Modos de Falha, seus Efeitos e Criticalidade
GPS	- <i>General Problem Solver</i>
IA	- Inteligência Artificial
LASHIP	- Laboratório de Sistemas Hidráulicos e Pneumáticos
MCC	- Manutenção Centrada na Confiabilidade
MCR	- Manutenção Centrada no Reparo
MPT	- Manutenção para Produtividade Total
MIL-STD	- <i>Military Standard</i>
MTBF	- Tempo médio entre falhas
MTTF	- Tempo médio até falha
NEDIP	- Núcleo de Desenvolvimento Integrado de Produtos
OAV	- Objeto-Atributo-Valor
RAC	- <i>Reliability Analysis Center</i>
RCM	- <i>Reliability Centered Maintenance</i>
RPN	- <i>Risk Priority Number</i>
RTF	- <i>Run to Failure</i>
TD	- <i>Time-Directed</i>
TPM	- <i>Total Productive Maintenance</i>

RESUMO

O objetivo desta tese é apresentar o desenvolvimento de um sistema especialista para sistematização do conhecimento relativo ao projeto de sistemas hidráulicos que facilite o processo de projeto para a confiabilidade e manutenibilidade destes sistemas. O conhecimento sistematizado para confiabilidade e manutenibilidade envolve modelagem confiabilística, análise dos modos de falha e seus efeitos que irão auxiliar no estabelecimento de tarefas de manutenção eficientes e baixo custo para cada componente, conforme a estratégia Manutenção Centrada na Confiabilidade. A sistematização desse conhecimento é baseada no processo de desenvolvimento de um sistema especialista, focando as quatro primeiras etapas: estudo de viabilidade, aquisição do conhecimento, representação do conhecimento e projeto. Este trabalho de tese apresenta, entre outras contribuições, uma ferramenta computacional desenvolvida para inferir manutenções controladas (preditivas), preventivas e corretivas para cada componente nas fases iniciais de projeto de sistemas hidráulicos (mais precisamente para reguladores de velocidade de turbinas hidrelétricas), no processo de aquisição do conhecimento para modelagem confiabilística visando indicação dos principais componentes para execução da função principal do sistema hidráulico e no uso da análise de modos de falha e seus efeitos para indicação de manutenções em componentes com modos de falha críticos que comprometem a função principal, segurança pessoal e ambiental. A tese também apresenta algumas observações referentes a avaliação dos especialistas durante processo de validação do sistema especialista protótipo. Além de avaliar a aplicação do protótipo, estas opiniões contribuem também para sugerir novas perspectivas de estudos na área de manutenibilidade e confiabilidade.

ABSTRACT

The objective of this thesis is to present the development of an expert system that facilitates the process of maintainability and reliability design of hydraulic systems. The knowledge systematization in this domain involves the integration of Reliability Modeling, FMEA (Failure Mode and its Effect Analysis) to support the establishment of efficient and cost effective maintenance tasks for each component, according to the strategy known as RCM- Reliability Centered Maintenance. The knowledge systematization in this scope is based on the expert system development phases: feasibility study, knowledge acquisition, representation, implementation and validation. Some contributions are the computational aid to infer predictive, preventive and corrective maintenance activities for each component in the initial phases of hydraulic system design (more precisely for speed-governing of hydroelectric turbines), in the knowledge acquisition process for reliability modeling seeking relevant component for main function of a hydraulic system and the use of the failure mode and its effect analysis for maintenance indication in components with critical failure mode that compromises the main function, personal and environmental safety. The thesis also presents some conclusions from the experts' feedback during validation of the prototype system. Besides evaluating the system application, these opinions also contribute to suggest perspectives for further studies in the area of maintainability and reliability.

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO

A vida atual é caracterizada pelas interdependências. À medida que o conhecimento humano vai avançando, percebe-se que tudo está mais fortemente integrado. Nos sistemas técnicos isso, certamente, não é diferente.

O sistema regulador de velocidade de turbinas hidráulicas utilizado em usinas hidrelétricas é um bom exemplo de um sistema técnico, o qual faz parte de uma rede, com possibilidade de interferir no cotidiano das pessoas e de outros sistemas técnicos. Uma ilustração real disto é a influência na qualidade de uma linha de produção em uma empresa situada a muitos quilômetros de distância da usina geradora de energia. O regulador de velocidade é, por sua vez, constituído de sistemas hidráulico, elétrico e eletrônico, além de todos os componentes mecânicos e tem o objetivo de manter a estabilidade de produção de energia elétrica segundo as referências de frequência e potência, atuando somente sobre dispositivos de entrada d'água para turbina ou, em alguns casos, atuando sobre entrada d'água e pás da turbina.

A geração de energia elétrica é feita de forma integrada em nível regional ou nacional e o controle de produção é feito em tempo real, já que não se pode acumular energia sem um investimento pesado na pesquisa por novas tecnologias viavelmente econômicas. A produção, portanto, depende da demanda e deve ser adaptada a ela a cada instante por um sistema de regulação, que no Brasil é comandado pela ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS, 2002). Significa dizer que o sistema regulador de velocidade tem que estar disponível para atuar sempre que se fizer necessário.

Disponibilidade é um conceito que pode estar associado ao tempo real de desempenho de uma atividade em relação ao tempo ideal. O tempo aqui pode estar transposto em número de ciclos, produção, ou outro referencial de medida. A disponibilidade tem relação direta com a confiabilidade e a manutenibilidade, isto porque a confiabilidade é a probabilidade de um item poder desempenhar uma função requerida, sob dadas condições, durante um dado intervalo de tempo (NBR 5462, 1994), e a manutenibilidade é a probabilidade de uma dada ação de manutenção efetiva, para um item sob dadas condições de uso, poder ser efetuada dentro de um intervalo de tempo determinado, quando a manutenção é feita sob condições estabelecidas e usando procedimentos e recursos prescritos. (NBR 5462, 1994).

A implementação da confiabilidade resulta em um sistema técnico com poucas paradas devido à falha no cumprimento da função, num tempo pré-estabelecido. No entanto, deve-se levar em conta que um sistema técnico confiável poderá apresentar baixa disponibilidade se o mesmo, após uma falha, requerer muito tempo para recolocá-lo em operação. Portanto o projeto de um sistema técnico deve correlacionar manutenibilidade e confiabilidade com intuito de obter disponibilidade.

Estes atributos são inerentes a cada sistema técnico. Isso quer dizer, eles são definidos e atribuídos ao sistema técnico ainda na fase de projeto. Um sistema técnico depois de pronto tem, portanto, sua manutenibilidade e sua confiabilidade definida. As ações de manutenção, mesmo com mão de obra qualificada, irão tão somente colocar o sistema à disposição da produção, mas não irão interferir na sua manutenibilidade ou na sua confiabilidade, a menos que interfiram no conceito do projeto do produto, já em operação. A máxima disponibilidade do produto é obtida se ele estiver na condição de tão bom quanto novo.

A incorporação dos atributos de confiabilidade e de manutenibilidade a um produto na fase do projeto é possível, ou melhor, é facilitada se o projetista dispor das informações requeridas para considerar estes atributos, nas diferentes fases do desenvolvimento do produto. Neste sentido, o sistema especialista entra como uma forte possibilidade de contribuição, na medida que dispõe de ferramentas que transformam o conhecimento empírico do especialista, no caso, falha de sistemas hidráulicos do regulador de velocidade, em regras que podem ser utilizadas pelo projetista para atribuir ao produto em desenvolvimento os requisitos necessários para incorporar os atributos de confiabilidade e de manutenibilidade.

Assim, este trabalho de tese propõe utilizar o conhecimento já existente em sistemas especialistas para gerar facilidades de atribuir confiabilidade e manutenibilidade durante o processo de projeto de sistemas hidráulicos. Esta proposição será aplicada à área de sistemas hidráulicos, particularmente, aos reguladores de velocidades de turbinas hidráulicas utilizadas para geração de energia elétrica. As razões para esta escolha devem-se à importância destes sistemas na geração de energia elétrica de qualidade e no interesse por parte de alguns especialistas no resultado desta tese e, por isso, na facilidade de obter informações que possam gerar um protótipo para ser testado e validado. A tese em si é: “se o conhecimento estiver adequadamente organizado, com facilidade de acesso, será utilizado”.

1.1– A importância do custo de operação ao longo do ciclo de vida

Atualmente, qualquer estudo para projetar um produto não pode resumir-se somente ao desempenho de sua função, principalmente quando se deseja buscar um nível de competitividade nacional e internacional. Produtos ou sistemas com rápida restauração de sua função após a ocorrência de uma falha, baixo custo de manutenção e maior disponibilidade durante o ciclo de vida útil são fortemente requeridos numa época em que o uso de recursos ambientais e monetários deve ser cuidadosamente ponderado.

Para obter moderação nos gastos de recursos monetários deve-se pensar não somente no baixo custo de aquisição do produto a ser projetado, mas também na forma de mantê-lo. No caso de grandes sistemas técnicos, o custo acumulado de manutenção durante o ciclo de vida do produto pode chegar a ser igual ao custo de aquisição (segundo Dhillon, 1992). Estes custos de manutenção no ciclo de vida podem ser diminuídos se ações de manutenibilidade forem consideradas no projeto do produto.

O estudo da manutenibilidade começou a ser considerado na medida em que sistemas técnicos foram se tornando mais complexos e as exigências sobre confiabilidade e disponibilidade tornaram-se mais significativas. Devido a isso, exigiu-se um processo de racionalização para as ações de manutenção focando o estudo nas causas que geraram o acúmulo de itens fora de operação, aguardando ações de manutenção. Um exemplo clássico desta situação foi ilustrado pela Força Aérea do Exército Americano sediada na Inglaterra durante a Segunda Guerra Mundial, onde em determinado momento, somente 30% dos bombardeiros pesados estacionados estavam prontos para missão, em outras bases, a situação era bem pior. Conforme Marvin Moss (Moss, M. 1985), esta indisponibilidade foi resultante das seguintes causas:

- Falha de projeto por não integrar o equipamento e os dispositivos de suporte sob os aspectos da manutenção. Os projetistas não consideraram as condições em que o usuário iria executar a manutenção no campo.
- Falha no planejamento da logística e implementação dos recursos para manutenção. Ferramentas, equipamentos de teste, partes sobressalentes, técnicos apropriadamente treinados e manuais técnicos não estavam prontamente disponíveis no lugar e na hora certa.

Estas causas implicam em custos que ainda estão presentes nos dias de hoje. Segundo Rossi (1999), o orçamento do Departamento de Defesa Americano, para manter os equipamentos de defesa em boas condições, exigiu uma distribuição de investimentos tais que

72% dos mesmos estão concentrados em suporte logístico e operação, enquanto que aquisição se resume a 28%, como está apresentado na figura 1.1. É importante observar que 60% corresponde a suporte logístico, mas totalmente voltado para as ações de manutenção.

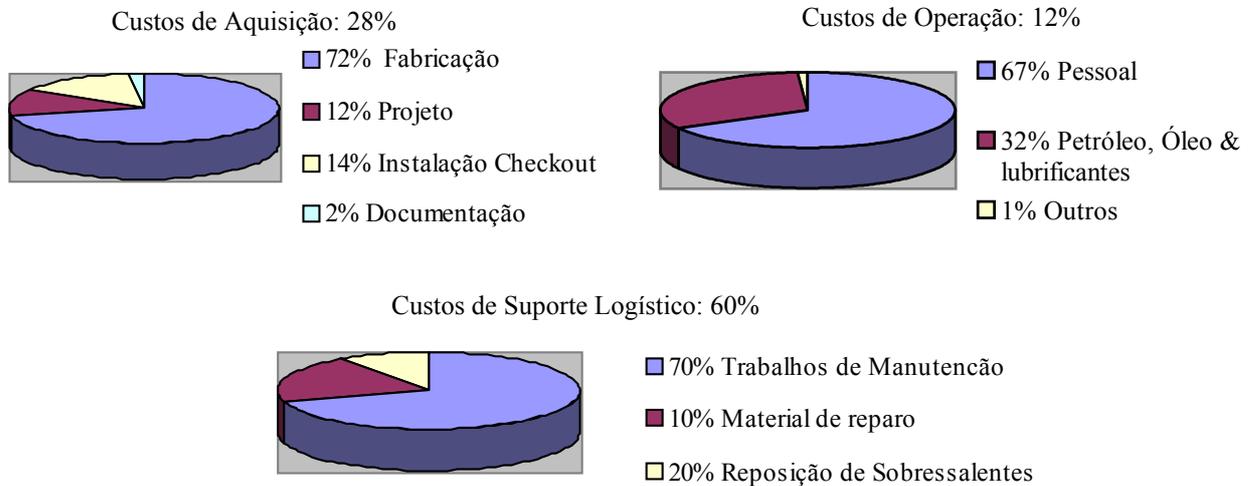


Figura 1.1 - Distribuição do custo do ciclo de vida (Rossi, 1999).

Outro exemplo de custo com manutenção é associado às frotas automotivas. Conforme citado por Matos (1999), cerca de 30 a 40% dos custos operacionais totais de uma empresa de ônibus urbano sofrem influência direta do desempenho satisfatório dos equipamentos e do suporte associado para mantê-los. Deste percentual, os custos mais significativos são: combustível (50%), peças e acessórios (25%), mão de obra (15%) e pneus (10%). Portanto, há necessidade de refletir não somente ao montante inicial destinado à aquisição do equipamento, mas também aos custos subsequentes relacionados ao custo do ciclo de vida útil.

Segundo Blanchard et al (1995), o custo durante o ciclo de vida (incluindo a fase de projeto) de um equipamento é definido nas decisões tomadas nas fases iniciais de projeto. As decisões referentes ao uso de novas tecnologias, seleção de componentes e materiais, rotinas de diagnósticos de falhas, seleção de processos de manufatura e política de suporte à manutenção, tem uma grande influência no custo do ciclo de vida do produto. Para ilustrar o elevado comprometimento das decisões tomadas nas fases iniciais do projeto de um produto ou sistema, a figura 1.2 evidencia três projeções diferentes no decorrer do processo de projeto tais como: gasto real, investimento orçado para o ciclo de vida, oportunidade para redução do custo de ciclo de vida. O gasto real está relacionado com as despesas a cada passo executado no projeto, sendo que as maiores porções dos gastos estão na construção e/ou produção. O investimento orçado para ciclo de vida está relacionado com as conseqüências das decisões tomadas no

processo de projeto que influenciam as etapas subseqüentes e alteram o custo do ciclo de vida do sistema a ser projetado. Diante destas duas últimas projeções foi dada uma idéia de estabelecer oportunidades para redução do custo do ciclo de vida do sistema. Estas oportunidades vão sendo reduzidas à medida que as decisões vão sendo tomadas.

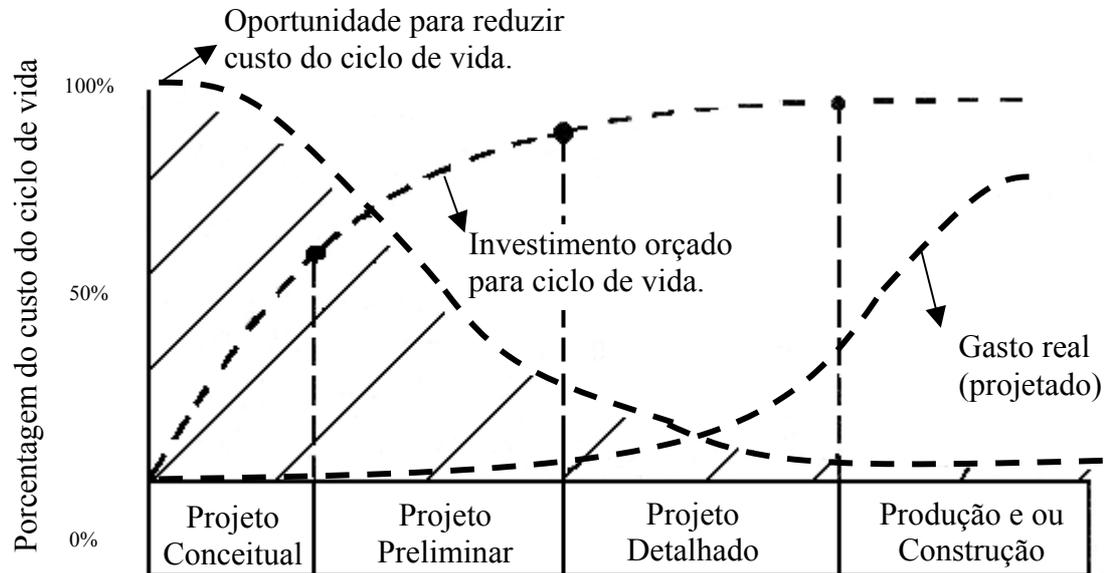


Figura 1.2 - Comprometimento do custo do ciclo de vida (Blanchard et al, 1995).

O investimento feito nas fases iniciais de projeto conceitual e preliminar é relativamente pequeno, mas influenciam enormemente na fase de utilização do sistema, onde se concentram os custos maiores com manutenção e suporte logístico. Assim, segundo Blanchard et al (1995), 60 a 70% dos custos totais do ciclo de vida estão relacionados com as decisões tomadas até a fase preliminar do projeto.

A redução do custo com a manutenção de um produto a ser projetado é possível através da previsão de recursos de suporte e estratégias que diminuam o tempo para recolocação do produto na condição de tão bom quanto novo. A previsão de recursos de suporte está relacionada com ferramentas e dispositivos exigidos por técnicas de prevenção ou restauração do produto. Estratégias consistem em estabelecer prioridades na aplicação de manutenções em componentes que mantenham a função principal do sistema a ser projetado ou em componentes cuja falha expande seus efeitos para todos os demais itens do produto a ser projetado.

1.2 – Síntese de Disponibilidade e Produtividade

Há situações onde é requerido do equipamento mais do que a disponibilidade. Santos et al (1999) sugere que além da disponibilidade seja considerada a produtividade como fator preponderante, exigindo assim também eficiência e qualidade. A eficiência é ação, força ou virtude de produzir um efeito (Ferreira, 1999). Um produto ou sistema pode desempenhar sua função normalmente, mas para se fazer presente, deve produzir um efeito suficientemente satisfatório com máximo aproveitamento de energia. Exemplificando-se, um sistema que regula a velocidade de uma turbina em uma hidrelétrica deve ser eficiente em aumentar e diminuir a velocidade, quando recebe uma quantidade de energia admissível. A eficiência neste âmbito é mensurada pelo rendimento (η). Numa escala de valores, qualidade é o que permite avaliar e, conseqüentemente, aprovar, aceitar ou recusar, qualquer coisa (Ferreira, 1999). De forma mais objetiva, a qualidade está diretamente associada à diminuição da variabilidade da saída do sistema que está sendo avaliado. Exemplificando, o regulador de velocidade tem sua qualidade medida em função da permanência e repetitividade de controle da rotação da turbina. A qualidade é mensurada, neste entender, pela exatidão (E) de resposta à regulação desejada.

A correlação entre produtividade e disponibilidade do produto, sob o ponto de vista desta tese, é feita através de tarefas de manutenção, pois para manter a exatidão e o rendimento nos níveis operacionais requeridos é necessária ação de manutenção. Baseando-se nas correlações entre confiabilidade e manutenibilidade para obter disponibilidade, abordada por Dias (1996), e também nas correlações entre eficiência e qualidade para obter produtividade, conforme Santos et al (1999), sintetizou-se a figura 1.3.

A síntese mostrada na figura 1.3 pode ser aplicada ao longo do processo de projeto, em qualquer fase. É preferível deslocar esta síntese para fases iniciais, onde é possível tomar decisões relevantes para todo ciclo de vida do produto com menor custo. Contudo, para plena aplicabilidade desta síntese, deve-se ter pelo menos uma ou mais concepções a serem analisadas pelas técnicas e métodos da confiabilidade e manutenibilidade visando definir a disponibilidade. Observando estas duas considerações, as fases de projeto conceitual e preliminar são as mais apropriadas, conforme é visto na parte central da figura 1.3.

Nos tempos atuais, a disponibilidade é prevista através de simulações do ciclo de vida útil do sistema reparável a ser projetado onde são emuladas: probabilidade de bom funcionamento após um tempo de funcionamento (confiabilidade), probabilidade de ser recolocado em serviço para um intervalo de tempo (manutenibilidade). As probabilidades de tempo de funcionamento e de recolocação são baseadas em dados estatísticos. A execução destas simulações tem como saída de dados: o número de falhas e tempo total em manutenção,

após um certo tempo de serviço. Estes dados caracterizam a disponibilidade do produto e servem de entrada para estimar o custo com manutenções e suporte logístico, tal como é visto na figura 1.3 na parte central abaixo. O suporte logístico está relacionado com aquisição de sobressalentes, custos de armazenamento e procedimentos administrativos e depende das manutenções implementadas.

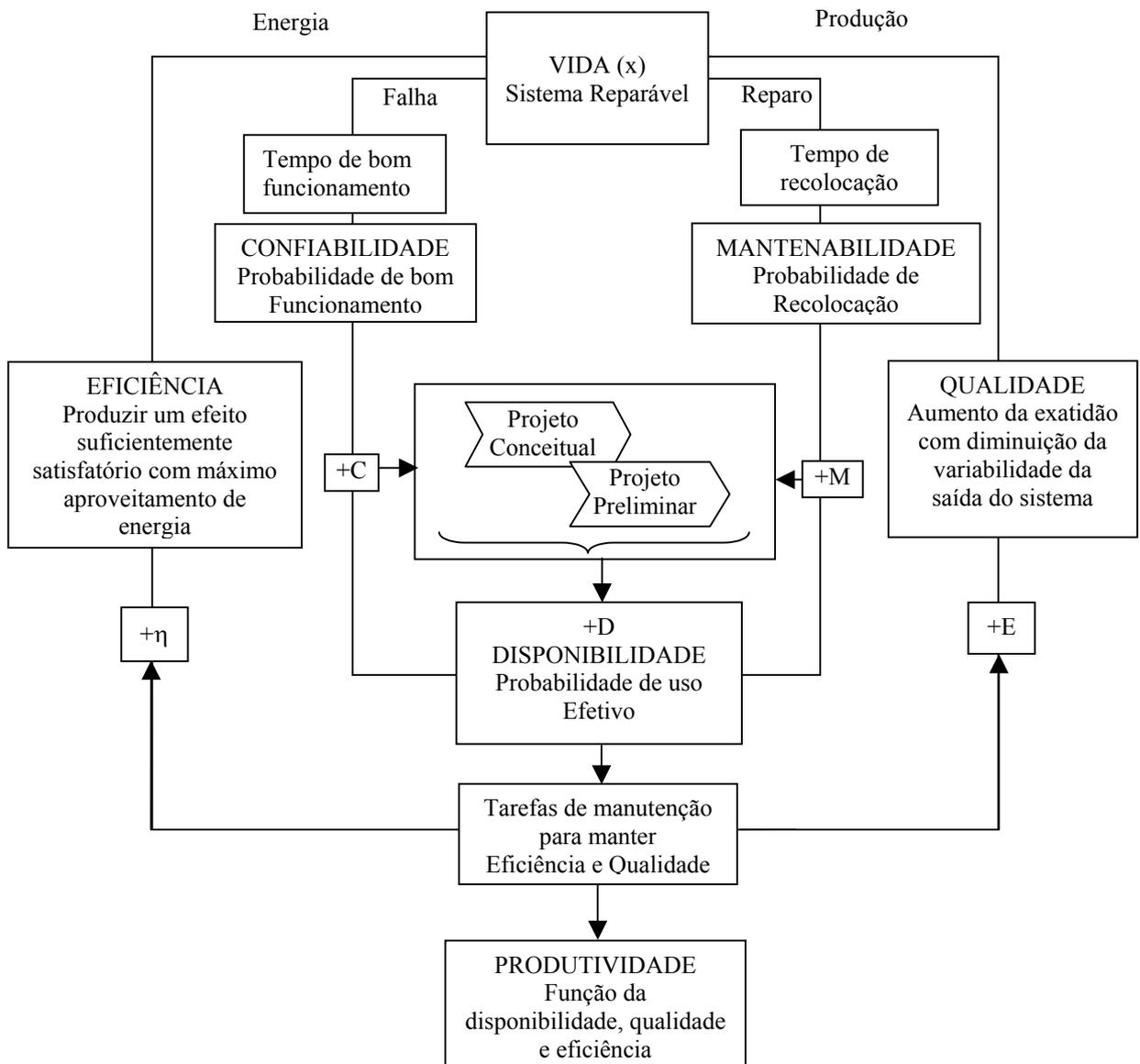


Figura 1.3 – Síntese da Disponibilidade e Produtividade (adaptado de Santos et al, 1999 e Dias,1996).

As ações de manutenção, conforme mencionado anteriormente, mantêm um nível de qualidade e eficiência do produto a ser projetado para garantir produtividade. Todavia, as manutenções também devem atender as prioridades atuais como segurança pessoal, proteção ambiental, garantia de cumprimento contratual de produção e respeito às leis vigentes. Estas prioridades definem estratégias de manutenção que resultam em impactos diretos no custo do

ciclo de vida do produto, incluindo o suporte logístico. Através da estratégia escolhida é estabelecido o tipo de manutenção para cada componente do sistema, podendo ser preventivas, controladas ou corretivas, as quais devem assegurar atributos mais desejáveis como confiabilidade, manutenibilidade, disponibilidade, eficiência, qualidade, produtividade.

Entretanto, a busca por informações, que auxiliem no estabelecimento de uma estratégia de manutenção, durante o processo de projeto, requer um trabalho demorado e detalhado. Pois em primeiro lugar deve-se identificar os componentes em *standby* (componentes redundantes que são acionados para substituir um componente falho) na estrutura física de um produto a ser projetado. Isto é feito porque componentes em *standby* normalmente requerem uma manutenção do tipo detectiva que é uma atividade periódica desenvolvida para checar ou testar se o equipamento ainda funciona (Nunes, 2001; Moubray, 1997). Depois, para cada componente, é imperativo o levantamento dos seus modos de falha cujos efeitos podem comprometer a disponibilidade e produtividade do produto bem como as prioridades de segurança pessoal e ambiental. Os componentes em funcionamento, redundantes ou não, com modos de falha que geram e induzem tais efeitos, terão preferência em receber manutenções controladas ou preventivas aplicáveis e eficientes.

Para dar suporte a este trabalho de estabelecimento de uma estratégia de manutenção nas fases iniciais de projeto, esta tese se propõe a criar uma sistemática com abordagens sobre confiabilidade, manutenibilidade e sistemas especialistas. A relevância da confiabilidade se deve ao fato de poder contribuir com ferramentas como modelagem confiabilística e análise dos modos de falha e seus efeitos. Manutenibilidade está relacionada com os métodos e procedimentos para selecionar a manutenção mais adequada a cada tipo de modo de falha de um componente. Os conceitos e definições de sistemas especialistas são focados nesta proposta com intuito de criar uma base para sistematização do conhecimento e viabilizar a criação de um protótipo de um sistema especialista que faça inferência de manutenções controladas, preventivas e corretivas para cada componente, visando manter a função principal do produto a ser projetado e demais prioridades como segurança pessoal e ambiental.

1.3 – Objetivos da Tese

Sistematizar o conhecimento relativo ao projeto de sistemas hidráulicos e gerar um sistema especialista que facilite o processo de projeto para a confiabilidade e manutenibilidade destes sistemas. Esse intento é alcançado com desenvolvimento de um sistema especialista para auxiliar na implementação de uma estratégia de manutenção do produto na fase do projeto preliminar.

1.3.1 – Objetivos específicos

O processo de desenvolvimento de um sistema especialista é normalmente dividido em estudo de viabilidade, aquisição do conhecimento, representação do conhecimento, projeto, teste, documentação e manutenção. Esta tese propõe-se a execução das quatro primeiras fases de desenvolvimento, chegando até a implementação de um protótipo inicial com o conhecimento sistematizado para confiabilidade e manutenibilidade. Alcançando-se essa meta, têm-se como contribuições o processo de aquisição e representação do conhecimento que são consideradas como as etapas mais relevantes e constituem um verdadeiro gargalo no desenvolvimento de um sistema especialista, conforme Reys & Pati (2000), Yahia et all (2000), Silva & Dawson (1997), Hamilton e Breslawski (1996) e Kidd (1987).

No processo de projeto de sistemas hidráulicos, pretende-se obter, representar e sistematizar o conhecimento com objetivo de auxiliar na determinação de uma estratégia de manutenção com baixo custo, sem comprometimento da função principal do sistema. Para chegar a este objetivo, deve-se buscar: regras que identifiquem os componentes importantes para execução da função principal; os modos de falha cujos efeitos impedem a execução da função principal e as tarefas de manutenção que mantenham a função principal.

Outro objetivo é identificar e associar métodos e técnicas da confiabilidade e manutenibilidade no projeto de sistemas hidráulicos. Esta envolve modelagem confiabilística, análise dos modos de falha e seus efeitos que irão auxiliar no estabelecimento de tarefas de manutenção eficientes e baixo custo para cada componente.

1.4 – Justificativas da Tese

Tendo em vista o detalhamento e o trabalho envolvido no estabelecimento de uma estratégia de manutenção e seu respectivo impacto no custo do ciclo de vida do produto, os objetivos desta tese se justificam pelas contribuições no projeto de sistemas hidráulicos, na sistemática para confiabilidade e manutenibilidade e no desenvolvimento de um sistema especialista.

As contribuições para o projeto de sistemas hidráulicos estão na viabilização de um auxílio computacional para inferir manutenções controladas, preventivas e corretivas para cada componente nas fases iniciais de projeto. Tal abordagem tem despertado interesse em vários especialistas pelo fato desta fornecer uma indicação de componentes relevantes para execução

da função principal e por focar modos de falha com efeitos indesejáveis no sistema e nos demais componentes.

Na área de confiabilidade e manutenibilidade são apresentados alguns dos principais métodos e técnicas para modelagem confiabilística, análises para levantamento de modos de falha e seus efeitos, além de técnicas de seleção de manutenções controladas, preventivas e corretivas. Discute-se cada um dos métodos e utiliza-se o método do grupo mínimo de corte para processar a análise de confiabilidade nos sistemas hidráulicos estudados. Este método foi escolhido em função da facilidade para implementação computacional.

O sistema especialista na engenharia é normalmente utilizado para os diagnósticos de equipamentos. Na área de projeto de sistemas hidráulicos, há poucos exemplos, entre os quais cita-se o protótipo apresentado por Silva (1998). No projeto para manutenibilidade há um sistema especialista para recomendar dimensões ergométricas apropriadas para acessibilidade durante a fase de projeto de equipamentos navais (Tarelko, 1995; Tarelko, 1999). Mas a idéia de criar um sistema especialista para definir uma estratégia de manutenção nas fases iniciais de projeto, tem sido pouco abordada a não ser nos trabalhos desta tese na aquisição do conhecimento para modelagem confiabilística visando indicação dos principais componentes para execução da função principal do sistema hidráulico (Vinadé et al, 2001a) e na indicação de manutenções controladas e preventivas para componentes críticos com modos de falha que comprometem a função principal, segurança pessoal, ambiental e que induzem falhas nos demais componentes (Vinadé et al, 2001b).

1.5 – Conteúdo dos Capítulos

O capítulo 2 trata das últimas tendências no processo de projeto de sistemas hidráulicos, onde se evidenciam algumas contribuições para confiabilidade e manutenibilidade de sistemas hidráulicos. Para tanto, este capítulo descreve o processo de projeto de sistemas automáticos no qual se situa o projeto de sistemas hidráulicos de reguladores de velocidade usado como estudo de caso desta tese. Com intuito de caracterizar a falha nestes sistemas é descrito sucintamente o princípio de funcionamento dos reguladores de velocidade.

No capítulo 3 descreve-se métodos e análises de confiabilidade e manutenibilidade, a modelagem e a análise da confiabilidade, o método do grupo mínimo de corte, a análise dos modos de falha e seus efeitos, e por último, descreve-se a aplicação do diagrama lógico de decisão da manutenção centrada na confiabilidade. Para cada método apresentado, é feito um exemplo de aplicação em sistemas hidráulicos. No capítulo é também abordada a manutenção destes reguladores e de sistemas hidráulicos em geral.

O capítulo 4 faz uma descrição dos principais elementos de um sistema especialista e os relacionamentos entre os mesmos, bem como a sequência de passos normalmente seguidos para o desenvolvimento de um sistema especialista. O final é constituído por algumas técnicas de representação do conhecimento e sugere-se uma proposta para representar o conhecimento do sistema especialista para confiabilidade e manutenibilidade aplicados em sistemas hidráulicos.

O capítulo 5 focaliza a etapa de aquisição do conhecimento, um dos principais gargalos no desenvolvimento de sistemas especialistas. Para tanto se propõe a integração de métodos como modelagem confiabilística, grupo mínimo de corte e o método indutivo para aquisição de conhecimento. Como resultado tem-se um modelo já analisado pelos referidos métodos para ser submetido a proposição descrita no capítulo 4.

O capítulo 6 trata de uma proposição onde se consideram análises de modos de falha e seus efeitos em sistemas hidráulicos e alocação de manutenções controladas, preventivas e corretivas. Esta proposta complementa o estabelecimento de manutenções considerando os modos de falha com efeitos primários, de aviso, modos de falha não isolados e os que impedem a função principal, segurança e integridade ambiental.

Capítulo 7 descreve a implementação da sistemática proposta através do protótipo de um sistema especialista. Neste capítulo são apresentadas a estrutura funcional, a base de conhecimento bem como as interfaces utilizadas pelo protótipo.

O capítulo 8 consiste na apresentação dos resultados junto com os comentários de especialistas a respeito da sistemática e do protótipo do sistema especialista.

O capítulo 9 enumera algumas conclusões a respeito do referido trabalho além de fazer uma sequência de recomendações para trabalhos futuros.

O apêndice A descreve o princípio de funcionamento dos circuitos hidráulicos de potência e atuação que constituem os reguladores velocidade de turbinas. Nestas descrições são justificados o uso e duplicação de componentes nestes circuitos.

Uma vez que a tese trata sobre alocação de manutenções baseadas no tempo de funcionamento, o apêndice B descreve duas formas de estabelecimento do intervalo entre as manutenções. A primeira é baseada no cálculo da confiabilidade, quando se dispõe o histórico do tempo de serviço até ocorrência da falha. A segunda é baseada na condição do componente onde procura-se definir parâmetros que indicam o fim da funcionalidade de um componente após um tempo de operação.

Para selecionar manutenções é necessário saber quais os modos de falha a serem controlados ou eliminados. Portanto o apêndice C apresenta tabelas de modos de falha, causas e

efeitos de cada componente hidráulico. Estas tabelas fazem parte da base do conhecimento do sistema especialista oriundo deste trabalho de tese.

O apêndice D descreve o processo de instalação e execução do sistema especialista protótipo resultante desta tese.

CAPÍTULO 2

SISTEMAS HIDRÁULICOS E REGULADORES DE VELOCIDADE

2.1 – Introdução

Neste capítulo são abordadas as últimas tendências no processo de projeto de sistemas hidráulicos, onde se evidenciam algumas contribuições para confiabilidade e manutenibilidade de sistemas hidráulicos. O processo de projeto é o foco desta tese cujo intento é contribuir com a incorporação da confiabilidade e manutenibilidade. Contudo, faz-se um recorte para descrever o processo de projeto de sistemas automáticos no qual se situa o projeto de sistemas hidráulicos de reguladores de velocidade onde será aplicado na forma de estudo de caso.

O princípio de funcionamento dos reguladores é abordado não só por ser o estudo de caso desta tese, mas também devido ao fato que a proposta desta tese visa sugerir manutenções corretivas, preventivas e controladas que mantenham a função principal deste sistema. Sem conhecer o princípio de funcionamento a partir de um diagrama de fluxo funcional, fica difícil saber se dois componentes similares no sistema têm que trabalhar em série ou um deles é redundante.

Além de conhecer o princípio de funcionamento, a sugestão de manutenções deve seguir uma estratégia, uma vez que o regulador está normalmente inserido em um ambiente de vários equipamentos para produção de energia elétrica. Mesmo assim, o regulador não perde sua prioridade no recebimento de ações de manutenção mais eficientes e caras. Essas ações são normalmente implementadas para que mantenham a integridade do equipamento e a garantia de produção elétrica. Mas atualmente, evitar as conseqüências das falhas na segurança pessoal, integridade ambiental e as multas impostas pelas leis vigentes devido a paradas inesperadas, também tendem a se tornar prioridades de uma estratégia de manutenção aplicada a reguladores de velocidade.

2.2 – Processo de Projeto de Sistemas Automáticos

A hidráulica reúne os conhecimentos para o uso da pressão estática e dinâmica do fluido para transmitir forças e potências em forma de movimentos lineares ou rotacionais, que são proporcionados pela associação de um conjunto de componentes.

O desenvolvimento destes sistemas requer uma lógica de forma que sejam bem adaptados para solucionar um problema específico. Essa lógica é o processo de projeto cuja definição, apresentada por Forcellini & Back (1997), é um mapa que mostra, a partir de necessidades de um objeto específico, como chegar ao produto final. No entanto, conforme Furst (2001), em um mapa podem existir diferentes caminhos para se chegar a um destino, analogamente, no processo de projeto existem diferentes soluções para qualquer problema de projeto.

O processo de projeto de um sistema hidráulico, é tratado como projeto de sistemas automáticos que envolve atividades de diversos domínios tecnológicos e, por sua vez, vários especialistas. Esse processo de projeto demanda a união de componentes elétricos, hidráulicos, mecânicos, pneumáticos, eletrônicos e também de softwares (De Negri & Vieira, 1997). Os sistemas hidráulicos e pneumáticos têm se mostrado como soluções adequadas para atuação em máquinas e processos como: manipulação de peças e ferramentas, posicionamento de dispositivos mecânicos, controle de forças, velocidade, etc. Isso se deve à capacidade de atuação rápida e precisa e à possibilidade de receber sinais elétricos de comando através de válvulas eletro-hidráulicas e eletropneumáticas (De Negri & Vieira, 1997). Conforme estas características, os sistemas hidráulicos têm sido uma boa opção para controle de velocidade de turbinas hidrelétricas, onde é exigida uma interface entre os sensores para medição de deslocamentos de abertura e fechamento de passagens d'água, e controladores que mantêm, através de um circuito hidráulico de atuação, a posição desejada destas passagens.

A multidisciplinaridade não se resume só no desenvolvimento do sistema automático em si, mas também está relacionada com processos de projetos paralelos (projeto de engenharia civil, elétrica, mecânica, etc) que vão sendo integrados com o propósito de constituir um sistema maior ou produto maior. Para melhor visualizar e descrever os níveis entre os processos de projetos, Araújo et al (2001) apresenta um modelo de processos de desenvolvimento integrado de produto. Baseando-se neste modelo e aplicando no contexto de projeto de usinas hidrelétricas, elaborou-se a figura 2.1.

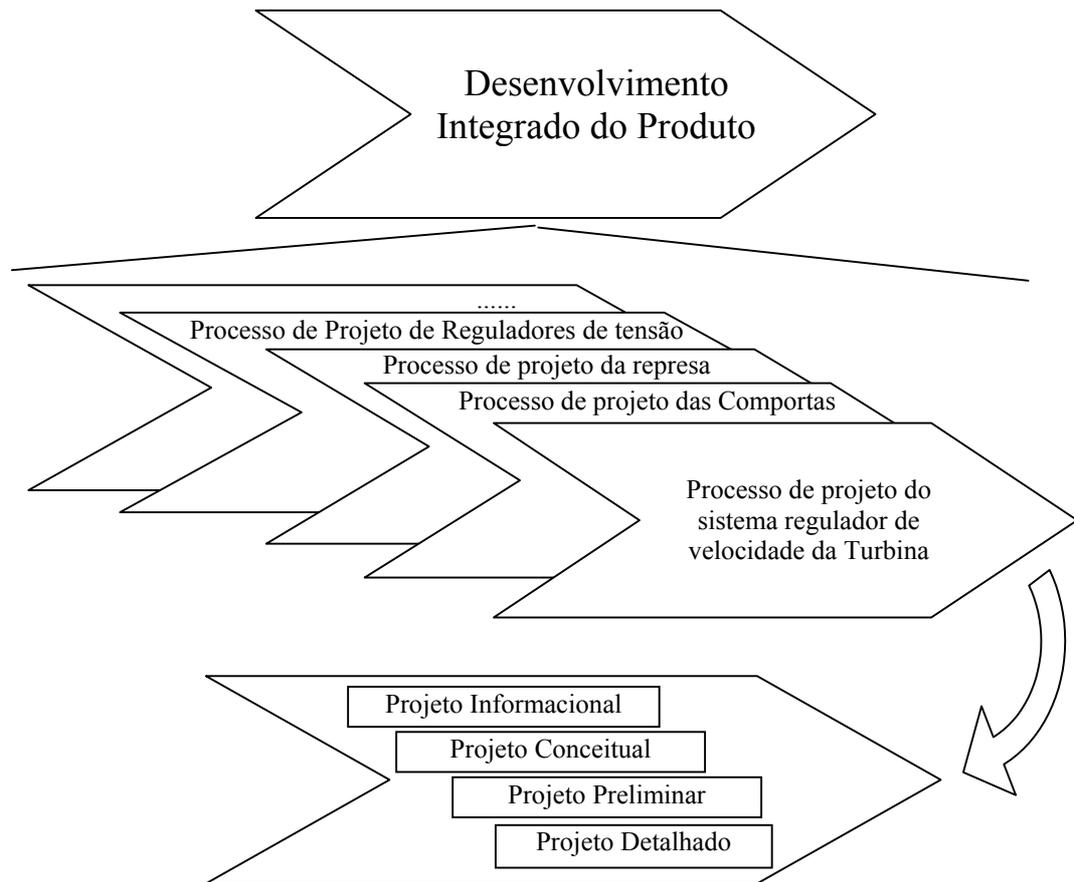


Figura 2.1 – Modelo de desenvolvimento integrado do produto (adaptado de Araújo et al, 2001).

Seguindo os trabalhos de Back (1983), Ogliari (1999) e Maribondo (2000), adotou-se as quatro principais fases da sistemática do processo de projeto: projeto informacional, projeto conceitual, projeto preliminar e projeto detalhado. O projeto informacional começa com as informações do cliente visando estabelecer requisitos e especificações de projeto. No projeto conceitual estão as tarefas que buscam por concepções com maiores chances de atender os requisitos de projeto determinados no projeto informacional. A fase seguinte, projeto preliminar, otimiza a concepção selecionada no projeto conceitual para satisfazer especificações técnicas e econômicas. Por último, o projeto detalhado que visa construir e testar protótipo.

Furst (2001) e De Negri (1996) detalharam processo de projeto de sistemas automáticos em fases, etapas e tarefas que são ilustradas na figura 2.2. A cada fase têm-se círculos na entrada e saída, procurando evidenciar os dados necessários para início e fim de cada fase. Observando a figura 2.2, é importante salientar que os requisitos levantados no projeto informacional servirão de entrada em todas as fases subsequentes. Por exemplo, no projeto

conceitual, terão os requisitos de carga (que serão mencionados a seguir) e no projeto preliminar os parâmetros quantitativos de cada atuador do sistema. No projeto preliminar, variáveis tratadas são: a pressão a ser fornecida ao sistema e os demais dados quantitativos para cada atuador como força estática máxima do atuador estendido, força estática máxima do atuador retraído (no caso de atuador linear), força dinâmica máxima do atuador estendendo, força dinâmica máxima do atuador retraindo, velocidade máxima de deslocamento, deslocamento e peso da massa. O resultado de cada fase deve ser avaliado em relação aos requisitos estabelecidos e às decisões tomadas no projeto informacional.

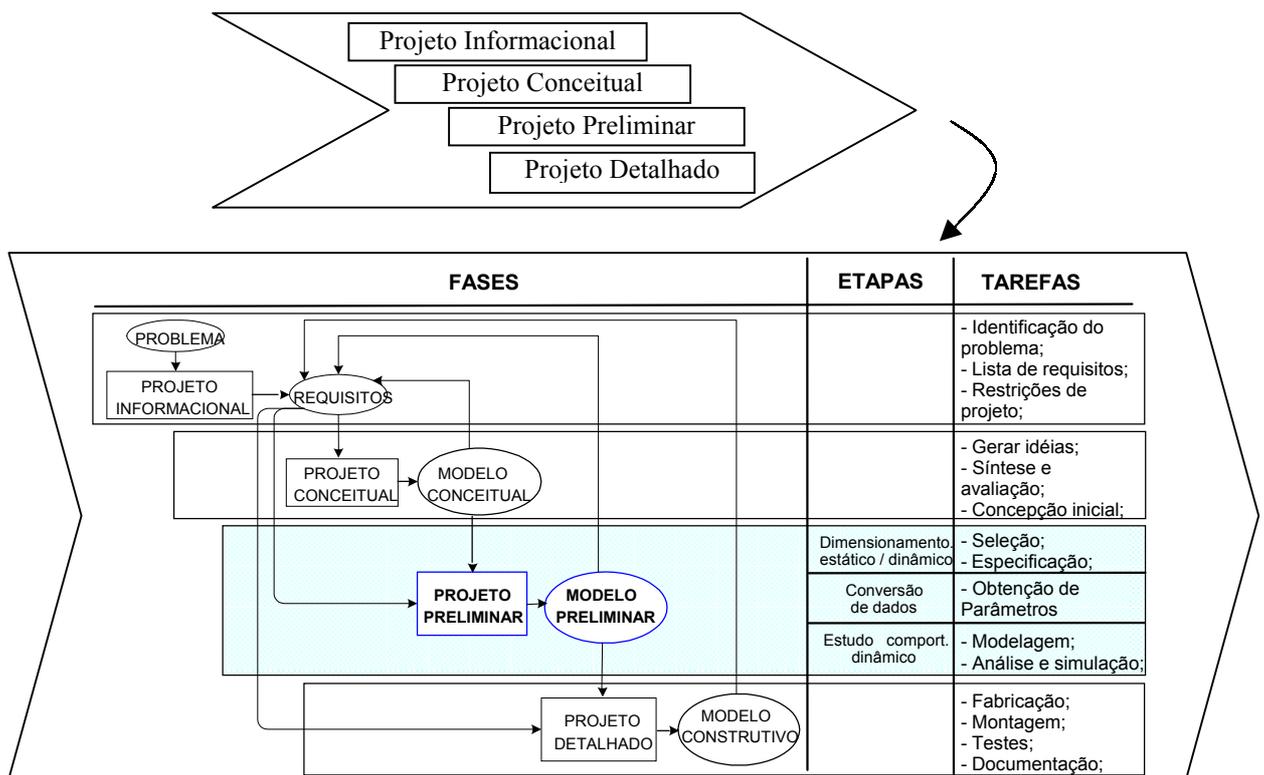


Figura 2.2 – Sistematização para processo de projeto de sistemas automáticos (adaptado de De Negri, 1996 e Furst, 2001).

2.2.1 – Projeto Informacional de Sistemas Automáticos

O projeto informacional é a fase do processo de projeto onde é feita a aquisição e a sistematização da informação e do conhecimento relacionado com o tema do projeto, para subsidiar todas as outras fases e etapas do processo de projeto. Segundo Maribondo (2000), isso significa identificar oportunidades de inovação tecnológica, mercadológica e estabelecer a missão principal do produto a ser projetado. Após a definição do problema, deve-se assegurar a satisfação do cliente em relação ao produto a ser projetado e isso é feito através de tarefas de tradução das necessidades dos clientes em requisitos de projeto. Os requisitos que

induzem a escolha por um sistema hidráulico como solução adequada tem relação com suas vantagens citadas por Geis (1988):

- Transmissão de grandes forças em espaço reduzido;
- Liberdade construtiva na disposição dos elementos;
- A fonte de energia e o acionamento podem ser montados em diferentes ambientes com união de dutos rígidos e flexíveis;
- Possibilidade de utilização de elementos e módulos padrões;
- Conversão simples de movimentos rotativos em retilíneos e vice-versa;
- Elevada densidade de energia;
- Boa regulagem de forças atuantes.

Um outro requisito preponderante atualmente é a alta confiabilidade que direciona a solução hidráulica para uma integração com a informática e eletrônica. Tal como exposto por Buur (1990), De Negri e Vieira (1997) a adoção de um sistema desse tipo aumenta a confiabilidade devido à eliminação de partes móveis como cames, correias, etc. Precisa, no entanto, dar robustez às soluções já que, de outro modo, aumenta-se a complexidade dos sistemas em função da integração dos diferentes sistemas de atuação: mecânica, hidráulica, elétrica, eletrônica, pneumática.

2.2.2 – Projeto Conceitual de Sistemas Automáticos

Os requisitos, enquanto uma saída do projeto informacional, se constituem na informação básica a ser trabalhada para gerar a concepção do problema que está sendo estudado. Para sistemas hidráulicos esta fase do processo de projeto é simplificada já que a concepção de certa forma já está constituída tendo-se para cada função um conjunto de circuitos alternativos. Um exemplo de utilização deste procedimento é visto no protótipo de um sistema especialista desenvolvido por Silva (1998), onde requisitos qualitativos dos circuitos de atuação são estabelecidos pelos atributos como: tipo de movimento; descrição do movimento; modo de controle de atuação e modo de atuação da força de gravidade. Para cada um destes atributos, têm-se indicações que especificam um determinado circuito de atuação na base de conhecimento do protótipo e gera as alternativas de sistemas hidráulicos.

Os circuitos mencionados no parágrafo anterior são entendidos nesta tese como subsistemas constituídos por grupos de componentes associados. Um projeto executado com a utilização desses subsistemas é feito conforme o conceito de circuitos. Como exemplo do uso

de conceito de circuitos, tem-se a implementação dos seguintes circuitos hidráulicos que realizam determinadas funções em um sistema a ser projetado: circuito de bombeamento, circuito de controle de velocidade, circuito de controle de força, circuito de controle de posição, etc. Com a utilização do conceito de circuito, pode-se estabelecer uma estrutura hierárquica acerca de sistema, circuito e componente conforme Silva (1998). Essa estrutura hierárquica contribui para maior facilidade de representação computacional e para a agilidade em se obter alternativas de solução de um problema já na fase de projeto conceitual.

O requisito qualitativo, que normalmente caracteriza o circuito de atuação dos reguladores de velocidade, é o estabelecido no atributo de modo de controle de atuação. Nos reguladores, este atributo é atendido por circuitos de controle de posição os quais são constituídos por quatro funções elementares: medir posição real do deslocamento (função executada por um transdutor eletrônico de posição), comparar posição real com a posição desejada e enviar um sinal de erro para correção da posição (função normalmente executada por um controlador eletrônico ou um sistema mecânico de barras e amortecedor), direcionar fluido com movimento proporcional ao sinal de erro (função executada por uma válvula direcional proporcional), converter energia hidráulica em deslocamento e força (normalmente executado por um cilindro). O diagrama de fluxo funcional deste tipo de circuito é mostrado na figura 2.3.

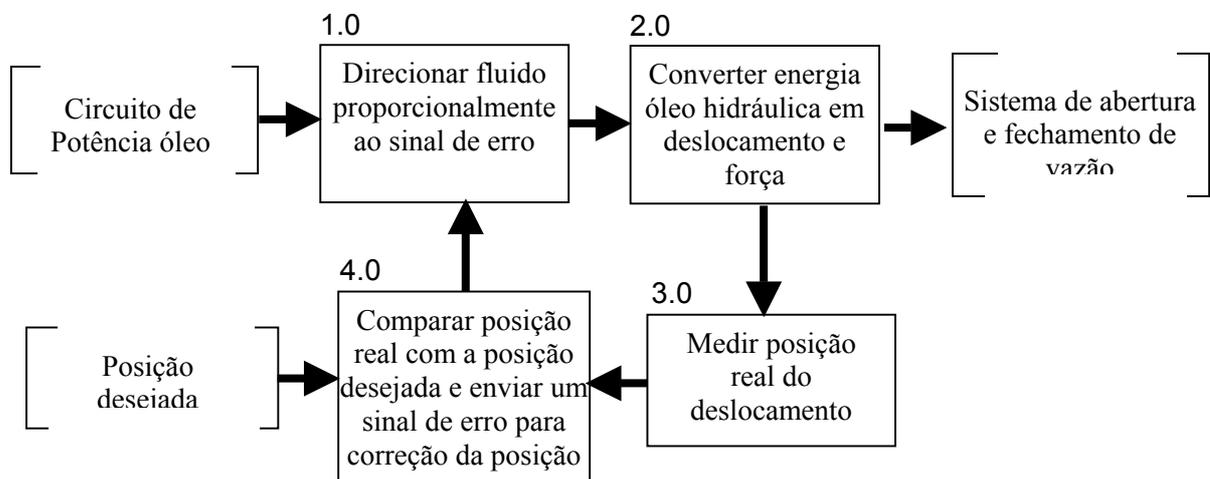


Figura 2.3 - Diagrama de fluxo funcional de um circuito de controle de posição (adaptado de Furst, 2001).

Para atendimento de requisitos de manutenibilidade do projeto informacional, é recomendável optar por concepções de circuitos de bombeamento com bombas de deslocamento fixo pois esses costumam ser de fácil manutenção, conforme Silva (1998).

Além disso a manutenibilidade destes circuitos pode ser melhorada através do acionamento por controladores lógicos programáveis (CLP) em função da facilidade de manutenção que estes proporcionam devido a modularidade, facilidade para recolocação e diagnóstico de falha (NASA, 1998a). Já os circuitos de atuação, no contexto de reguladores de velocidade de usinas antigas, onde os sistemas são de baixa pressão e grandes vazões, têm circuitos pouco confiáveis devido ao maior número de componentes com partes móveis. Isso porque requerem válvulas direcionais piloto de vazões menores para comandar válvulas direcionais de vazões maiores (válvulas distribuidoras), tendo às vezes atuadores auxiliares. A tendência é optar por circuitos com componentes menores de altas pressões e pequenas vazões, para diminuir o número de componentes pilotos, auxiliares e também o tamanho dos componentes hidráulicos.

No apêndice A, são apresentadas algumas concepções básicas e adaptadas para diferentes tipos de turbinas. O objetivo principal é controlar a frequência e a potência elétrica através do fechamento e abertura da vazão d'água, usando o circuito hidráulico controlador de posição.

2.2.3 – Projeto Preliminar de Sistemas Automáticos

O projeto preliminar para sistemas hidráulicos, já com solução definida, tem início no diagrama de circuito hidráulico combinado com o diagrama de blocos e um diagrama elétrico ilustrado na figura 2.3. Conforme exposto por Furst (2001), na fase do projeto preliminar são executadas três etapas distintas: o dimensionamento estático e dinâmico, a conversão de dados de catálogo e o estudo do comportamento dinâmico. O dimensionamento estático e dinâmico apresenta duas tarefas básicas como seleção do atuador e da válvula. Essas tarefas são realizadas simultaneamente por apresentarem parâmetros interdependentes, isto é, calculando-se a área do cilindro define-se uma vazão a ser usada para seleção da válvula direcional. Esse processo também é iterativo pois os parâmetros vão sendo modificados até se obter os requisitos do projeto informacional tais como velocidade, força, deslocamento e pressão de suprimento. A etapa seguinte, conversão de dados de catálogo, como o próprio diz, trata da obtenção de parâmetros técnicos de catálogos de fabricantes necessários para projeto e simulação dos sistemas hidráulicos de controle de posição. A última etapa é o estudo do comportamento dinâmico que consiste na modelagem matemática, análise e a aprovação do modelo. Essas etapas não serão abordadas neste trabalho por estarem fora do enfoque da confiabilidade e manutenibilidade. A descrição sucinta das mesmas visa caracterizar a sua existência e sua importância no processo de projeto de sistemas hidráulicos relacionado com o estudo da confiabilidade e manutenibilidade. O projeto preliminar é uma das fases mais

oportunas para aplicação de técnicas e métodos para confiabilidade e manutenibilidade que serão apresentados no capítulo 3.

No projeto conceitual pode-se ter mais de uma concepção e em cada uma delas as várias recomendações, informações e requisitos referentes a modos de falha e efeitos que podem gerar problemas para o meio ambiente, para as pessoas, para a produtividade e que, por sua vez, tem relação com custo, logística e manutenção. O projeto preliminar é a fase que possibilita ver as conseqüências de uma solução. Para tanto é importante dispor para o projetista as conseqüências que uma concepção pode acarretar já no início desta etapa, dando chances de tomar decisões com menores complicações para o cliente durante o ciclo de vida útil do sistema a ser projetado

2.2.4 – Projeto Detalhado de Sistemas Automáticos

A etapa a seguinte, projeto detalhado, trata do detalhamento do projeto para fabricação, montagem, testes e documentação do sistema. Nesta etapa pode-se ter um protótipo do sistema para validar as características de manutenibilidade e confiabilidade do sistema, através de demonstrações de acessibilidade, número de tarefas de manutenções a serem implementadas, etc. Este trabalho contudo, como já sinalizado, se aprofundará nas fases do projeto conceitual e preliminar. Estas fases são fundamentais por permitirem trabalhar mais facilmente os diversos conceitos existentes, sem grandes investimentos e em menor tempo. Entende-se que uma vez estabelecidos os conceitos e definido o projeto preliminar com os requisitos de confiabilidade e manutenibilidade, os mesmos serão repassados para a fase seguinte: projeto detalhado. Há, evidentemente, de dispor de algumas ferramentas que facilitam o acompanhamento do desenvolvimento do produto a partir dos requisitos estabelecidos desde a fase informacional. O sistema especialista aqui proposto é uma ferramenta de projeto preliminar mas pode contribuir com projeto detalhado na elaboração de documentações voltadas para manutenções que mantenham a função principal do sistema. Outra contribuição é o controle de algum modo de falha através de uma manutenção sugerida pelo sistema especialista, durante os testes a serem feitos no protótipo do sistema hidráulico.

2.3 – Concepções e Definições de Sistemas Hidráulicos Reguladores de Velocidade.

Os reguladores de velocidade são considerados ao mesmo tempo: coração e cérebro de uma unidade geradora de energia (Souza et al, 1983). Os reguladores são responsáveis de forma direta e indireta pela qualidade da energia gerada, em termos de freqüência e potência, com relação direta para o consumidor: máquinas industriais, equipamentos hospitalares,

aparelhos elétricos e eletrônicos para ordenar o tráfego rodoviário, influenciando na qualidade de vida e até mesmo no crescimento econômico de uma região.

Além disso, os reguladores não só controlam a potência gerada para um determinado local, mas também podem fazer parte de um grupo maior de unidades de geração, onde é exigida alta disponibilidade, devido às solicitações imediatas de geração potência extra. Esta disponibilidade, como visto no capítulo 1, está atrelada à confiabilidade e manutenibilidade cuja aplicação tem como primeiro passo o entendimento das principais funções do sistema. Para tanto, no apêndice A, são apresentados concepções e princípios de funcionamento comumente usados nos circuitos de reguladores de velocidade através de diagramas de fluxos funcionais, onde são explicitadas as funções de cada componente.

Em serviço, os reguladores de velocidades são submetidos a diferentes estratégias de manutenção, as quais são normalmente aplicadas para focar a produtividade de energia elétrica ou para manter a função principal. A implementação de uma estratégia pode estar fortemente vinculada com a concepção do regulador de velocidade, pois há exemplos de duplicação de componentes com propósitos distintos, onde as tarefas de manutenção podem ser idênticas ou diferentes. Conforme apêndice A, existem três propósitos para duplicação de componentes em reguladores de velocidade: reserva para o caso de falha (duas bombas no circuito de potência), regulagem dupla para evitar o efeito aríete (no caso da turbina Pelton há um atuador para defletor de jato e outro para controle da vazão através do bico injetor) e para a melhora de rendimento hidrodinâmico da turbina (no caso das turbinas Kaplan há um atuador para controle de vazão e outro atuador para o passo variável das pás). No primeiro propósito, considerando o impacto da falha na função principal do sistema, a bomba reserva pode estar desligada e ser acionada quando a bomba principal falhar. A bomba reserva, estando desligada, sofre inspeções periódicas para constatação de sua disponibilidade. Já a bomba principal pode ser submetida a ações de manutenções controladas, uma vez que pode apresentar efeitos como ruído, vibração, vazamentos e temperatura excessiva, variações na pressão e vazão.

Para outros dois propósitos, os componentes duplicados podem receber manutenções controladas, preventivas ou uma combinação das mesmas com intuito de evitar falhas inesperadas que normalmente implicam em elevados custos devido ao comprometimento da integridade física da instalação das turbinas Pelton e Kaplan, sem mencionar as possíveis multas contratuais devido ao não fornecimento de energia.

2.4 – Considerações finais

Este capítulo se evidenciou algumas contribuições para confiabilidade e manutenibilidade no processo de projeto como a integração de informática e eletrônica, adoção de controladores lógicos programáveis, recomendações para seleção de circuitos com componentes menores e com alta pressão. A contribuição a ser proporcionada por esta tese é o estabelecimento de uma estratégia de manutenção baseada na configuração física do sistema a ser construído. Isto pode ser obtido na fase do projeto preliminar quando se dispõe de uma ou mais alternativas de concepções físicas. Conhecendo-se as ações de manutenção de cada opção é possível comparações entre número de condições a serem monitoradas, número de manutenções preventivas e corretivas.

Por fim, neste capítulo vislumbram-se as principais contribuições a serem proporcionadas pelo cumprimento dos objetivos desta tese. No próximo capítulo será explicitada a contribuição do estabelecimento de uma estratégia de manutenção baseada na estrutura física do sistema e análise dos modos de falha e seus efeitos nas fases iniciais de projeto. Essas ferramentas serão abordadas no capítulo 3, onde são apresentados exemplos aplicados em sistemas hidráulicos. No capítulo 4 é proposto um auxílio computacional através de um sistema especialista que levará em conta os modos de falha e seus efeitos, bem como, o modo de operação dos componentes para definição de ações de manutenção.

CAPÍTULO 3

MÉTODOS DE APOIO AO PROJETO PARA CONFIABILIDADE E MANTENIBILIDADE APLICADOS A SISTEMAS HIDRÁULICOS

3.1 – Introdução

O objetivo deste capítulo é apresentar métodos para facilitar a inclusão dos atributos de confiabilidade e manutenibilidade no processo de projeto direcionado para sistemas hidráulicos. Evidentemente, espera-se contribuir também com os atributos de segurança, sem afetar os aspectos econômicos, já que a competitividade precisa ser garantida. Sem isso todos os processos de desenvolvimento são fadados ao insucesso. As ações desenvolvidas deverão facilitar a explicitação das manutenções bem como as recomendações relativas à melhor gestão de manutenção que visa obter segurança, desempenho e economia, baseada na implementação de várias ações. Todas estarão voltadas para o desenvolvimento de um projeto que resulte em mais confiabilidade, mais manutenibilidade através da adoção de uma estratégia de manutenção.

A escolha de uma estratégia de manutenção a ser tomada já no processo de projeto direcionará as demais ações que ajudarão na utilização dos princípios e conceitos de confiabilidade e manutenibilidade. Para tanto, esta seleção pode basear-se em três principais estratégias de gerenciamento e análise de atividades de manutenção: Manutenção Centrada no Reparo, Manutenção para Produtividade Total (TPM – *Total Productive Maintenance*) e Manutenção Centrada na Confiabilidade (RCM – *Reliability Centered Maintenance*) (Geraghty, 1996 citado por Matos, 1999). Torna-se importante salientar que esses processos podem também ocorrer de forma integrada.

A manutenção centrada no reparo é definida à medida que as falhas vão ocorrendo. Ou seja, as máquinas são projetadas e postas para trabalharem, ao falharem, buscam-se ações corretivas necessárias para fazer as máquinas voltarem ao estado de operação.

A manutenção para produtividade total é um conceito originalmente desenvolvido pelos japoneses, dirigido inicialmente para o ambiente da manufatura com participação direta da produção. Visa maximizar a eficácia geral dos equipamentos e a eliminação das perdas de produção devido à deficiência dos equipamentos. O processo de gestão é *top-down* orientado para ciclo de vida com manutenção orientada para a produtividade (Blanchard et al, 1995, p17). Isto é feito através da preservação e conseqüente prolongamento do período de vida

entre falhas e da vida total do sistema. Focando a identificação das principais perdas de produção, por consequência, revelam-se os custos associados com a falta de uma apropriada manutenção para o sistema (Matos, 1999). A utilização desta estratégia de manutenção implica em que a maioria das ações de manutenção sejam executadas pelo próprio usuário, sem envolver tarefas mais especializadas como ajustes, diagnósticos, etc.

A estratégia de Manutenção Centrada na Confiabilidade se baseia na definição de manutenção centrada na função principal, diminuindo ao máximo as ações de manutenção preventiva definida no tempo, a menos que isto seja para maior segurança, maior disponibilidade (confiabilidade), maior eficiência em controlar e prevenir uma falha, buscando sempre menor custo. Esta gestão usa procedimentos como definição das funções primárias e secundárias de cada componente, análise das causas e efeitos dos modos de falha, e por último, aplicação de diagramas lógicos de decisão para determinar falhas ocultas e seleção de manutenções preventivas, controladas e corretivas.

A sistemática a ser desenvolvida nesta tese se baseia na Manutenção Centrada na Confiabilidade de onde serão estabelecidas algumas regras básicas para viabilizar a criação de um sistema especialista. Para tanto, serão abordados métodos e técnicas referentes a esta estratégia, onde as definições das funções de cada componente serão substituídas por análises através de diagramas de fluxo funcional e modelos confiabilísticos. Diante destas considerações, serão elaborados modelos confiabilísticos de circuitos hidráulicos que serão obtidos pela análise da função principal do mesmo e depois serão analisados pelo método do grupo mínimo de corte. O passo seguinte é fazer a análise dos modos de falha e seus efeitos de cada componente nos respectivos modelos confiabilísticos. Os modos de falha, causas e efeitos também farão parte da base de conhecimento, além de serem mostrados os tipos de falhas existentes que podem estar relacionados com tempo de funcionamento ou serem de natureza aleatória.

Para identificação dos modos de falha é feita uma abordagem sobre diagnóstico de falha em sistemas hidráulicos. O diagnóstico de falha é considerado nesta tese como uma etapa da manutenção corretiva que faz uso de efeitos de aviso baseadas nas sensações humanas que também podem prever modos de falha no sistema. Neste capítulo discute-se o uso destes efeitos de aviso e as técnicas de monitoração para as causas raízes das falhas de um sistema hidráulico.

Tal como é normalmente feito, para cada modo de falha do componente aplica-se o diagrama lógico de decisão para estabelecer as ações preventivas, controladas ou corretivas aplicáveis, que também farão parte da base de conhecimento.

Para melhor compreender os conceitos presentes na manutenção centrada na confiabilidade, apresenta-se algumas das principais definições usadas no domínio da confiabilidade e manutenibilidade, assim como é feita uma visão geral do histórico e do estado-da-arte da aplicação dos métodos e técnicas usados na estratégia de manutenção centrada na confiabilidade.

3.2 - Definições

Primeiramente será dada a definição de Sistema. Este termo é uma expressão freqüentemente usada nas áreas de confiabilidade, manutenibilidade e sistemas especialistas as quais serão estudadas no decorrer desta tese. Conforme Blanchard & Fabricky (1990), sistema pode ser definido como:

“...uma reunião ordenada e compreensiva de fatos, princípios, doutrinas em um ramo de conhecimento ou pensamento, tal como sistema de filosofia.”

“...é um conjunto de componentes inter-relacionados funcionando em conjunto diante de um objetivo em comum.”

Além destas definições, existem outras, mas as citadas acima se relacionam de forma mais direta com o contexto do trabalho. A primeira definição pode ser relacionada com o sistema especialista, a segunda com sistemas hidráulicos. A relação entre a primeira definição e sistema especialista está na presença de termos como princípios e doutrinas que são constituídas por regras e preceitos (Ferreira, 1999), tal como conhecimento de um especialista. A relação entre a segunda definição e sistema hidráulico se deve a presença de termos como componentes que juntos cumprem uma função. Genericamente, sistema é uma reunião ou combinação de elementos ou partes (que podem ser tanto fatos, princípios até componentes mecânicos com uma função específica) inter-relacionados formando um todo (o que pode ser um sistema hidráulico com uma função global ou um sistema especialista com um tipo de conhecimento composto de regras e fatos). Portanto a palavra sistema deve ser acompanhada por um termo que especifique algum domínio de aplicação.

3.2.1 – Definições de confiabilidade e manutenibilidade

O termo confiabilidade é definido pela norma NBR 5462 (1994) como:

“Capacidade de um item desempenhar uma função requerida sob condições especificadas, durante um intervalo de tempo.”

O termo item é definido como qualquer parte, componente, dispositivo, subsistema, unidade funcional, equipamento ou sistema que possa ser considerado individualmente (NBR 5462, 1994).

Blanchard & Fabricky (1990) definem confiabilidade enfatizando quatro elementos como probabilidade, desempenho satisfatório, tempo e condições de operações especificadas. Confiabilidade é definida como:

“Probabilidade que um sistema ou produto desempenhará função de uma maneira satisfatória para um dado período de tempo, quando usado sob condições operacionais especificadas.”

O desempenho satisfatório é um padrão que pode ser associado à média ou a um critério de medida efetiva, que se usa para comparar o desempenho de que se deseja avaliar (Dias, 1996). O tempo, período ou intervalo de uso (NBR 5462, 1994) é analisado considerando que a falha ocorrerá, mais cedo ou mais tarde, dependendo das condições de uso. As condições operacionais especificadas estão relacionadas com a localização geográfica onde o sistema irá funcionar, o perfil operacional, o perfil de transporte, ciclos de temperatura, umidade, vibração, impacto, etc (Blanchard et al, 1995).

Como se pode observar, a confiabilidade é tratada como um parâmetro quantitativo dependente do tempo. A confiabilidade diminui no decorrer do tempo, podendo diminuir com maior ou menor velocidade dependendo das condições de operação.

Esta proposta de tese considerará a confiabilidade integrada na estratégia de gerenciamento da manutenção. A atuação se dará de forma a auxiliar na adoção do tipo de manutenção (corretiva, preventiva ou controlada) ainda na fase projeto, para manter o sistema com desempenho satisfatório durante o período de tempo previsto no projeto, através do controle dos modos de falha com conseqüências mais severas em relação segurança pessoal, funcionalidade do sistema ou a problemas econômicos.

Em relação aos tipos de manutenções têm-se as seguintes definições, segundo a norma NBR 5462/1994:

Manutenção Corretiva:

“Manutenção efetuada após ocorrência de uma pane destinada a recolocar um item em condições de executar uma função requerida.”

Manutenção Preventiva:

“Manutenção efetuada em intervalos predeterminados ou de acordo com critérios prescritos, destinados a reduzir a probabilidade de falha ou degradação do funcionamento de um item.”

Manutenção Controlada/Monitorada/Preditiva:

“Manutenção que permite garantir uma qualidade de serviço desejada, com base na aplicação sistemática de técnicas de análise, utilizando-se de meios de supervisão centralizados ou de amostragem, para reduzir ao mínimo a manutenção preventiva e diminuir a manutenção corretiva.”

Vale salientar que a manutenção preventiva é conhecida também como manutenção baseada no tempo, enquanto que, manutenção controlada é conhecida como manutenção baseada na condição. Estes termos são frequentemente usados por Smith (1993). Este autor descreve a estratégia de manutenção centrada na confiabilidade para controlar ou eliminar os modos de falha de um sistema.

Para pensar em manutenção integrada ao processo de projeto torna-se necessário inserir a definição de manutenibilidade. Segundo a definição da norma NBR 5462 (1994) manutenibilidade é:

“Capacidade de um item ser mantido ou recolocado em condições de executar suas funções requeridas, sob condições de uso especificadas, quando a manutenção é executada sob condições determinadas e mediante procedimentos e meios prescritos.”

A definição acima expressa manutenibilidade em termos de capacidade de assegurar que um item seja mantido por tarefas ou ações previsíveis baseados em manuais técnicos e listas de verificações (*checklists*), cumprindo requisitos qualitativos para execução de uma manutenção. Este conceito, não determina uma maneira de quantificar a manutenibilidade. A manutenibilidade é um atributo que, assim como a confiabilidade, pode ser quantificável. As definições abaixo já estabelecem a manutenibilidade em termos quantitativos facilitando na análise desta característica.

Segundo Blanchard et al (1995), manutenibilidade é definida como:

“...uma característica de projeto e instalação que é expressa como a probabilidade que a manutenção não será requisitada mais do que x vezes em um dado período, quando o sistema é operado de acordo com procedimentos prescritos, por pessoal

com habilidade apropriada. Isto pode ser análogo à confiabilidade enquanto a manutenibilidade trata com a frequência global de manutenção.”

“...uma característica de projeto e instalação que é expressa como probabilidade que o custo da manutenção para um sistema ou produto não ultrapassará y unidades monetárias para um período de tempo planejado, quando o sistema é operado e mantido de acordo com procedimentos prescritos. Custo deve ser apresentado em termos de fatores de consumo de recursos e impactos ambientais, bem como, em valores monetários equivalentes.”

Segundo Blanchard et al (1995), manutenibilidade é uma característica multidimensional, isto é, apresenta diversas medidas para especificar a manutenção de um produto ou sistema, conforme pode ser verificado pelas definições com enfoques diferentes: a primeira relaciona manutenibilidade com frequência de manutenções, enquanto a segunda focaliza os recursos monetários e ambientais.

Esta tese considera a manutenibilidade na estratégia de gerenciamento da manutenção. Para cada modo de falha, a manutenibilidade é um atributo que visa diminuir o tempo de parada, enquanto a confiabilidade visa aumentar a distância entre as paradas e diminuir a frequência de parada, observando critérios de segurança, disponibilidade e custo.

3.2.2 – Definição de defeito, falha e pane

A norma NBR 5462 (1994), apresenta diferentes conceitos sobre defeito, falha e pane. Estas definições devem estar bem claras para indicar o principal enfoque desta tese.

O termo defeito, conforme NBR 5462 (1994), é definido como:

“Qualquer desvio de uma característica de um item em relação aos seus requisitos.”

A norma observa que “os requisitos podem, ou não, serem expressos na forma de uma especificação”. Uma outra observação é que “um defeito pode, ou não, alterar a capacidade de um item em desempenhar uma função requerida”. Conforme a definição e as observações, o termo defeito não se subentende como perda da função principal do item. Um item pode executar a sua função, embora não apresente características ideais de funcionamento.

A norma NBR 5462 define falha como:

“Término da capacidade de um item desempenhar a função requerida.”

Esta definição apresenta observações que depois da falha, o item tem uma pane. Também é colocado que “falha” é um evento; diferente de “pane” que é um estado. No contexto desta tese, o termo falha será freqüentemente abordado, baseado na relação com perda da função do item.

Logo após a falha, conforme a norma, o item entra em pane que é definida como:

“Estado de um item caracterizado pela incapacidade de desempenhar uma função requerida, excluindo a incapacidade durante a manutenção preventiva ou outras ações planejadas, ou pela falta de recursos externos.”

O termo “pane” é usado em várias definições na norma NBR 5462, inclusive na denominação de métodos e procedimentos na área de confiabilidade e manutenibilidade. Um exemplo é a análise dos modos de falha e seus efeitos que é denominado pela norma como análise de modos de pane e seus efeitos. Nesta tese será adotado análise de modos de falha e seus efeitos, tal como é adotado pela maioria dos autores da área de confiabilidade e manutenibilidade.

3.3 – Histórico de Confiabilidade e Manutenibilidade

O objetivo desta seção consiste em citar técnicas e normas de procedimentos para prever a confiabilidade e manutenibilidade de um sistema. Estas técnicas e normas servem de base para a sistematização de projetos em diversas áreas tecnológicas.

A confiabilidade utiliza métodos e modelos matemáticos para determinar a probabilidade e a freqüência de falha de um sistema. A manutenibilidade utiliza métodos e modelos matemáticos para determinar a freqüência e o tempo de reparo de um sistema. Com o estudo da confiabilidade e manutenibilidade é possível estimar custos e viabilidade de um sistema ou produto a ser projetado.

Os trabalhos pioneiros sobre confiabilidade começaram nos anos 50 com uma série de eventos tais como: simpósios, desenvolvimento de técnicas estatísticas como uso das distribuições de Weibull, elaboração de manuais militares dos Estados Unidos para fornecer orientações sobre aplicações confiáveis de componentes eletrônicos, estabelecimentos de programas de confiabilidade e enfim, uma variedade de esforços para melhorar as técnicas de confiabilidade através de uma coleção de dados de projeto (Denson, 1998).

O trabalho TR-1100, “Análise de Fadiga e Confiabilidade para Equipamentos Eletrônicos” no período de 1956, feito pelo Departamento de Defesa Americano (DoD) no

Centro de Análise de Confiabilidade (RAC) iniciou a análise de confiabilidade. Este documento apresentou modelos matemáticos para estimar taxas de falhas de componentes eletrônicos e também evidenciou as dificuldades associadas com a correlação estatística de causa e efeito. O TR-1100 foi o predecessor da norma MIL-STD-217 que se tornou uma das principais referências para projeto de sistemas confiáveis (Denson, 1998).

A primeira versão da MIL-STD-217 começou a ser publicada pela Marinha americana em 1962. Esta norma tornou-se base para as análises da confiabilidade. As outras fontes de análise foram desaparecendo. Parte da razão para falência das outras fontes era a frequência com que a MIL-STD-217 era citada em favor dos contratantes (Denson, 1998).

Ainda nos anos 60, uma abordagem diferente para manutenibilidade foi apresentada pela RAC (Crawford & Altman, 1972). O principal objetivo era relacionar os requisitos de manutenção na fase de projeto do equipamento ou sistema. No mesmo período, surgia o conceito de disponibilidade que relaciona os fatores de projeto e fatores de suporte. Os fatores de projeto relacionam-se com confiabilidade e manutenibilidade, os fatores de suporte relacionam-se com logística e administração durante o ciclo de vida útil do produto ou sistema. A disponibilidade é definida como sendo a probabilidade de um sistema estar operando em qualquer tempo (Crawford & Altman, 1972).

Nos anos 80, sob patrocínio da SAE (Sociedade de Engenharia Automotiva), a indústria automotiva desenvolveu um conjunto de modelos de confiabilidade específicos para área de eletrônica automotiva. Paralelamente, as indústrias de telecomunicações começaram a desenvolver metodologias de confiabilidade, baseando-se na MIL-STD-217. Neste mesmo período, surge um crescimento explosivo de circuitos integrados com componentes do tamanho de 0,5 μm , junto com essa evolução, vem um novo desafio para os pesquisadores da confiabilidade, pois percebeu-se a correlação estatística entre taxa de falha e a complexidade do sistema (Denson, 1998).

Na chegada dos anos 90, tradicionalmente utilizava-se a norma MIL-STD-217 para encontrar a taxa de falha de um sistema com base na taxa de falha dos componentes. Esta técnica atendia as necessidades para os anos 60 e 70, quando os componentes tinham altas taxas de falha e os sistemas eram menos complexos em relação aos anos 90. Com o aumento da complexidade do sistema e da confiabilidade dos componentes do sistema descobriram-se outros fatores além da taxa de falha que interferiam na confiabilidade. Estes fatores são: manufatura, projeto, requisitos do sistema, interface e software. Anteriormente estes fatores não eram empregados nos métodos de determinação da confiabilidade (Denson, 1998).

Outra contribuição importante foi a consideração da nova metodologia de projeto para manutenibilidade como um atributo de projeto. Blanchard & Fabricky (1990) sistematizaram o projeto para manutenibilidade enfatizando o ciclo de vida do produto. O ciclo de vida descrito começa em projeto, produção, utilização pelo consumidor, suporte logístico e descarte, sendo que o projeto é dividido em três fases orientadas para o restante do ciclo de vida do produto : conceitual, preliminar e detalhado. O projeto conceitual é a primeira fase onde se faz estudos de viabilidade e identificação dos requisitos de manutenção que devem ser traduzidos em medidas de manutenibilidade. A fase seguinte, projeto preliminar, são feitas análises para verificar o cumprimento das medidas de manutenibilidade estabelecidas na fase anterior. Na fase de projeto detalhado é constituída por testes e avaliações das medidas de manutenibilidade no protótipo já concebido. Blanchard et al (1995), apresentam alguns métodos e análises das normas MIL-STD distribuídos nas fases de projeto para manutenibilidade.

Nesta mesma década, surgiam novas aplicações para estratégia de gerenciamento de manutenção (RCM - *Reliability Centered Maintenance*- Manutenção Centrada na Confiabilidade) visando manter a confiabilidade, baixo custo e segurança. A RCM era aplicada na aviação comercial e em usinas nucleares, e, a partir de 90, foi sendo aplicada também na indústria petroquímica e subestações de energia elétrica. Esta estratégia ajuda na ponderação em relação aos critérios de disponibilidade, confiabilidade e segurança operacional dos equipamentos a um custo viável através da implementação de manutenções do tipo corretivo, preventivo e preditivo.

A RCM utiliza ferramentas de análise específica chamada de: FMEA (Análise de Modos de Falha e seus Efeitos) e FMECA (Análise dos Modos de Falha, seus Efeitos e sua Criticidade) para identificação dos modos de falha mais críticos, ajudando na determinação do melhor tipo de manutenção a ser adotada. A escolha do tipo de manutenção a ser adotada para um modo de falha é auxiliada por um diagrama de decisão, priorizando confiabilidade, segurança e baixo custo (Smith, 1993; Pradhan, 1994; Pradhan, 1996; Moubrey, 1997; Matos, 1999; Nunes, 2001).

Atualmente há uma coleção de sistemas computacionais para predição de confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade os quais são oferecidos por instituições como: Relex Software Corporation (Relex, 1999), Item Software Limited (AvSim+, 1999), BQR Reliability Engineering Ltd. (Care Basic Tutorial, 1999), Advanced Automation Corporation (AAC, 1999) e RAC Reliability Analysis Center (RAC, 1999). A maioria destes sistemas de predição baseia-se em dois tipos de simulações como modelos de Markov e os modelos estocásticos (NASA, 1998b). Os modelos estocásticos usam distribuições de probabilidade de

falhas e de reparo e outros parâmetros de manutenção para prever o percentual do tempo total que o sistema ficará fora de operação. Os modelos de Markov baseiam-se na análise de espaço-estado, isto é, consiste em determinar a probabilidade de um sistema estar em serviço ou em manutenção depois de um determinado número de ciclos de operações.

Este trabalho se propõe a contribuir com a evolução apresentada na medida em que pretende facilitar a inclusão da estratégia de manutenção durante o processo de projeto, visando aumentar a disponibilidade do produto que está sendo projetado. Neste item foi possível notar uma lacuna na automatização da inferência de uma estratégia de manutenção para que se viabilize as simulações de disponibilidade nas fases iniciais de projeto. Para fazer esta inferência, este trabalho de tese tem como base os métodos e técnicas a seguir para automatização do estabelecimento de uma estratégia de manutenção.

3.4 – Modelagem e análise de confiabilidade

Conforme Billinton & Allan (1983), na prática, um sistema é frequentemente representado como uma rede composta por componentes conectados em série, paralelo, malhas ou uma combinação destas interligações. É importante salientar que a rede de confiabilidade usada para modelar o sistema pode não seguir necessariamente a mesma estrutura física do sistema. Essas redes de confiabilidade serão definidas como modelos confiabilísticos. Salienta-se também que essas redes de confiabilidade têm reflexos na manutenibilidade dos sistemas. Alguns aspectos que interferem na manutenibilidade são: a identificação dos itens falhos, seu posicionamento na rede, intercambiabilidade e as interfaces entre os itens.

Os modelos confiabilísticos mais simples como os componentes em série e paralelo são identificados através dos efeitos de suas falhas no sucesso ou insucesso durante a execução da função global do sistema. A falha no sistema pode ser interpretada de diversas formas tal como o cumprimento insatisfatório de sua função e também pode ser caracterizada como um desvio exagerado do valor requerido para um tipo de saída do sistema.

Neste trabalho adotou-se as seguintes definições para componentes em série e paralelo (segundo Billinton & Allan, 1983):

Em série:

“Os componentes num grupo são ditos em série, do ponto de vista da confiabilidade, se todos componentes devem funcionar para o sucesso do sistema, ou basta apenas um componente falhar para todo sistema falhar.”

A figura 3.1, mostra a representação de um modelo confiabilístico com os componentes em série.

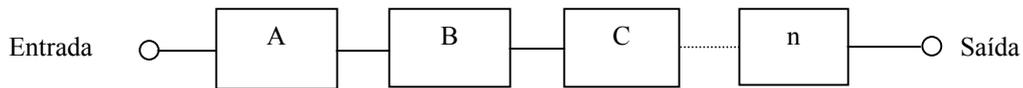


Figura 3.1 - Componentes em série.

Em paralelo:

“Os componentes num grupo são ditos em paralelos, do ponto de vista da confiabilidade, se precisar apenas um componente funcionando para sucesso do sistema ou todos devem falhar para o sistema falhar.”

A figura 3.2 mostra o modelo confiabilístico com os componentes em paralelo.

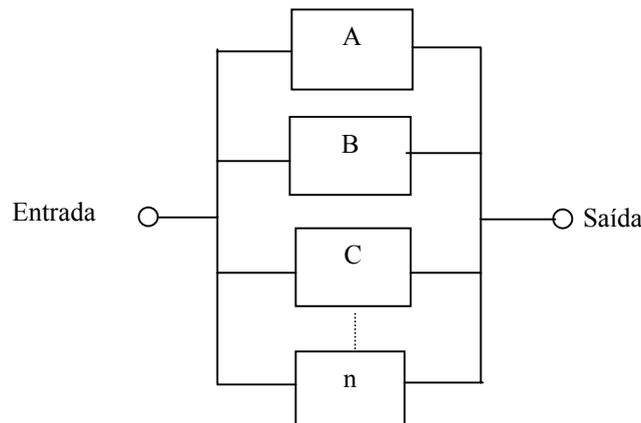


Figura 3.2 - Componentes em paralelo.

Conforme as definições acima, a condição de “todos os componentes do sistema devem funcionar para o sucesso do sistema” implica numa rede de todos os componentes estarem conectados em série. Se a condição for “apenas um componente precisa estar funcionando para o sucesso do sistema” implica que todos os componentes estão ligados em paralelo. As redes em série e paralelo são usadas extensivamente na avaliação, representação e redução de sistemas.

Além das redes mencionadas acima existem outros tipos de conexões como delta, estrela, conexão R em N, conexões trimodular e standby (Figura 3.3). As estruturas tipo delta devem

ser convertidas em uma estrutura estrela equivalente para facilitar cálculos de probabilidade de falha e definição de modos de falha. Conexões R-em-N consistem de n componentes independentes idênticos, dos quais pelo menos $r < n$ (lê-se r itens menor que n) destes componentes devem operar com sucesso, para que o sistema desempenhe com sucesso sua função. A conexão trimodular é muito utilizada em projeto de computadores e comporta dois subsistemas, um com três componentes em paralelo e outro com subsistema central. No subsistema paralelo são necessárias no mínimo duas unidades conectadas em paralelo para que funcione. Os casos apresentados e chamados de paralelo simples (um bom em n) e paralelo parcial (r bons em n) são chamados de sistemas paralelos com redundância ativa, ou seja, todos os itens estão trabalhando simultaneamente. A conexão standby é também chamada de sistema paralelo com redundância passiva. Neste caso, o item ou os itens redundantes ficam fora de operação, ou seja, estão na reserva passiva. Quando o item principal (item ativo) entrar na condição de falha, um sensor aciona um comutador que procede a substituição do item em falha pelo item bom que está na reserva. A figura 3.3 mostra a representação de cada uma destas conexões.

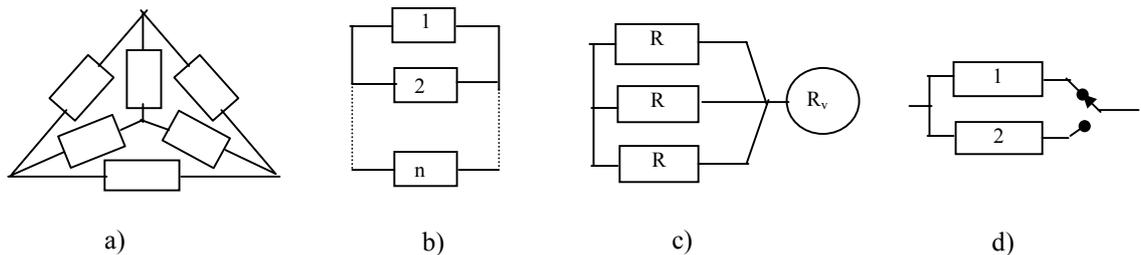


Figura 3.3 - a) Conexão delta-estrela; b) Conexão R-em-N; c) Conexão trimodular; d) Conexão standby;

Um ponto importante é o fato de um sistema tendo uma estrutura física definida, poder ser representado por diferentes modelos confiabilísticos, conforme os requisitos exigidos. Alterando-se o requisito do sistema muda-se o modelo confiabilístico, embora seja mantida a estrutura física do sistema. Isso pode ser exemplificado desconsiderando dessa análise demais implicações como modo de falha. Dado um sistema de bombeamento de água com duas bombas, cuja capacidade seja de 1000 l/min cada uma (figura 3.4). Fisicamente, as bombas estão dispostas paralelamente, sendo esta segundo sua configuração funcional. Se o requisito deste sistema for bombear somente 1000 l/min, considera-se as duas bombas estão em paralelo, do ponto de vista da confiabilidade, pois basta somente uma bomba para atender o requisito. Se o requisito for 2000 l/min, as duas bombas estão em série, do ponto de vista da

confiabilidade as duas bombas devem estar funcionando para cumprirem o requisito. A figura 3.4 mostra o sistema de bombeamento topologicamente, e os dois modelos confiabilísticos.

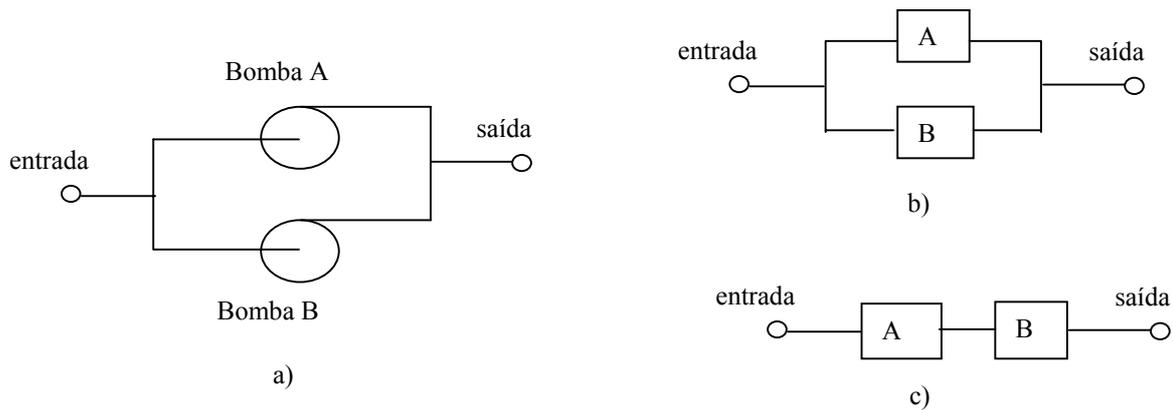


Figura 3.4 - a) Sistema de bombeamento fisicamente montado; b) Modelo confiabilístico paralelo com redundância ativa; c) Modelo confiabilístico série.

Além dos modelos confiabilísticos descritos até aqui, também existem outros modelos, os modelos chamados de complexos. Estes modelos podem ser reduzidos em várias combinações de subsistemas série e paralelo usando-se análises especiais. Estas análises visam simplificar a interpretação do funcionamento do sistema. Estes modelos complexos podem ser apresentados como mostrado na figura 3.5.

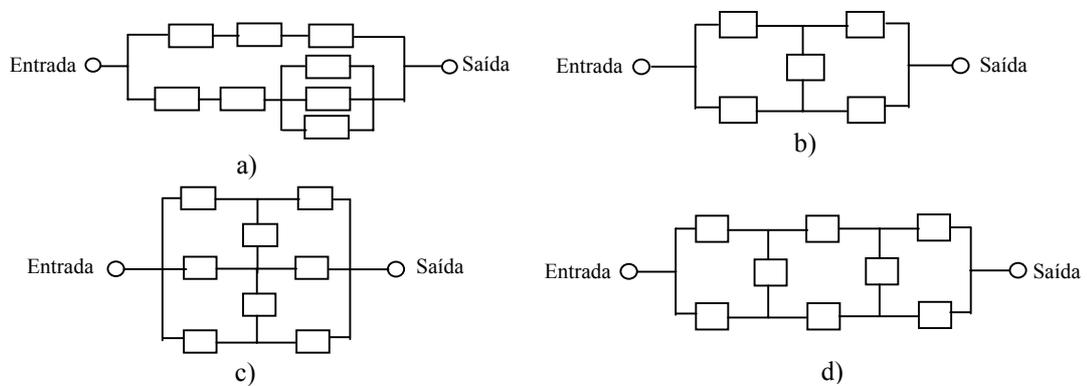


Figura 3.5 - Configuração complexa convencional; b) configuração complexa não convencional tipo "Ponte"; c,d) configurações complexas não convencionais tipo "Ponte Dupla" (Billinton & Allan, 1983).

Como é visto na figura 3.5, estes modelos não apresentam somente conexões em série e paralelo entre os componentes. A identificação dos componentes, cuja falha implica em falhas potenciais ao sistema, é um tanto difícil. Para reduzir sistemas complexos em série e paralelo com o propósito de identificar falhas potenciais, pode-se utilizar os métodos do grupo mínimo de corte, do grupo mínimo de ligação, da árvore de eventos, da árvore de falha, o método da decomposição, o método da inspeção e o métodos da matriz de conexão. Neste trabalho será

utilizado o método de grupo mínimo de corte por se mostrar mais apropriado à implementação computacional. Esta opção foi feita a partir de análise da revisão bibliográfica que trata deste assunto (Billinton & Allan, 1983).

O método da árvore de eventos consiste em enumerar todos os possíveis eventos de falha num sistema através de uma representação gráfica, no entanto, torna-se oneroso quando o número de componentes é superior a cinco conforme Billinton & Allan (1983). O método da árvore de falha (também conhecida por FTA, *Failure Tree Analysis*) trabalha a partir de uma falha indesejável e depois se busca pelas causas através de ramificações simbólicas. Neste caso, a falha indesejável deve ser bem especificada pois pode ser criada uma árvore de falha com várias causas e sem foco (Blanchard et al, 1995). Os demais métodos, como da decomposição, da inspeção, matriz de conexão e o método do grupo mínimo de ligação, não indicam de forma direta o modo de falha do sistema.

3.4.1 – Modelo confiabilístico do sistema hidráulico

Conforme Blanchard et al (1995), a análise e modelagem da confiabilidade são feitos na fase do projeto preliminar, onde já se dispõe de uma ou mais concepções do produto ou sistema a ser projetado.

Uma vez que não foram encontrados na literatura assuntos a respeito de projeto de sistemas hidráulicos focando confiabilidade e manutenibilidade, a tese aqui proposta se baseará nos conceitos de circuitos para elaboração do modelo confiabilístico do sistema hidráulico. Sendo assim, um sistema hidráulico é constituído pelo menos de um circuito de atuação e de um circuito de potência. Cada circuito terá um ou mais modelos confiabilísticos dependendo da função principal do circuito.

Os modelos confiabilísticos podem apresentar-se numa configuração diferente se for considerado o modo de falha de um componente. Um exemplo seria o modo de falha proveniente do desgaste, onde uma das conseqüências seria a contaminação do fluido por partículas metálicas (Anders, 1983). A contaminação pode resultar em uma pressão instável ou pressão baixa devido ao emperramento na posição aberta da válvula de alívio (Mitchell & Pippenger, 1997). Neste caso, independentemente se o componente desgastado esteja em paralelo ou série no modelo confiabilístico, o efeito seria como se estivesse em série, impedindo a função principal do sistema. Contudo, baseando-se na função principal mantida pela estratégia manutenção centrada na confiabilidade, este modo de falha pode ser evitado por ações preventivas e controladas (análise do óleo hidráulico ou sensores de detecção de partículas ou contaminantes) sem alterar a configuração do modelo confiabilístico.

Tendo-se uma concepção como a apresentada na figura 3.6, o primeiro passo é ter em mente a função principal do sistema. Supondo que uma especificação de projeto seja um nível de velocidade de atuação, sendo necessário apenas a bomba A. Para esta situação a bomba B, na redundância ativa, idêntica a A, trabalharia como reserva em constante funcionamento, colocando o excedente de vazão de volta ao reservatório. Mas para outras aplicações, o mesmo sistema da figura 3.6 pode ser requerido trabalhar com maior velocidade, exigindo maior vazão. Para esta situação, aciona-se válvula direcional D para obter maior velocidade de atuação. Portanto este sistema pode assumir duas funções principais: oferecer uma atuação linear numa velocidade baixa com bomba B em redundância ativa ou atuar com velocidade máxima com as bombas A e B em carga.

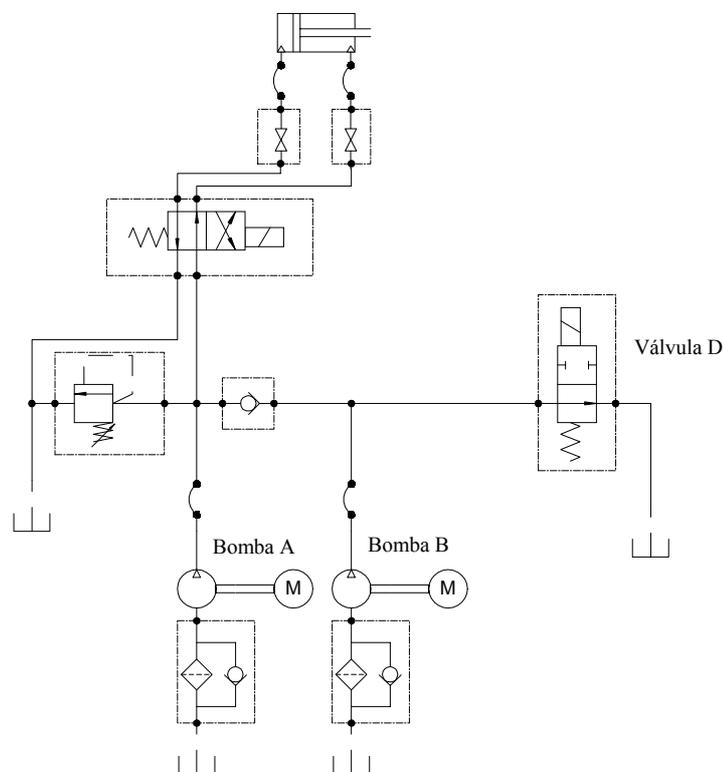


Figura 3.6 - Sistema hidráulico para deslocar carga em dois níveis de velocidades.

Segundo Blanchard et al (1995), o modelo confiabilístico é uma extensão da representação funcional do sistema. Para tanto, recomenda-se estabelecer a estrutura funcional do sistema antes de definir o modelo confiabilístico. Existem várias formas de representar a estrutura funcional de um sistema sendo que algumas destas representações são propostas por Pahl & Beitz (1996) e Blanchard et al (1995).

A representação funcional proposta por Pahl & Beitz (1996) é o método da função síntese. Este método baseia-se na definição da função global do sistema e depois no desdobramento em várias subfunções em diferentes níveis de detalhamento. Cada função

apresenta suas entradas e saídas e é denominada por um verbo e mais um substantivo tal como “manter pressão” e “bombear fluido”.

A função total é desdobrada em funções parciais e estas vão sendo desdobradas em vários níveis até chegar em funções elementares, as quais são suficientes para representar a função de um componente ou equipamento.

Cada nível de representação se constitui numa sistemática lógica, ligando as entradas e saídas de cada função parcial ou elementar do sistema. As entradas e saídas podem ser fluxos de energia, informações e materiais. A figura 3.7 mostra a função síntese da figura 3.6, explicitando os fluxos e as funções parciais e elementares.

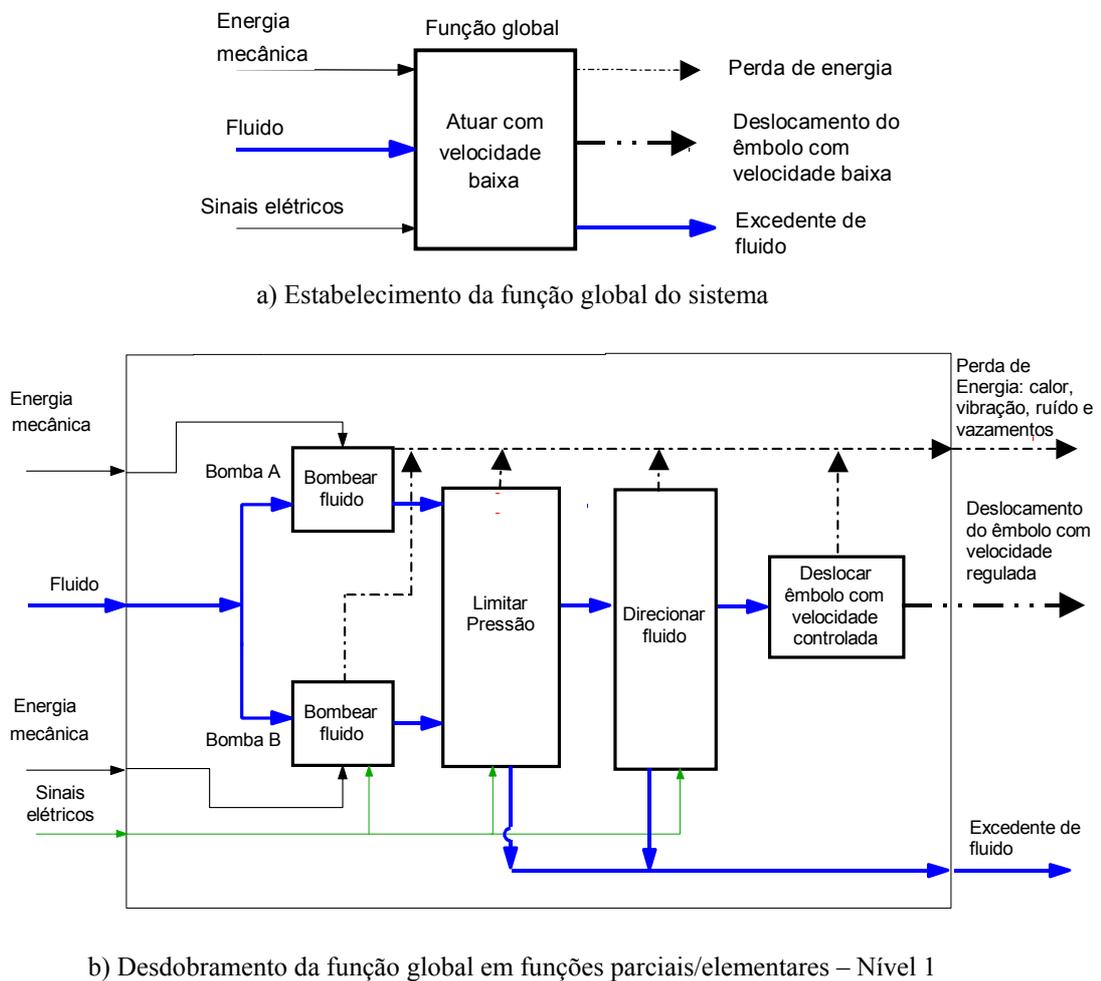


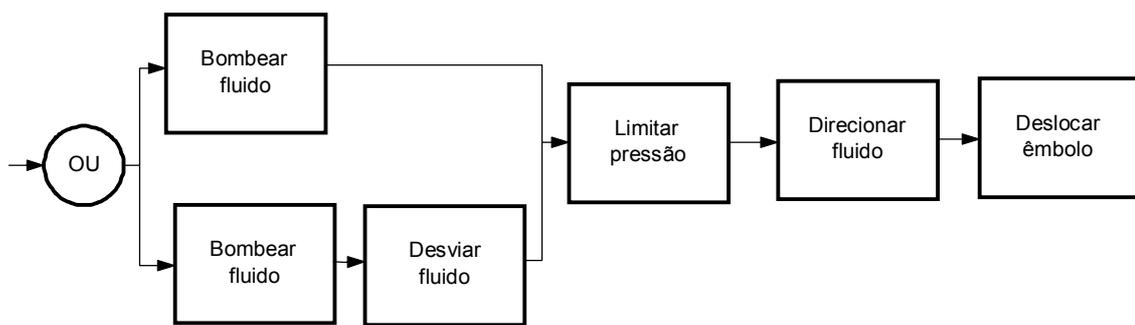
Figura 3.7 - Função síntese do sistema da figura 3.6.

O modelo funcional proposto por Blanchard et al (1995) é o diagrama de fluxo funcional, como apresentado na figura 3.8. Além de representar o sistema, o diagrama de fluxo funcional também modela as atividades de manutenção que podem ser abordadas para verificar a viabilidade tecnológica e a eficiência de apoio logístico. No entanto, neste trabalho de tese a

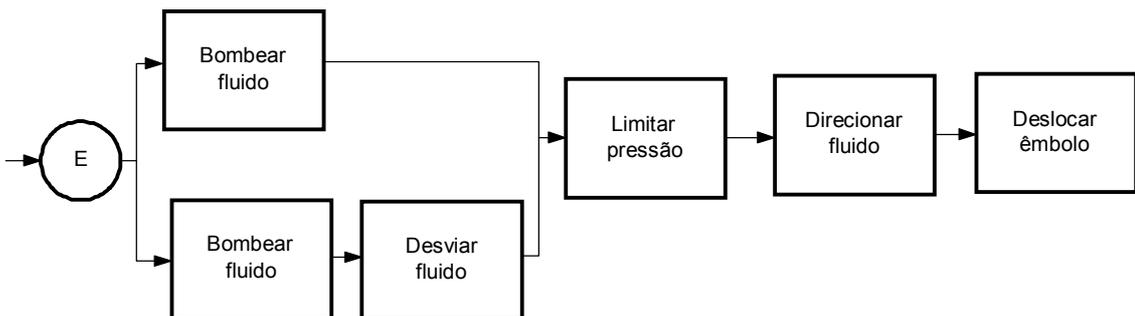
análise funcional será usada somente para modelagem do sistema. Esta forma de representação de um sistema tem a vantagem ser de fácil compreensão para os vários grupos envolvidos no projeto.

Nos diagramas de fluxos funcionais (Figura 3.8), as conexões entre os blocos funcionais são linhas horizontais e verticais que mostram relações em série e paralelo. As relações em paralelo podem ser acompanhados por portas lógicas do tipo E e OU. O termo E é usado para funções paralelas que devem ser completadas antes da execução da função seguinte. O termo OU é usado para indicar as funções alternativas antes de executar a próxima função.

Aplicando-se o diagrama de fluxo funcional no sistema hidráulico da figura 3.6 obtêm-se uma estrutura funcional mais simples em relação a função síntese. Indicando a seqüência de funções em série e paralelo é possível visualizar mais de uma função principal para o sistema: atuação linear numa velocidade baixa com a função bombear em redundância ativa ou atuar numa velocidade máxima diferentes, conforme figura 3.8.



a) atuação linear numa velocidade baixa (redundância ativa).



b) atuar com velocidade máxima.

Figura 3.8 - Diagramas de fluxos funcionais com duas velocidades.

A representação funcional proposta por Blanchard et al (1995) será adotada nesta tese para modelar funcionalmente o sistema. A escolha por esta representação baseou-se na facilidade de relacionamento com modelos confiabilísticos, pois os elementos já se encontram em série e paralelo. Outro motivo é a simplicidade na representação do fluxo funcional do

sistema sem as demais entradas e saídas como fluxos de energia, matéria e informações que acabam divergindo do objetivo de criar o modelo confiabilístico do sistema. A possibilidade de representar mais de uma função principal no sistema com o uso das portas lógicas E e OU nas ligações em paralelo, também foi outro ponto favorável na escolha deste tipo de representação.

Embora as funções de bombear estejam em paralelo na análise funcional, estas podem ser colocadas em série para atender a função de operar com velocidade máxima ou em paralelo para atender velocidade baixa, conforme figura 3.9. Assim, circuito de potência (com funções de direcionar, desviar fluido e limitar pressão) pode assumir dois modelos confiabilísticos. O circuito de atuação linear (com as funções de direcionar fluido e deslocar êmbolo) pode ser representado por um modelo em série, tal como mostra figura 3.9. Nestes modelos, foram desconsiderados os dutos e as conexões. O fluido foi considerado como componente, pois pode levar a falha do sistema quando este se encontra contaminado por resíduos metálicos, água ou elementos químicos.

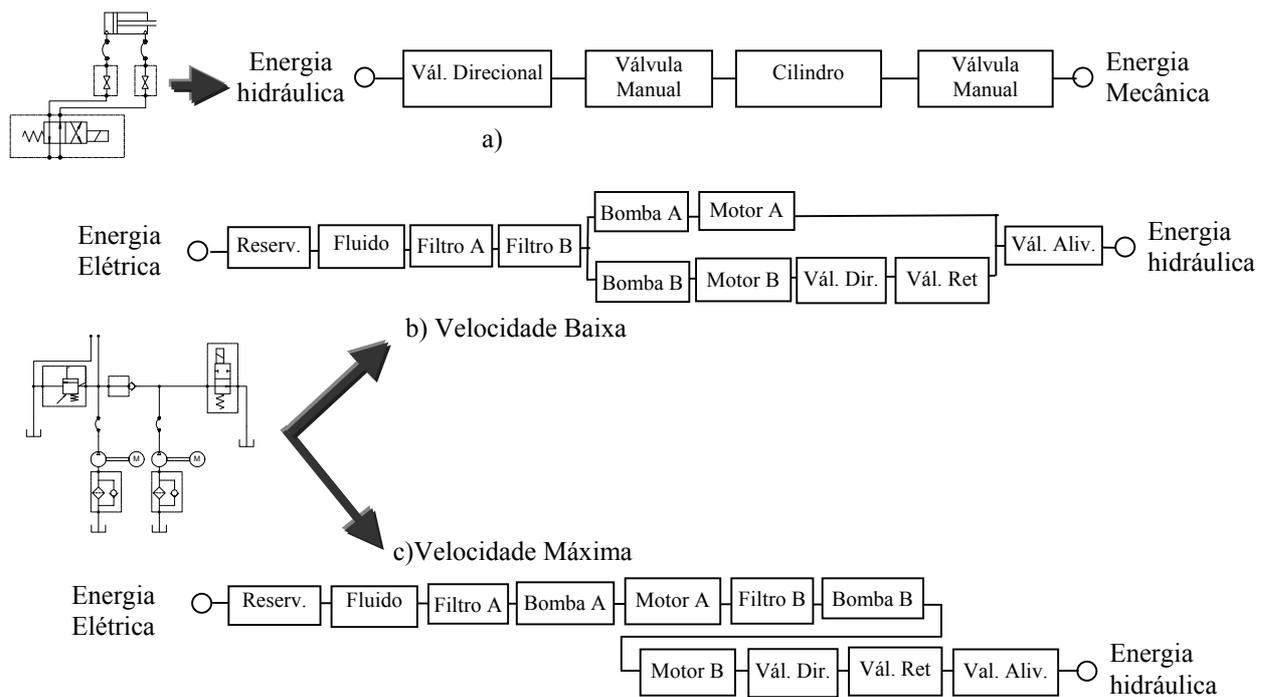


Figura 3.9 - Modelos confiabilísticos dos circuitos da figura 3.6.

Os modelos representados na figura 3.9, podem representar o sistema hidráulico da figura 3.6 de duas formas: para função de uma só velocidade de atuação com redundância ativa, ou para duas velocidades de atuação. Portanto o modelo confiabilístico do sistema pode ser representado nas formas mostradas na figura 3.10.

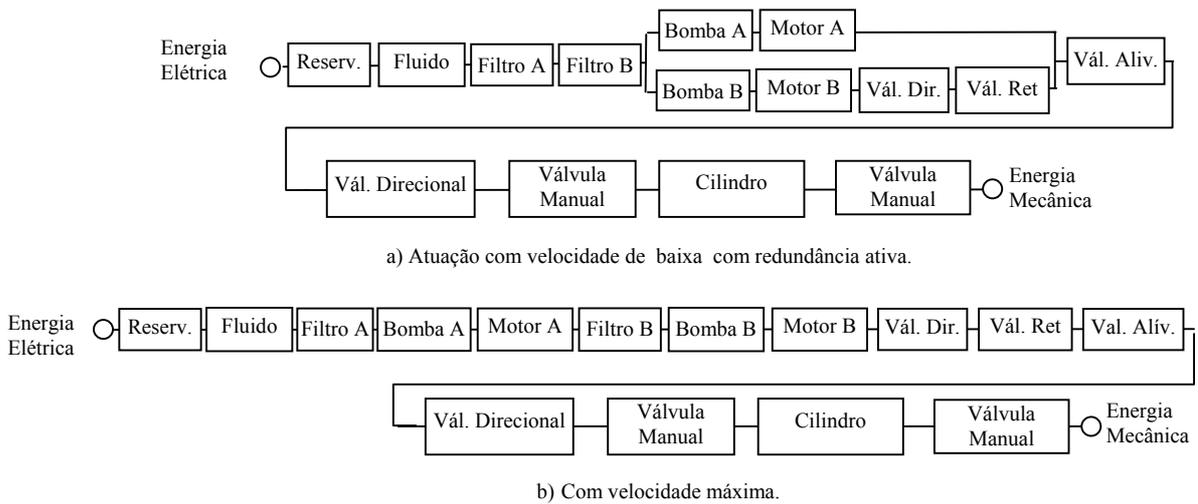


Figura 3.10- Modelos confiabilísticos da figura 3.6.

3.4.2 - Método do grupo mínimo de corte

Segundo Billinton & Allan (1983), o potencial de se avaliar a confiabilidade do sistema utilizando o grupo mínimo de corte se deve a duas principais razões. A primeira é a facilidade de programação em computador para obter uma solução rápida e eficiente. A segunda razão é a relação direta dos eventos de falhas com os modos de falha do sistema, e portanto, identifica as formas distintas e discretas que um sistema pode falhar. Billinton & Allan (1983) definem grupo mínimo de corte como um grupo de componentes de um sistema que, quando falham, causam falhas no sistema. Porém, se qualquer um dos componentes do grupo estiver funcionando o sistema não falha.

Conforme a definição, todos os componentes do grupo mínimo devem falhar para causar falha no sistema e isto pode ser visto quando todos componentes cruzados por uma linha de corte falharem. Cada linha de corte gera um grupo mínimo de corte. Na figura 3.11, têm-se duas linhas de corte definindo dois grupos mostrados na tabela 3.1.

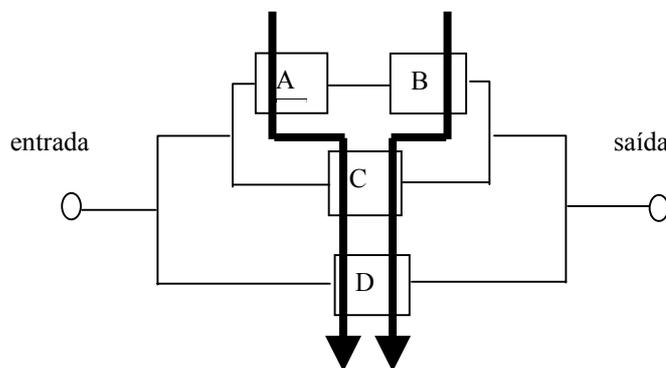


Figura 3.11 - Obtenção dos grupos mínimos de corte.

Tabela 3.1 – Grupos Mínimos da figura 3.11.

Número de identificação do evento	Componentes do grupo Mínimo de corte	Ordem do grupo de corte
1	ACD	Terceira ordem
2	BCD	Terceira ordem

Ocorrendo-se evento 1, com falhas nos componentes ACD, resulta em falha no sistema. O mesmo ocorre para o evento 2. Estas estruturas podem ser modeladas numa forma mais prática de interpretação do funcionamento do sistema, isto é, em configurações em série e paralelo como mostra figura 3.12. Os componentes de uma linha de corte estão em paralelo e são montados em série com o grupo da outra linha de corte. Usando esta técnica, um grande potencial pode ser observado quando aplicado para analisar sistemas complexos, cuja representação não pode ser feita apenas com modelos em série e paralelos.

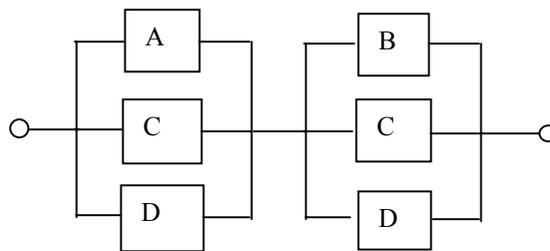


Figura 3.12 – Modelagem da figura 3.11 pelo método grupo mínimo de corte, no modelo série e paralelo.

Observa-se também que um grupo formado pela linha de corte pode ser denominado de acordo com o número de componentes: primeira ordem para um só componente, segunda ordem quando o grupo de corte tem dois componentes e assim sucessivamente.

3.4.3 – Método grupo mínimo de corte em sistemas hidráulicos

Na figura 3.10 são mostradas duas situações de modelos confiabilísticos, sendo que uma situação é um caso clássico e mais simples. O modelo para velocidade máxima de atuação (figura 3.10b) é o arranjo dos componentes em série já que, neste caso, o sistema falha na execução de sua função principal se qualquer um dos itens falhar.

Na segunda situação, o modelo de velocidade baixa de atuação (figura 3.10a), já justifica a aplicação do grupo mínimo de corte pois evidencia de forma mais direta todos os eventos de falha do sistema. Portanto, o modelo da figura 3.10a pode ser representado de uma forma mais prática de interpretação com os componentes em série e paralelo. Esta nova estrutura

facilita na representação computacional. A figura 3.13 mostra o novo modelo confiabilístico da figura 3.10a.

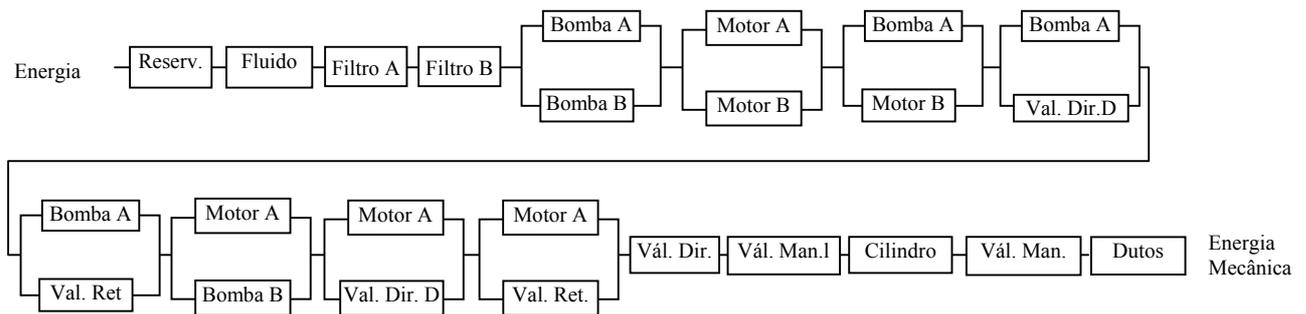


Figura 3.13 - Modelo confiabilístico da figura 3.6 após aplicação do método grupo mínimo de corte.

A partir deste modelo pode-se estabelecer os eventos de falha que comprometem a função do sistema. Eventos de falha com componentes em série podem implicar em comprometimento do sistema, já os componentes em paralelo com redundância ativa não correm este risco, desde que não haja falha simultânea destes componentes. Para assegurar o funcionamento do sistema, recomenda-se ação preventiva para componentes em série. Os componentes em paralelo podem até receber ações corretivas, desde que apresentem baixa probabilidade de falha simultânea.

Torna-se necessário salientar que um componente pode apresentar mais de um modo de falha. Dependendo do tipo do modo de falha do componente, isto pode apresentar grande efeito na função principal do sistema ou não. Portanto, o próximo passo é execução da análise dos modos de falha.

3.5 – Análise dos modos de falha, seus efeitos (FMEA)

A análise dos modos de falha e seus efeitos (FMEA: *Failure Mode and its Effects Analysis*) visa listar um conjunto de efeitos gerados pelos modos de falha mais críticos em termos do desempenho do sistema. Esta análise é aplicada para diversos propósitos e em diferentes aplicações, buscando sempre listar uma coleção de relações em cadeia como causas, maneiras como a falha se apresenta e os respectivos efeitos. Além disso a análise FMEA não se restringe somente ao desenvolvimento do produto ou sistema pois esta ferramenta pode ser estendida para projeto (focando as deficiências do projeto), processo de manufatura, montagem e serviço, segundo Stamatis (1995).

Análises tipo FMEA é considerada como um dos maiores gargalos no processo de projeto devido ao tempo consumido e o alto grau de detalhamento. Diante destes empecilhos foram feitos vários estudos para automatizar esta análise. Dentre os intentos relacionados com

a automatização do FMEA, menciona-se várias aplicações para diferentes propósitos: determinação da criticalidade dos modos de falha de um produto com auxílio do método fuzzy (Chang et al, 1999); simulação dos efeitos dos modos de falha mais frequentes em um componente óleo hidráulico (Hawkins e Wollons, 1998); produção de modelos causais de falhas com cadeias de causas, modos de falha e efeitos visando apoio ao diagnóstico de falha e ao projeto (Lee, 1999); emprego de várias bases de conhecimento para dar apoio completo e preciso aos processos e produtos, facilitando a reutilização do conhecimento na FMEA (Wirth et al, 1996). Além destes trabalhos existem outros, mas poucos são os que propõem a inferência automática de manutenções controladas, preventivas e corretivas para cada componente, conforme as conseqüências dos seus respectivos modos de falha.

3.5.1 – Definições em FMEA

Entre as várias definições existentes, optou-se pela definição da norma britânica BS 5760 (1991) (citada por Hawkins e Wollons, 1998) onde FMEA é definida como um método de análise da confiabilidade destinada a identificar falhas que têm conseqüências afetando o funcionamento do sistema.

O modo de falha pode ser definido como a maneira na qual o defeito se apresenta ou a maneira como o item (item é uma expressão genérica que pode estar associado ao componente, sistema, processo) falha ou deixa de apresentar o resultado desejado ou esperado (Sakurada, 2001). Mas este conceito fica um tanto vago se não for especificado em que nível a falha se apresenta ou onde ela é descrita. Portanto, os modos de falha podem ser identificados em vários níveis, em função da importância, ou em função da posição no sistema onde o modo de falha está ocorrendo, que pode estar nos elementos de montagem de um componente até os modos de falha de um subsistema.

Os efeitos são as conseqüências e podem ser facilmente confundidos com modos de falha. Para evitar esta confusão, antes de dar início ao FMEA, recomenda-se saber o que realmente deseja-se analisar: falha no sistema, no componente ou no item interno. O termo “o que” representa o efeito, enquanto que a pergunta “como surge o efeito” é o modo de falha. No entanto, esta estratégia deve ter um ponto limite, onde as descrições de “como surge o efeito” possam ser palpáveis e controladas. A próxima subseção trata de uma outra forma de atacar este problema, mostrando como estabelecer os níveis para facilitar a identificação de modos de falha e efeitos.

3.5.2 - FMEA em vários níveis

Para usar o FMEA, Hawkins e Wollons (1998), sugerem dividir sistemas complexos em vários níveis. Estes sistemas seriam compostos por subsistemas os quais poderiam ir sendo divididos até chegar na menor unidade substituível. Dessa forma pode-se abstrair incrementalmente começando com os itens de montagem, componentes, subsistemas e os demais níveis de maiores proporções, tal como é visto na figura 3.14.

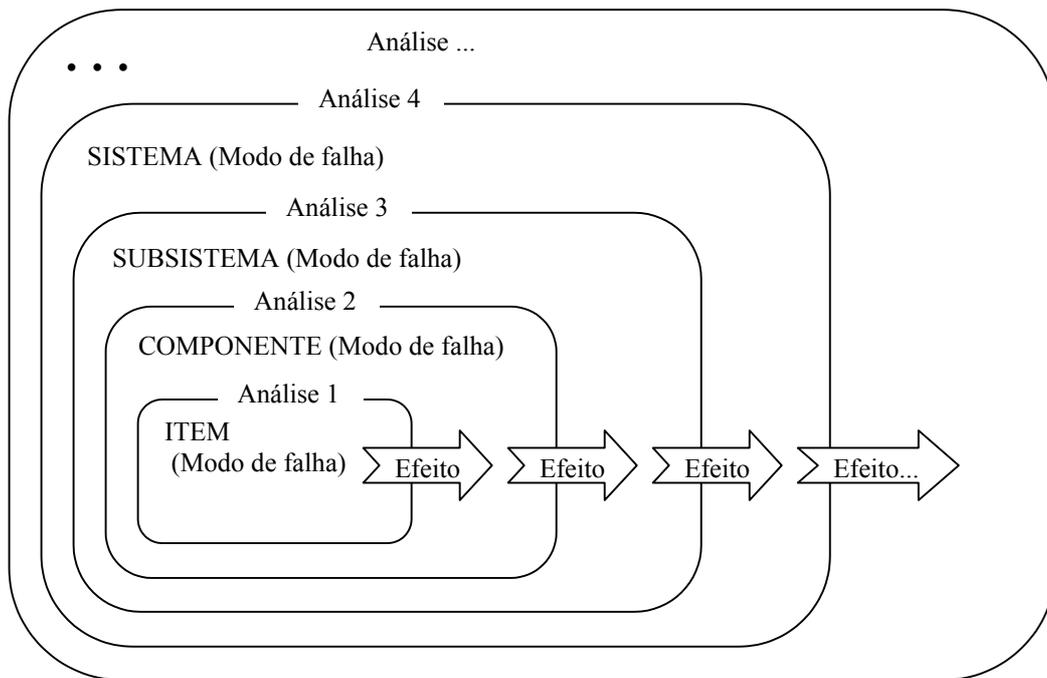


Figura 3.14 - Análises em níveis sucessivos (Moretti, 2001).

FMEA pode ser iniciado com os modos de falha conhecidos de um nível e os efeitos são descritos no nível seguinte. Exemplificando-se, os modos de falha poderiam ser as descrições de como o eixo de uma bomba de engrenagem falhou e outro nível seria os efeitos observados na bomba. Isto pode ser visto na tabela 3.2, onde são mostrados os modos de falha e os efeitos de uma bomba de engrenagem. Neste nível de abstração os itens internos são vistos como componentes, e a bomba como um sistema.

Tabela 3.2 – FMEA da Bomba de engrenagem como sistema.

Componentes	Modos de Falha	Efeitos
Eixo	Deformado	Vazamento externo Vibração excessiva Vazão incorreta Ruído excessivo
	Desalinhado	
	Empenado	
	Rompido	
Mancal	Deformado	
Engrenagens	Desgastado	Vazão Incorreta
	Rompido	
Estator	Desgastado/ corroído	Vazão incorreta Vibração

Seguindo esta idéia no caso do sistema hidráulico, pode-se ter dois estágios. Um estágio é mostrado na tabela 3.2, que analisa o modo de falha sobre o item, sendo que o efeito vai ser percebido sobre o componente. O segundo estágio analisa o sistema, conforme tabela 3.3. Agora, o modo de falha (no segundo estágio) é o efeito gerado pelo componente. Por sua vez, o efeito resultante do modo de falha do sistema vai se manifestar sobre o sistema seguinte, por exemplo sistema hidráulico.

Tabela 3.3 – FMEA da bomba de engrenagem como componente.

Componente	Modos de Falha	Efeitos
Bomba	1)Vazão incorreta;	1.1)Alteração da pressão do sistema (pressão baixa ou errática); 1.2) Parada ou movimentação lenta do atuador;
	2)Vibração excessiva	2.1)Afrouxamento ou soltura de elementos de união; 2.2)Vazamento externo; 2.3)Ruído;
	3)Ruído Excessivo	3.1)Ruído;
	4)Vazamento Externo	4.1)Insuficiência de pressão nos atuadores; 4.2)Velocidade de anormal dos atuadores;

O trabalho de Hawkins e Wollons está voltado para o primeiro estágio onde se estuda análise dos modos de falha dos itens internos de um componente e se verificam os efeitos em volta do mesmo. Esta tese foca o segundo estágio cujos modos de falha são descritos pelas

anomalias perceptíveis em torno do componente e os efeitos são as conseqüências notadas no sistema.

3.5.3 - Abordagens estrutural e funcional

Conforme Sakurada (2001), existem duas abordagens para levantar os modos de falha: funcional e estrutural. A abordagem funcional é mais genérica e não necessita de especificações de projeto ou de engenharia. Pode ser tratada como não função. Logo se as funções de um acumulador hidráulico são armazenar energia, amortecer choques e compensar variações volumétricas, então os modos de falha seriam: não armazena energia; não amortece o choque; e não compensa variações volumétricas. A abordagem estrutural consiste de informações mais detalhadas. Exemplificando-se no acumulador hidráulico, os modos de falha são: fornecimento de vazão insuficiente para o sistema; amortecimento ineficiente de ondas de pressão; e compensação de variação volumétrica insuficiente. Ambas abordagens requerem a função do componente bem definida, para servir de referência no momento de verificar se o componente está em falha ou não.

Hawkins e Wollons (1998) também mencionam sobre as duas abordagens baseadas nas práticas recomendadas para engenharia aeroespacial. A abordagem funcional é semelhante ao descrito por Sakurada (2001). A abordagem estrutural é caracterizada pela consideração das conseqüências dos efeitos do componente nas suas vizinhanças. O efeito do modo de falha é propagado para nível seguinte e assim sucessivamente.

Neste trabalho adotou-se abordagem estrutural considerando que os modos de falha dos componentes induzem falhas e efeitos nos componentes em sua vizinhança. Esta escolha leva em conta que o FMEA será executado na fase do projeto preliminar e detalhado, quando já se dispõe de uma estrutura bem definida do sistema hidráulico. Outro fato levado em conta é a preocupação em relação a componentes cujas falhas influenciam no surgimento de uma outra coleção de efeitos que comprometem a função principal do sistema, tal como foi observado por Wang et al (1998).

3.5.4 - Aplicação do FMEA em Sistemas Hidráulicos

Análise dos modos de falha, causas e seus efeitos é pouco aplicada no projeto hidráulico. Essa pouca aplicação é justificada por envolver um trabalho muito detalhado e relativamente demorado. Para se ter êxito, a análise deve ser acompanhada por uma documentação completa. Outro motivo está relacionado com a dificuldade metodológica. Isto se deve a poucos exemplos de uma metodologia organizada, acessível e orientada a aproveitar a base de conhecimento para se ter os ganhos de confiabilidade e de manutenibilidade. Contudo, tendo

como base as diretrizes de Sakurada (2001) e Hawkins e Wollons (1998), propõe-se implementar esta ferramenta para análise com os referidos ganhos tais como identificação de modos de falha indesejáveis, modos de falha não isolados e efeitos de aviso, em sistemas hidráulicos, que serão abordados no capítulo 6.

Neste capítulo, contudo, aplica-se o FMEA em sistemas hidráulicos seguindo as definições e determinações anteriores. O FMEA foi feito baseando-se em catálogos, manuais de manutenção e livros de diagnóstico de falha (referências Anders, 1983; Esposito, 2000; Gotz, 1991; Hydraulic Standards Lexicon And Data, 1967, Linsingen, 1992; Mitchell & Pippenger, 1997; Palmieri, 1989; Pease, 1967; RAC, 1999; Sperry Vickers, 1977). Em uma tabela do FMEA deve constar: identificação dos componentes, funções, modos de falha, efeitos e as causas. Uma parte da análise dos modos de falha e seus efeitos em sistemas hidráulicos é estruturada na tabela 3.4, onde é abordado o filtro.

Tabela 3.4 – Parte da Análise dos modos de falha e seus efeitos do filtro

Componente	Função	Modos de Falha	Efeitos	Causas
Filtro	Reduzir para um nível aceitável o tamanho e a concentração de partículas contaminantes, de modo a proteger os componentes contra um desgaste prematuro.	1)Ruptura do elemento filtrante; 2)Elemento filtrante inadequado para o sistema (em termos da porosidade do filtro) 3)Entupimento	1.1)Emperramento ou entupimento das partes móveis de componentes; 1.2)Acúmulo de sujeira mais freqüente que as tarefas de limpeza; 2.1)Maior desgaste nos componentes do sistema; 2.2) Emperramento ou Entupimento das partes móveis de componentes; 2.3)Acúmulo de sujeira mais freqüente que as tarefas de limpeza (porosidade demasiado reduzida) 3.1) Parada ou movimentação lenta dos atuadores;	1.1)Vazão muita elevada para o filtro selecionado (CE* - Erro de projeto); 1.2)Pressão alta devido ao acúmulo de sujeira (CE- Fluido:MF3); 1.3)Desintegração do papel do elemento filtrante (CE- vibração no sistema); 1.4)Desgaste dos componentes do elemento filtrante (CI**); 2.1)Erro de projeto (CE- na seleção da porosidade) 3.1) Obstrução da passagem de óleo devido a contaminação do fluido (CE- Fluido:MF3);

* CE - Causa externa;

** CI- Causa interna;

3.5.5 - FMEA x FMECA

Segundo a norma MIL-STD 1629A, pioneira na análise dos modos de falha, FMECA (análise dos modos de falha e seus efeitos e sua criticalidade) é definido como um procedimento pelo qual cada modo de falha potencial em um sistema é analisado para determinar os resultados ou efeitos no sistema e para classificar cada modo de falha potencial de acordo com sua severidade (Sakurada, 2001). Nesta definição, além de explicitar as conseqüências do modo de falha, também é observada análise da criticalidade que ordena os modos de falha através de único valor, o RPN (*Risk Priority Number*). Este valor é o produto da quantificação da severidade, da freqüência de ocorrência e da facilidade de detecção do modo de falha. Portanto, FMEA é um método qualitativo (segundo NBR 5462, 1994) enquanto que FMECA é uma análise qualitativa e quantitativa.

Mas quando a análise dos modos de falha e seus efeitos é direcionada para os objetivos da Manutenção Centrada na Confiabilidade, o RPN é suprimido pela classificação dos modos de falha quanto à segurança pessoal, desempenho operacional e economia. Esta classificação é feita pelo primeiro diagrama lógico da figura 3.16.

Embora FMECA não seja abordada com maiores detalhes neste trabalho de tese, a sua utilização no processo de projeto não perde relevância diante das contribuições proporcionadas pelas comparações quantitativas do RPN.

Tendo o FMEA em mãos, torna-se oportuno apresentar algumas peculiaridades a respeito de ações de diagnóstico de falha e manutenções controladas normalmente usadas no controle de modos de falha. A consideração destas peculiaridades como efeitos de aviso e causas raízes ajudam no estabelecimento de manutenções através dos diagramas lógicos de decisão.

3.6 – Ações de Diagnóstico de Falha em Sistemas Hidráulicos e Reguladores de Velocidade

O termo “falha” em sistemas hidráulicos adotado neste trabalho é baseado na norma NBR 5462 (1994): “Término da capacidade de um item desempenhar a função para o qual foi projetado”.

Logo, para identificar a falha deve-se saber a função do equipamento. A função é normalmente descrita por um verbo e um complemento. Dentre as várias funções do regulador de velocidade hidráulico a principal e de maior enfoque desta tese está em: “Acionar os mecanismos de controle de vazão por meio de servomotores (atuadores hidráulicos), permitindo variar a vazão de água através do rotor da turbina conforme a

demanda de energia elétrica e mantendo, deste modo a rotação da máquina dentro de níveis admissíveis” (Rodrigues et al, 2001).

A afirmativa “acionar os mecanismos de controle de vazão por meio de atuadores hidráulicos” evidencia o atuador como um dos principais pontos de saída ou resposta de um regulador. É neste ponto que a falha é caracterizada no contexto desta tese. Isto coincide com as indicações de falhas através das operações impróprias do atuador, citadas por Mitchell e Pippenger (1997), as quais são:

- Nenhum movimento;
- Movimento em direção errada;
- Movimento errático;
- Velocidade incorreta;
- Emperramento;
- Seqüência incorreta;
- Força incorreta;

Uma outra falha a ser analisada é falta de precisão no deslocamento do atuador , uma vez que os reguladores são sistemas hidráulicos com controle de posição.

As ocorrências dessas falhas não estão diretamente relacionadas com a falha do atuador mas com o arranjo do conjunto de componentes incluindo o próprio atuador. Conforme o arranjo, o sistema estará mais sujeito à falha de seus componentes ou não. Para tanto alguns circuitos de potência dos reguladores são arranjados com componentes redundantes os quais podem estar na redundância passiva ou redundância ativa, conforme abordado no item 3.4.1

Para diagnosticar a falha, Mitchell e Pippenger (1997) sugerem uma seqüência lógica de procedimentos quando constatadas as operações impróprias do atuador. Dentre esses procedimentos está a elaboração de uma lista com todos componentes do sistema, colocando em primeiro lugar os componentes de fácil checagem. Seguindo a lista, se verifica se o componente apresenta algum tipo de efeito de aviso (ruído, vazamento externo, vibração e temperatura excessiva). Não havendo componentes com efeitos de aviso, que identifica o componente falho, o passo seguinte é seguir novamente a lista fazendo testes repetitivos com instrumentos (ex.: manômetro), sem remover os componentes do sistema. Uma vez encontrado o componente falho, é feita sua restauração ou troca. Após este procedimento, Mitchell e Pippenger (1997) recomendam encontrar a verdadeira causa da falha para que esta não ocorra novamente.

Contudo, considerando as conseqüências das falhas de um sistema hidráulico, às vezes não é recomendado esperar pela ocorrência da falha para exercer o diagnóstico. Para evitar esse tipo de falha, uma sugestão é observar os efeitos de aviso que podem anteceder a falha, segundo Mitchell e Pippenger (1997). Entretanto, segundo Moubray (1997), esses efeitos são baseados nas sensações humanas e correspondem a estágios bem avançados da falha, restando pouco tempo para ações preventivas. Essa situação é indesejável para um sistema hidráulico regulador de velocidade, pois o mesmo faz parte de uma unidade inteira de geração constituída por uma turbina, gerador, regulador de tensão e demais equipamentos. Dependendo da localização e severidade da falha, o regulador de velocidade pode requerer um tempo maior para realização de tarefas de restauração (ou substituição), além de requerer a definição de uma outra unidade de geração substituta. Para estes casos, deve-se considerar adoção de técnicas de monitoramento, pois essas técnicas oferecem um tempo maior de antecedência de aviso de uma falha eminente.

Como foi enfatizado por Mitchell e Pippenger, após a restauração ou substituição do componente falho, deve-se identificar as causas raízes da falha para não induzir a mesma falha em pouco tempo de funcionamento. Neste sentido, o trabalho de Fitch (1998) tem prestado importantes contribuições, cuja principal premissa é atuar diretamente nas causas raízes das falhas através de manutenções controladas .

3.7 – Manutenções Controladas Aplicadas nas Causas Raízes das Falhas.

Fitch (1998) denomina as manutenções controladas aplicadas nas causas raízes como manutenções pró-ativas. Fitch descreve essas manutenções como se fosse um quarto tipo de manutenção, além das manutenções corretivas, preventivas e controladas . Entretanto, conforme os conceitos adotados nesta tese, a manutenção pró-ativa é tratada como manutenção monitorada aplicada para eliminar um modo de falha que pode induzir falhas nos demais componentes do sistema.

A manutenção sugerida por Fitch (1998) objetiva estender a vida útil do sistema, mantendo os parâmetros das causas raízes em limites aceitáveis através da prática de “detecção” e “eliminação” das anomalias nas causas raízes. Nos sistemas mecânicos com fluido, o controle das oito principais causas raízes de falhas deve ser alcançado para garantir a longevidade do sistema. As oito causas raízes são a falta de controle na:

- Contaminação do fluido;
- Vazamento do fluido;
- Propriedades químicas do fluido;

- Propriedades físicas do fluido;
- Cavitação do fluido;
- Temperatura do fluido;
- Desgaste dos componentes;
- Carregamento mecânico;

As causas raízes iniciam pela deterioração do material, seguida de degradação do desempenho e finalmente resultando em perda total da funcionalidade do componente podendo acarretar em parada do sistema. Esta seqüência de degradação é semelhante à idéia de modificação da condição do componente em relação ao tempo, quando em processo de falha, tal como apresentado por Moubray (1997). Fitch (1998) também apresenta esta progressão da falha de forma mais detalhada para sistemas mecânicos com fluido. Esta progressão é dividida em cinco etapas, sendo que para cada etapa tem-se uma ação correspondente. A figura 3.15 ilustra as duas seqüências, uma de Moubray (1997) e outra de Fitch (1998).

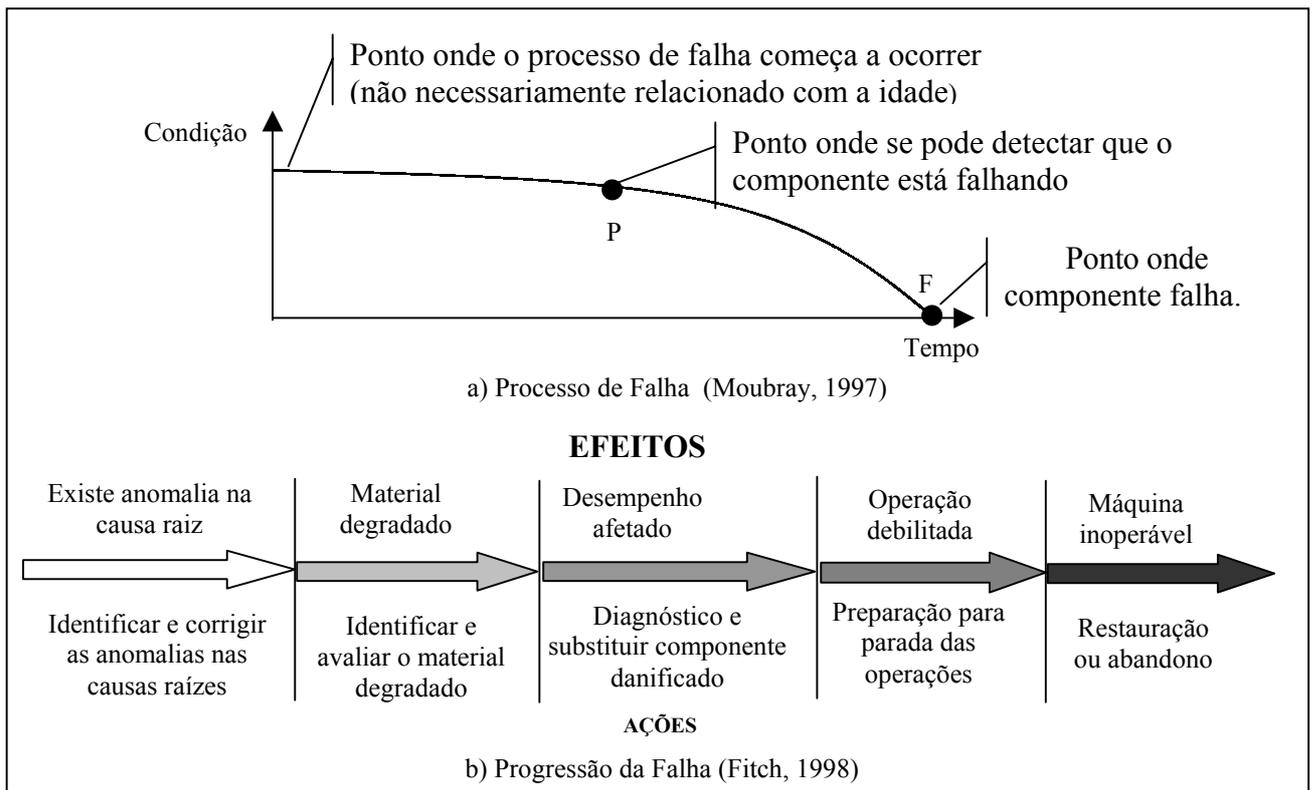


Figura 3.15 – Seqüências de degradação até a falha.

Moubray usa este processo de falha como base para alocação de quatro categorias diferentes de manutenção controlada: categoria baseada nas sensações humanas, baseada nas

variações da qualidade do produto, baseadas nos efeitos primários (variações na vazão e pressão) e baseadas nas técnicas de monitoração (uso de equipamentos especiais para monitorar a condição do equipamento). A categoria baseada nas técnicas de monitoração (ex.: como análise da vibração, análise do óleo) começa a detectar a falha a partir do ponto P da figura 2.4. A categoria baseada nas variações da qualidade do produto pode ser aplicada entre os pontos P e F. As categorias de manutenções baseadas na condição detectável pela percepção humana (efeitos de aviso: ruído, vibração excessiva, vazamento externo e temperatura excessiva) e nos efeitos primários (variações na vazão e pressão) podem detectar o processo de falha mais próximo do ponto F. Na manutenção centrada na confiabilidade, todas essas categorias são consideradas e a tarefa de manutenção selecionada é a que tiver maior eficiência em detectar a falha eminente com menor custo diante das demais manutenções aplicáveis.

A manutenção controlada aplicada nas causas raízes (ou manutenção pró-ativa denominada por Fitch, 1998) prioriza a longevidade dos componentes no sistema, visando diminuir tempos de paradas para manutenção, número de peças no inventário, gastos com pessoal de manutenção e reparo. As manutenções são aplicadas somente nas anomalias relacionadas diretamente com causas raízes, antes de proporcionar alguma deterioração que comprometa a função do componente. Por outro lado, a implementação desse tipo de manutenção requer pessoal especializado (o que exige investimento na mão de obra), técnicas e equipamentos de monitoração e uma boa base de dados de parâmetros relacionados com as causas raízes. A implementação da manutenção controlada aplicada nas causas raízes pode ser ponderada onde as conseqüências das falhas são realmente severas em custo e segurança.

No contexto desta tese, as descrições de Fitch (1998) sobre causas raízes se enquadram com as causas de um modo de falha. Um modo de falha pode gerar um conjunto de efeitos que comprometem a função principal do sistema, a segurança pessoal e a integridade ambiental. Também existem modos de falha cujos efeitos não apresentam nenhum comprometimento grave. Para tanto, utiliza-se análise dos modos de falha e seus efeitos (FMEA) que é normalmente empregada pela manutenção centrada na confiabilidade. FMEA é uma ferramenta da confiabilidade extremamente útil para levantamento de todos os possíveis modos de falha de um componente, onde pode se verificar as implicações dos seus efeitos na função principal do sistema diante de uma instalação industrial, na segurança pessoal, na integridade do meio ambiente e nos custos de manutenção e produção. Isto possibilita a otimização de recursos, implementando manutenções controladas em causas de modos de falha com maiores severidades.

3.8 – Diagrama lógico de decisão

Os diagramas lógicos de decisão, a serem usados neste trabalho, são a essência da sistemática na manutenção centrada na confiabilidade. O objetivo destes diagramas (figuras 3.16 e 3.17) é desenvolver programas de manutenção preventiva, controlada e corretiva que forneçam boas características de custo eficiência.

Tendo o primeiro diagrama o objetivo de classificar os modos de falha quanto às conseqüências na segurança pessoal, desempenho operacional e economia, este diagrama também identifica os modos de falha que são ocultos ou evidentes em relação ao operador. A figura 3.16 mostra o primeiro diagrama lógico de decisão.

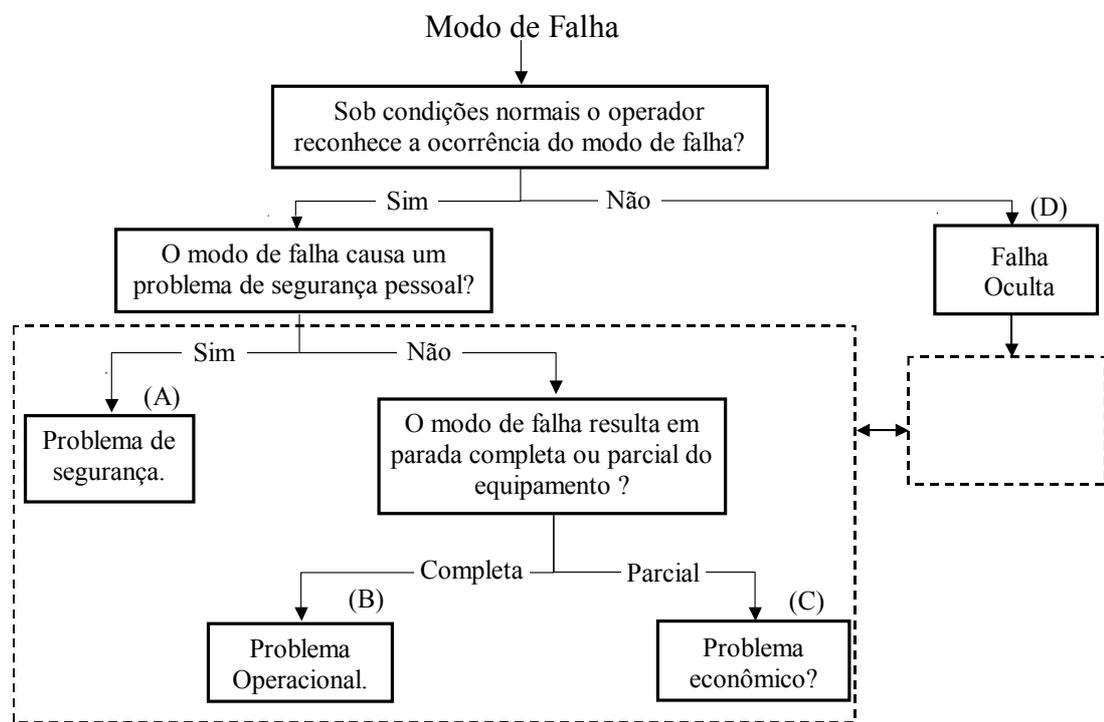


Figura 3.16 - Classificação dos modos de falha (Smith, 1993).

Após a aplicação do primeiro diagrama, cada modo de falha fica classificado como A, B, C, D/A, D/B ou D/C, isto é:

- A - Modo de falha com comprometimento da Segurança;
- B - Modo de falha com comprometimento do desempenho operacional;
- C - Modo de falha com comprometimento na economia
- D/A - Modo de falha oculto com comprometimento da segurança;
- D/B - Modo de falha oculto com comprometimento do desempenho operacional;
- D/C - Modo de falha oculto com comprometimento na economia;

Uma vez que todos os modos de falha foram classificados, o passo seguinte é o estabelecimento de manutenções controladas, preventivas e corretivas, obedecendo a uma ordem de prioridade. A prioridade na implementação de manutenções controladas e preventivas, conforme Smith (1993), baseia-se na seguinte seqüência:

- 1 - A e D/A,
- 2 - B e D/B,
- 3 - C e D/ C.

Nos modos de falha do tipo, A é dada preferência a implementação de manutenções controladas e preventivas, não importando o custo. Uma vez que o modo de falha tem como consequência o comprometimento da segurança, não se deve poupar recursos financeiros para implementação de manutenções controladas ou preventivas. Neste caso recomenda-se primeiro verificar a implementação de manutenção controlada, pois este implica num acompanhamento mais preciso dos parâmetros mensuráveis do modo de falha. Quando os valores destes parâmetros saem de uma faixa tolerável, facilita-se o reconhecimento do início do modo de falha em questão, possibilitando maior controle.

Para os modos de falha do tipo B, pode-se implementar manutenções controladas ou preventivas, desde que o custo da manutenção não ultrapasse o custo gerado pelo efeito do modo de falha. Se o custo das manutenções controladas e preventivas for elevado em relação ao custo do efeito, recomenda-se manutenção corretiva.

Para os modos de falha do tipo C, conforme recomendações de Smith (1993), normalmente aplica-se manutenções corretivas. A aplicação da manutenção corretiva deve ser justificada como redução de custos em relação a implementação de manutenções controladas e preventivas.

Os modos de falha do tipo D, modos de falha ocultos, estão relacionados a componentes sob redundância na condição passiva, componentes de sistemas de emergência ou qualquer subsistema pouco usado cuja falha só é perceptível no momento de sua utilização (Smith, 1993). Neste caso é adotada manutenção preventiva para modos de falha do tipo A/D e B/D, isto é, executar a manutenção em determinados intervalos de tempo. No caso do modo de falha do tipo C/D, é adotado manutenção corretiva, uma vez que o efeito não resulte em altos custos.

O próximo passo é a execução do segundo diagrama, que será apresentado no próximo item, visa selecionar tarefas para controlar ou eliminar os efeitos dos modos de falha.

3.8.1 – Seleção de tarefas

O segundo diagrama lógico de decisão de seleção de tarefas tem por objetivo estabelecer manutenções controladas e preventivas somente para modos de falha que podem garantir retorno financeiro. Logo o procedimento é determinar uma lista de manutenções aplicáveis a um modo de falha, e a partir desta, definir a manutenção mais eficiente. Para Smith (1993), a manutenção é dita aplicável se previne ou diminui o efeito do modo de falha, se detecta o início do modo de falha ou se consegue identificar um modo de falha oculto. A manutenção selecionada é a que apresenta maior economia em relação às demais opções.

Caso não exista uma manutenção aplicável para algum modo de falha, a única opção é deixar funcionar até falhar. Da mesma forma, se a manutenção preventiva ou controlada for aplicável e seus custos associados excederem o custo total da falha, a opção econômica seria deixar funcionar até falhar (RTF – *Run to Failure*). No entanto, o modo de falha associado com problema de segurança pessoal requer modificações no projeto, tornando-se imperativo a eliminação deste risco.

Conforme o diagrama da figura 3.17, a primeira pergunta é se existe uma relação entre idade-confiabilidade. Isto implica em saber se existe algum levantamento estatístico relacionando a probabilidade de falha com o tempo de operação. Este gráfico é conhecido como função da densidade de falha, o qual é descrito com maiores detalhes no apêndice B. A partir dessa função e demais equações derivadas, é possível estabelecer a periodicidade das tarefas de manutenção ao modo de falha do componente em questão.

Quando se conhece a relação entre idade-confiabilidade, pode-se cogitar a existência de tarefas de restauração ou descarte para prevenir o modo de falha após determinado tempo de funcionamento, isto é, tarefas de prevenção baseada no tempo (TD: *Time-directed*) ou manutenções preventivas. O passo seguinte é encontrar tarefas para detectar o começo do modo de falha, isto é, tarefas de prevenção baseada na condição (CD: *Condition-Directed*) ou manutenções controladas. A seguir, um outro tipo de tarefa a ser identificada é para os modos de falha ocultos que devem ser descobertos antes do funcionamento do sistema. Este tipo de tarefa está relacionado com inspeções periódicas ou testes (FF: *Failure-Finding*) ou manutenções detectivas. Segundo Nunes (2001), esta forma de manutenção compreende verificações funcionais ou tarefas de busca de falhas, que são atividades desenvolvidas para checar ou testar algum equipamento. Conforme os conceitos apresentados anteriormente, esta inspeção periódica será considerada como manutenção preventiva uma vez que é efetuada em intervalos pré-determinados sem usar meios de supervisão e amostragem como a manutenção controlada.

Após a identificação de todas as tarefas aplicáveis para eliminar ou controlar um modo de falha, deve-se verificar qual é a tarefa mais econômica. A figura 3.17 ilustra o estabelecimento de tarefas de manutenção através do diagrama lógico de decisão sugerido por Smith (1993).

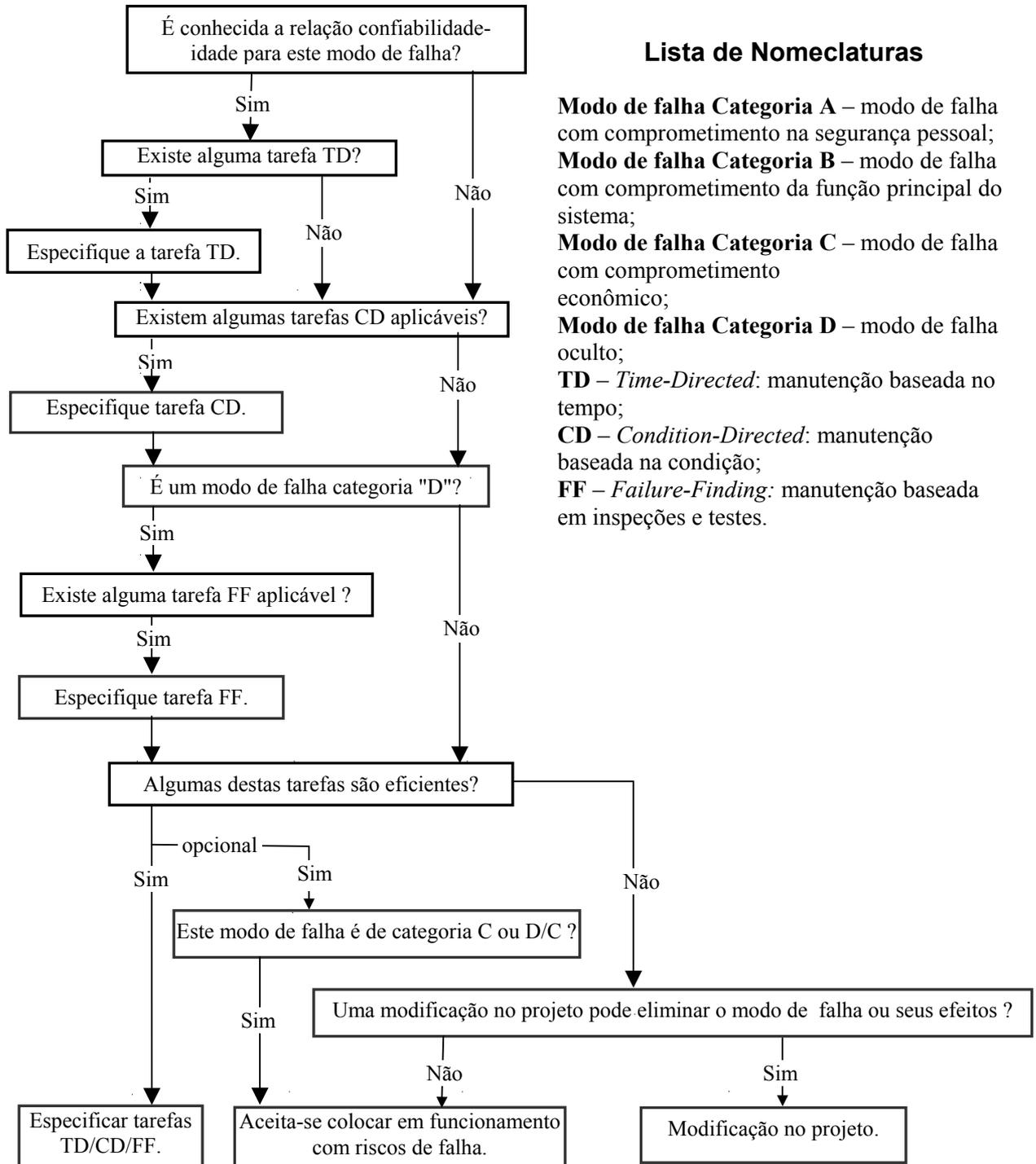


Figura 3.17 - Diagrama para seleção de tarefas (Smith, 1993).

O diagrama da figura 3.17 é aplicado para todos os tipos modos de falha, desde o tipo A até os do tipo C/D, não havendo uma consideração explícita para cada tipo. Os modos de

falha do tipo A, com comprometimento na segurança, podem receber um conjunto de manutenções aplicáveis cuja capacidade de diminuição do efeito deste modo de falha seja questionável. Esta argumentação é feita pelo simples fato que uma manutenção econômica não é necessariamente a de maior controle do modo de falha. Smith (1993) tem enfatizado isto, mas não fica explícito esta colocação no diagrama da figura 3.17.

Uma outra observação é o fato de não priorizar manutenções controladas que normalmente favorecem o surgimento de ciclos de vida prolongados. Conforme Reis e Pati (2000), a manutenção controlada apresenta vantagens como o prolongamento do período de troca de componentes, estendendo ao máximo o ciclo de vida do equipamento sem comprometer a segurança ou a operação.

A simples seleção de uma manutenção mais econômica, podendo ser preventiva ou corretiva sem verificar todas as possibilidades de manutenções controladas, pode não ser uma boa solução quando também é pretendido um ciclo de vida útil prolongado. Além do mais, manutenções controladas não se resumem em técnicas de monitoração com tecnologias de ponta e de alto custo, também existem as manutenções controladas baseadas nas sensações humanas (efeitos de aviso) que normalmente são de menor custo e podem ser executadas pelo próprio operador. Essas manutenções normalmente são destinadas aos modos de falha do tipo C cuja consequência não é tão severa.

O diagrama de seleção de manutenções sugerida por Moubray (1997) contempla a priorização de manutenções controladas, além de evidenciar um tratamento separado para cada tipo de modo de falha. Estas contribuições serviram de base para esta tese na elaboração de um diagrama de seleção de tarefas de manutenção mais específico para sistemas hidráulicos.

A contribuição desta tese, implementada neste diagrama, é a observação das causas internas e os efeitos do modo de falha oriundos da FMEA. As causas internas podem ser desgaste, fadiga, corrosão, desbalanceamentos ou desalinhamentos (tal como causas raízes abordadas por Fitch, 1998). Os efeitos dos modos de falha podem ser os de aviso como ruído, vazamentos, vibração e aumento excessivo de temperatura (tal como efeitos observados por Mitchell e Pippenger, 1997). Monitorando-se causas internas dos componentes tem-se a vantagem de oferecer maior antecedência de aviso, entretanto estas tarefas podem exigir técnicas mais caras. A monitoração dos efeitos é de baixo custo uma vez que pode ser observado pelo próprio operador, no entanto o tempo que resta para evitar o modo de falha é muito curto ou praticamente nulo. Diante das considerações sobre a monitoração das causas internas e efeitos em componentes hidráulicos sintetizou-se nesta tese o diagrama da figura 3.18.

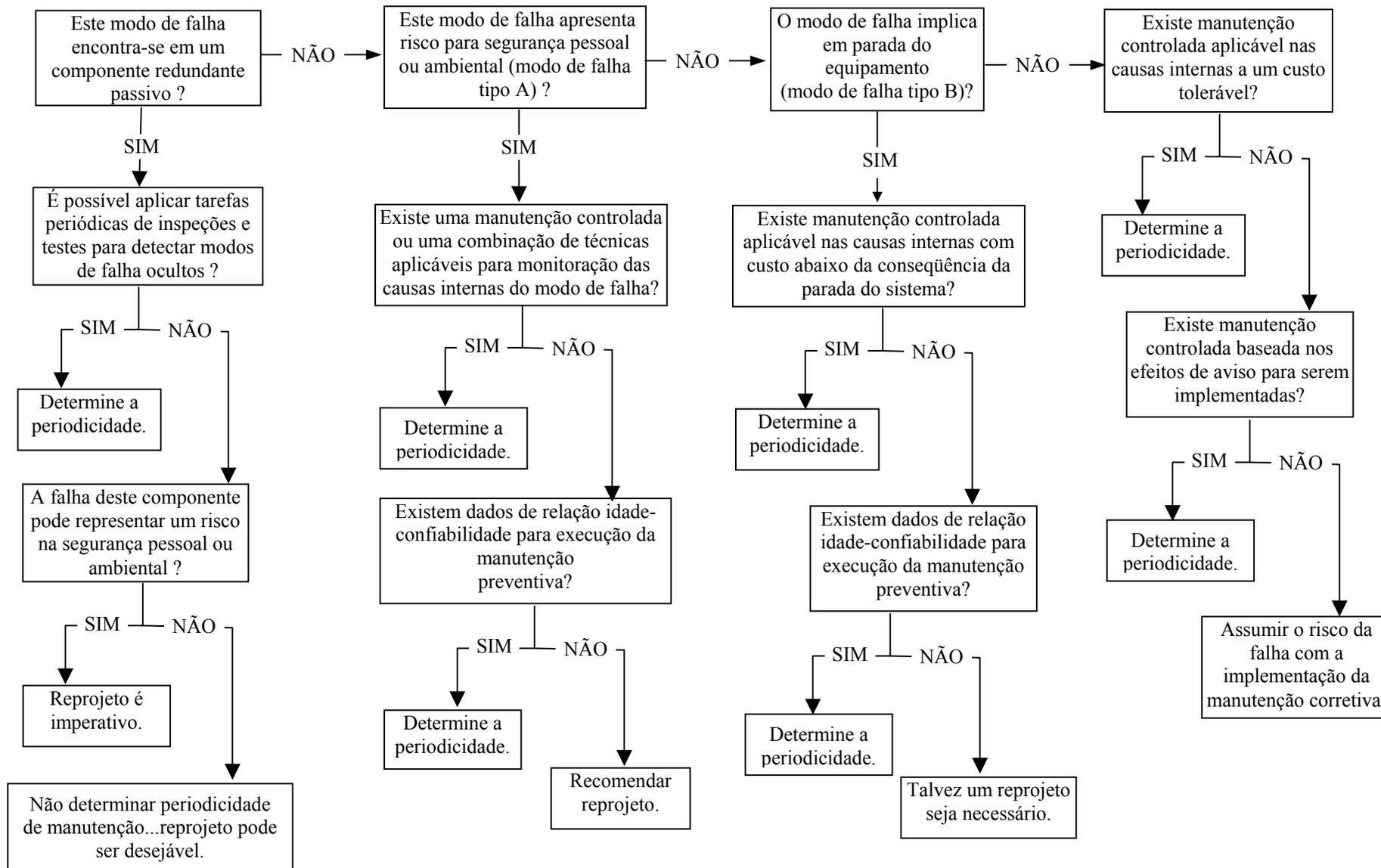


Figura 3.18 - Diagrama de seleção de tarefas de manutenção (Moubray,1997).

Para cada tipo de modo de falha há uma seqüência de questões a serem respondidas. Primeiramente é perguntado se o modo de falha não pertence a um componente que esteja na reserva passiva (ou *standby*). Os componentes nesta situação são difíceis de terem sua condição monitorada uma vez que se encontram desligados sem poderem indicar um efeito de mau funcionamento como vibração, aquecimento, ruído, vazamento ou algum tipo de degradação (fadiga, desgaste, etc). Para estes componentes busca-se determinar uma periodicidade de inspeções e testes para certificar pelo menos a plena execução de suas funções.

Quando o modo de falha é tipo A, essas questões buscam por manutenções de maior antecedência de aviso, para tanto, sugere-se as que monitoram causas internas como desgaste, fadiga, etc. As questões destinadas aos modos de falha do tipo B ponderam a utilização de manutenções controladas com maior e menor antecedência de aviso, sendo que desta vez são observados os custos de aplicação diante do custo devido à parada inesperada do sistema hidráulico. O questionário para modos de falha do tipo C também verifica a utilização de manutenções controladas com maior e menor antecedência de aviso, entretanto pode acabar sugerindo manutenções corretivas quando os custos das alternativas anteriores forem acima do tolerável para evitar o referido modo de falha.

3.9 – Considerações finais

O projeto para confiabilidade e manutenibilidade abordado nesta proposta é caracterizado por três etapas distintas. A primeira trata da modelagem confiabilística dos circuitos para constituírem o modelo do sistema. A segunda etapa é análise dos modos de falha, seus efeitos cujo objetivo é identificar os modos de falha prejudiciais ao sistema. A terceira etapa ajuda a selecionar a manutenção com melhores características custo-eficiência em relação as demais manutenções aplicáveis.

Também foram apresentadas as principais falhas em um sistema hidráulico bem como a seqüência de procedimentos recomendada para diagnóstico de falhas. Um dos objetivos desta parte é enfatizar que o diagnóstico de falha no contexto desta tese é definido como ações tomadas para localizar e identificar a causa da falha, o que significa dizer que é uma atividade após a ocorrência da falha. Diante deste estabelecimento, as atividades de diagnóstico de falha fazem parte das tarefas de manutenções corretivas. Mas também foi abordada a possibilidade de evitar falhas através de efeitos de avisos baseados nas sensações humanas. Estes efeitos podem ser de um custo bem menor em relação adoção de equipamentos de monitoração relativamente caros. Além disso, a adoção de manutenções corretivas não precisa ser

descartada por completo quando o sistema hidráulico não assume grandes responsabilidades e os custos com tempo de parada, pessoal de manutenção e reparo forem relativamente baixos.

Assim como existem sistemas hidráulicos cujas tarefas de manutenção podem ser predominantemente corretiva, há os que devem ser controlada com tecnologias de monitoramento. Estes sistemas seriam os que apresentam grandes responsabilidades, necessitando de um tempo maior de antecedência de aviso de falha eminente para planejamento logístico e definição de subsistemas ou sistemas substitutos. As tecnologias de monitoramento também são destinadas aos sistemas sem histórico de falhas que justifica o uso de manutenções preventivas.

Levando-se em conta etapas da RCM mais as considerações sobre manutenções aplicáveis em sistemas hidráulicos, pode se pensar em um conjunto de dados a serem relacionados visando uma estratégia de manutenção eficiente segundo critérios de segurança, desempenho e economia. Na primeira etapa relaciona-se uma lista de modelos confiabilísticos de cada circuito para formar o modelo confiabilístico do sistema hidráulico. É importante salientar que os modelos confiabilísticos de um circuito são submetidos ao método do grupo mínimo de corte facilitando na representação do modelo e evidencia os eventos de falha tal como é mostrado na tabela 3.1. A segunda etapa é o relacionamento dos componentes com os respectivos modos de falha, causas e efeitos. Na terceira etapa, relaciona um grupo de manutenções aplicáveis para um modo de falha e conforme as regras de custo eficiência da RCM, seleciona-se a manutenção mais eficiente. Esta seqüência de procedimentos já é considerada como demorada e muito detalhada só pela presença da análise dos modos de falha e seus efeitos, tal como foi mencionado por Hawkins e Wollons (1998) no momento de justificar a pouca aplicação desta análise nos sistemas hidráulicos.

Diante do contexto acima, propõe-se a criação de uma sistemática que viabilize a criação de um sistema especialista para auxiliar em cada uma das etapas até chegar na alocação de manutenções eficientes para o componente ou sistema em função dos modos de falha que comprometem a função dos mesmos. As inferências e recomendações do sistema serão baseadas na combinação entre modelos confiabilísticos, modos de falha, manutenções aplicáveis de acordo com as diretrizes da manutenção centrada na confiabilidade. Mas para tanto, falta o estabelecimento de regras a serem evidenciadas no capítulo 6.

A princípio, as regras vão ser baseadas no estabelecimento de estratégias de manutenção para um sistema hidráulico regulador de velocidade de turbinas de usinas hidroelétricas, uma vez que já foi estabelecido contato com uma empresa experiente no projeto deste tipo de sistema hidráulico e com profissionais que operam e mantêm este tipo de sistema. Estas abordagens serão feitas nos capítulos 4, 5 e 6.

CAPÍTULO 4

SISTEMA ESPECIALISTA

4.1 – Introdução

O presente capítulo começa com a definição de sistema especialista bem como a descrição de seus principais módulos como a base de conhecimento, memória de trabalho e máquina de inferência. Logo mais, são mostrados o estado-da-arte desses sistemas e as suas principais atribuições que resultaram em sucessos em diferentes domínios de aplicação. Neste mesmo capítulo é feita a caracterização dos principais elementos de um sistema especialista, bem como, a função de cada um destes elementos. O item seguinte tratará sobre engenharia do conhecimento onde são expostos os passos geralmente seguidos para desenvolvimento de um sistema especialista. Depois é feita uma descrição de algumas técnicas de representação do conhecimento básicas para estruturação de um sistema especialista. Em seguida é adotada uma combinação de duas técnicas de representação de conhecimento e um método de inferência para o futuro sistema especialista.

4.2 – Definição de sistema especialista

De uma forma geral, sistema especialista é um programa de computador desenvolvido para resolver problemas de uma área específica, tal como o raciocínio de um especialista humano da mesma área. Para emular a habilidade de um especialista, este tipo de programa utiliza a capacidade de relacionar as informações do problema a ser resolvido com o conhecimento já armazenado

O professor Edward Feigenbaum da Universidade de Stanford, citado por (Harmon & King, 1985), um dos pesquisadores reconhecidos em trabalhos com sistemas especialistas, definiu sistema especialista como:

“...um programa inteligente de computador que usa conhecimento e inferência de procedimentos para resolver problemas que são suficientemente difíceis para requerer uma significativa perícia humana para sua solução.”

A partir desta definição nota-se que o sistema especialista é formado por dois módulos: conhecimento e inferência de procedimentos (Durkin, 1994). O conhecimento é dividido em memória de trabalho e base de conhecimento. A inferência de procedimentos faz parte da máquina de inferência que relaciona a memória de trabalho e base de conhecimento.

A base de conhecimento de um sistema especialista contém conhecimento altamente especializado sobre a área do problema a ser solucionado. Esta parte inclui um conjunto de regras. A outra parte do conhecimento, memória de trabalho, guarda os fatos, conclusões e recomendações a respeito do problema a ser resolvido.

A máquina de inferência é o processador do conhecimento, utiliza a informação disponível de um dado problema, dentro da memória de trabalho, combinando com o conhecimento armazenado na base de conhecimento para inferir conclusões ou recomendações. A figura 4.1 mostra como um sistema especialista é constituído.

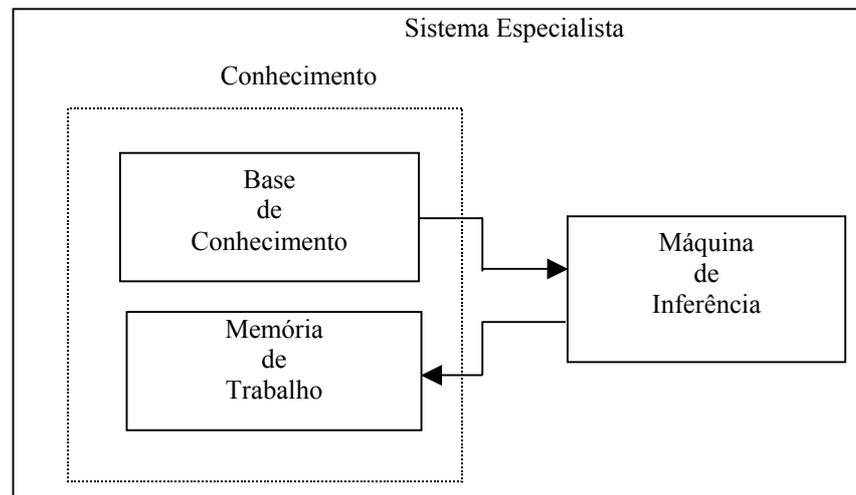


Figura 4.1 - Diagrama de bloco de um sistema especialista.

Considerando a carência de uma sistemática teórica de apoio ao projeto para confiabilidade e manutenibilidade aplicada em sistemas hidráulicos que viabilize a criação de um sistema especialista, este trabalho sugere como seria esta estrutura conforme as definições acima. A memória de trabalho, teria como fatos armazenados circuitos hidráulicos de atuação e de potência selecionados pelo usuário para formar um sistema, além das indicações do próprio usuário do modo de operação (componentes ativos, na redundância ativa e passiva). Com ativação da máquina de inferência, que conecta com a base de conhecimento com a memória de trabalho, outros tantos fatos (conclusões e recomendações) vão sendo inferidos como: modos de falha com comprometimento da segurança, desempenho e economia; fatos indicando manutenções eficientes e de menor custo. A base de conhecimento seria regras que ajudariam inferir fatos como os grupos mínimos de corte; regras para indicação de

componentes com modos de falha comprometendo a segurança, desempenho e economia; e regras para seleção de manutenções controladas, preventivas e corretivas. Para tanto, é necessário analisar e sistematizar o conhecimento de confiabilidade e manutenibilidade com objetivo de representá-lo computacionalmente, contribuindo para viabilização de um sistema especialista.

A originalidade de se fazer um sistema especialista com propósito de inferir manutenções controladas, preventivas e corretivas para cada componente, pode ser verificado no histórico e estado-da-arte desta tecnologia descritos no próximo item.

4.3 – Histórico e Estado-da-Arte dos Sistemas Especialistas

Após a Segunda Guerra Mundial, havia um pequeno grupo de pesquisadores interessados em usar computadores como manipuladores de símbolos não numéricos. Paralelamente, psicólogos procuravam desenvolver programas de computadores que poderiam simular o comportamento humano. A preocupação em processar símbolos não numéricos e simular a capacidade humana de resolver problemas tem formado uma área multidisciplinar na ciência da computação chamada Inteligência Artificial (IA). Esta área foi dividida em três áreas de pesquisas relativamente independentes. Um grupo trabalhou com desenvolvimento de programas que possam ler, falar ou entender a linguagem das pessoas em uma conversação cotidiana. Outro grupo de pesquisa dedicou-se para desenvolvimento de robôs inteligentes. Estudou-se como desenvolver programas para visão e tato que permitissem o robô perceber a mudança de acontecimentos no ambiente em sua volta. A terceira área da IA busca desenvolver programas que use conhecimento simbólico (conhecimento sem símbolos numéricos) para simular o comportamento de um especialista humano (Harmon & King, 1985). Estes programas são sistemas especialistas.

Um dos projetos mais ambiciosos na área de Inteligência Artificial foi o desenvolvimento do GPS (Newell et al, 1960; citado por Durkin, 1994). O GPS significa *General Problem Solver*, isto é, solucionador de problemas gerais, o qual foi desenvolvido para resolver uma variedade de problemas em torno de uma integração simbólica dos elementos dos jogos. Este programa foi o primeiro em definir o problema em termos de “estados”, que representam diferentes estágios da solução do problema. No entanto, percebeu-se que esta estratégia de proposta geral de um resolvidor de problemas como GPS não era eficiente para problemas complexos e para problemas do mundo real (Durkin, 1994) devido ao grande número de variáveis que influem na solução do problema.

Com passar dos anos, surgiram esforços para pesquisar técnicas de buscas de soluções. Pesquisadores acreditavam que o comportamento inteligente era primeiramente baseado em técnicas eficazes de raciocínio e algoritmos eficazes de busca, os quais poderiam emular a capacidade humana de resolver problemas. Porém, pesquisadores começaram a perceber que somente técnicas de busca não eram suficientes para produzir máquinas inteligentes (Durkin, 1994).

O programa chamado DENDRAL (Buchnan and Fungenbaum, 1978 citado por Durkin, 1994) deu um novo impulso para IA. Este programa foi desenvolvido na universidade de Stanford a pedido da NASA. A intenção era enviar uma nave não tripulada para Marte e o objetivo era fazer um programa de computador para análise química do solo marciano. A análise do solo consistia na geração de milhões de estruturas moleculares, e depois, obter os dados de espectrograma de massa de cada uma dessas estruturas geradas. Estes dados são comparados com os dados do solo marciano. O problema estava em reduzir a geração de tantas estruturas, logo a solução foi usar as regras práticas de químicos experientes para reduzir o número de dados a serem gerados. As regras práticas são denominadas heurísticas.

Além do DENDRAL, foi desenvolvida uma série de sistemas especialistas para diferentes áreas. MYCIN, sistema especialista para diagnóstico médico (Shortliffe et al, 1973, citado por Harmon & King, 1985), DIPMETER de análise de dados geológicos para petróleo, PROSPECTOR para minerais e XCON/R1 para configuração de sistemas computacionais (Giarratano & Riley, 1994). Os sistemas como PROSPECTOR e XCON/R1 apresentaram bom retorno financeiro, conseqüentemente, aumentou-se o interesse desta nova tecnologia nos anos de 1980. Contudo, o sistema MYCIN foi muito importante para uma boa parte dos sistemas especialistas existentes hoje, através dele surgiu uma nova concepção que priorizou a facilidade de explicação, aquisição automática de conhecimento e uma instrução inteligente. Este sistema contribuiu como uma aplicação prática da IA através de uma estrutura computacional (*shell*) apta a receber diferentes áreas de conhecimento (Giarratano & Riley, 1994).

Os primeiros sistemas especialistas, tal como DENDRAL, eram de um tipo que apresentavam a base de conhecimento misturado com a máquina de inferência. MYCIN separou explicitamente a base de conhecimento da máquina de inferência. Com esta nova concepção possibilitou-se desenvolver sistemas especialistas reusando-se o seu núcleo (*shell*), assim pode-se criar um novo sistema mais rapidamente do que o sistema do tipo DENDRAL, uma vez que permite retirar um conhecimento antigo e colocar um outro conhecimento de uma área diferente. A *shell* é a parte do MYCIN que pode ser preenchida com conhecimento

de um novo sistema especialista. A shell produzida pela remoção do conhecimento médico foi chamada de EMYCIN (Giarratano & Riley, 1994). Na metade dos anos 80, a NASA desenvolveu uma nova shell escrita na linguagem de programação C, apresentando características de alta velocidade de processamento, portabilidade e baixo custo. Esta nova shell é conhecida como CLIPS (*C Language Integrated Production System*).

Os sistemas especialistas foram usados em diversas áreas com diferentes objetivos tais como diagnósticos, instrução, monitoração, seleção, simulação e planejamento. Também foram usados no auxílio de projetos na área da engenharia eletrônica e mecânica. Para projeto de circuitos eletrônicos foi criado o sistema PEACE, o qual pode sintetizar o circuito em passos definidos, cumprindo as especificações de projeto sob restrições do problema (Dincbas, 1980, citado por Durkin, 1994). Um outro sistema especialista para auxílio de projeto foi o MDS (*Maintainability Design System*) que permite identificar uma transgressão de manutenibilidade através da acessibilidade, fatores ergonômicos, normalização de peças, automação e mecanização de operações de manutenção (Tarelko, 1995). Recentemente, foi desenvolvido um sistema especialista para projeto de sistemas hidráulicos, denominado como *Schemebuilder Expert-Fluid Power Module* (Silva, 1998). O objetivo deste sistema é gerar um conjunto de diagramas de sistemas hidráulicos viáveis, conforme os parâmetros de precisão, facilidade de operação, eficiência, economia e facilidade de manutenção.

Os sistemas especialistas também têm contribuído na manutenção de sistemas complexos através do monitoramento e diagnósticos de falhas. No caso do monitoramento, tem-se como exemplo as abordagens de Reis e Pati (2000) citando vários sistemas especialistas que alertam o operador sobre futuras falhas baseando-se na condição do equipamento através das variações na velocidade e aceleração das vibrações, na temperatura de funcionamento, etc. Para diagnóstico de falha, menciona-se o protótipo desenvolvido por Alves (2001), cujo objetivo é identificar o componente falho de um sistema hidráulico que comanda o leme de um navio.

Diante dessa exposição, nota-se que a proposição de um sistema especialista para inferência de manutenções controladas, preventivas e corretivas na fase do projeto preliminar é um assunto inédito domínio da inteligência artificial. Esta é mais uma observação que justifica o intento desse trabalho de tese, além das carências já citadas e a serem reportadas.

4.4 – Características de um sistema especialista

Os sistemas especialistas são aplicados em diversas áreas como química, eletrônica, medicina, geologia e ciência da computação. Para cada uma destas áreas foram criados

sistemas especialistas específicos para resolver problemas de configuração, diagnóstico, instrução, interpretação, monitoração, planejamento, prognóstico e controle. São problemas que não dispõem de uma solução exata ou ótima, isto é, não podem ser resolvidos por um programa computacional convencional, baseado numa seqüência de procedimentos com entradas e saídas bem definidas. Os sistemas especialistas são recomendados para resolver problemas que possam ter diferentes soluções diante de um conjunto de dados disponíveis. Os dados do problema e os fatos armazenados no sistema especialista são combinados através de regras, que geram informações até encontrar uma solução.

As buscas de soluções através de um sistema especialista são baseadas no relacionamento entre os seus seguintes itens (Riley & Giarrano, 1994):

- Interface com usuário: o mecanismo pelo qual o usuário e o sistema especialista se comunicam;
- Facilidade para explicação: explica o raciocínio do sistema para o usuário.
- Memória de trabalho: um banco de dados globais de fatos usados pelas regras;
- Máquina de inferência: faz inferências decidindo quais regras são satisfeitas pelos fatos ou objetos, priorizando regras já ativadas e executa as regras com alta prioridade;
- Agenda: uma lista de regras priorizadas pela máquina de inferência, cujas condições são satisfeitas por fatos ou objetos na memória de trabalho;
- Base de conhecimento: um conjunto de regras, representando o conhecimento no sistema;
- Facilidade de aquisição do conhecimento: uma forma automática para o usuário entrar com conhecimento no sistema, melhor do que ter um engenheiro do conhecimento para codificar o conhecimento;

A interface com usuário pode ser da forma mais simples, orientada por textos na tela ou pode ser na forma de tela mais sofisticada e com alta resolução. Esta tela de alta resolução é comumente usada para simular um painel de controle com teclas (Giarrano & Riley, 1994).

Conforme Durkin (1994), a base de conhecimento é parte de um sistema especialista que contém o domínio de conhecimento. A tarefa de um engenheiro de conhecimento é obter o

conhecimento de um especialista e codificá-lo na base de conhecimento usando várias técnicas para aquisição e representação. Uma forma de representar o conhecimento em um sistema especialista é através de regras. Uma regra é uma estrutura IF/THEN que logicamente relaciona uma informação contida na parte IF com a outra informação contida na parte THEN. Um exemplo sucinto desta estrutura seria a recomendação de um tipo de manutenção para controlar a vibração excessiva na Bomba B da figura 3.6 que tem como efeito o aumento de vazamentos externos:

Regra 1:

IF (Bomba B operando com carga)

THEN (Pode haver Vibração Excessiva causada por desgaste)

Regra 2:

IF (Pode haver Vibração Excessiva causada por desgaste)

THEN (Existe risco de aumento de vazamentos com impacto no meio ambiente)

Regra 3:

IF (Pode haver Vibração Excessiva causada por desgaste)

THEN (Desgaste pode ser monitorado por: “Contagem Eletrônica de Partículas” com alto grau de detecção, “Análise Global de Vibração” com grau médio de detecção e “Inspeção Baseadas nas Sensações Humanas de Vibração” com baixo grau de detecção.)

Regra 4

IF (Desgaste pode ser monitorado por: “Contagem Eletrônica de Partículas” com alto grau de detecção, “Análise Global de Vibração” com grau médio de detecção e “Inspeção Baseadas nas Sensações Humanas de Vibração” com baixo grau de detecção.)

AND (Existe risco de aumento de vazamentos com impacto no meio ambiente)

THEN (Adotar Contagem eletrônica de Partículas por ser de alto grau de detecção para evitar vazamentos com impacto ao meio ambiente)

A memória de trabalho contém os fatos sobre o problema que são descobertos durante uma consulta. Consultando um sistema especialista, o usuário entra com informações sobre o problema corrente dentro da memória de trabalho. O sistema combina estas informações com o conhecimento contido na base de conhecimento para inferir novos fatos. Então, o sistema entra com estes novos fatos dentro da memória de trabalho e o processo de combinação continua. Eventualmente o sistema coloca algumas conclusões que também entram na memória de trabalho (Durkin, 1994).

A máquina de inferência trabalha com os fatos contidos na memória de trabalho e com domínio do conhecimento contido na base de conhecimento para originar novas informações. A máquina de inferência busca as regras da base de conhecimento para uma combinação entre a parte do IF e as informações contidas na memória de trabalho. Quando a máquina de inferência encontra uma combinação, ele adiciona a conclusão da regra na memória de trabalho e continua a varrer regras procurando por novas combinações (Durkin, 1994).

Considerando as regras mostradas anteriormente, a operação da máquina de inferência pode ser ilustrada através de questões do sistema especialista e nas respostas do usuário:

Passo 1

Sistema Especialista: Circuito de potência selecionado apresenta duas bombas, uma funcionando com carga, e a outra pode ter três modos de operação: operando com carga (ativa), operando sem carga (redundância ativa) ou desligada entrando em operação nos casos de emergência (redundância passiva). Qual o modo de operação da segunda bomba?

Usuário declara: Operando com Carga;

Sistema declara: Pode haver Vibração Excessiva causada por desgaste;

Sistema declara: Existe risco de aumento de vazamentos com impacto ao meio ambiente;

Comentário: A memória de trabalho agora contém três fatos. Um declarado pelo usuário que é o modo de operação da bomba B. Este fato acionou as regras 1 e 2 que colocam na memória de trabalho dois fatos: um indicando o modo de falha a ser controlado e outro identificando seu efeito.

Passo 2

Sistema declara: Pode haver Vibração Excessiva causada por desgaste.

Sistema declara: Desgaste pode ser monitorado por: “Contagem Eletrônica de Partículas” com alto grau de detecção, “Análise Global de Vibração” com grau médio de detecção e “Inspeção Baseadas nas Sensações Humanas de Vibração” com baixo grau de detecção.

Comentário: Uma vez que a memória de trabalho do sistema especialista contém dois fatos como a identificação do modo de operação da bomba B (declarado pelo usuário) e o modo de falha que pode ocorrer (declarado pelo sistema especialista), o sistema infere um terceiro fato indicando as manutenções aplicáveis para monitorar a causa da vibração excessiva.

Passo 3

Sistema declara: Desgaste pode ser monitorado por: “Contagem Eletrônica de Partículas” com alto grau de detecção, “Análise Global de Vibração” com grau médio de detecção e “Inspeção Baseadas nas Sensações Humanas de Vibração” com baixo grau de detecção.

Sistema declara: Existe risco de aumento de vazamentos com impacto no meio ambiente;

Sistema declara: Adotar Contagem eletrônica de Partículas por ser de alto grau de detecção para evitar vazamentos com impacto ao meio ambiente;

Comentário: Com a coleção de manutenções aplicáveis declaradas num fato e com o alerta sobre as conseqüências do modo de falha armazenadas em outro fato, a regra três é acionada para inferir a decisão de adotar a contagem eletrônica de partículas, junto com as devidas justificativas.

Uma das características de um sistema especialista é a capacidade de explicar as suas conclusões. Esta característica é acrescentada através de um módulo chamado facilidade de explicação. Usando este módulo, um sistema especialista pode fornecer uma explicação para o usuário sobre porque está perguntando e como chegou a tal conclusão. Esta capacidade fornece um benefício para o desenvolvedor do sistema e para o projetista. O desenvolvedor pode usar isto para descobrir erros no conhecimento do sistema enquanto que o benefício para o usuário está na transparência fornecida no raciocínio do sistema (Durkin, 1994).

4.5 – Engenharia do conhecimento

Segundo Durkin (1994), engenharia do conhecimento é “processo de construir um sistema especialista”. Diferentemente de uma programação convencional, desenvolver um sistema especialista é um processo altamente interativo. O engenheiro de conhecimento constrói parcialmente o sistema, testa, então modifica o conhecimento e este processo é repetido durante todo o projeto onde a base de conhecimento do sistema e o entendimento do engenheiro do conhecimento crescem juntos em cada teste.

O desenvolvimento do sistema especialista pode ser dividido em avaliação, aquisição de conhecimento, projeto, teste, documentação e manutenção, conforme Durkin (1994). A fase de avaliação conduz estudos para determinar a viabilidade e a justificativa do problema candidato. A segunda fase é a aquisição do conhecimento sobre o problema a ser usado para guiar o esforço de desenvolvimento. Esta fase é considerada como um verdadeiro gargalo do processo de desenvolvimento, a ponto de ser tratado isoladamente no capítulo 5 desta tese. A fase seguinte, projeto, trata sobre designação de um bom enfoque para representar o conhecimento do especialista e a estratégia para resolver o problema em um sistema especialista. Durante esta fase, um protótipo inicial do sistema é construído. A fase de teste não é uma tarefa separada, mas é um processo contínuo durante todo o projeto e consiste em adicionar um novo conhecimento no sistema a cada entrevista com especialista. O maior objetivo do teste, é validar a estrutura global do sistema e seu conhecimento. A fase de documentação implica preparar material para explicar como operar o sistema e fornecer um tutorial que mostra a maioria das características do sistema. Após a colocação do sistema especialista no ambiente de trabalho é necessário fazer a manutenção que consiste em refinar ou atualizar o sistema conforme a necessidade.

Riley & Giatarrano (1994) também expõe estágios gerais de desenvolvimento de um sistema especialista tais como estudo de viabilidade, criação imediata do protótipo, refinamento do sistema (teste - α), testar no campo (teste - β), criação do sistema com qualidade comercial, manutenção e evolução.

Antes de iniciar o desenvolvimento do sistema especialista faz-se necessário saber qual o tipo de conhecimento a ser representado na base de conhecimento. Conforme Gonzalez (1993) citado por Silva (1998), os sistemas de base de conhecimento variam quanto ao grau de sucesso na representação do conhecimento, para tanto, os sistemas de conhecimento tem sido classificados em três categorias: conhecimento associativo (caixa preta), habilidade motora e teórico.

No conhecimento associativo o especialista pode não entender o que acontece dentro de uma caixa preta, no entanto pode associar as entradas com as saídas específicas. Neste caso, um especialista que tem um excelente entendimento de associação de alguns dispositivos, e baseando-se na sua experiência, pode ser capaz de resolver qualquer problema encontrado.

O conhecimento de habilidade motora não é facilmente emulado em uma base de conhecimento, pois o aprendizado humano destas habilidades está relacionado com uma execução repetitiva.

O conhecimento teórico, também conhecido como conhecimento profundo é adquirido através de um treinamento formal e a prática em resolver problemas. Por causa de sua natureza técnica e teórica, este conhecimento é facilmente esquecido devido ao contínuo desuso. No presente momento, é difícil de duplicar este tipo de conhecimento em uma base de conhecimento num sistema convencional. Para aplicar este tipo de conhecimento é necessário criar um modelo básico de inferência e depois usá-lo.

Esta tese trabalha com os conhecimentos associativo e teórico. O conhecimento associativo é caracterizado no fato que cada componente é associado a diferentes modos de falha, causas e efeitos e para cada modo de falha pode-se adotar diferentes tipos de manutenção. O conhecimento teórico é relacionado com o diagrama lógico de decisão da manutenção centrada na confiabilidade, que é um modelo base de raciocínio para definição de manutenções eficientes para cada modo de falha. Conforme Silva (1998), os conhecimentos associativo e teórico podem ser modelados por um sistema especialista tal como *Schemebuilder Expert-Fluid Power Module*.

O modelo de desenvolvimento de sistema especialista para auxiliar no projeto para confiabilidade e manutenibilidade mais indicado é da forma incremental. Cada incremento funcional pode ser testado, verificado e validado imediatamente por um especialista, melhor do que tentar validação total do sistema no final do desenvolvimento.

4.6 – Técnicas de representação do conhecimento

A representação do conhecimento é definida como técnicas ou métodos para codificar o conhecimento em um sistema especialista (Durkin, 1994). Através do esforço de vários pesquisadores da inteligência artificial, foram desenvolvidas diversas técnicas de representação do conhecimento, sendo que aqui serão descritas algumas destas técnicas como:

- Regras;
- Redes Semânticas;

- Orientada a Objeto;

4.6.1 – Regras

Os fatos fornecidos pelo usuário são importantes para operação de um sistema especialista, uma vez que permitem o sistema inferir sobre o estado atual de um problema. No entanto, o sistema deve ter um conhecimento adicional que permita trabalhar inteligentemente com os fatos para resolver um problema. Este conhecimento adicional é proporcionado pelas regras que são uma representação do conhecimento normalmente usada no projeto de um sistema especialista.

A regra associa uma dada informação a alguma ação. Esta ação pode ser uma declaração de uma nova informação ou algum procedimento a ser executado. Neste caso, uma regra descreve como resolver um problema.

A estrutura das regras conecta logicamente um ou mais antecedentes (também chamados de premissas) contidas na parte IF, para uma ou mais conseqüências (também chamadas de conclusões) contidas na parte THEN. Por exemplo:

IF (Falha bomba hidráulica)

THEN (Atuadores param)

Pelo exemplo, dada a premissa (Falha bomba hidráulica) então a regra infere que os atuadores param.

Um aspecto dos sistemas especialistas baseados em regras é quanto ao método de inferência usado como estratégia para resolver problemas. Os métodos comumente usados são encadeamento direto e reverso. O encadeamento direto é uma estratégia de inferência que começa com um conjunto de fatos conhecidos, deriva novos fatos usando regras cujas premissas combinam com fatos conhecidos, e continua este processo até que o estado final seja alcançado ou até não ter mais regras com premissas combinando com fatos conhecidos ou derivados (Durkin, 1994). Exemplo, se o acoplamento entre bomba e motor estiver quebrado (o fato), então o sistema hidráulico fica sem pressão (a conclusão).

O encadeamento reverso começa a partir de uma hipótese, uma conclusão potencial deve ser provada através de fatos que apóiam a hipótese (Giarratano & Riley, 1994). Por exemplo, se for observado no sistema hidráulico pressão baixa e instável, pode-se ter como hipóteses da causa: falha na bomba devida entrada de ar pela vedação da bomba ou falha devida contaminação do fluido. Neste caso deve-se fazer uma seqüência de perguntas para obter fatos que comprovam uma das hipóteses.

Para indicar qual o melhor processo de encadeamento a ser implementado para um tipo de problema, existem algumas orientações para apoiar esta decisão (Rich, 1991 citado por Silva, 1998):

1. Existem possíveis estados iniciais ou estados finais? Pode ser preferível mover de um pequeno conjunto de estados para um conjunto maior de estados (é mais fácil de encontrar).
2. Em que direção o fator de ramificação (isto é o número médio de nós que podem ser alcançados diretamente de um nó) é maior? A opção deve ser para proceder na direção com menor fator de ramificação.
3. O sistema especialista será questionado sobre suas conclusões pelo usuário? Se sim, então é importante proceder na direção que corresponde com a forma mais próxima da maneira como o usuário irá pensar.
4. Que tipo de evento irá ativar um episódio de resolver o problema? Se o evento é a chegada de um novo fato, o encadeamento direto faz sentido. Se for uma pergunta onde espera por uma resposta, encadeamento reverso é mais indicado.

Acompanhando-se as orientações citadas acima, o sistema especialista para sistematização do projeto para confiabilidade e manutenibilidade assumirá características de encadeamento direto devido aos seguintes aspectos:

- O sistema poderá partir de especificações dos circuitos que constituem um sistema hidráulico, para modelos confiabilísticos, componentes até chegar as recomendações quanto ao tipo de manutenção para cada modo de falha dos componentes, isto é, parte-se de um modelo confiabilístico para um conjunto maior de combinações como manutenções aplicáveis para cada modo de falha;
- No contexto do projeto para explicar as conclusões do sistema, o encadeamento direto é a maneira mais próxima da forma de pensar do projetista. No contexto da manutenibilidade, este trabalho proporá o encadeamento direto pois o sistema parte de um fato conhecido como função principal do sistema até os fatos derivados como as recomendações de manutenção para cada modo de falha.

4.6.2 – Redes semânticas.

Redes semânticas são representações do conhecimento estruturado em redes. As redes semânticas foram originalmente desenvolvidas como modelos psicológicos da memória

humana e atualmente é um método padrão de representação para IA e sistemas especialistas. Esta estrutura consiste de pontos ou figuras quaisquer para representar os nós que são conectados por ligações chamados de arcos, com intuito de descrever relações entre os nós. Os nós geralmente representam eventos, conceitos ou objetos. Os arcos normalmente são rotulados por termos como “é-um” ou “tem-parte” para descrever respectivamente uma relação generalização-especificação ou todo-parte.

As relações “é-um” e “tem-parte” estabelecem uma propriedade de herança e hierarquia na rede, isto é, os nós em níveis mais baixos podem herdar propriedades dos nós em níveis mais altos de uma rede (Waterman, 1986). O nó em nível mais alto pode representar conceitos mais gerais de um objeto como circuito hidráulico na generalização de circuitos, como é visto na figura 4.2(a), ou na representação do todo de um objeto exemplificado pelo nó de “Sistema Hidráulico” na figura 4.2 (b). O nó em nível mais baixo representa um tipo particular de objeto tal como o nó “circuito de atuação” em relação ao nó “circuito hidráulico”, ou pode ser uma parte de um todo tal como o nó “circuito hidráulico” em relação ao nó “Sistema Hidráulico”.

As redes semânticas são muito úteis para representar domínios em que existam objetos similares e ou diferentes taxonomias.

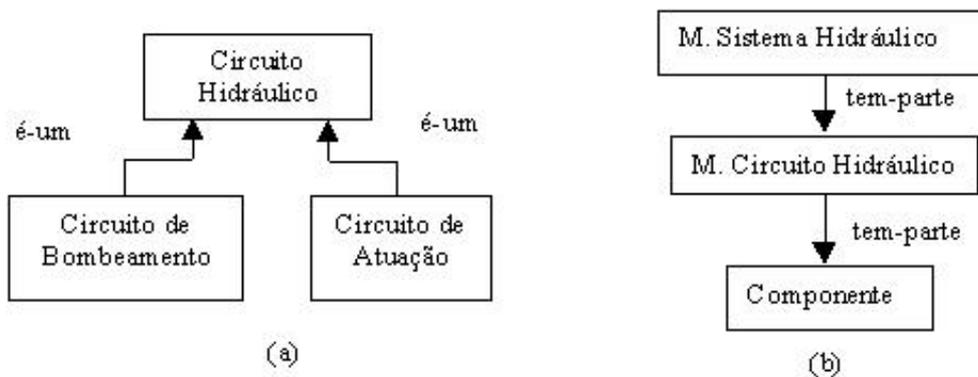


Figura 4.2 - Exemplos de redes semânticas: (a) relações tipo "é-um", (b) relação tipo "tem-parte".

Aplicando-se as redes semânticas na representação do processo de elaboração de uma estratégia de manutenção usa-se a relação do tipo “é-um” conforme figura 4.3.

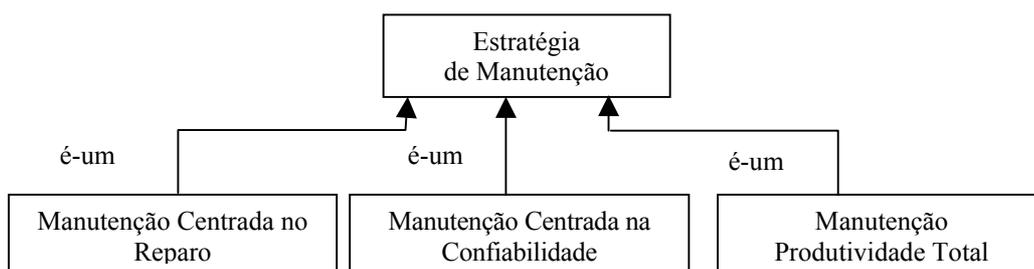


Figura 4.3 - Redes Semânticas para estratégia de manutenção.

4.6.3 – Orientada a Objeto

Antes de abordar sobre representação orientada a objeto serão descritos representações como objeto-atributo-valor e frames, os quais servem de base para representação orientada a objeto.

a) Objeto-Atributo-Valor:

Além das relações entre objetos como redes semânticas, há situações que requerem uma descrição das características do objeto por meio de fatos. Estes fatos são declarações de um valor para um atributo particular do objeto. Conforme Durkin (1994), este tipo de fato é conhecido como tríade objeto-atributo-valor (OAV). A representação tríade OAV divide uma dada declaração em três partes distintas: objeto, atributo e valor.

O objeto representado em uma tríade OAV pode ser um item físico, tal como uma bomba ou válvula, ou um item abstrato tal como falha ou defeito. Segundo Durkin (1994), atributo é uma característica do objeto que é importante no domínio do problema. O valor especifica a designação do atributo. O valor pode ser booleano, numérico ou não numérico.

Normalmente os objetos a serem representados em um sistema especialista apresentam mais de uma característica relevante. Nestas situações mais de um atributo com seus valores correspondentes caracterizam um objeto. Um exemplo é considerar a falha como objeto com seus atributos e valores na tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Tabela OAV.

Objeto	Atributo	Valor
Falha	Modo	Vazão Anormal
Falha	Efeitos	1.1) Alteração da pressão do sistema (pressão baixa ou errática); 1.2) Parada ou Movimentação lenta do atuador
Falha	Causas Internas	1.1) Vazamento interno excessivo (desgaste excessivo da carcaça) 1.2) Quebra nos rolamentos e/ou nos dentes de engrenagem
Falha	Componente de origem	Bomba hidráulica de deslocamento fixo
Falha	Tipo de comprometimento	A (envolve Segurança pessoal)
Falha	Condições Monitoráveis	Desgaste Quebra Pressão Vazão

A representação OAV é útil para modelar as condicionais a serem combinados com os fatos premissa de uma regra.

A representação da tabela 4.1 serve de base para criação de classe e objeto identificada como Falha, a qual será abordada a seguir.

b) Modelagem Orientada a Objeto

A representação orientada a objeto tem algumas características comuns em relação às representações de redes semânticas e frames (figura 4.4). Algumas destas características são as propriedades de herança e hierarquia. As representações tipo frames apresentam estruturas com classes que juntam propriedades gerais de um mesmo grupo de nós e objetos, eventos ou conceitos. Conforme Walterman (1986), Durkin (1994), há uma grande similaridade entre as representações Frames e Orientação objeto.

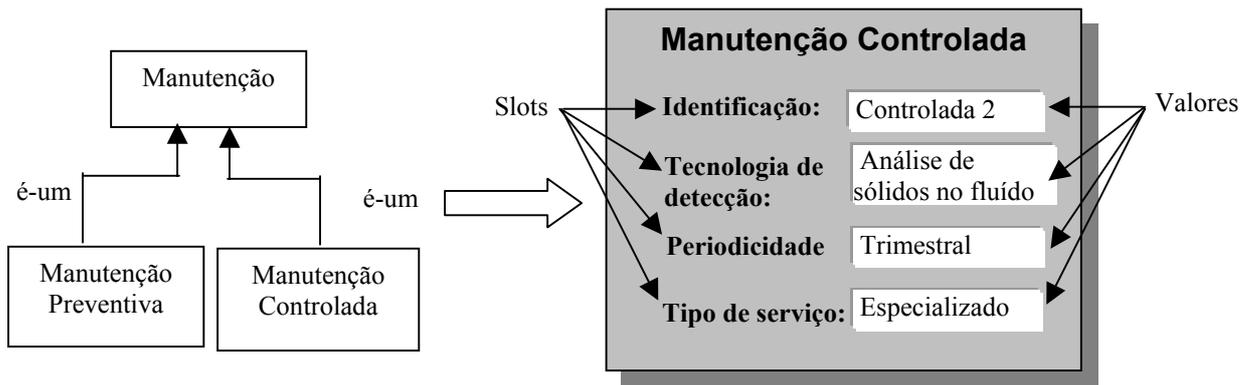


Figura 4.4 - Exemplo de representação Frame.

No contexto da modelagem orientada a objeto os atributos e serviços mais gerais, constituem as classes em níveis mais altos, com o propósito de evitar atributos e serviços redundantes nas classes em níveis mais baixos. As classes em níveis mais baixos são constituídas por atributos e serviços mais específicos.

O termo objeto na representação orientada a objeto é considerado como “uma abstração de alguma coisa no domínio de um problema, refletindo a capacidade de um sistema em manter informações sobre ela, interagir com ela, ou ambos: um encapsulamento de valores de atributos e seus serviços exclusivos” (Coad & Yourdon, 1990). De uma certa forma, objeto é uma entidade no domínio do problema constituído e descrito por valores de seus atributos e por serviços (também considerado como procedimento) específico a esta entidade.

As classes e objetos são arranjadas em estruturas do tipo generalização–especificação ou todo–parte. Estas estruturas expressam o entendimento do analista a respeito do domínio do problema sobre complexidade de múltiplas classes e objetos.

A estrutura todo–parte é constituída por uma classe e objeto representando o todo no topo da estrutura e as demais classes em níveis mais baixos da estrutura representando as partes do todo. As classes são organizadas tal como os nós das redes semânticas com estruturas “tem–parte“, com o intuito de representar a montagem do todo. No topo, aparece o objeto representando o todo e depois coloca-se um outro objeto representando uma parte. Na análise orientada a objeto aplicada na modelagem confiabilística usando relacionamento todo–parte é mostrado na figura 4.5.

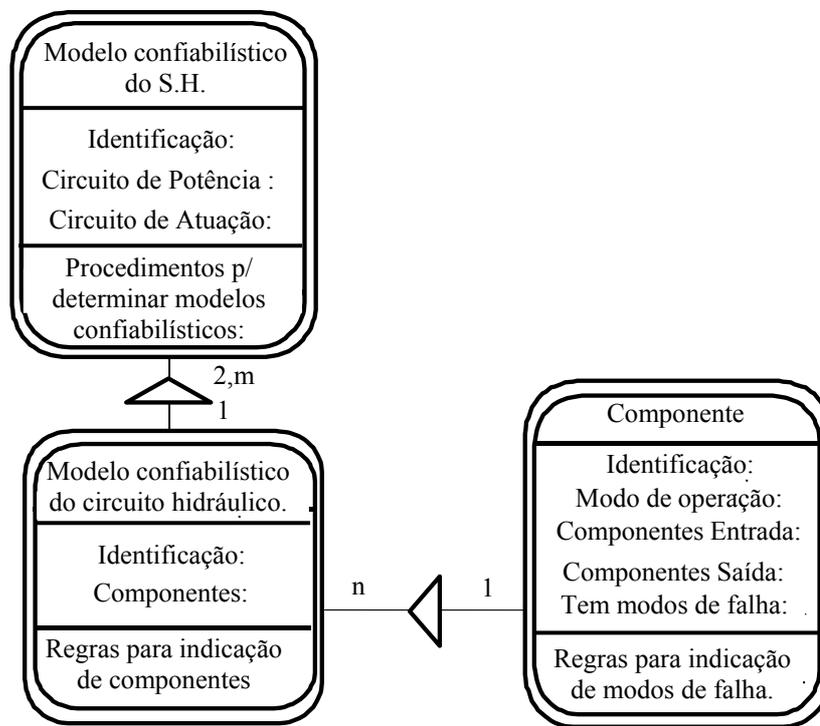


Figura 4.5 - Exemplo de estrutura todo-parte.

As terminações das linhas de conexão são marcadas com uma quantidade ou faixa, indicando o número de partes que um todo pode ter e vice-versa. Lembrando-se que um sistema hidráulico pode ter no mínimo dois circuitos (um circuito de atuação e um circuito de bombeamento) e m circuitos de atuação então um modelo do sistema tem 2 a m modelos confiabilísticos de circuitos. Interpretando no sentido circuito para sistema, o modelo do circuito pertence somente a um modelo do sistema. Seguindo com a interpretação, um circuito pode ter n componentes, enquanto que, um componente pertence a um só circuito. Neste trabalho de tese, a modelagem confiabilística vai até o nível de circuitos, considerando o

componente como menor unidade da modelagem confiabilística do sistema. Portanto, não será considerado o modelo confiabilístico do componente.

Outro tipo de estrutura é generalização-especificação cuja notação gráfica é representada por um semicírculo. Do ponto central desse semicírculo, traça-se uma linha em direção à classe de generalização. Na base do semicírculo traçam-se as linhas de ligação com as classes de especialização. É importante enfatizar que esta relação ocorre de classe para classe, ou seja, não há uma ligação de generalização-especificação entre classe e objeto, ou entre objeto e objeto (Montenegro e Pacheco, 1994). Na figura 4.6, a classe de generalização corresponde à classe Componente enquanto que as classes de especificação são as subclasses Bombas, Válvulas Direcionais, Acumulador, etc. A classe Componente, no topo da figura 4.6, é constituído por atributos genéricos tal como identificação, modo de operação, componentes entrada, componentes saída que são herdados pelas subclasses.

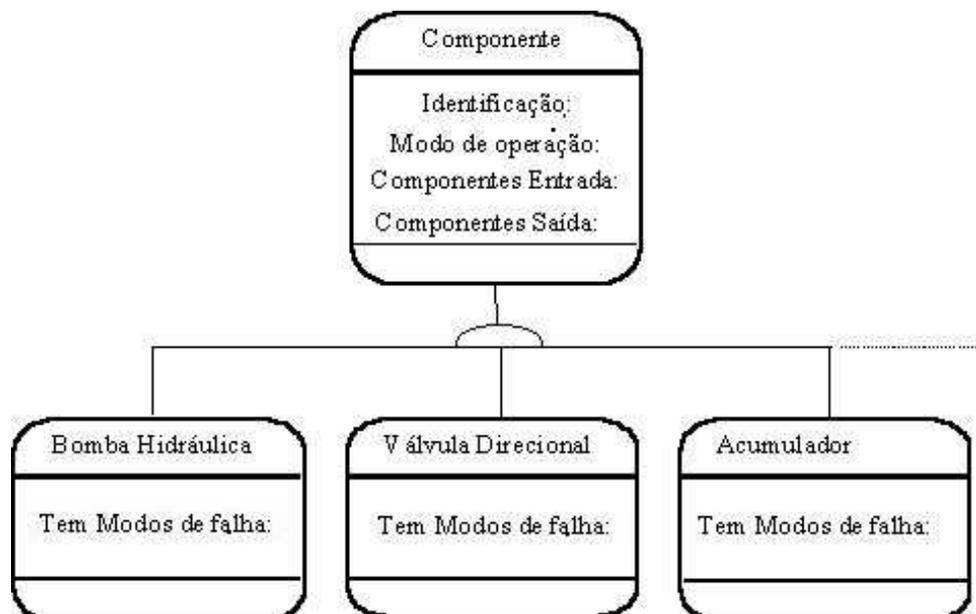


Figura 4.6 - Exemplo de estrutura generalização-especificação.

A aplicação da estrutura generalização-especificação teve como principal motivo um dos pontos enfatizados por Silva (1998): os atributos apresentam diferentes valores iniciais (valores *defaults*) para cada subclasse. Isto é, os valores do atributo Modos de falha são os mesmos para todas as válvulas direcionais, mas são diferentes dos valores usados no atributo Modos de falha dos acumuladores, das bombas, dos atuadores e assim por diante. Cada tipo de componente tem seu conjunto de modos de falha específicos.

Além das estruturas, há situações em que o domínio do problema é muito complexo, composto por várias estruturas. Uma representação deste tipo compromete o entendimento

global do problema. Para resolver este impasse, a análise orientada a objeto propõe separar estruturas muito complexas por assuntos que geralmente são identificados pela classe no topo de cada estrutura. As fronteiras do assunto são representadas por retângulos ou polígonos, distinguindo uma parcela do problema global. A figura 4.7 mostra dois assuntos: modelagem confiabilística e análise dos modos de falha e seus efeitos.

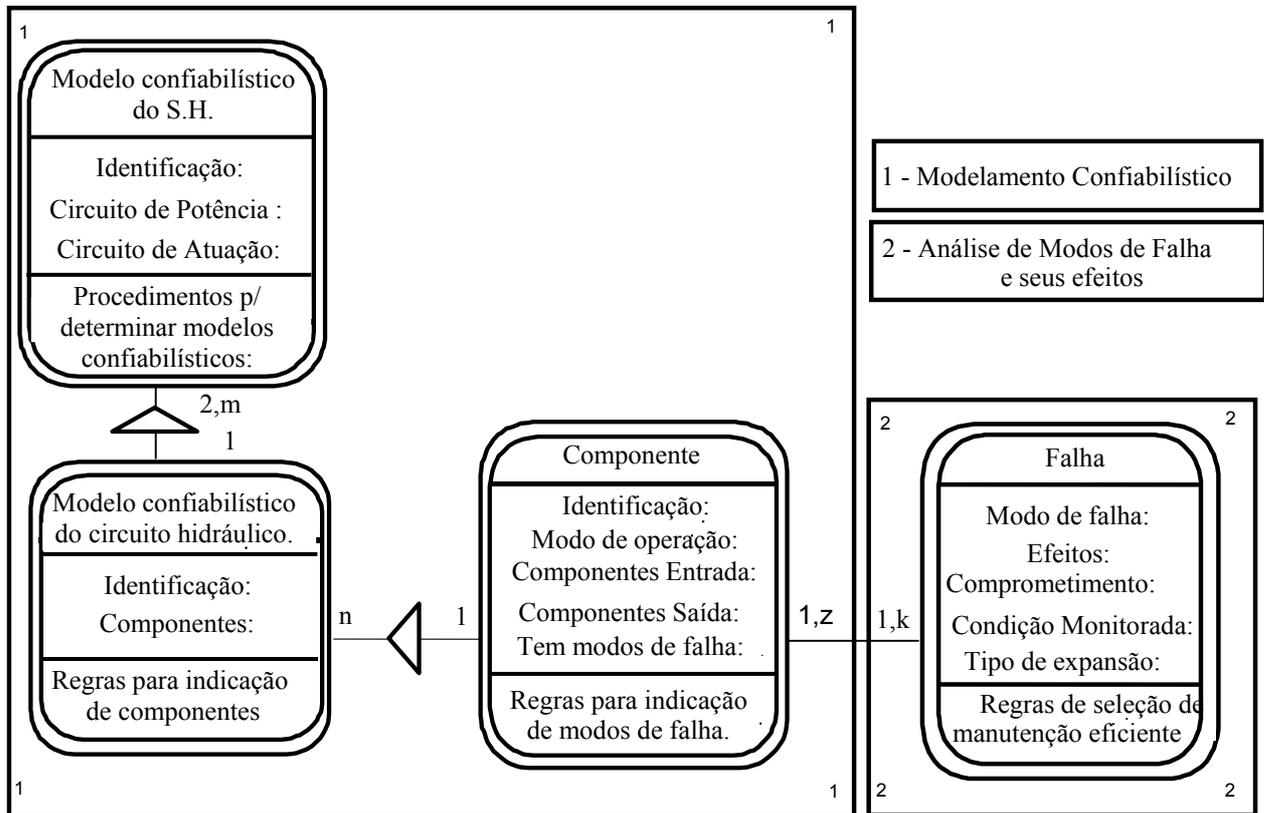


Figura 4.7 - Representação de dois assuntos: modelagem confiabilística e análise de modos de falha.

Na figura 4.7, a classe falha está ligada à modelagem confiabilística, uma vez que o modelo pode ser alterado pelo modo de falha. A análise da modelagem confiabilística desta tese se baseia na conexão entre os componentes (entradas e saídas), no modo de operação de cada componente e nos modos de falha que induzem falhas nos demais componentes (modos de falha não-isolados). Esses modos de falha são evitados por meio de manutenções controladas ou preventivas. Sendo assim, cada modo de falha da classe falha poderá ser relacionada com regras para selecionar manutenções controlada, preventiva e corretiva, cujos atributos estariam em uma classe própria das manutenções.

No caso de sistemas especialistas com representação orientada a objeto, as regras fazem parte dos serviços que podem ser inferidos através das mudanças nos valores dos atributos do

objeto, nas conexões de ocorrência, nas conexões de mensagens e também nas relações entre as estruturas tipo generalização-especialização e todo-parte.

A potencialidade da técnica orientada a objeto está relacionada com as propriedades como abstração, encapsulamento, herança e polimorfismo. Para entender a aplicação da técnica é feita explicação a respeito de cada uma das propriedades (Gonzalez, 1993 citado por Silva 1998):

1. Abstração: Ignora aspectos de algumas entidades que não são relevantes para o corrente problema, assim é possível concentrar-se mais naqueles aspectos mais relevantes.
2. Encapsulamento: é usado no desenvolvimento de uma estrutura global de programas, onde cada parte do programa deve conter tarefa específica, revelando tão pouco quanto possível sobre os trabalhos internos.
3. Herança: isto permite expressar características comuns possuídas por uma coleção de diferentes classes de objetos em uma só vez.
4. Polimorfismo: permite que uma mesma mensagem seja respondida por diferentes classes de maneira própria de cada classe. Onde mensagem é uma solicitação ou comando enviado por um objeto emissor para um objeto receptor para realização de um serviço ou processamento.

Aplicando-se a técnica orientação objeto na representação do processo para confiabilidade e manutenibilidade em sistemas hidráulicos, com base na estratégia de manutenção centrada na confiabilidade, propõe-se a estrutura mostrada na figura 4.8

A representação da figura 4.8 apresenta uma estrutura todo parte da modelagem confiabilística onde um modelo do sistema é constituído de um modelo confiabilístico formado de 1 a m combinações em série ou paralelo dos modelos confiabilísticos dos circuitos. Os modelos confiabilísticos dos circuitos são formados por n componentes. Esta estrutura está conectada com análise dos modos de falha, pois cada componente pode ter de um a z falhas, assim como, cada falha pode ter de um a y tipos de tarefas de manutenções aplicáveis e eficientes.

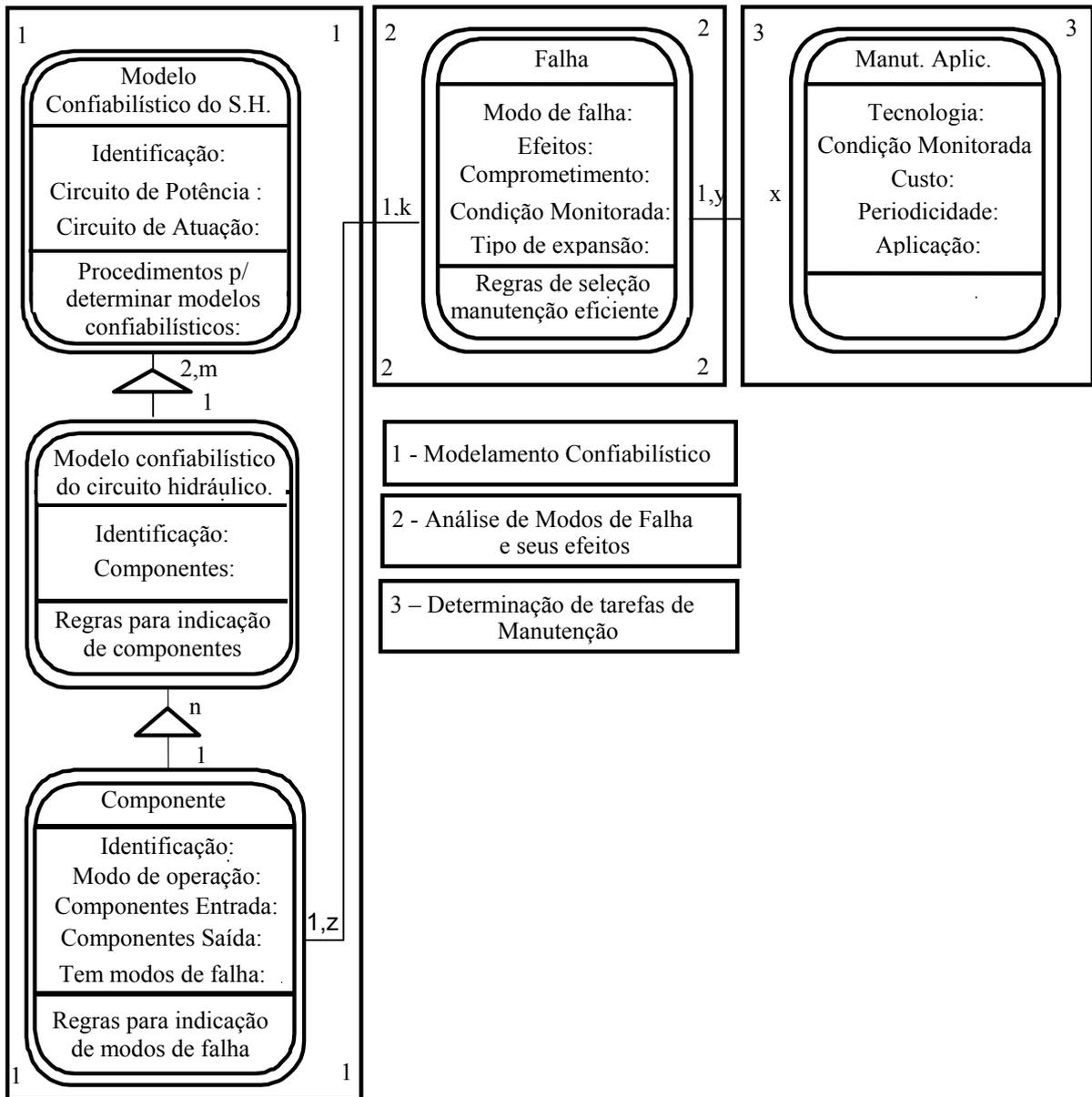


Figura 4.8 - Estrutura orientação objeto para os métodos da confiabilidade e manutenibilidade em sistemas hidráulicos.

4.7 – Modelagem orientada a objeto e regras para representação da estratégia de manutenção centrada na confiabilidade

O processo de estabelecimento de tarefas de manutenção segue um fluxo de informações iniciados em um sistema hidráulico já concebido para modelagem confiabilística, FMEA e diagrama lógico de decisão. Nesta direção, um sistema hidráulico pode ter um ou mais modelos confiabilísticos, dos quais identificam-se os componentes que merecem maior atenção (principalmente os que estão em série, cuja falha implica em parada do sistema). Os componentes estão relacionados com os modos de falha que deverão ser classificados para receberem tarefas preventivas, controladas ou corretivas. Observando a figura 4.9, pode-se

notar uma coleção de possíveis soluções desde o sistema hidráulico até as ações de manutenção.

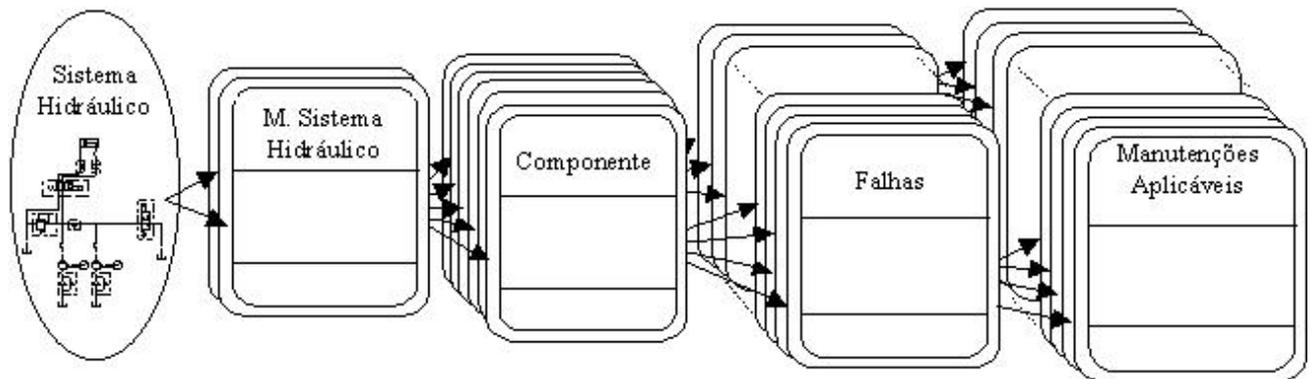


Figura 4.9 - Combinação de possíveis soluções.

Conforme figura 4.9, o leque de opções é muito extenso, mas para se ter manutenções que asseguram segurança, baixo custo, eficiência e disponibilidade, as opções podem ser bem menores com ajuda de regras, aplicando o encadeamento direto como método de inferência. Estas regras serão retiradas do conhecimento teórico e prático.

As regras tratarão da interface entre as classes e objetos com objetivo de convergir para soluções suficientemente boas, isto é, determinação de manutenções com boas características de custo-eficiência. Cada classe e objeto terá regras, emitindo fatos e conclusões através da modelagem orientada a objeto.

Na definição de tarefas de manutenção em um sistema hidráulico, as regras irão buscar opções conforme as diretrizes da manutenção centrada na confiabilidade no fluxo de dados nas classes de modelos confiabilísticos, modos de falha e tarefas de manutenção. Neste fluxo, um sistema hidráulico pode ter m modelos confiabilísticos, n componentes, k modos de falha e y tarefas de manutenções aplicáveis. As regras vão estreitando este número de opções à medida que as diretrizes da RCM vão sendo aplicadas até chegar uma tarefa de manutenção para cada modo de falha.

4.8 – Considerações finais

Até aqui, discutiram-se alguns aspectos sobre sistemas especialistas, as técnicas de representação do conhecimento e aplicação no estabelecimento da estratégia de manutenção. Mas falta identificar as regras que fazem conexão entre um sistema hidráulico e modelos confiabilísticos, componente, modos de falha e tarefas de manutenção eficientes, visando

segurança pessoal, desempenho do sistema e economia. Para este propósito, passa-se para o processo de aquisição do conhecimento baseado no método indutivo para capturar regras que facilitarão a criação do primeiro módulo do sistema especialista.

CAPÍTULO 5

PROCESSO DE AQUISIÇÃO DO CONHECIMENTO BASEADO NO MÉTODO INDUTIVO

5.1 – Introdução.

O objetivo deste capítulo é descrever o processo de aquisição do conhecimento na área de projeto de sistemas hidráulicos reguladores de velocidade de turbinas em hidrelétricas. Este processo consiste de duas etapas. A primeira etapa é a obtenção do conhecimento a respeito do funcionamento para elaboração do diagrama de fluxo funcional. A segunda é o método indutivo para automatização da modelagem confiabilística e o método do grupo mínimo de corte. O capítulo é finalizado com a representação computacional do modelo resultante do método indutivo.

O processo de aquisição do conhecimento é uma das principais etapas de desenvolvimento de um sistema especialista e é considerado como um dos estágios mais difíceis, conforme Reys & Pati (2000), Yahia et al (2000), Silva & Dawson (1997), Hamilton e Breslawski (1996) e Kidd (1987). Esta etapa envolve a obtenção, análise e interpretação do conhecimento que um especialista humano usa quando resolve um problema em uma representação adaptável a uma máquina, segundo Kidd (1987).

Na área de aquisição do conhecimento foram realizados vários trabalhos em busca de metodologias e técnicas de automatização. No campo das pesquisas sobre metodologias houve várias contribuições com intuito de encontrar uma concepção estrutural para um sistema especialista. Breuker e Wielenga (citado por Kidd, 1987) apresentaram uma metodologia conhecida como KADS (Aquisição do Conhecimento e Estruturação do Documento) que se mostrou eficaz em uma larga variedade de domínios e apresentou rápida prototipagem. No entanto esta metodologia gerava sistemas pouco operacionais e requeria melhorias quanto à manutenibilidade. Fox et al (citado por Kidd, 1987) propuseram um método no desenvolvimento de um sistema especialista para diagnóstico da leucemia, porém apresentava limites quanto à aplicação em diversos domínios. Hart mencionou o método da indução, mostrando a vantagem de obter, facilmente, as regras (Hart 1990; Kidd, 1987). O método da indução constrói o conhecimento a partir de casos específicos para serem generalizados nos demais casos de uma área de aplicação. O especialista fornece um conjunto de problemas exemplares com as devidas soluções e destes são retiradas regras que formam a

base do conhecimento de um sistema especialista. Este método serviu de apoio para criação de módulos automáticos de aquisição do conhecimento. Baseando-se nestas considerações, este método foi adotado neste trabalho de tese.

Este trabalho não tratará sobre automatização do processo de aquisição do conhecimento embora se menciona trabalhos como de Wu (1998) que propõe um programa de transferência de conhecimento, pelo qual o especialista pode interagir diretamente na construção de bases de conhecimento sem ajuda de um programador. Segundo Hamilton e Breslawski (1996), a não adoção do enfoque automático de aquisição do conhecimento está baseada nas limitações quanto à universalidade de aplicação, nas dificuldades na validação da base do conhecimento, e na explicação sobre as recomendações feitas por estes sistemas.

5.2 – Obtenção do conhecimento sobre Sistemas Hidráulicos Reguladores de Velocidade

Para auxiliar na etapa de obtenção do conhecimento, foram desenvolvidas várias técnicas, sendo que algumas citadas por Durkin (1994) e Watermann (1986) são: entrevistas estruturadas, não estruturadas, discussões do problema, descrição do problema e a análise do problema. A técnica focada nesta tese está baseada na análise de um problema abordada por Watermann (1986), onde um especialista descreve a solução após cada hipótese gerada pelo engenheiro do conhecimento.

A entrevista com especialista de sistemas hidráulicos de controle de velocidade baseia-se numa entrevista não estruturada começando com perguntas abertas a respeito das falhas mais comuns e mais drásticas nestes sistemas, depois se procura saber quais são as alternativas de projetos usadas para evitar que o sistema pare ou apresente efeitos indesejáveis devido a falha de um componente. A partir destas questões é solicitado ao especialista mostrar alguns exemplos de sistemas com recursos para evitar paradas inesperadas ou efeitos indesejáveis. Estes recursos podem ser a adoção de sensores e emprego de componentes redundantes e que vão sendo apresentados num sistema hidráulico típico. Feitas considerações num sistema hidráulico típico, um diagrama de fluxo funcional deste sistema é montado e logo é avaliado pelo especialista.

Um exemplo dessas entrevistas é mostrado a seguir, onde foi usado um circuito hidráulico de bombeamento mostrado na figura 5.1. Junto deste circuito é explicada uma seqüência de funcionamento para ser apresentada ao especialista com propósito de obter suas observações, além do diagrama de fluxo funcional apresentado na figura 5.2. Essas informações eram enviadas via e-mail e foram sendo prontamente respondidas pelo especialista

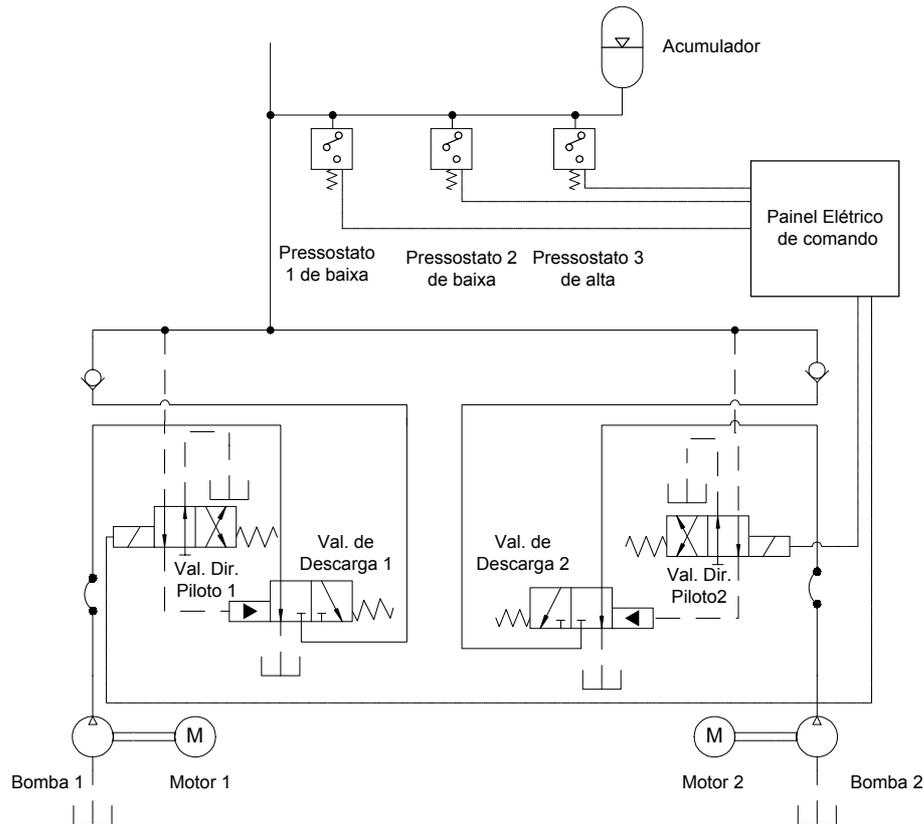


Figura 5.1 - Circuito de bombeamento usado na entrevista.

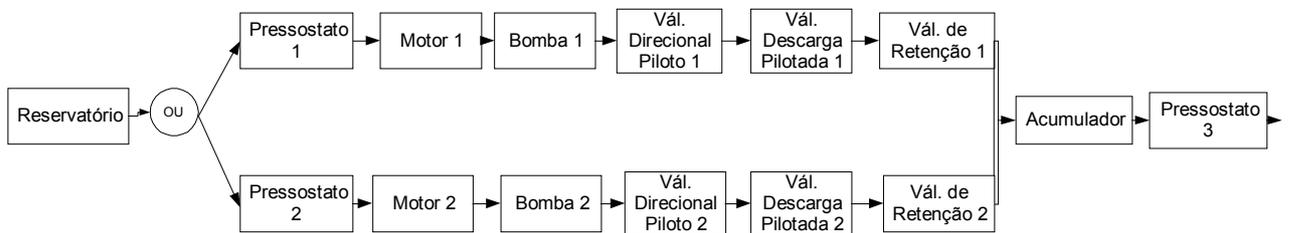


Figura 5.2 - Diagrama de fluxo funcional do circuito da figura 5.1.

A seqüência de funcionamento apresentada pelo engenheiro do conhecimento ao especialista foi a seguinte:

“A bomba 1 fica desligada, até que a pressão no acumulador chegue a uma pressão mínima que aciona o pressostato 1. Este pressostato manda um sinal elétrico para o painel elétrico que aciona a bomba 1 e a válvula direcional piloto 1. Neste momento a bomba 1 fica temporariamente descarregando para o tanque até que a válvula direcional piloto 1 deixa de ser atuada (supondo que haja algum temporizador no painel elétrico que desatua a válvula direcional piloto 1 após um certo tempo) que despressuriza a linha piloto da válvula de descarga 1, colocando a bomba 1 em carga, carregando o acumulador.

A linha da bomba 2 tem mesma seqüência de funcionamento, mas ficaria desligada a não ser que o pressostato 1 falhasse e a pressão do sistema chegasse a um segundo valor mínimo estabelecido no pressostato 2 que acionaria a linha da bomba 2. Você concorda com esta seqüência de funcionamento?”

Resposta do especialista:

“A bomba selecionada como principal fica ligada permanentemente, descarregando para tanque pois a válvula direcional piloto permanece desenergizada mantendo a linha de óleo de comando da válvula de descarga com pressão. Pressostato 1 (além de outro na retaguarda) monitora o acumulador informando ao CLP. Quando a pressão do acumulador atinge a mínima o CLP energiza a válvula direcional piloto que despressuriza a linha de óleo piloto da válvula de descarga, comutando a bomba para pressurização do acumulador (em carga). Ao atingir a pressão normal no acumulador ocorre a desenergização da válvula direcional piloto e novamente a bomba passa para tanque (a vazio) mantendo o motor funcionando.

Caso a pressão no acumulador continue caindo para o segundo valor mínimo que aciona o pressostato 3, fazendo CLP atuar na relé da bomba selecionada para reserva, ligando o motor e após uma temporização para que este atinja a rotação nominal, é acionada a válvula direcional piloto comutando a válvula de descarga para carga. Ao atingir a pressão ajustada para o grupo reserva a válvula direcional piloto é desenergizada e o motor da bomba é desligado

Pressostato 2 quando atuado comanda o desligamento do motor da(s) bomba(s) que estiver(em) operando, além de um outro pressostato na retaguarda.”

Estas observações serviram de base para modificação do circuito da figura 5.1. As modificações foram o posicionamento das válvulas direcionais pilotos 1 e 2 e das válvulas de descarga 1 e 2. Além destas alterações foram acrescentados os pressostatos de redundantes (os de retaguarda) como o de baixa 4 e o de alta 5. A nova configuração do circuito é vista na figura 5.3.

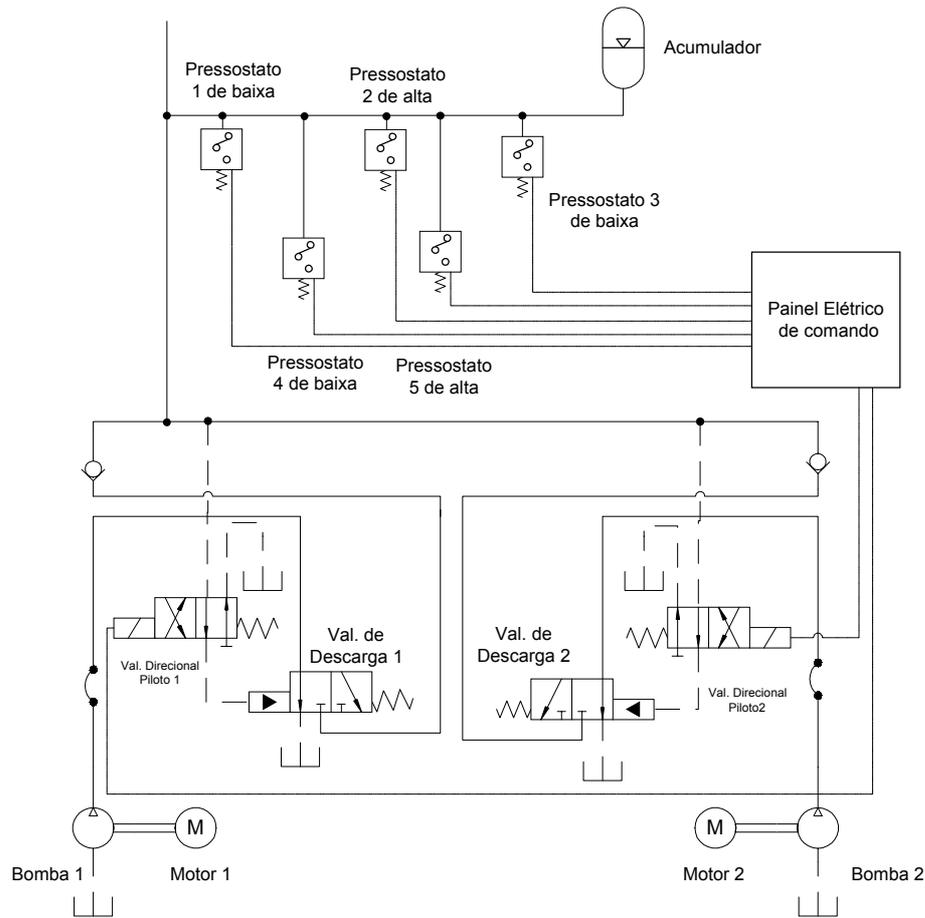


Figura 5.3 - Circuito hidráulico modificado de acordo com as observações do especialista.

À medida que as modificações eram feitas diretamente no circuito hidráulico, também eram sugeridas alterações no diagrama de fluxo funcional. Um exemplo de alterações no diagrama de fluxo funcional é mostrado na figura 5.4, o qual representa o circuito da figura 5.3 e é derivado das entrevistas do primeiro diagrama mostrado na figura 5.2.

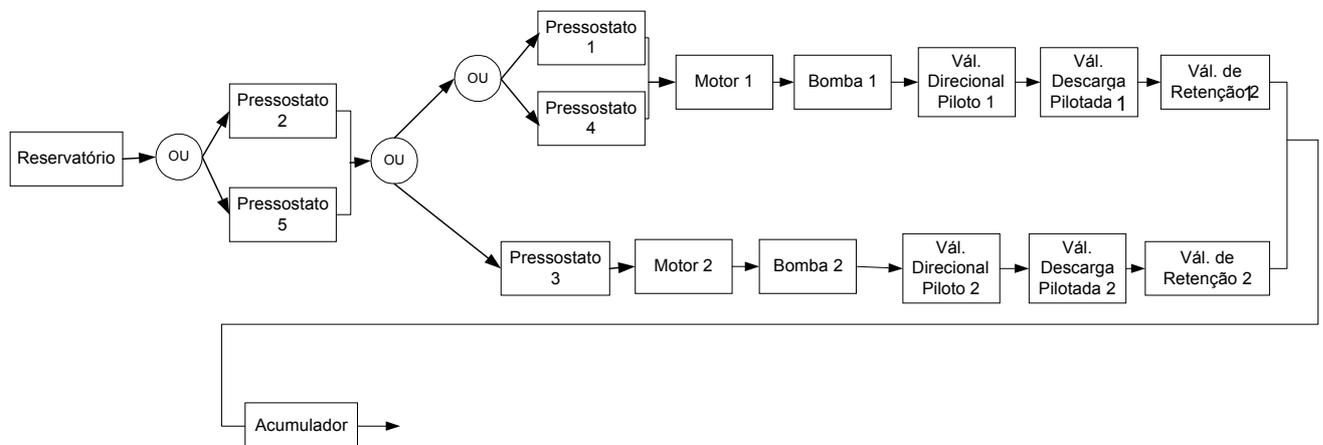


Figura 5.4 - Diagrama do fluxo funcional da figura 5.3.

Após esta etapa, são observadas as características de cada componente como suas entradas, saídas no diagrama de fluxo funcional bem como seu modo de operação. Estas características são as peças chaves para automatização da modelagem confiabilística com uso da técnica grupo mínimo de corte. Esta automatização é viabilizada através do método da indução.

5.3 – Método da Indução

O método da indução é usado na etapa de aquisição do conhecimento no desenvolvimento de um sistema especialista e foi abordado por Hart (Hart, A., 1990; Kidd, A. 1987). Este método ajuda a descobrir o conhecimento implícito (conhecimento que o especialista dispõe mas não tem como evidenciá-lo de forma clara e objetiva) na tomada de decisões para solução de um grupo de problemas em um domínio através do princípio da indução. O uso deste princípio é apropriado nos casos onde o especialista apresenta uma coleção de problemas já resolvidos com diferentes tipos de soluções. Junto com cada exemplo são enfocadas algumas características quantitativas ou qualitativas que influenciaram na decisão por uma determinada solução. Este conjunto de exemplos forma a base para o aprendizado indutivo cujo procedimento primeiramente foca as características relevantes para então tomar uma decisão e formar uma regra geral.

5.3.1 – Integrando Modelagem Confiabilística de Sistemas Hidráulicos com Método Indutivo

A redundância de componentes hidráulicos é uma característica diretamente relacionada à sua aplicação. Existem aplicações onde a redundância é imperativa pelo fato de considerar não só a falha do sistema, mas também suas conseqüências no contexto da segurança pessoal, ambiental e econômico. Um dos setores, onde a redundância é relevante, é a geração de energia elétrica. A falha de determinados sistemas neste setor pode comprometer o fornecimento de energia para uma região, com conseqüências econômicas para população e para empresa, devido às multas impostas pela legislação vigente.

Considerando as conseqüências das falhas de sistemas hidráulicos para controle de velocidade de turbinas hidrelétricas, alguns projetistas têm adotado a redundância de componentes para assegurar a plena geração de energia elétrica. A redundância destes sistemas tem sido a duplicação de componentes óleos hidráulicos, tais como bombas, válvulas de alívio e válvulas de descarga. Estes sistemas têm usado no máximo dois componentes em paralelo, o que faz induzir regras para conexões em paralelo simples com o máximo de dois componentes ou dois ramos de componentes. Estes componentes podem estar na condição

reserva ativa ou passiva, conforme suas vantagens. Os componentes na reserva ativa apresentam a vantagem de estarem prontamente ligados para substituir os componentes ativos que falham repentinamente, sem aviso. Mas os componentes na reserva ativa têm a desvantagem de estarem sujeitos ao desgaste, corrosão tal como os componentes ativos. Os componentes na condição redundância passiva não estariam nas mesmas condições de desgaste que os componentes em funcionamento, proporcionando assim, um maior ciclo de vida útil ao sistema, pois falhando os componentes ativos, teremos os componentes da reserva passiva para dar um mesmo tempo de vida oferecido pelos ativos. Baseando-se nas características de redundância, modos de operação e entre outras peculiaridades destes sistemas é que foi aplicado o método da indução.

Segundo Hart (1992), os quatro requisitos para execução do processo de indução são:

Exemplos - Os exemplos são exercícios de treinamento que formam a base do processo indutivo (Hart, 1992). Um grupo incompleto ou inadequado de exemplos pode resultar em regras pouco abrangentes. No contexto deste trabalho, tem-se como exemplos sistemas hidráulicos para o controle de velocidade de turbinas hidrelétricas com os seus componentes apresentando diferentes modos de operação e ligações físicas.

Atributos – Os exemplos tem um conjunto de características que os descrevem, e habilitam comparações a serem feitas entre si (Hart, 1992). Algumas destas características são relevantes no estabelecimento de regras para inferir uma solução. Estas características são denominadas como atributos que podem ser categorizados como quantitativos e qualitativos. Os atributos qualitativos serão os mais usados neste trabalho e alocam características descritivas a respeito de cada componente. Os atributos focados serão o modo de operação, entradas e saídas do componente. A definição de características como entrada e saída de componentes teve por base o trabalho de Elliot (1994) cujo objetivo é o desenvolvimento de um sistema especialista para geração automática de árvores de falhas de sistemas elétricos e hidráulicos embarcados em aeronaves militares.

Classes – A classe representa a decisão ou classificação do especialista (Hart, 1992). Torna-se importante enfatizar que o termo classe abordado no método da indução é diferente do termo classe usado na análise orientada a objeto. No contexto deste trabalho, as classes referem-se ao estabelecimento da posição de um componente no modelo confiabilístico, determinando se está em série ou paralelo. Na classe já é estabelecido como ficaria o modelo confiabilístico após aplicação do método grupo mínimo de corte.

Algoritmo Indutivo - O algoritmo é o método que o programa usa para induzir regras a partir de um conjunto de exemplos de treinamento (Hart, 1992). De uma certa forma o

algoritmo indutivo é representado por uma árvore de decisão de onde mostra a ordem com que os atributos são considerados para emitir uma classificação ou uma solução. No propósito deste trabalho o algoritmo indutivo recebe uma coleção de componentes com seus respectivos atributos como entradas, saídas e modos de operação para então recomendar através de fatos um modelo confiabilístico modificado pelo método do grupo mínimo de corte.

5.3.2 - Aplicação do Método Indutivo na Modelagem Confiabilística em Sistemas Hidráulicos

O primeiro passo para aplicação do método indutivo é o estabelecimento das entradas e saídas de cada componente do sistema. O diagrama de fluxo funcional do sistema vai servir de base para montagem do modelo confiabilístico pois tem a vantagem de mostrar os possíveis modos de operação que um sistema pode oferecer através das portas OU e E.

Como é mostrado na figura 5.5, um passo é considerar a função principal do sistema. Supondo que uma especificação de projeto para o circuito de potência é assegurar o contínuo fornecimento de vazão, tendo como conseqüência a pressão devido a carga no cilindro do circuito de atuação. Uma vez que o circuito de potência apresenta bombas A e B, o sistema pode assumir duas situações. Na primeira situação, bomba A poderia estar funcionando (condição ativa) e a bomba B se manteria desligada, isto é, caracterizando a condição redundância passiva. A segunda situação, as duas bombas poderiam estar funcionando, entretanto a válvula de descarga estaria ativada, desviando o fluido bombeado por B para o reservatório. Neste caso, a bomba A está na condição ativa enquanto que a bomba B está condição reserva ativa. Note que nas duas situações, a bomba B apresenta diferentes modos de operação. Assumindo as duas bombas estão operando plenamente, estabelecendo que a bomba B, válvula de descarga, válvula de retenção e filtro B estão na condição redundância ativa e os demais componentes na condição ativa. O próximo enfoque é determinar o diagrama de fluxo funcional.

Este diagrama descreve o que cada componente faz para o sucesso do sistema através de funções como apresentado na tabela 5.1. A Figura 5.5 mostra o esquema óleo hidráulico e o respectivo diagrama de fluxo funcional de um regulador simples.

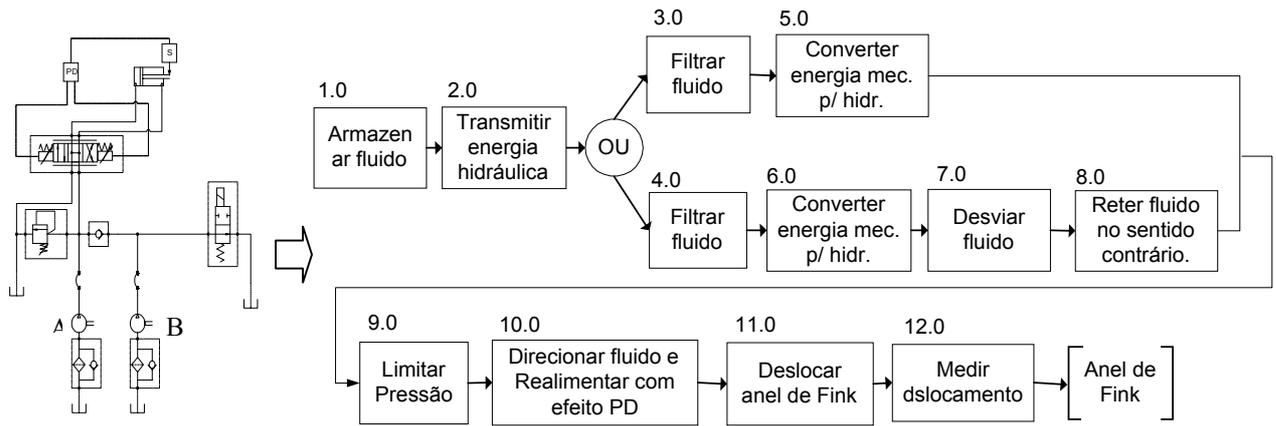


Figura 5.5 - Diagrama do fluxo funcional de um regulador simples para uma turbina.

Tabela 5.1. Componentes hidráulicos e suas respectivas funções.

Referências	Componentes	Funções
1.0	Reservatório	Armazenar Fluido
2.0	Fluido	Transmitir Energia Hidráulica
3.0	Filtro A	Filtrar Fluido
4.0	Filtro B	Filtrar Fluido
5.0	Bomba A	Converter Energia Mecânica Em Energia Hidráulica
6.0	Bomba B	Converter Energia Mecânica Em Energia Hidráulica
7.0	Válvula de Descarga	Desviar Fluido
8.0	Válvula de Retenção	Reter Fluxo Num Sentido
9.0	Válvula de Alívio	Limitar Pressão
10.0	Controlador PD e Válvula Direcional	Realimentar com efeito PD e Direcionar Fluido
11.0	Cilindro	Deslocar anel de Fink
12.0	Transdutor de posição	Medir dslocamento do anel de Fink

A partir do diagrama de fluxo funcional são obtidas as entradas e saídas dos componentes, bem como as respectivas condições de funcionamento, baseando-se nas portas lógicas com funções alternativas (OU) e complementares (E). A porta OU indica um ramo de componentes ativos e outro de componentes redundantes (redundantes ativos ou passivos), enquanto que, a porta E indica dois ramos de componentes ativos.

Submetendo-se o conjunto de componentes com seus respectivos atributos ao primeiro estágio do algoritmo indutivo da Figura 5.6 procura-se primeiramente por componentes de mesma entrada e saída, depois por componentes com mesma entrada e ,por último, componentes sem entradas idênticas.

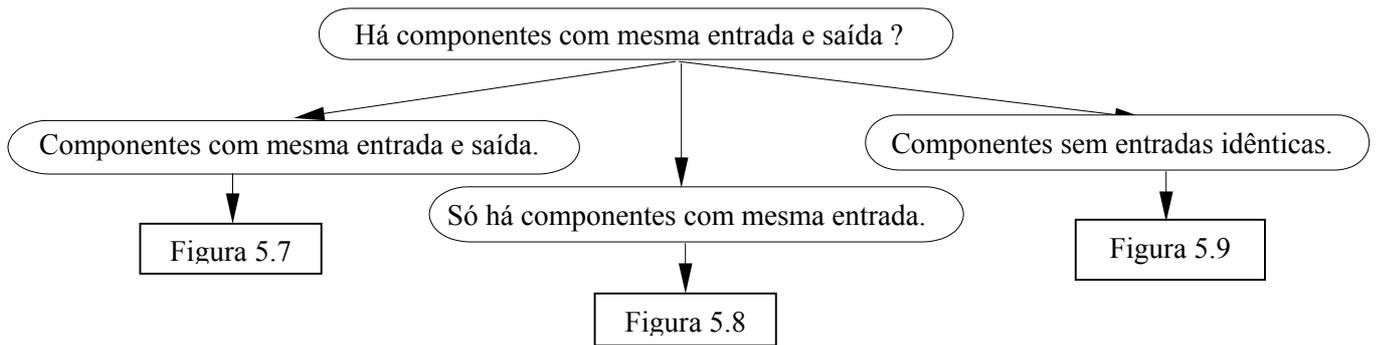


Figura 5.6 - Primeiro estágio do algoritmo indutivo para modelagem confiabilística.

a) Componentes de Mesma Entrada e Saída.

Conforme a figura 5.7, um par de componentes, com mesma entrada e saída, são verificados se apresentam a mesma condição de operação, isto é, se estão ambos na condição ativa. Essa última situação indica componentes em série formando dois grupos de corte de primeira ordem. Caso os componentes estejam em situação diferente, onde um está na condição ativa e outro na redundância ativa, pode-se induzir um grupo de corte de segunda ordem. Nesta decisão são considerados três atributos: componentes na entrada, componentes na saída e modo de operação.

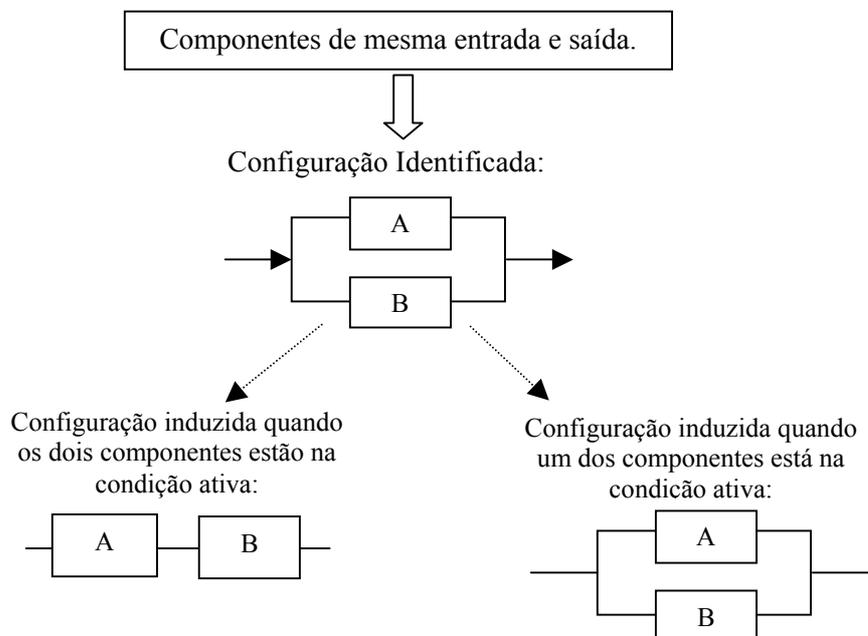


Figura 5.7 - Ramo do algoritmo para componentes com mesma entrada e saída.

Um exemplo de componentes de mesma entrada e saída em sistemas hidráulicos é a dupla de filtros normalmente colocados antes de válvulas direcionais proporcionais. Estas

válvulas requerem baixíssimos níveis de contaminação por partículas, e portanto, obriga o uso de filtros de malha mais fina que podem entupir com maior frequência. Isso justifica um segundo filtro na redundância ativa.

b) Componentes de Mesma Entrada.

Os casos destinados ao ramo da figura 5.8, são para componentes com mesma entrada que normalmente iniciam duas linhas paralelas de componentes. Essas linhas podem ser exemplificadas através de circuitos de bombeamento com mais de uma bomba para fornecimento de vazão. Cada linha é constituída por uma bomba com os demais componentes como válvula de alívio, válvula de descarga, válvulas de retenção, etc.

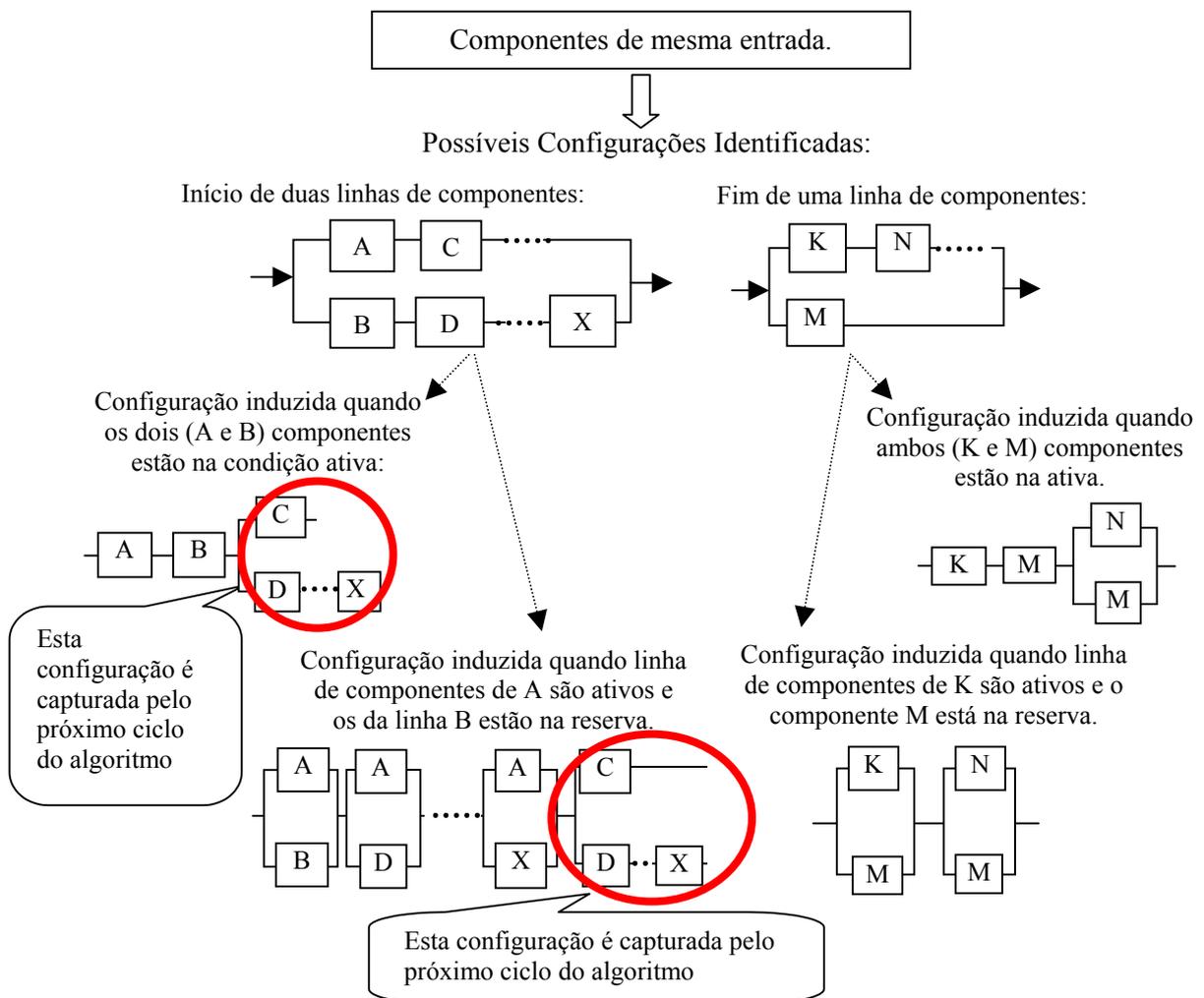


Figura 5.8- Ramo do algoritmo indutivo para componentes com mesma entrada.

Toda uma linha pode assumir um modo de operação, isto é, uma bomba e os demais componentes ligados em entre si fornecem vazão diretamente ao circuito de atuação, caracterizando o modo ativo, enquanto que a segunda linha ficaria na redundância ativa, desviando o óleo para o tanque. Esta segunda linha poderia estar na reserva passiva cuja

situação é exemplificada pela bomba desligada junto de seus demais componentes, estando somente os sensores e relés de acionamento em estado de redundância ativa, prontos para ligar a bomba na falha da linha principal.

Logo, o início de duas linhas ou mais é definido pelos componentes com mesmas entradas e por haver uma linha em estado ativo e outra em estado de reserva. Tendo duas linhas de componentes com estas peculiaridades, já é um precedente para indução do emprego do método do grupo mínimo de corte.

No parágrafo anterior foram abordadas configurações do ramo esquerdo da figura 5.8, isto é, componentes de mesma entrada que indicam o início das linhas de componentes. Mas falta considerar o fim de uma dessas linhas. O fim de uma linha é caracterizado quando surgir um dos seus componentes com mesma saída de um componente na linha paralela, conforme visto no ramo direito da figura 5.8. De acordo com o modo de operação do último componente podem ser induzidos dois grupos de corte de primeira ordem ou um grupo de corte de segunda ordem.

c) Componentes sem entradas idênticas

O terceiro ramo tem o propósito de identificar configurações mais comuns em reguladores de velocidade tais como circuitos de atuação com controle de posição. Além destas, são identificados componentes não pertencentes às linhas paralelas com um elemento na entrada e outro na saída. Também são identificadas configurações onde há componentes de mesma saída que não pertencentes a linhas paralelas.

A identificação destas configurações é baseada nos valores de três atributos: componentes na entrada, na saída e o tipo de componente (figura 5.9). As configurações com circuitos de controle de posição são identificados através da presença de componentes controladores e sensores de posição que são reconhecidos pelo valor do atributo tipo de componente.

Componentes não pertencentes às linhas paralelas são identificados por uma única conexão na entrada e saída.

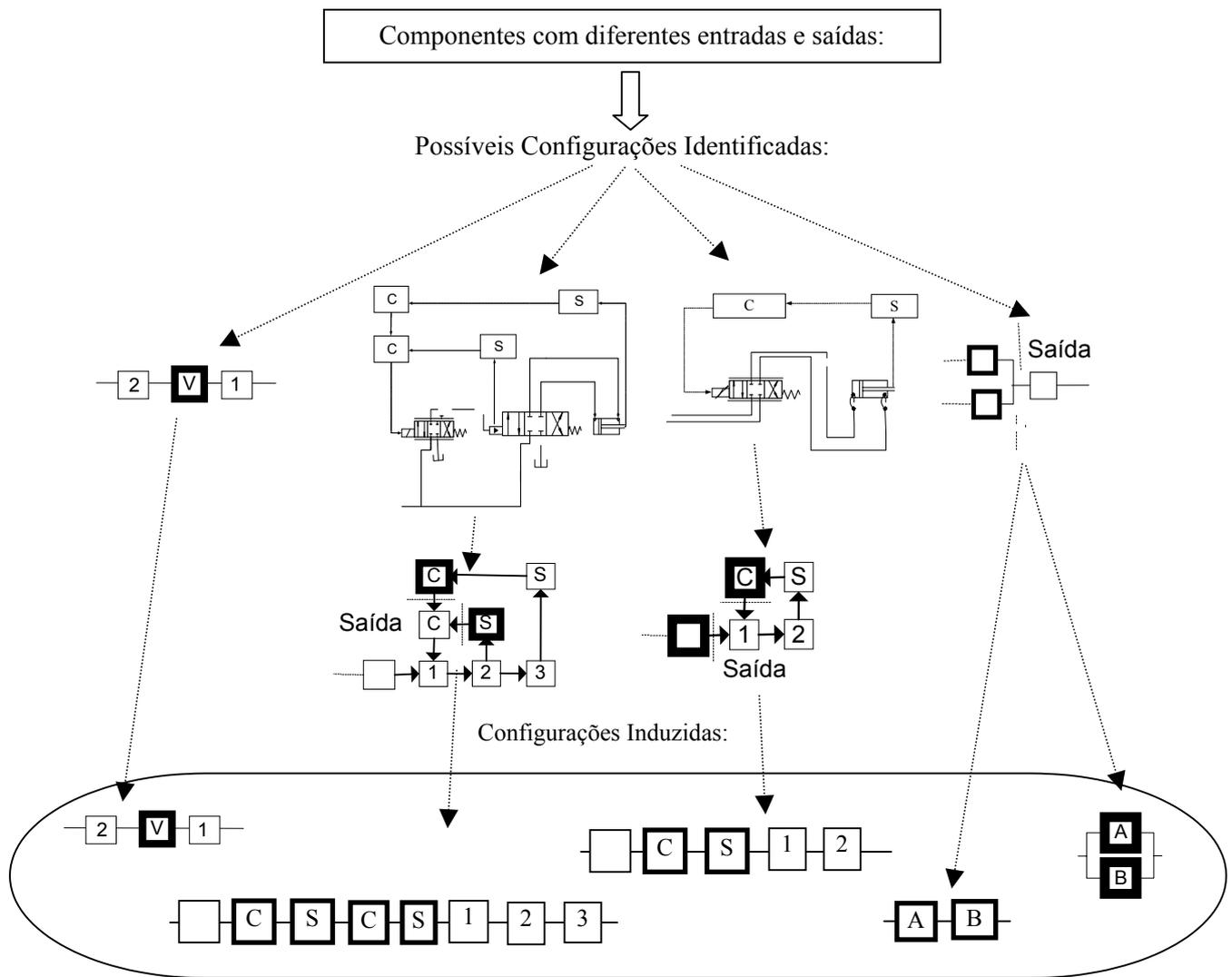


Figura 5.9 - Algoritmo indutivo tratando componentes de conexões distintas e de mesma saída.

Os circuitos de controle de posição tratados no ramo da figura 5.9 são dois tipos: realimentação simples e dupla. A realimentação simples é caracterizada por uma malha fechada com uma válvula proporcional, um servomotor, um controlador e um transdutor. A constatação deste tipo de realimentação é feita quando um dos componentes de mesma saída corresponde a um controlador. Após a constatação, as conexões do controlador são alteradas para formação de dois grupos de corte de primeira ordem. A realimentação dupla corresponde aos circuitos de grandes turbinas, onde há duas malhas fechadas: uma com a válvula proporcional e a válvula distribuidora, e outra entre válvula proporcional e servomotor. Este tipo de realimentação é identificado quando os dois componentes com mesma saída correspondem respectivamente ao controlador e sensor. Estes componentes são transformados em grupos de corte de primeira ordem.

A última configuração, onde há simplesmente componentes de mesma saída que não do tipo controlador ou sensor, é induzido a formar um grupo de corte de segunda ordem ou dois grupos de corte de primeira ordem, conforme modo de operação.

A Figura 5.10 apresenta o resultado final da aplicação do algoritmo indutivo, formando um modelo confiabilístico do sistema hidráulico já submetido ao método do grupo mínimo de corte. Embora este resultado seja óbvio para sistemas com menor número de componentes, a aplicação do algoritmo indutivo pode ser relevante para sistemas complexos e com grande quantidade de componentes. Nestes sistemas, a identificação de componentes relevantes para execução da função principal é extremamente difícil e demorada, necessitando de um auxílio computacional.

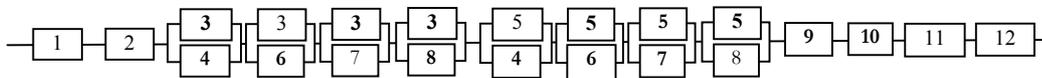


Figura 5.10 - Modelo resultante após aplicação do algoritmo indutivo no sistema da fig. 5.5.

Neste modelo verifica-se o ponto crítico do sistema que são os grupos de corte de primeira ordem onde a falha implica em falha do sistema. Além disso, os componentes no mesmo grupo de corte de segunda ordem auxiliam na identificação das possíveis combinações entre os modos de falha. Observando a figura 5.10, evidencia-se a possibilidade de haver eventos de falha no sistema cuja origem pode ser a combinação dos modos de falha do componente 3 com os modos de falha dos componentes 4, 6, 7 e 8, assim como do componente 5 com os componentes 4, 6, 7 e 8.

5.3.3 - Diretrizes para Estabelecimento das Manutenções

Com o algoritmo indutivo são obtidas algumas regras para auxiliar no estabelecimento de ações de manutenção. As diretrizes do algoritmo indutivo determinam os grupos de corte de primeira e segunda ordem. Os componentes de primeira ordem têm prioridade na aplicação de manutenções controladas através da detecção de vazamentos, vibrações, ruídos, temperaturas excessivas, desgaste, corrosão, desalinhamentos, desbalanceamentos, etc. Se alguns destes parâmetros estão fora dos limites toleráveis, substituições ou ações de recuperação devem ser consideradas.

Os componentes nos grupos de corte iguais ou superiores a segunda ordem podem ser submetidos a inspeções periódicas para certificação de disponibilidade dos componentes na redundância passiva. Os componentes na redundância ativa podem ter modos de falha cujos

efeitos podem ser estendido para outros componentes do sistema. Neste caso a seleção de manutenções para estes componentes deve ser feita como se fossem de grupos de primeira ordem tal como é abordado no capítulo 6.

5.4 – Representação Computacional

Como foi mencionado nos itens 3.4.2 e 3.4.3 do capítulo 3, os grupos mínimos de corte identificam eventos de falhas dos componentes que induzem a parada do sistema. Portanto os grupos mínimos de corte não precisam mais ser expressos através de conexões de entrada e saída como os componentes no diagrama de fluxo funcional, embora esses atributos tenham servido de base para geração destes grupos. O que realmente importa é o evento representado por esses grupos mínimos de corte.

Uma vez que os grupos mínimos de corte são vistos como eventos, a sua seqüência de colocação no modelo confiabilístico perde relevância. Logo, cada grupo mínimo de corte é armazenado como um fato na memória de trabalho do sistema especialista, sem ter vínculos com entradas e saídas dos componentes. Assim cada grupo pode ser facilmente manipulado quando forem considerados os componentes com efeitos não isolados (abordado no item 6.2 do capítulo 6) ou no cálculo da periodicidade de inspeções para os grupos mínimos de corte com componentes na redundância passiva (a ser visto no item 6.8.2 do capítulo 6).

A figura 5.11 mostra a representação computacional através de fatos na memória de trabalho, onde as entradas e saídas dos grupos mínimos de corte são desconsideradas. O modelo confiabilístico fica representado como uma lista de fatos que podem implicar em parada do sistema.

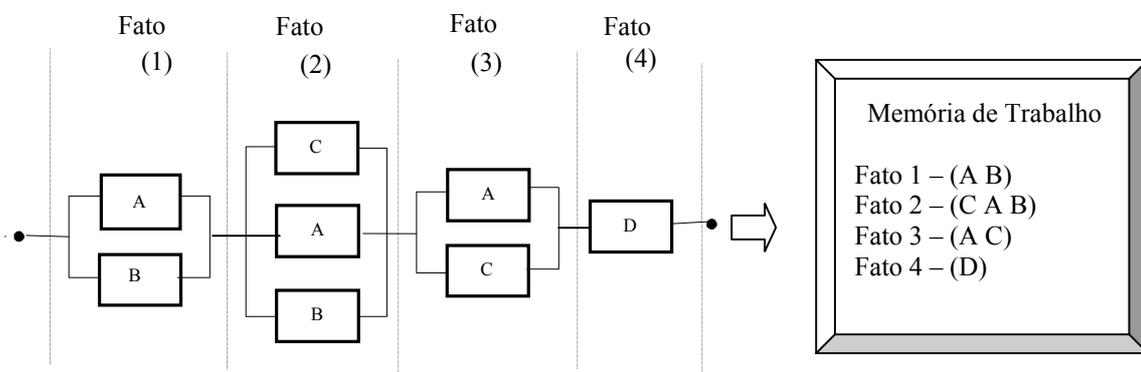


Figura 5.11 – Representação Computacional do modelo confiabilístico do circuito através de uma lista de fatos.

5.5 – Considerações Finais

A sistemática aqui apresentada pode ser estendida para as demais áreas como elétrica e eletrônica, desde que cada bloco do diagrama de fluxo funcional represente um componente ou item. O próprio diagrama de fluxo funcional descrito por Blanchard et al (1995) contribui para a diversidade de sua aplicação por ser um tipo de representação de fácil interpretação para especialistas de diferentes áreas de atuação. Este diagrama foca as dependências e redundâncias de componentes e um sistema, sendo estas características essenciais para um primeiro esboço de um modelo confiabilístico.

Usando-se o método indutivo para modelagem confiabilística e formação de grupos mínimos de corte viabiliza-se a automatização através de um sistema especialista. Através desta automatização é possível a execução de um primeiro módulo para estabelecimento de uma estratégia de manutenção, dando uma indicação para seleção de manutenções controladas , preventivas e corretivas para cada um dos componentes. Essas considerações são vistas no próximo capítulo.

CAPÍTULO 6

SELEÇÃO DE TAREFAS DE MANUTENÇÃO BASEADA NO MODELO CONFIABILÍSTICO E FMEA

6.1 – Introdução

Este capítulo começa descrevendo o processo de modificação do modelo confiabilístico baseado na existência de modos de falha com efeitos não-isolados. Em seguida é descrito como foram identificados os principais efeitos que devem ser controlados para evitar comprometimentos na segurança pessoal, no meio ambiente e na capacidade operacional do sistema. Depois são apresentadas as três categorias de manutenções controladas : baseadas nos efeitos de aviso, nos efeitos primários e em tecnologias de monitoramento. Na sequência, são enfatizadas as considerações para seleção de tarefas de manutenção para grupos de corte de primeira ordem. O mesmo é feito para grupos de corte de segunda ordem, todavia, nesse tipo de configuração é preconizada a existência de falhas seguras e inseguras. Esta distinção é baseada no modo de operação dos componentes, onde um grupo de corte com componentes na ativa e redundância ativa caracterizam falhas seguras, enquanto que grupos de corte de segunda ordem com componentes na ativa e na redundância passiva definem falhas inseguras.

6.2 – Modificação no Modelo Confiabilístico baseado nos Efeitos Não Isolados.

Durante a análise de modos de falha e seus efeitos (FMEA) é possível encontrar componentes cujos modos de falha geram efeitos no sistema e outros tantos modos de falha nos demais componentes. Estes efeitos, com capacidade de gerar outros modos de falha, devem ser controlados ou eliminados. Isso evitaria a ocorrência de um grupo maior de modos de falha com possível comprometimento na segurança, meio ambiente e na operação normal do sistema.

Uma estratégia de controle é monitorar o maior responsável por modos de falha com efeitos na vizinhança. Para tanto, foi elaborado o gráfico da figura 6.1, baseado na análise FMEA realizada neste trabalho de tese.

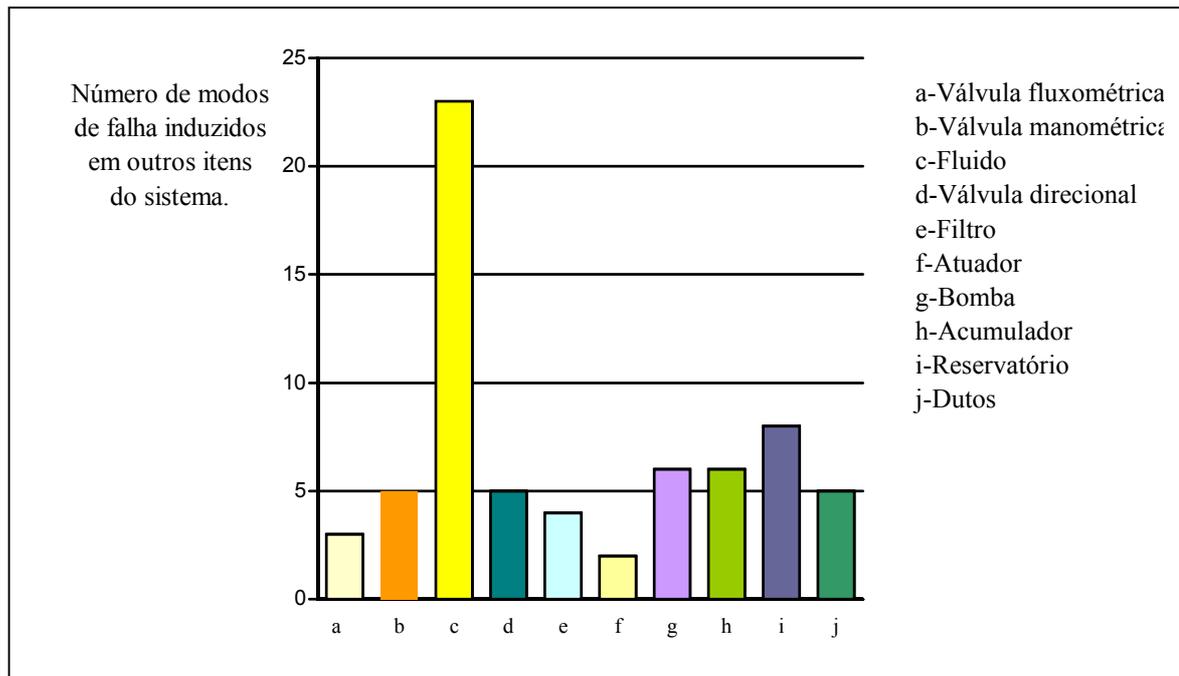


Figura 6.1 – Gráfico da relação entre componentes x número de modos de falha induzidos, para sistemas hidráulicos em geral (Vinadé et al, 2001b).

No gráfico da figura 6.1 ficou claro que o fluido, aqui tratado como um componente, é o que gera a maior quantidade de modos de falha induzidos em outros itens do sistema (Vinadé et al, 2001b). Contudo, a importância dos modos de falha induzidos varia desde paradas de atuadores até fontes de ruídos do sistema. Por outro lado, há componentes com menor potencial de induzir modos de falha na vizinhança, mas quando o fazem podem levar esses itens a quebras, desgastes ou emperramentos. O filtro se enquadra neste segundo caso. Para separar especificamente os modos de falha com estes efeitos nas vizinhanças estabeleceu-se uma definição para efeitos não-isolados neste trabalho de tese.

O efeito não isolado é o que induz emperramento, entupimento ou maior desgaste nas partes móveis dos componentes. Esses efeitos atuam como causas externas de outros modos de falha nos demais componentes do sistema. Assim vão surgindo efeitos indesejáveis em diversos pontos do sistema, tendo como consequência a reincidência de ações corretivas e a dificuldade na focalização da causa raiz.

Um exemplo é mostrado na tabela 6.1, onde uma válvula controladora de pressão tem como modo de falha induzido “Pressão Excessiva”. Este modo de falha pode ser induzido pelo modo de falha “Excesso de partículas no fluido” ou pela “Ruptura do filtro”. Estes dois últimos modos de falha apresentam o efeito: “Emperramento ou entupimento de componentes das partes móveis de componentes”. Note que, não adianta simplesmente evitar pressão

excessiva na válvula controladora de pressão enquanto houver excesso de partículas no fluido e filtros rompidos.

Tabela 6.1 – Exemplo de influência de um efeito não isolado nas causas externas de um modo de falha .

Componentes	Modos de falha	Efeitos	Causas
1 Fluido Hidráulico	1.1) Excesso de partículas	1.1.1) Emperramento ou entupimento de componentes	.
2 Filtro	2.1) Ruptura do filtro	2.1.1) Emperramento ou entupimento de componentes	.
3 Válvula Controladora de Pressão	3.1) Válvula causa Pressão excessiva	3.1.1) Golpes de pressão 3.1.2) Desgaste dos componentes do sistema 3.1.3) Aumento excessivo da temperatura	3.1) Elementos de controle falham ao se moverem devido a: a) Emperramento do carretel (Causa externa: Excesso de partículas no fluido ou ruptura do filtro) b) Dreno ou passagens piloto bloqueadas (Causa externa: Excesso de partículas no fluido ou ruptura do filtro).

Os componentes com modos de falha de efeitos não isolados podem alterar o modelo confiabilístico conforme abordado na seção 3.3 e capítulo 5. Essa alteração é baseada na situação em que um componente em paralelo com outro pode induzir efeitos não isolados como emperramento ou entupimento em vários componentes, inclusive nos componentes em série. Nesses componentes o efeito resultante pode ser a parada e inoperância do sistema. Esta seqüência de ocorrências mostra que um componente em paralelo pode impor uma falha no

sistema como se estivesse em série. Isto é ilustrado na figura 6.2 onde modo de falha de ruptura do filtro induz emperramento no cilindro.

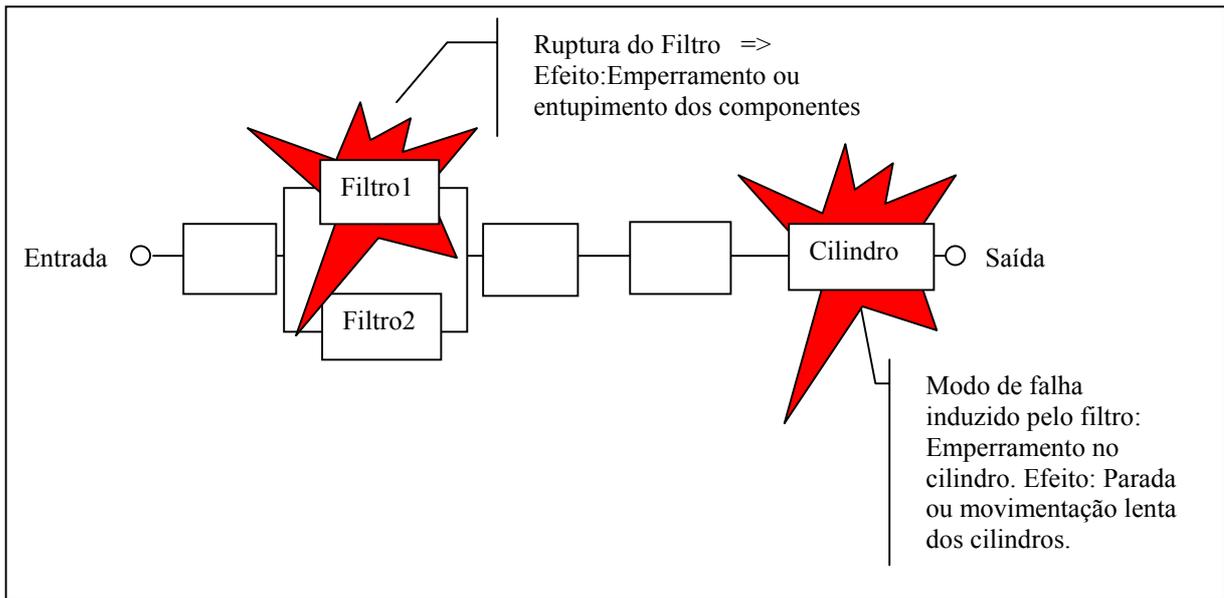


Figura 6.2 - Influência de um efeito não isolado em um componente em série.

Como solução, o protótipo desenvolvido nesta tese coloca em série os componentes que possuem modos de falha com efeitos como do tipo: “Emperramento ou entupimento de componentes” e “Maior desgaste nos componentes”. Essa solução só é aplicada em componentes ativos e os de redundância ativa. Isto está baseado no fato que um componente em funcionamento, contribuindo (ativo) ou não (redundância ativa) com a função principal, pode também induzir modos de falha no sistema nos componentes em série. Como indicado na figura 6.3, os grupos de corte de segunda ou terceira ordem são excluídos quando apresentarem componentes com efeitos não isolados. Depois são substituídos por um grupo de primeira ordem do componente com efeitos não isolados.

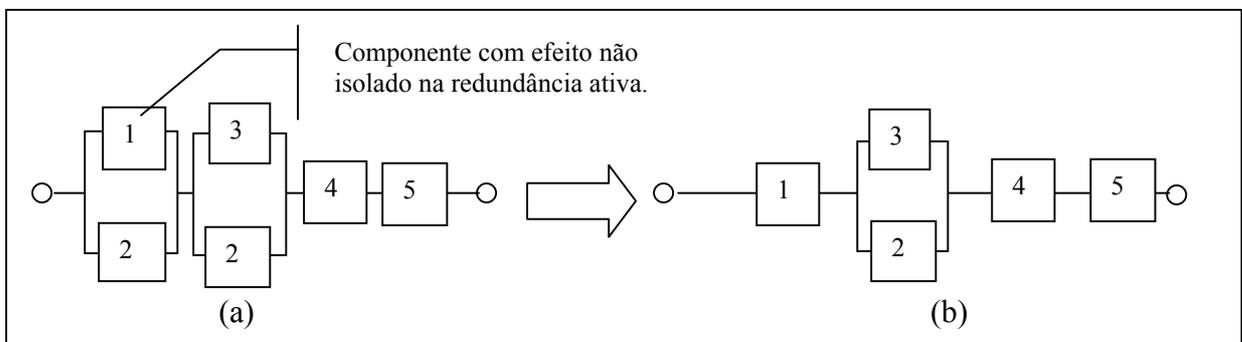


Figura 6.3 - Substituição de grupos de corte de 2ª ordem por grupos de 1ª ordem devido à presença de efeitos não isolados.

Esse ajuste fica de acordo com os conceitos série e paralelo apresentados no capítulo 3. Esses conceitos são bem apropriados para componentes com efeitos isolados cuja substituição ou restauração são suficientes para restabelecer a função do sistema a quem pertencem. Já os componentes com efeitos não isolados induzem falha nos demais componentes estando tanto na ativa como na redundância ativa. Portanto é mais coerente colocar esse componente em série do que deixá-lo em paralelo ativo. A simples substituição ou restauração desses componentes não garante o completo restabelecimento da função sem que sejam verificados os componentes na vizinhança.

Uma outra questão que pode surgir é o porquê adotar componentes em paralelo na redundância ativa se estes podem induzir falhas nos componentes em série seguintes? Por que não deixar todos os componentes redundantes desligados (redundância passiva), contribuindo para longevidade do sistema? Isso deve ser justificado pela excepcionalidade. Por exemplo, nos casos em que a falha repentina gerar danos inadmissíveis para o sistema ou para o cumprimento da função ou problemas de segurança e meio ambiente. No caso de componentes na condição redundância passiva, deve-se estar ciente do risco da falha oculta que não é perceptível sobre si mesma pelo pessoal de operação. Essa falha é comum em componentes desligados ou de emergência que não evidenciam nenhum tipo de efeito anormal, a não ser que sejam colocados em funcionamento. Esta situação é mais grave ainda se o componente com falha oculta for um item reserva para casos de emergência. Este evento é abordado como falha insegura na seção 6.8.2.

6.3 – Classificação dos Efeitos quanto ao Comprometimento da Segurança, Desempenho e Economia.

A figura 6.4 mostra uma coleção de efeitos obtidos a partir do levantamento bibliográfico para elaboração do FMEA. Como pode ser visto, há efeitos cuja origem pode ser de vários modos de falha de diferentes componentes. Caso o projetista queira fazer uma avaliação econômica (investimento, ganho e custo) com tarefas de manutenção em sistemas hidráulicos a ser projetado, é necessário ter em mente qual a função principal do mesmo. Há sistemas cuja qualidade e eficiência no cumprimento da função depende do controle de alguns efeitos. Por exemplo, para garantir o cumprimento da função com qualidade e eficiência de um sistema cujos efeitos de “perda de precisão de posicionamento dos atuadores”, “insuficiência de pressão dos atuadores” e “aumento da temperatura”, mostrados na figura 6.4, são preponderantes, há que atuar no trabalho de prevenção destes três efeitos. Em outras palavras, para controlar estes três efeitos necessita-se investir no controle de 23 modos de falha. Já nos

sistemas com menores exigências de funcionamento, talvez bastasse a prevenção de “Insuficiência de pressão nos atuadores”. Mesmo assim seria necessário controlar no mínimo 9 modos de falha.

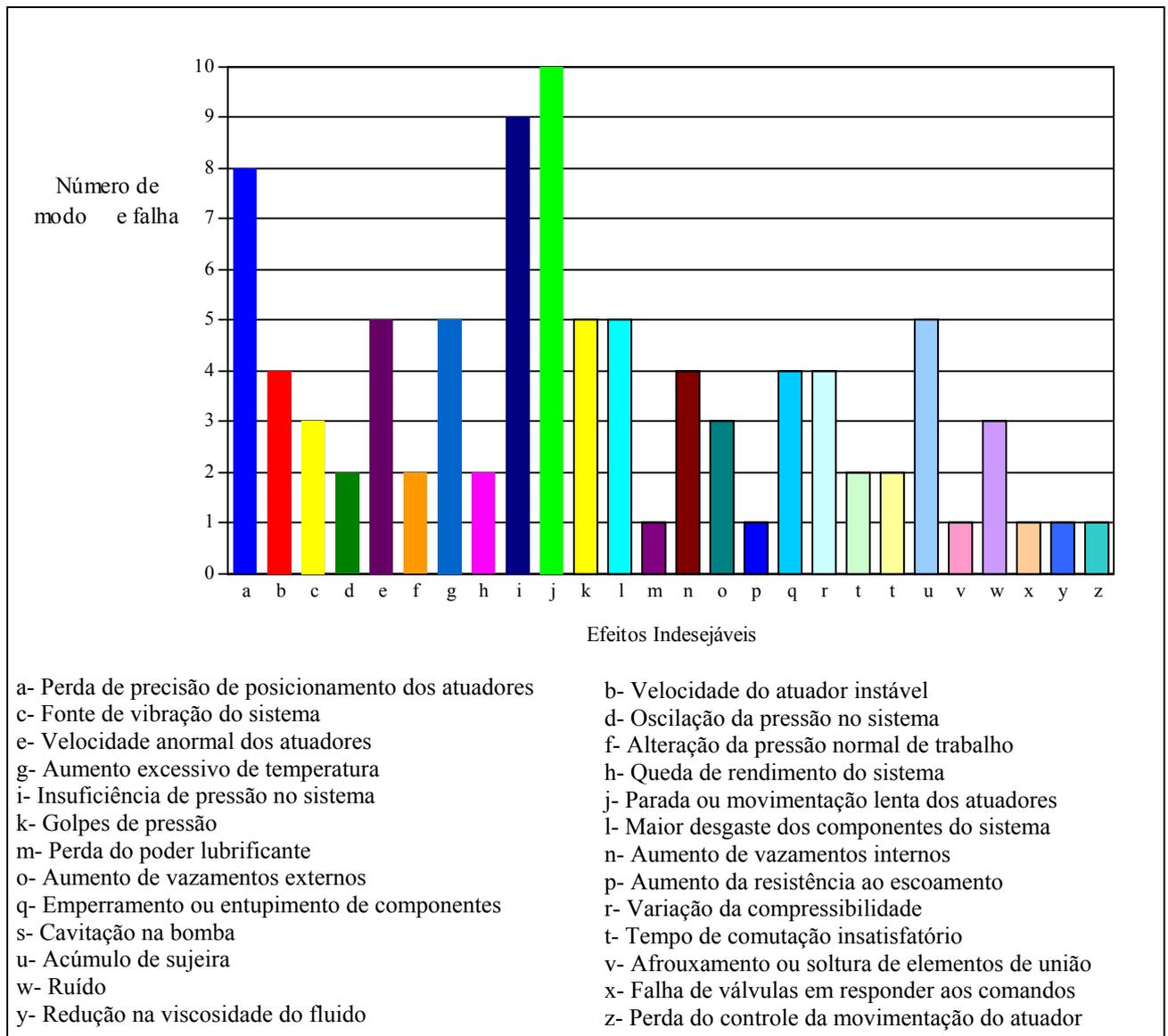


Figura 6.4-Gráfico de pareto entre efeitos e o número de modos de falha a serem controlados (Vinadé et al, 2001b).

Para saber quais efeitos devem ser controlados ou tolerados e então rastrear os modos de falha que os originam, foi feita uma tabela para ajudar a formular o questionário destinado ao especialista. Nesta tabela constam todos os efeitos obtidos pela FMEA, e que de uma certa forma, carecem de uma diferenciação quanto às suas conseqüências na segurança pessoal, no meio ambiente ou no cumprimento da função. Esta diferenciação dos efeitos ajuda na implementação da filosofia da manutenção centrada na confiabilidade. Neste sentido contou-

se com a colaboração de um especialista com experiência na implantação da MCC em reguladores de velocidade (Nunes, 2002a).

A tabela 6.2 foi usada no questionário para o preenchimento da terceira coluna, onde a letra A indica efeitos com comprometimento na segurança pessoal e ambiental. A letra B representa os efeitos que resultam, em comprometimento da função principal do sistema. A letra C corresponde aos efeitos que não impedem a função principal do sistema mas geram conseqüências que se refletem em aumento dos custos ou das perdas (Smith, 1993).

Com os resultados desta tabela é possível implementar a filosofia da manutenção centrada na confiabilidade onde se busca por manutenções mais eficientes para modos de falha do tipo A, e torna possível a ponderação em termos de custo para manutenções destinadas aos modos de falha do tipo B e C. Para obter uma estratégia de manutenção otimizada em termos de custo e garantir o cumprimento da função principal sem afetar a integridade da segurança pessoal e ambiental, serão estudadas três categorias de manutenções controladas baseadas nos efeitos de aviso, nos efeitos primários e os de tecnologias de monitoramento. Cada uma destas categorias tem suas vantagens e desvantagens que devem ser consideradas na hora da alocação.

Tabela 6.2 – Classificação dos efeitos dos modos de falha de componentes hidráulicos.

Tipo de Efeitos	Efeitos	Classificação		
Efeitos na precisão	Perda de exatidão no posicionamento dos servomotores			C
	Tempo de comutação da válv. direcional insatisfatório			C
Efeitos na pressão	Alteração da pressão normal de trabalho	A		
	Oscilação da pressão do sistema			C
	Insuficiência de pressão no sistema		B	
	Varição da compressibilidade			C
	Golpes de pressão	A		
Efeitos na vazão (na velocidade de atuação)	Velocidade do atuador Instável			C
	Aumento da resistência ao escoamento.(Variação na viscosidade)			C
	Parada ou movimentação lenta dos atuadores		B	
	Velocidade anormal dos atuadores			C

Tabela 6.2 – Classificação dos efeitos dos modos de falha de componentes hidráulicos. (continuação)

Tipo de Efeitos	Efeitos	Classificação		
Efeitos no Controle	Emperramento ou entupimento de componentes	A		
	Falha das válvulas em responder aos comandos		B	
	Perda de controle na movimentação do atuador	A		
Aumento de temperatura	Aumento excessivo de temperatura			C
Vazamentos	Aumento de vazamentos internos			C
	Aumento de vazamentos externos	A		
Vibração	Fonte de vibração no sistema hidráulico			C
	Afrouxamento ou soltura de elementos de união			C
Ruído	Ruído			C
Outros	Queda de rendimento do sistema			C
	Maior desgaste dos componentes do sistema			C
	Perda do poder lubrificante do fluido			C
	Cavitação da bomba			C
	Acúmulo de sujeira mais freqüente		B	
	Redução da viscosidade do fluido			C

6.4 – Efeitos de Aviso para Auxiliar na Manutenção Controlada.

Os efeitos de aviso identificados na análise dos modos de falha e seus efeitos (FMEA) se encaixam na categoria de manutenções controladas baseadas nas sensações humanas. Esta categoria tem suas vantagens e desvantagens que foram listadas por Moubray (1997).

As vantagens estão relacionadas com a larga variedade de condições de falha que podem ser observadas pelas sensações humanas, enquanto que uma tecnologia de monitoração cuida de uma só condição. Outra vantagem é o baixo custo, pois pode ser executada por pessoas que normalmente estão próximas ao equipamento. Além do mais, o ser humano tem a capacidade de julgar a severidade da falha e adotar uma ação apropriada ao passo que os dispositivos de monitoramento da condição necessitam de sistemas computacionais inteligentes para processar sinais e tomar decisões.

A desvantagem é o fato que a maioria das falhas eminentes detectadas pelas sensações humanas já se encontra em estágio avançado. Isto implica dizer que o tempo de ocorrência definitiva da falha é muito curto e a ação de restauração ou substituição deve ser imediata. Quando se conta somente com as sensações humanas, as tarefas de verificação da condição do equipamento devem ser mais frequentes para não ser surpreendido com a ocorrência da falha, dado que estas inspeções só detectam a eminência da falha em estágios bem avançados. Outra desvantagem está relacionada com a subjetividade das percepções humanas que mudam de uma pessoa para outra. Esta categoria de manutenção controlada depende muito da experiência do observador. Esta categoria de predição é mais adequada para a gestão de manutenção para a produtividade total, que tem por filosofia integrar o operador ao seu posto de trabalho, não só do ponto de vista da produção mas também a todas as ações necessárias para prolongar os tempos médios entre as falhas (MTBF). Os efeitos aviso também são utilizados para chamar atenção de condição de funcionamento que não está associada ao modo de falha mas sim a uma condição necessária para não permitir que o mesmo ocorra: óleo está no nível mínimo, temperatura está subindo, ruído está aumentando.

Resumindo as principais características desta categoria são: baixo custo e baixa eficiência. Para Hess et al (2001), manutenções deste tipo só são aplicadas em modos de falha tipos A e B quando combinados com uma tecnologia de monitoramento mais eficiente ou quando não houver outra tecnologia viável. Adotando esta recomendação para os propósitos do protótipo desta tese, as manutenções controladas baseadas nas sensações humanas são a última opção para modos de falha do tipo B e a primeira opção para modos de falha do tipo C.

Todavia foram encontrados poucos modos de falha com efeitos de aviso que possam dar suporte a manutenções controladas baseadas nas sensações humanas. Conforme levantamento bibliográfico para elaboração do FMEA (Apêndice C), de um total de 41 modos de falha estabelecidos, somente 15 são identificáveis por efeitos de aviso como: temperatura, vazamento externo, vibração e ruído. Esta constatação pode ser vista na figura 6.5.

Diante do exposto, é possível perceber que os modos de falha com efeitos de aviso não são a maioria. Entretanto, conta-se ainda com uma segunda categoria de manutenções controladas baseadas nos efeitos primários que podem auxiliar no controle de alguns modos de falha.

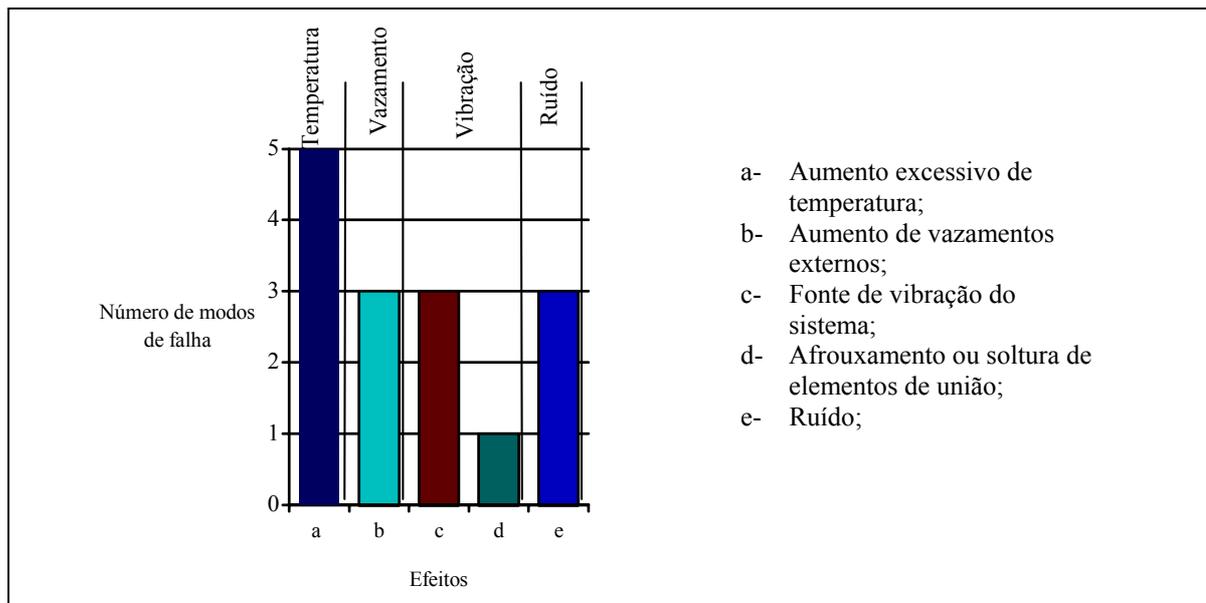


Figura 6.5 –Número de modos de falha e efeitos de aviso possíveis de detecção humana para qualquer sistema hidráulico (Vinadé et al, 2001b).

6.5 – Efeitos Primários para Auxiliar na Manutenção Controlada.

Os modos de falha com efeitos primários são aqueles relacionados diretamente com as variações de pressão e vazão e podem ser observados através de manômetros e medidores de vazão. Segundo Mitchell e Pippinger (1997) estes efeitos normalmente caracterizam o mau funcionamento de um sistema hidráulico, pois estão diretamente ligados com a velocidade e força requerida do sistema. Os efeitos da vazão são detectados por situações indesejáveis relacionados com a velocidade dos atuadores. As anomalias com a pressão são percebidas por efeitos baseados na falta de força de atuação.

Na falta de efeitos de aviso junto de um modo de falha, os efeitos primários podem ser uma opção, uma vez que são bem mais freqüentes, conforme visto na figura 6.6. No entanto, apresentam a desvantagem de requerer algum tipo de instrumento de medição, tal como manômetros e medidores de vazão. Além do mais, a capacidade de detecção de falha eminente é igual ao da manutenção baseada nas sensações humanas, uma vez que refletem diretamente nas principais especificações de projeto do sistema hidráulico.

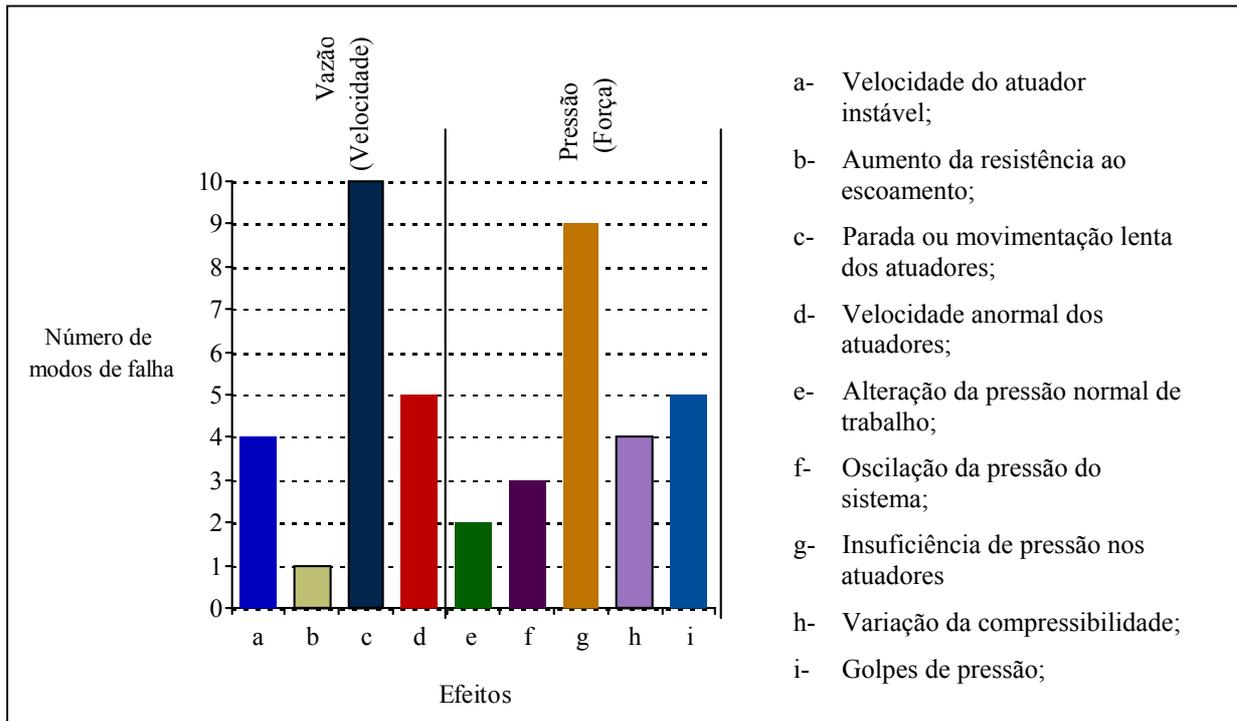


Figura 6.6 – Relação entre número de modos de falha e os respectivos efeitos primários para qualquer sistema hidráulico (Vinadé et al, 2001b).

Todavia, baseando-se nas observações de Moubray (1997) sobre a deterioração natural do desempenho do equipamento, os efeitos primários podem ter uma capacidade maior de detecção se o sistema em questão estiver dimensionado além do desempenho requerido. Isto pode ser visto na figura 6.7 onde são mostrados dois gráficos de dois sistemas idênticos com mesma característica de projeto, porém com desempenhos requeridos diferentes. Supondo que ambos tenham a mesma razão de deterioração de desempenho com o passar do tempo, é possível constatar que a eficiência de monitoração através de efeitos primários como pressão e vazão, está intimamente ligada com a potência requerida em cada aplicação. Um sistema hidráulico terá maior eficiência a partir do monitoramento da pressão e vazão quando levar mais tempo para potência deteriorar-se até o nível de potência requerida. Um sistema hidráulico terá menor eficiência a partir da observação da pressão quando apresentar um tempo muito curto para potência deteriorar-se até o nível de potência requerida. Essa deterioração está relacionada com perdas devido ao desgaste dos componentes, aumento de vazamentos internos e externos, aquecimento excessivo do fluido, etc.

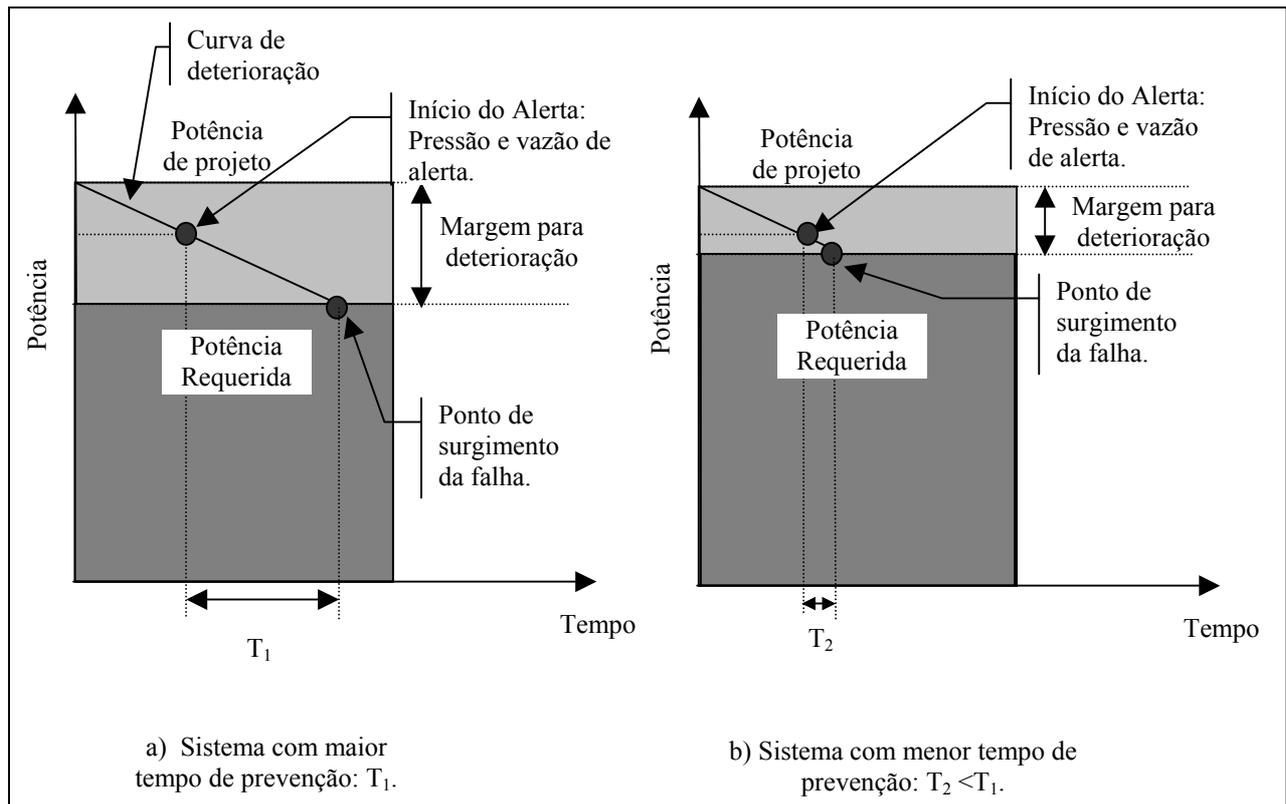


Figura 6.7 - Degradação de dois sistemas idênticos com desempenhos desejados diferentes (Adaptado de Moubray, 1997).

Se a potência requerida para o sistema da figura 6.7(a) for baixa tem-se uma margem de deterioração maior, isto é, uma folga maior para distúrbios de pressão e vazão, e conseqüentemente, consegue-se um intervalo maior para executar ações de prevenção contra a falha eminente. Através da figura 6.7(b), é possível notar que um sistema com uma potência requerida mais próxima da potência de projeto tem uma margem de deterioração menor, resultando num intervalo mais curto para evitar as conseqüências da falha. Desta forma pode-se estipular uma queda de pressão ou vazão que corresponda a um tempo suficiente para execução de uma ação de manutenção.

A partir do conhecimento sobre o sistema pode-se usar efeitos primários em modos de falha do tipo C quando este não gera efeitos de aviso. Mas usar os efeitos primários com a perspectiva de ter pleno controle de um modo de falha é arriscado, pois às vezes é difícil prever a potência requerida de um sistema para todo seu ciclo de vida útil. Os efeitos primários servem mais para localizar o componente falho do que antecipar a falha do mesmo. Contudo, o projetista pode estabelecer algumas escalas. A partir da potência de projeto ele pode fazer algumas inferências que indicam: se a potência requerida for X executa-se um determinado conjunto de manutenções, se a potência requerida for Y executa-se um outro

conjunto de manutenções e assim por diante. Porém é necessário o conhecimento do grau de degradação da potência em função do tempo, que nem sempre está disponível.

No caso de haver modos de falha do tipo A e B com efeitos primários sem uma tecnologia de monitoração mais eficiente e econômica é preferível recomendar manutenções preventivas. Esta é a solução sugerida por Hess et al (2001) para manutenções com baixa eficiência e com algum custo.

6.6 – Tecnologias de Monitoramento.

As manutenções controladas mais sensíveis são pertencentes à categoria de tecnologias de monitoramento, significa dizer que é necessário ter causa e condição da causa bem definidos para poder perceber a manifestação do modo de falha (ou modos) e acompanhar ou interromper seu desenvolvimento. Essas manutenções usam algum tipo de equipamento para monitorar algum tipo de condição do sistema (Moubray, 1997).

Existem centenas de tecnologias de monitoramento para uma larga variedade de condições a serem monitoradas. Algumas são mais adequadas para sistemas hidráulicos e são classificadas em três tipos: técnicas de análise de óleo, técnicas de análise de vibração e técnicas de análise térmica. Cada tipo é destinado a um grupo de componentes hidráulicos e a um grupo de condições monitoráveis.

As técnicas de análise de óleo são as mais abrangentes em número de componentes e de condições monitoráveis. Através destas técnicas torna-se possível determinar o grau de desgaste dos componentes, a quantidade de partículas contaminantes e também a condição do óleo com relação ao esgotamento de aditivos químicos como antioxidantes, antiespumantes e antidesgastantes. As condições monitoráveis como desgaste e quantidade de partículas são detectadas com bastante antecedência pelas análises de óleos quando comparadas com análises térmicas e de vibração.

As análises de vibração são aplicáveis em componentes com elementos rotativos tais como bombas e motores hidráulicos. As condições monitoradas com maior eficiência são desalinhamento e desbalanceamentos, embora a análise de vibração possa ser usada para detectar desgastes e quebras.

As análises térmicas são aplicáveis em todos os componentes hidráulicos, no entanto, só monitoram com eficiência operações excessivas que geram aumento de temperatura de forma imediata. As demais condições monitoráveis são detectadas em estágios bem avançados de degradação.

Diante de uma variedade de tecnologias de monitoramento e condições a serem monitoradas, Troyer (1999) estabeleceu uma forma de comparar a eficiência de cada grupo de técnicas de monitoramento na detecção de algumas condições monitoráveis em sistemas fluido mecânicos. Essas comparações são baseadas na curva PF do processo de falha da figura 6.8 apresentada por Moubray (1997).

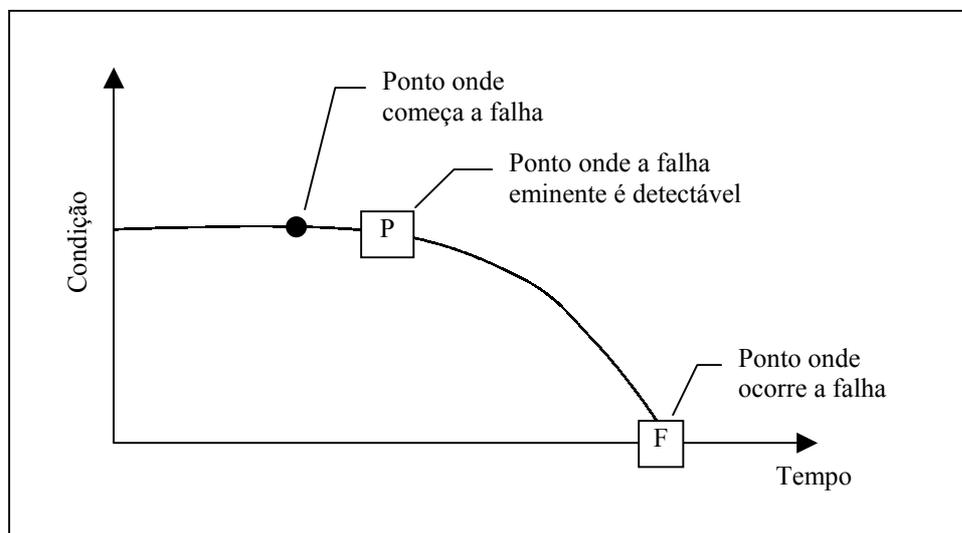


Figura 6.8 - Curva PF (Moubray, 1997).

Na curva PF, o ponto P corresponde ao tempo em que a falha eminente é detectada e o ponto F se refere ao tempo onde a falha em questão ocorre. A partir desta curva, a técnica é dita eficiente em relação as demais, se apresentar o intervalo PF mais longo. Com intervalo PF mais longo é possível ter boas decisões e planejar melhor as ações de substituição ou restauração. Tendo em mente este tipo de comparação, Troyer (1999) implementou-a nas análises térmicas, nas análises de óleo e de vibrações. O resultado é apresentado na tabela 6.3.

Tabela 6.3 - Eficiência das técnicas de monitoração conforme condição a ser monitorada (Troyer, 1999).

Condições Monitoradas	Técnicas de análise de óleo	Técnicas de Análise de Vibração	Técnicas de Análise Térmica
Contaminação do óleo	Excelente	Péssimo	Péssimo
Óleo Inadequado	Excelente	Péssimo	Péssimo
Óleo degradado	Excelente	Péssimo	Péssimo
Desgaste	Excelente	Bom	Regular
Fadiga Superficial	Excelente	Bom	Bom
Desalinhamento	Regular	Excelente	Regular
Desbalanceamento	Regular	Excelente	Regular
Quebra de dente de engrenagem	Péssimo	Excelente	Péssimo
Ressonância Estrutural	Péssimo	Excelente	Péssimo
Cavitação	Bom	Péssimo	Regular
Operação Excessiva	Regular	Regular	Excelente

A diferença de custo entre os grupos de análise é bem discernível. As análises de óleo hidráulico normalmente consistem de um pacote de testes como espectroscopia, análise de viscosidade, contagem de partículas, testes de acidez e de alcalinidade. Os preços variam entre US\$ 15.00 a US\$ 500.00. O grupo de análises de vibrações tem seus custos atrelados ao preço dos equipamentos portáteis cujo valor está na faixa de US\$ 25,000.00 a US\$ 32,000.00, sem mencionar a exigência de técnicos e engenheiros experientes e bem treinados. A análise térmica ou termográfica é a mais cara de todas, por exigir equipamentos com valor na faixa dos cem mil dólares, no entanto não requer um treinamento tão especializado quanto as análises de vibração. (Nasa, 2001).

6.7 – Seleção de Manutenções para Grupos de Corte de Primeira Ordem e Regras para Seleção da Tecnologia de Monitoramento

Grupos de corte de primeira ordem são os itens ativos do sistema. O processo de alocação de manutenções tem como informações iniciais o modelo confiabilístico resultante do algoritmo indutivo e os dados sobre os modos de falha dos componentes, os efeitos e suas causas. O modelo confiabilístico, além de evidenciar grupos de corte de primeira ordem, também tem o propósito de viabilizar a identificação de componentes com falhas ocultas os quais são normalmente caracterizados por pertencerem a grupos de corte de segunda ou terceira ordem e por estarem na reserva passiva (ou *standby*). A atribuição de manutenções a estes componentes merecem um outro tipo de abordagem e serão discutidos separadamente na seção 6.8.2.

Já os modos de falha dos componentes de grupos de primeira ordem são submetidos ao diagrama da figura 3.16, onde são observados os efeitos de aviso, os efeitos primários e as causas internas para alocação de manutenções.

As causas internas são usadas para estabelecimento de tecnologias de monitoramento. As condições monitoradas coincidem com as causas internas dos modos de falha dos componentes hidráulicos e são normalmente identificados como desgaste, fadiga, quebra, desbalanceamento e desalinhamento entre outros problemas nos itens internos. O acompanhamento de uma causa interna pode oferecer uma boa antecipação de falha eminente quando monitorado por uma tecnologia aplicável e com excelente eficiência de detecção.

No contexto desta tese, tecnologia é dita aplicável quando for destinada ao componente em questão e quando tiver a capacidade de monitorar a causa interna do modo de falha do mesmo. A eficiência da tecnologia de monitoração é baseada nas comparações entre intervalos PF abordados por Troyer (1999) na tabela 6.2.

No protótipo desta tese, as tecnologias de monitoramento são analisadas para implementação nos modos de falha do tipo A, B e C. Os efeitos primários e efeitos de aviso são aplicados nos modos de falha tipo B e C e não são recomendados para os do tipo A, devido à baixa eficiência destas manutenções.

a) Seleção de manutenções para modos de falha tipo A

Para o modo de falha tipo A, as tecnologias mais eficientes devem ser priorizadas. Caso não haja alguma tecnologia aplicável e eficiente o protótipo do sistema especialista que está sendo gerado recomenda manutenção preventiva (Hess et al, 2001). Havendo mais de uma opção de tecnologia aplicável e eficiente, a selecionada será a que apresentar menor custo.

b) Seleção de manutenções para modos de falha tipo B

Na busca por tecnologias de monitoramento para modos de falha tipo B são consideradas não só as mais eficientes, mas também as de média e baixa eficiência. Mas a implementação de uma tecnologia para o modo de falha tipo B está atrelada ao seu custo ou penalidades contratuais. Se houver uma tecnologia aplicável e de alta eficiência, com custo abaixo da consequência do modo de falha, esta será selecionada. Não havendo essas tecnologias, resta buscar por outra com custo mais apropriado.

No âmbito da produção de energia elétrica, para onde se destinam os sistemas hidráulicos reguladores de velocidade abordados nesta tese, as consequências podem ser as penalidades do mercado atacadista de energia elétrica estabelecidas pela resolução n°. 161 da ANEEL (2002a) (Resolução da Agência Nacional de Energia Elétrica, Resolução n°. 161, artigo 7, 20 de abril de 2001), cujo valor mínimo da multa é de cem mil reais mais o pagamento da energia que não foi produzida. Além dessas penalidades, deve-se considerar a resolução n° 318 da ANEEL (2002b), onde dita que *”a inexecução parcial ou total de obrigações legais e contratuais, caracterizadas entre outras, por violação dos padrões de qualidade dos serviços, atraso da entrada em operação das instalações está sujeita a suspensão temporária de participação de licitações para obtenção de novas concessões, permissões ou autorizações, bem como impedimento de contratos com ANEEL e de recebimento de autorização para serviços e instalação de energia elétrica”* (Resolução ANEEL n°. 318, artigo 13, 6 de outubro de 1998). Estas penalidades refletem em consequências maiores do que o custo de indisponibilidade do regulador de velocidade, ou melhor, do que tenha deixado de produzir.

Diante de tais considerações, quase todas as tecnologias eficientes podem ser consideradas, restando ao protótipo selecionar apenas as aplicáveis, e depois, sugerir a de menor custo. Caso exista modo de falha sem uma tecnologia aplicável e eficiente, o protótipo recomenda manutenção preventiva sem buscar por tecnologias aplicáveis de menor eficiência. Isto porque através da manutenção preventiva pode-se calcular um intervalo para restauração ou substituição diante de uma probabilidade de falha admissível (ver Apêndice B).

c) Seleção de manutenções para modos de falha tipo C

Os modos de falha do tipo C também podem receber tecnologias de monitoração eficientes, mas o custo tem de ser o mesmo ou abaixo das opções de manutenções controladas baseadas nos efeitos de aviso e efeitos primários. Normalmente as manutenções de efeitos de aviso preponderam por apresentar um custo quase nulo, além de estarem quase sempre presentes em modos de falha tipo C, conforme visto na FMEA.

6.8 – Seleção de Manutenções para Grupos de Corte de Segunda Ordem

Os grupos de corte de segunda ordem devem ser analisados para verificar se apresentam um componente de função oculta ou evidente, antes de se definir qual a manutenção a ser implementada.

O componente com função evidente é aquele cuja falha apresenta algum tipo de alerta tal como alarmes, luzes, vibração, aquecimento excessivo, vazamento, ruído ou uma combinação destes efeitos. Outros tipos de avisos podem ser percebidos pelas modificações no sistema resultante ou no desempenho. De uma certa forma, as falhas evidentes são as que podem ser identificadas quando ocorrem. Segundo Moubray (1997) a função evidente é definida como:

“aquela cuja falha sobre si mesma começará ser eventualmente e inevitavelmente evidente para o pessoal de operação, em circunstâncias normais.”

Contudo também ocorrem falhas que não são percebidas e continuam presentes até que ocorra uma outra falha. Isto pode ser exemplificado em um sistema com duas bombas: uma bomba B funcionando plenamente e uma bomba C no estado de redundância passiva que é acionada quando a bomba B falhar. Há situações onde a bomba C fica em estado de falha sem

que alguém perceba. A falha só é percebida quando a bomba B falhar. A falha na bomba C caracteriza uma função oculta definida como (Moubray, 1997):

“aquela cuja falha sobre si mesma não será evidente para o pessoal de operação, em circunstâncias normais.”

O modelo confiabilístico resultante do método indutivo facilita a identificação de funções ocultas pela distinção entre componentes de primeira e de segunda ordem e pelo modo de operação. Havendo um componente em um grupo de segunda ordem e estando na situação de redundância passiva, fica caracterizado um componente de função oculta.

As definições de funções ocultas e evidentes são importantes para o estabelecimento de dois tipos de falhas oriundas dos grupos de corte de segunda ordem: falhas seguras e falhas inseguras de dispositivos de proteção.

Os dispositivos de substituição, no contexto da tese, são os componentes redundantes em redundância passiva ou redundância ativa que contribuem com a função principal quando o componente monitorado falha (componente ativo). Exemplo de componente monitorado mencionado anteriormente é a bomba B, funcionando plenamente para garantir a vazão ao sistema. Exemplo de componente substituído é a bomba C que pode estar funcionando com a vazão desviada para o tanque ou fica desligada para ser acionada quando o componente monitorado falhar (bomba B).

6.8.1 – Seleção de Manutenções para Grupos de Corte de Segunda Ordem com Falha Segura.

Baseado nas observações de Moubray (1997), um componente substituído falha, de forma segura, quando sua falha é evidente para o pessoal de operação, sob circunstâncias normais. Os grupos de corte de segunda ordem constituído por um componente ativo e outro na redundância ativa se enquadram a esse contexto. Os componentes na redundância ativa podem ter efeitos de aviso e efeitos primários além de apresentarem condições mensuráveis por tecnologias de monitoramento.

Considerando que os componentes na redundância ativa falham da mesma forma que os componentes ativos, é possível prever três eventos diferentes: o componente ativo monitorado e o componente redundante ativo não falham; o componente monitorado falha antes do

componente redundante ativo; o componente redundante ativo falha antes do componente monitorado que desempenha a função.

A primeira possibilidade caracteriza o funcionamento normal do sistema, ou seja, onde “o componente monitorado e o componente redundante ativo não falham”.

A segunda possibilidade “componente monitorado falha antes do componente redundante ativo” é uma situação que deve ser prevista pelo projetista a fim de eliminar ou reduzir e a consequência da falha.

A terceira situação, “componente redundante ativo falha antes do componente monitorado”, é uma situação indesejável, mas não é considerada como uma falha insegura se a falha do componente redundante ativo é evidente. O componente redundante ativo estaria funcionando, podendo gerar ruído, vibração, aumento de temperatura e demais efeitos que são usados para definir a sua condição e prontidão para execução de sua função. Diante dessas considerações, o protótipo seleciona manutenções para ambos componentes, tal como, se estivessem num grupo de corte de primeira ordem.

6.8.2 – Seleção de Manutenções para Grupos de Corte de Segunda Ordem com Falha Insegura.

Falha insegura está relacionada com a falta de efeitos primários, efeitos de aviso e tecnologias de monitoramento para indicar a eminência ou estado de falha do componente. Esse caso ocorre no componente na redundância passiva que pode estar em falha quando solicitado a operar, caracterizando uma falha oculta. Isso pode ocorrer não só no componente substituto mas também com os demais componentes hidráulicos auxiliares que se encontram na mesma linha de pressão e no mesmo modo de operação (redundância passiva). Os componentes elétrico-eletrônicos como sensores (excluindo sensores integrantes do sistema, como sensores de posição) e comutadores, usados para supervisão e emergência, também se enquadram nesta situação pelo fato de terem sua falha descoberta somente quando são requisitados a operar. Resumindo, são componentes cuja função não é evidente, em circunstâncias normais de operação.

Esta situação gera quatro possibilidades de falhas, sendo que as duas primeiras são as mesmas apresentadas nos grupos de corte de segunda ordem com falha segura: o componente redundante e o componente monitorado não falham; componente monitorado falha antes do componente redundante. Esses dois casos são previstos no projeto e são situações controladas e desejadas.

A terceira possibilidade é a falha do componente redundante antes do componente monitorado. Este evento não é o mesmo que ocorre quando a falha é segura. A diferença é a falha oculta caracterizada no componente na redundância passiva. Este caso não representa parada do sistema, o problema é a falha não percebida no componente redundante. Isto pode ser exemplificado quando a bomba principal (componente monitorado por sensor/comutador) funciona plenamente e a bomba reserva (componente na redundância passiva) está desligada, se estiver em falha gerará problemas para a disponibilidade já que esta falha só é percebida quando for acionada.

A quarta possibilidade é a falha do componente ativo e ao mesmo tempo o componente na redundância passiva está em falha. Segundo Moubray (1997), esta ocorrência é conhecida como falha múltipla que é identificada pela falha oculta do componente na redundância passiva. Isso é grave, pois ninguém fica ciente e nem são tomadas ações corretivas no componente redundante enquanto o componente monitorado trabalha.

A quarta possibilidade pode ter conseqüências muito severas e precisa ser evitada por uma ação preventiva. Os componentes com modos de falha tipo A ou tipo B, não podem estar sujeitas a falha múltipla, uma vez que já foi investido num componente de proteção. Para garantir o controle deste tipo de falha Moubray (1997) sugere uma forma de calcular os intervalos de inspeção sob um risco admissível.

O cálculo deste intervalo é baseado na ocorrência concomitante de eventos independentes, onde a ocorrência de cada evento não é influenciada pela probabilidade de ocorrência de outro (Billiton & Allan, 1983). Estes eventos são a probabilidade de falha do componente monitorado e a indisponibilidade do componente redundante. Conforme Moubray (citado por Nunes, 2001): a probabilidade de uma falha múltipla ocorrer em qualquer período de tempo é dada pela probabilidade com que componente monitorado possa falhar, enquanto o componente redundante estiver em estado de falha neste mesmo período, tal como é visto na equação 6.1.

$$\text{Probabilidade de Falha Múltipla} = \text{Probabilidade de Falha do componente monitorado} \times \text{Indisponibilidade média do componente redundante} \quad \text{Equação 6.1}$$

Moubray (1997) recomenda este cálculo para definir a indisponibilidade média do componente de proteção, sendo que são dadas a probabilidade de falha do componente monitorado e a probabilidade admissível para ocorrência de falha múltipla.

A probabilidade admissível de falha múltipla pode ser estabelecida com base no gráfico da tolerabilidade de risco econômico fornecido por Moubray (1997). Neste gráfico, mostrado na figura 6.8, o eixo y representa a probabilidade tolerável de um evento em qualquer ano, cujo limite máximo é uma falha por ano e limite mínimo é de uma falha por dez milhões de anos. O eixo x corresponde aos custos das conseqüências da falha, cuja faixa é de 0 a US\$ 10 milhões. A reta relaciona o custo com a probabilidade admissível de ocorrência de falha múltipla.

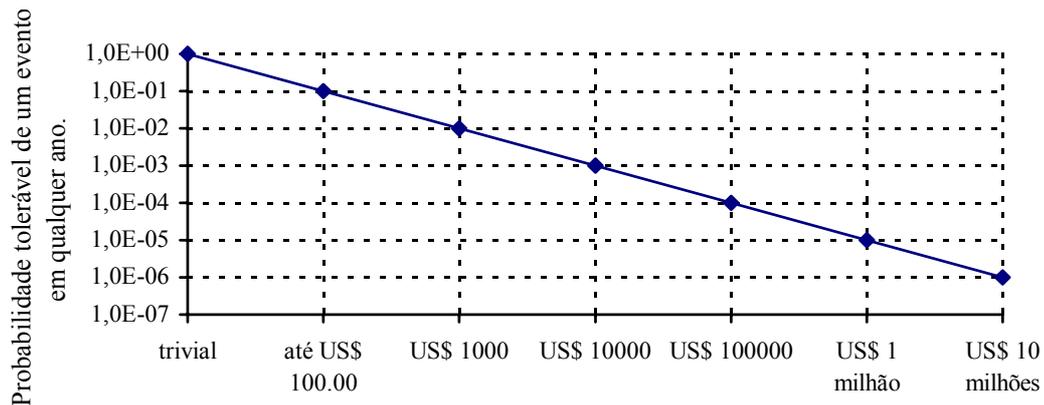


Figura 6.9 - Tolerabilidade de risco econômico (Moubray, 1997)

A probabilidade de falha do componente monitorado é baseada no tempo médio entre falhas (MTBF). Estabelecendo essa probabilidade como inverso do MTBF do componente monitorado, assume-se ser um evento randômico cuja probabilidade é a mesma durante todo ciclo de vida útil. Diante dessas considerações e fazendo as devidas modificações na equação 6.1 obtem-se:

$$U_{\text{redundante}} = \text{MTBF}_{\text{monitorado}} \times P_{\text{falha múltipla}} \quad \text{Equação 6.2}$$

Onde: $\text{MTBF}_{\text{monitorado}}$ – Tempo médio entre falhas do componente monitorado (horas);

$P_{\text{falha múltipla}}$ – Probabilidade admissível de falha múltipla (nº de falhas/horas);

$U_{\text{redundante}}$ – Indisponibilidade média do componente redundante (%);

Para determinar o intervalo de inspeções, Moubray (1997) tem por base o problema implícito no seguinte exemplo: “Tendo-se um intervalo de um ano entre as inspeções, há o risco da falha ocorrer um dia depois ou um dia antes da inspeção, ou em qualquer momento do intervalo. Isto é, o componente pode ficar um intervalo inteiro em estado de falha, se a falha ocorrer logo depois da inspeção, ou ficar um intervalo inteiro em boas condições e

falhar um dia antes da inspeção”. Não tendo informações suficientes do momento exato da falha, Moubray (1997) estimou que o componente de proteção pode ficar metade do intervalo em estado de falha. Tendo por base que a indisponibilidade é a razão entre o tempo de máquina parada sobre o tempo em funcionamento, Moubray apresenta a equação 6.3, usando a metade do intervalo entre inspeções e a MTBF do componente redundante:

$$U_{\text{redundante}} = 0,5 \times \text{FFI} / \text{MTBF}_{\text{redundante}} \quad \text{Equação 6.3}$$

Onde: $\text{MTBF}_{\text{redundante}}$ – Tempo médio entre falhas do componente redundante (horas);

FFI – Intervalo entre inspeções (horas);

$U_{\text{redundante}}$ – Indisponibilidade média do componente redundante (%);

Isolando-se a variável FFI, se obtém a equação usada para definir o intervalo de inspeções necessário para garantir uma probabilidade de falha múltipla tolerável. Com o resultado da indisponibilidade do componente redundante e rearranjando a equação 6.3, chega-se a seguinte equação:

$$\text{FFI} = 2 \times U_{\text{redundante}} \times \text{MTBF}_{\text{redundante}} \quad \text{Equação 6.4}$$

No protótipo resultante desta tese a equação 6.4 é utilizada para estabelecer o intervalo de inspeções para componente de proteção na redundância passiva. Note que, quanto menor for a probabilidade de falha múltipla tolerável, mais frequentes serão as inspeções.

Os cálculos mostrados acima são para um só grupo de corte. Mas o usuário escolhe um modo de operação para uma linha inteira de componentes. Isso gera vários grupos de cortes de segunda ordem cujos componentes podem ser determinados a estar na redundância passiva, conforme vontade do usuário. Também é inadmissível calcular um intervalo de inspeção para cada grupo de corte e depois recomendar todos esses intervalos de inspeções.

Diante deste problema, o protótipo adota uma regra que seleciona o grupo de corte que tiver componentes com MTBFs mais curtos, cuja probabilidade de falha múltipla é maior. Assim uma linha inteira de componentes na redundância passiva pode ser inspecionada com um intervalo baseado no grupo de corte com componentes com maior probabilidade de falha. Isto evita em calcular o intervalo para todos os grupos de corte além de otimizar a inspeção, pois aumenta as chances de detectar falhas não só no componente com maior probabilidade,

mas também nos demais com probabilidade de falha menor (que são suficientemente inspecionados com intervalos maiores).

6.9 – Considerações Finais.

Neste capítulo procurou-se tirar o máximo proveito da análise dos modos de falha e seus efeitos (FMEA), visando estabelecer tarefas de manutenção. Essa análise não só contribuiu para identificação de diferentes modos de falha, mas também evidenciou os efeitos e causas a serem monitorados por manutenções controladas .

Uma outra característica da sistemática apresentada neste capítulo é o enfoque na implementação de manutenções controladas . Isto acontece por que foi encontrada uma lacuna muito maior em selecionar uma manutenção controlada eficiente e econômica diante de várias opções (conforme abordado por Hess et al, 2001), do que simplesmente estabelecer ou calcular periodicidade de manutenções preventivas.

O protótipo, que será apresentado nos capítulos seguintes, se propõe a acompanhar algumas tendências como o manifestado por Fitch (2001), que diz ser inevitável no futuro a existência de máquinas auto-diaagnosticáveis por sistemas especialistas, embarcados e combinados com sensores e transdutores. O protótipo será desenvolvido para ser um sistema especialista que deve funcionar como uma ferramenta de auxílio ao projeto, onde seu objetivo é determinar quais os efeitos e causas internas devem ser monitorados por sensores e transdutores, a fim de evitar o aparecimento de modos de falha impeditores da função ou geradores de problemas de segurança ou meio ambiente, eliminar as causas mais prováveis destes modos de falha, evitar que os efeitos se propaguem para itens vizinhos e recomendar, em função das características do sistema hidráulico a estratégia de manutenção mais adequada. Observa-se contudo que a proposta do protótipo priorizou a estratégia de manutenção centrada na confiabilidade.

CAPÍTULO 7

DESCRIÇÃO DO PROTÓTIPO

7.1 – Introdução

Passadas as etapas de representação e aquisição do conhecimento, o próximo passo é a elaboração do protótipo. Isto envolve a codificação das classes e regras para formação da base de conhecimento, seguindo um modelo de desenvolvimento.

Tal como abordado no capítulo 4, o processo de desenvolvimento do protótipo tem por base o modelo incremental. Giatarrano e Riley (1994) citam como vantagem deste modelo a validação de cada incremento funcional do protótipo em estágios, pois agindo desta forma é muito menos custoso do que modificar um sistema inteiro com todas as funcionalidades. Tendo em mente esta vantagem, o protótipo desta tese tem a capacidade de sugerir tarefas de manutenções para apenas cinco sistemas diferentes: quatro sistemas hidráulicos reguladores de velocidade de grande porte e um de pequeno porte. A adoção deste modelo também é justificado devido a grande quantidade de informações a serem gerenciadas, que vão dos componentes usados nos sistemas até as tarefas de manutenções aplicáveis para cada modo de falha.

Este fluxo de informações é detalhado nos próximos itens, onde é descrita a base de conhecimento que constitui a primeira versão do protótipo. Depois é feita a descrição da interface do protótipo que é auxiliada por arquivos HTML.

7.2 – Base do Conhecimento

As técnicas de representação do conhecimento apresentadas no capítulo 4 têm por objetivo estruturar o conhecimento para ser facilmente codificado numa linguagem computacional. Contudo, só esta representação não é suficiente para compreensão geral do sistema especialista. Falta indicar quando e quais as informações a serem fornecidas pelo usuário, bem como quais os dados deverão ser oferecidos por uma base de dados. Esta visão é dada pela figura 7.1 através de uma estrutura funcional.

Na figura 7.1, o sistema inicia com a solicitação ao usuário para indicar um circuito de atuação e um circuito de bombeamento diante de algumas opções, ilustradas em arquivos HTML, com os respectivos diagramas de fluxo funcional contidos em uma base de dados.

Uma vez definido o sistema através de um circuito de atuação e um circuito de bombeamento, será pedido ao usuário o modo de operação dos componentes redundantes ou duplicados nos circuitos selecionados. Os modos de operação poderão ser três: na ativa (funcionando e contribuindo com a função principal do sistema), na redundância ativa (funcionando mas sem contribuir para função principal) e na redundância passiva (*standby*- componente desligado que é acionado quando ocorre uma falha). Estas indicações serão os fatos iniciais da memória de trabalho a serem combinadas com a base de conhecimento.

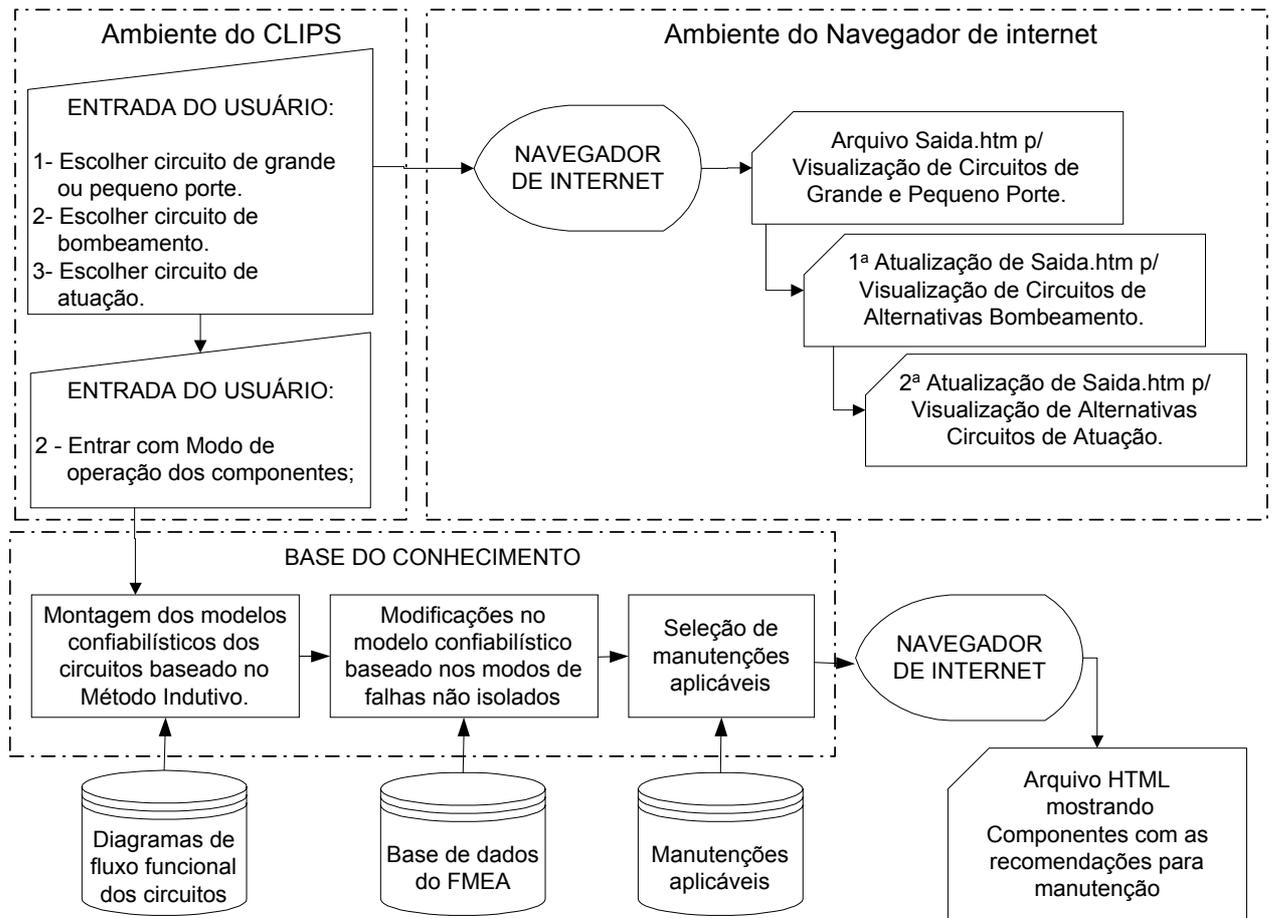


Figura 7.1 – Estrutura funcional do protótipo de sistema especialista para estabelecimento de estratégia de manutenção.

A base de conhecimento tem as regras obtidas pelo processo de aquisição do conhecimento para o qual pode-se optar por um método específico diante de outras alternativas. Como visto no capítulo 5, optou-se pelo método indutivo integrando a modelagem confiabilística e o método do grupo mínimo de corte como um primeiro módulo para estabelecimento da estratégia de manutenção.

Conforme as abordagens feitas no item 6.2 do capítulo 6, o módulo seguinte, modificação do modelo confiabilístico baseados nos modos de falha não isolados, é composto por regras adicionais que modificam o modelo confiabilístico conforme o efeito do modo de falha nos demais componentes.

Uma vez que os modos de falha já são rotulados na base de dados com o grau de seu comprometimento na segurança pessoal, ambiental e no desempenho da função principal, o terceiro módulo conta com regras para seleção de manutenções baseadas na modelagem confiabilística resultante e nas diretrizes de seleção apresentadas no capítulo 6, que foram baseadas nas considerações de Hess et al (2001), Troyer(1999), Mobray (1997) e Smith (1993).

Nesta seção são descritas as principais classes que estruturam o conhecimento representado no protótipo. Essas classes são Sistemas, Circuitos, Componentes, Falhas e Manutenções e vão sendo utilizadas para estruturar informações no decorrer dos três módulos do protótipo. O módulo de modelagem confiabilística faz uso intensivo das três primeiras classes. O segundo módulo tem por base a classe Falha para fazer as modificações no modelo confiabilístico resultante do primeiro módulo. O módulo seguinte, manutenções aplicáveis, aloca ações controladas, preventivas e corretivas para os modos de falha dos componentes na ativa e redundância ativa, tendo como fonte o conhecimento estruturado na classe Manutenções. Os componentes na redundância passiva são tratados de forma diferenciada no módulo de manutenções aplicáveis pois fazem uso dos valores das taxas de falhas definidas na classe Componentes e das informações sobre o modelo confiabilístico para determinação dos intervalos entre as inspeções.

Nos próximos subitens são apresentados e explicados os objetivos de cada classe bem como seus respectivos atributos que contribuem para alocação de manutenções. Em seguida é descrito o processo de ativação das regras do protótipo.

7.2.1 – Classe: Sistemas

Objetivo: A classe Sistemas tem o propósito de montar um sistema a partir dos circuitos selecionados pelo usuário. Essa montagem é uma adaptação da representação (sistema, circuitos e componentes) desenvolvida por Silva (1998). Para cumprir essa função, esta classe faz uso de quatro atributos:

- Sistema_ID: este atributo especifica um objeto da classe Sistemas. Na base de dados de diagramas de fluxo funcional constam cinco objetos de sistemas, que

são oriundos das combinações entre circuitos de bombeamento e atuação. Dois circuitos de bombeamento e dois de atuação, ambos de grande porte, possibilitam a geração de quatro sistemas diferentes. Nesta mesma base de conhecimento, também há dois circuitos de pequeno porte, um de atuação e outro de bombeamento, possibilitando a formação de um só sistema de pequeno porte.

- **CircuitoPot:** determina um objeto da classe Circuito para bombeamento. Este atributo indica um dos circuitos de bombeamento da base de conhecimento: dois circuitos de grande porte (figura 7.2) e um de pequeno porte (figura 7.3).
- **CircuitoAtua:** também especifica um objeto da classe Circuito para constituir a parte de atuação do sistema. Este atributo indica um de pequeno porte (figura 7.4) ou um dos dois circuitos de atuação de grande porte (figura 7.5) existentes na base de conhecimento.
- **Selecionado:** visa rotular um objeto da classe Sistemas como selecionado ou não. No início da execução do protótipo, todos os objetos desta classe estão rotulados como não selecionado. A combinação de circuitos selecionada pelo usuário indica um objeto sistema.

7.2.2 – Classe: Circuito

Objetivo: Além de identificar um objeto da classe Circuito, também tem o propósito de apontar os seus próprios componentes que são objetos da classe Componente.

- **Circuito_ID:** identifica um objeto da classe Circuito. Esta identificação relaciona objeto circuito com a montagem de um objeto da classe Sistemas. Esta relação é feita através da citação de identificação do objeto circuito no atributo CircuitoPot (quando objeto for circuito de bombeamento) ou CircuitoAtua (quando for um circuito de atuação);
- **Componentes:** neste atributo consta uma lista de instâncias de componentes que constituem o circuito identificado no atributo Circuito_ID. A partir desta lista é feita a conexão entre circuito e componentes;
- **Imagem:** armazena o nome do arquivo gráfico. Este arquivo armazena o desenho do esquema hidráulico usado pelos arquivos HTML gerados pelo protótipo;
- **Selecionado:** assim como na classe Sistema, este atributo rotula o objeto da classe Circuito como selecionado ou não.

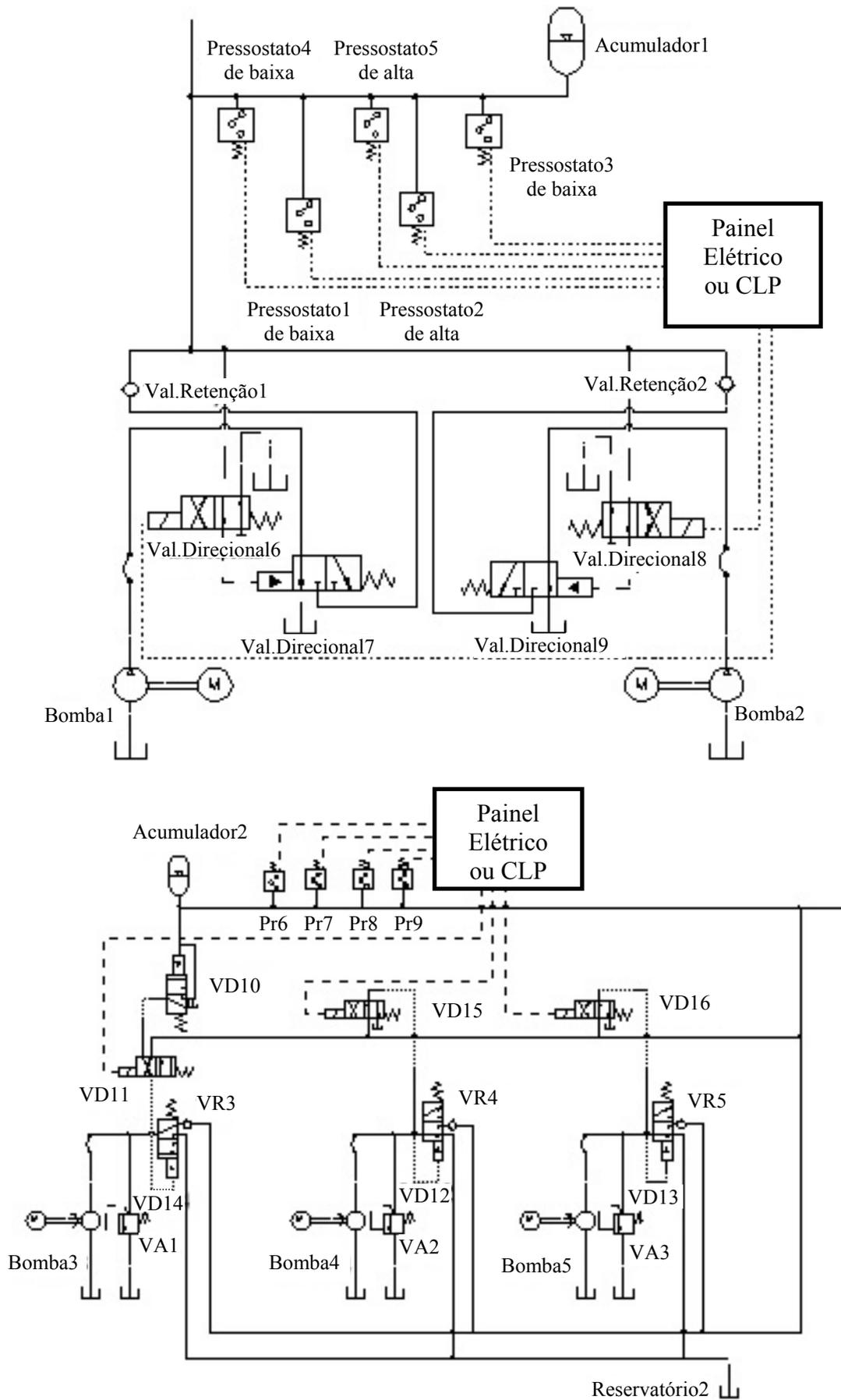


Figura 7.2 - Circuitos Potência de grande porte;

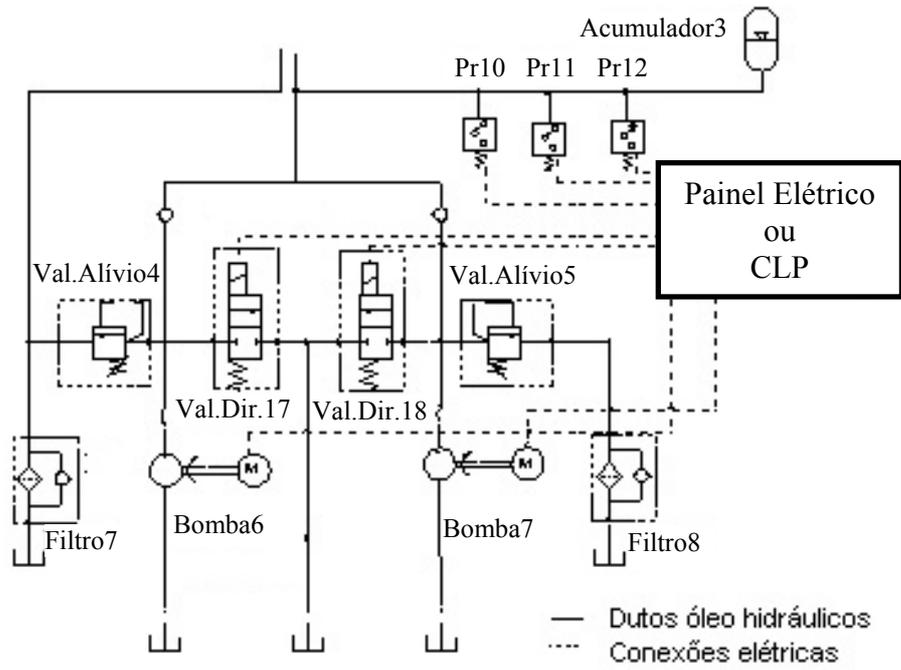


Figura 7.3 - Circuito de Potência de pequeno porte.

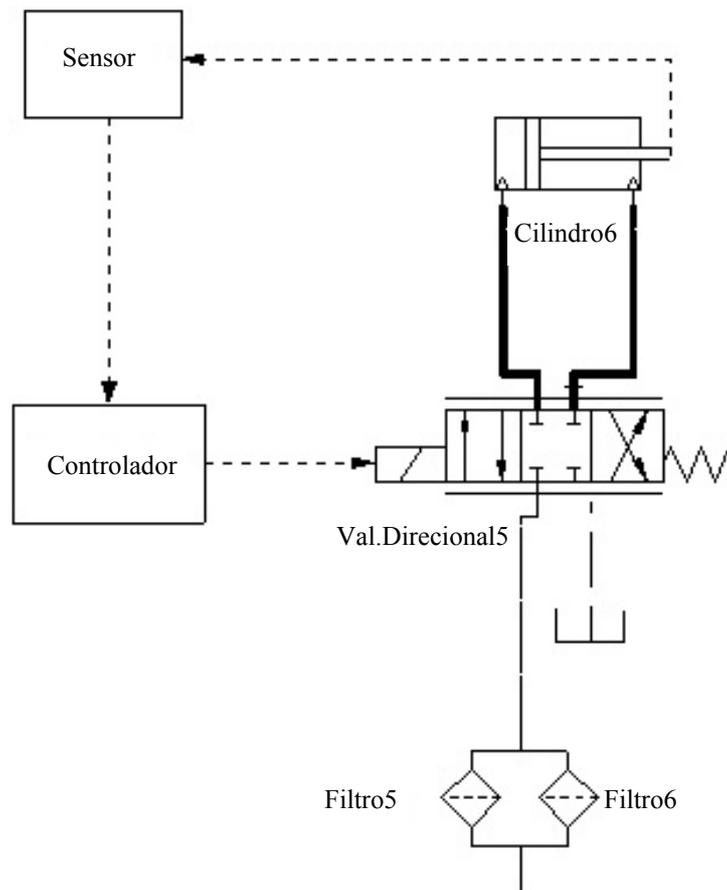


Figura 7.4 – Circuito de atuação de pequeno porte.

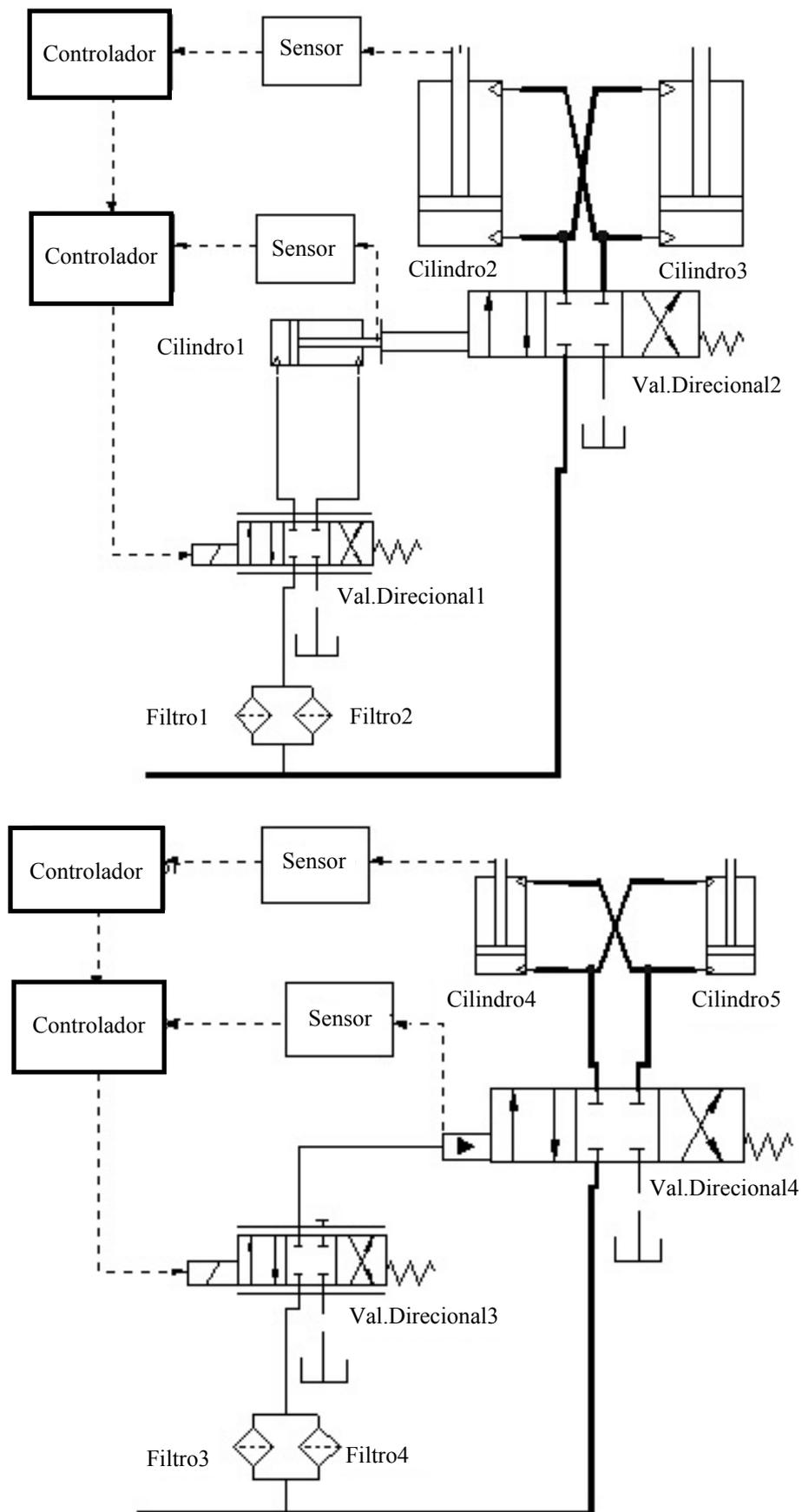


Figura 7.5 – Circuitos de atuação de grande porte.

7.2.3 – Classe: Componente

Objetivo: Visa estruturar o diagrama funcional que será usado para criar o modelo confiabilístico. Nesta classe constam os principais atributos para estruturar o diagrama funcional do sistema. Na base de conhecimento estão as instâncias vários grupos de componentes com diferentes entradas e saídas. Cada grupo forma um circuito.

- **Componente_ID**: identifica um componente. Assim como é feita a relação entre sistema e circuito, este atributo armazena a identificação do componente que pertence a um objeto da classe circuito;
- **ComponenteEntrada**: neste atributo mostra os componentes do diagrama funcional que estão conectados na entrada do componente identificado no atributo **Componente_ID**. Esta lista pode ser de um a três componentes.
- **ComponenteSaida**: este atributo lista os componentes do diagrama funcional ligados diretamente com a saída do componente em questão. Esta lista também pode ter de um a três componentes.
- **ModoOperacao**: neste atributo é especificado o modo de operação do componente, podendo ser componente ativo, componente redundância ativa e redundância passiva.
- **Situacao**: este atributo identifica o estado em que se encontra o componente, evidenciando se o componente foi posicionado ou não no modelo confiabilístico e se foi identificado o modo de operação do mesmo, etc.

a) Subclasse para Componentes Similares

Objetivo: Esta classe relaciona um grupo de componentes similares com os modos de falha da classe Falha. Para cada grupo de componentes similares há uma subclasse específica, onde são armazenados os dados em comum como modos de falha, MTBF e Tipo. Alguns exemplos são as subclasses: *ValvulaDirecional*, *ValvulaRetencao*, *Atuador*, etc. Portanto pode haver um sistema com vários objetos da subclasse *ValvulaDirecional*, vários objetos da subclasse *ValvulaRetencao*, etc.

- **MododeFalhas**: constitui uma lista de modos de falha de um grupo similar de componentes e faz conexão com as informações mais específicas dos objetos da classe Falha. Um exemplo é a lista dos modos de falha da subclasse *Acumulador*: *Vazão Inadequada*, *Varição do Volume Inadequada*, *Amortecimento Insuficiente*

e Perda da Função. As listas deste atributo são inalteradas durante toda a execução do protótipo.

- Tipo: este atributo armazena a classificação de componentes como válvulas, bombas, atuador, etc. Esta classificação visa auxiliar na identificação de manutenções aplicáveis que são destinadas a um grupo de componentes. Um exemplo é a tecnologia de análise de vibração que são normalmente aplicados em componentes rotativos como as bombas.
- MTBF: Tempo médio entre falhas (*Mean Time Between Failures*) é usado para calcular o intervalo entre as inspeções para componentes na reserva passiva.

7.2.4 – Classe: Falha

Objetivo: esta classe se propõe a representar os objetos dos modos de falha listados na subclasse de Componente. Nesta classe constam atributos necessários para indicar um grupo de manutenções aplicáveis como: causas internas, efeitos, grau de comprometimento, etc.

- Modo: Identifica uma instância da classe Falha. O nome usado neste atributo também está presente no atributo ModosdeFalhas de um dos objetos da subclasse dos componentes similares. Esta é a relação feita entre componentes e modos de falha.
- Texto: descreve o modo de falha, indicando se é isolado ou não isolado, e discrimina o grau de comprometimento (se A, B ou C) para ser apresentado no arquivo html. Também lista as causas internas e externas do modo de falha.
- CondiçãoMonitorada: apresenta uma coleção de efeitos de aviso, efeitos primários e causas internas que podem ser monitoradas para evitar o modo de falha.
- Comprometimento: aqui é definido o grau de comprometimento do modo de falha a ser usado para inferência de regras. A letra A representa o comprometimento da segurança pessoal e do meio ambiente. Letra B representa inoperância do sistema e letra C representa o modo de falha com pequenos gastos monetários.
- TipoDeExpansão: indica se o modo de falha apresenta efeito não isolado. Este atributo é usado para modificação do modelo confiabilístico baseado nos componentes com modos de falha de efeitos não isolados.

7.2.5 – Classe: Manutenção

Objetivo: esta classe apresenta os principais atributos das manutenções aplicáveis que são relacionadas com os modos de falha. Um modo de falha pode ter mais de uma manutenção aplicável e para desfazer esse tipo de conflito são verificados outros atributos como custo, eficiência e se a manutenção é normalmente adotada para um determinado grau de comprometimento.

- **Manutenção:** identifica uma tecnologia de monitoramento ou uma ação de manutenção baseado em efeitos primários ou de aviso.
- **MonitoracaoEficiencia:** este atributo consta uma lista de causas internas, efeitos primários e de aviso que podem ser monitorados pela tarefa de manutenção. Ao lado de cada condição monitorada é apresentado o grau de eficiência da manutenção em detectar tal condição. Esta lista emula a tabela 6.3 apresentada por Troyer (1999), mas de forma mais específica à técnica em questão. Como exemplo pode citar a espectroscopia cuja lista se apresenta: desgaste alto, contaminação do fluido alto; isto implica em dizer que a espectroscopia tem alta eficiência na monitoração de desgaste e contaminação do fluido. Esses dados específicos são obtidos do Guia de Manutenção Centrada na Confiabilidade da NASA (2001) e do apêndice 4 de Moubray (1997).
- **Custo:** representa o custo de aquisição e treinamento na implementação de uma tecnologia de monitoração, ou custo do serviço de terceiros. Estes valores estão expressos em dólares e foram obtidos a partir do Guia de Manutenção Centrada na Confiabilidade da NASA (2001) e consultas com especialistas.
- **Aplicação:** lista os tipos de componentes que podem ser submetidos a essa tarefa ou tecnologia de monitoração;
- **CriticalidadeAplicada:** Lista para quais graus de comprometimento a técnica de manutenção é recomendada.
- **Texto:** explica como funciona uma tecnologia de monitoração além de dar as principais vantagens e desvantagens.
- **Intervalo:** indica a periodicidade recomendada de aplicação da técnica de manutenção.

7.2.6 – Controle de Ativação de Regras

Tal como mencionado anteriormente, o protótipo apresenta três módulos, onde cada um tem uma meta a ser alcançada por suas respectivas regras. Esses módulos são executados de forma seqüencial, no entanto, as suas regras internas não seguem necessariamente este padrão. Isto não chega a ser uma deficiência do protótipo, mas sim, uma das principais vantagens de um sistema especialista. Conforme Giatarrano e Riley (1994), essa característica proporciona maior flexibilidade em adicionar, mudar e deletar regras sem submeter-se às restrições de uma execução seqüencial. Diante desta peculiaridade, o protótipo foi desenvolvido formando um conjunto de regras com mesmo propósito. Cada conjunto é destinado a uma etapa de execução do protótipo. Um exemplo disto é evidenciado no primeiro módulo do protótipo.

O primeiro módulo apresenta três conjuntos de regras para modelagem confiabilística que foi tratada no capítulo 5. O primeiro conjunto procura por componentes de mesma entrada e saída para formação de grupos de corte. Depois se aplica um segundo conjunto de regras para identificar de duas a três linhas paralelas de componentes. Por último, há uma coleção de regras para os demais casos. Diante do que foi descrito, os três conjuntos de regras têm o mesmo propósito que é formar grupos de corte de primeira, segunda e terceira ordem. Entretanto, o primeiro conjunto de regras é para situação de componentes de mesma entrada e saída. O segundo forma grupos de corte a partir de linhas paralelas de componentes redundantes. O último conjunto de regras é destinado a situações mais específicas.

O módulo de modificação do modelo confiabilístico só é executado se houver grupos de corte de segunda e terceira ordem com componentes funcionando (pelo menos um ativo e outro na redundância ativa), tal como mencionado na seção 6.2 do capítulo 6. Neste módulo, as regras também não seguem uma seqüência de execução, pois cada regra é acionada para situações específicas. Conforme o sistema selecionado e o modo de operação dos componentes, algumas regras são acionadas e outras não. Há um conjunto de regras para componentes com efeitos não isolados em grupo de corte de segunda ordem e há outro conjunto para grupos de corte de terceira ordem.

Seguindo as considerações do capítulo 6 sobre atribuição de manutenções baseada na FMEA, o módulo de alocação de manutenções apresenta quatro conjuntos de regras. O primeiro, segundo e terceiro correspondem respectivamente na busca de manutenções para modos de falha do tipo A, B e C. O quarto conjunto de regras pode ser executado ou não, pois depende da existência de componentes em *standby* (redundância passiva).

7.3 –Arquivo HTML com Resultados

A primeira versão do protótipo foi desenvolvida usando o ambiente da Shell do CLIPS devido às vantagens como portabilidade, velocidade de processamento e por ser gratuitamente distribuído via internet. Entretanto, o CLIPS tem sua interface baseada no modo texto, o que inviabiliza apresentações de qualquer tipo de desenho ou gráficos. Diante desta deficiência, o protótipo tem a sua interface complementada por um arquivo HTML (*Hyper Text Markup Language*: Linguagem de Marcação de Hiper Texto), que é visualizado através de navegadores de internet (Internet Explorer ou Netscape), novamente cabe mencionar que esta abordagem foi adaptada de Silva (1998).

7.3.1 – Entrada de dados.

A primeira pergunta ao usuário é verificar se ele deseja escolher um sistema de grande ou pequeno porte. Paralelamente no arquivo *saida.htm*, é ilustrado exemplos de circuitos de grande e pequeno porte para auxiliar na escolha do usuário. O arquivo *saida.htm* é mostrado nas figuras 7.6 e 7.7, onde é repartido em duas telas: a primeira tela (acima) mostra as opções de circuito de grande porte, e a segunda (abaixo) mostra a única opção de circuito de pequeno porte.

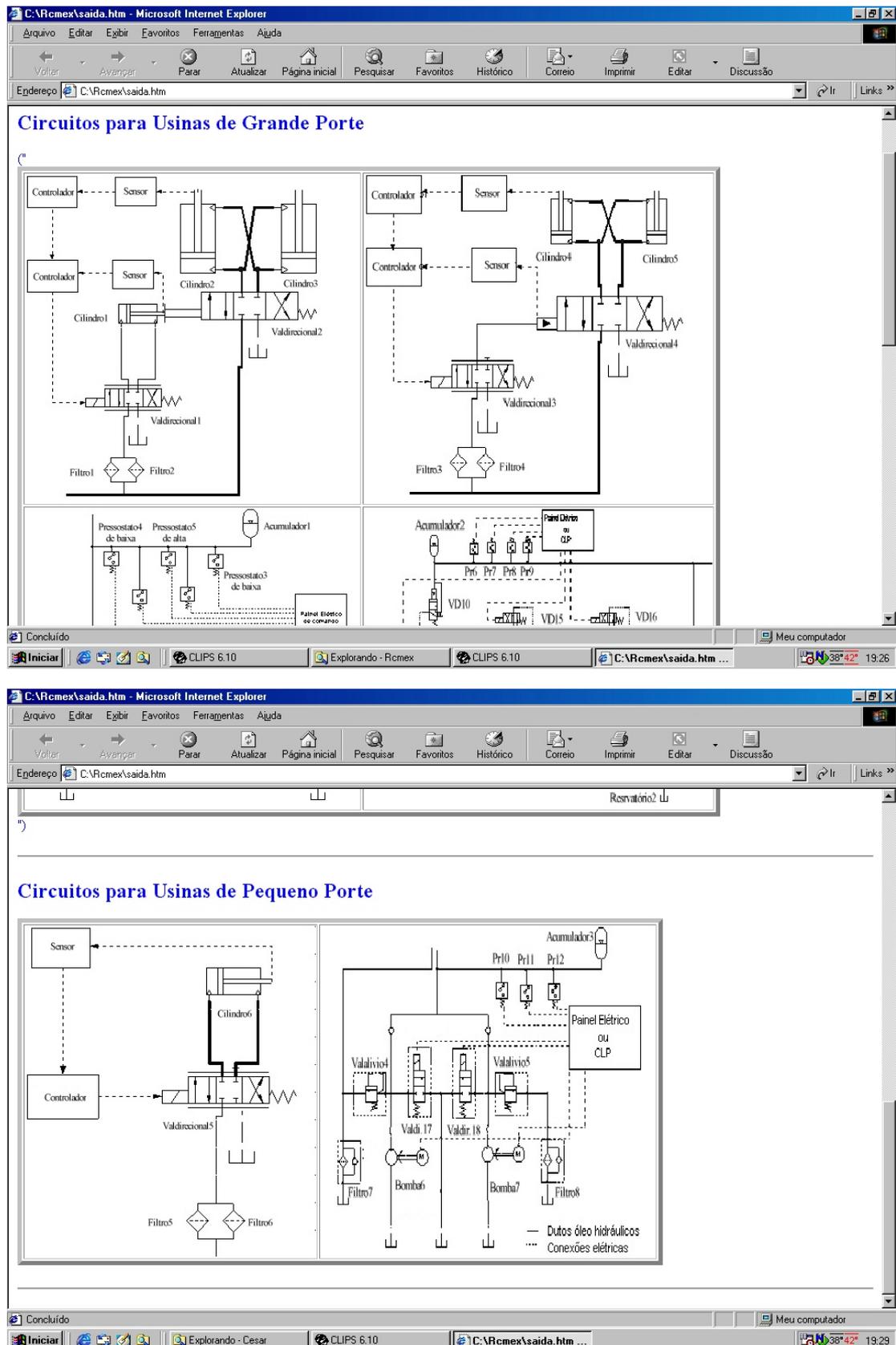


Figura 7.6 - Primeira apresentação do arquivo saida.htm.

Caso o usuário escolha sistema de pequeno porte, não são apresentadas alternativas de circuitos de bombeamento e atuação, pois a primeira versão deste protótipo apresenta somente uma opção de sistema de pequeno porte. Selecionando os circuitos de grande porte, o arquivo saída.htm é atualizado mostrando as opções de circuitos de bombeamento, tal como é visto na figura 7.7.

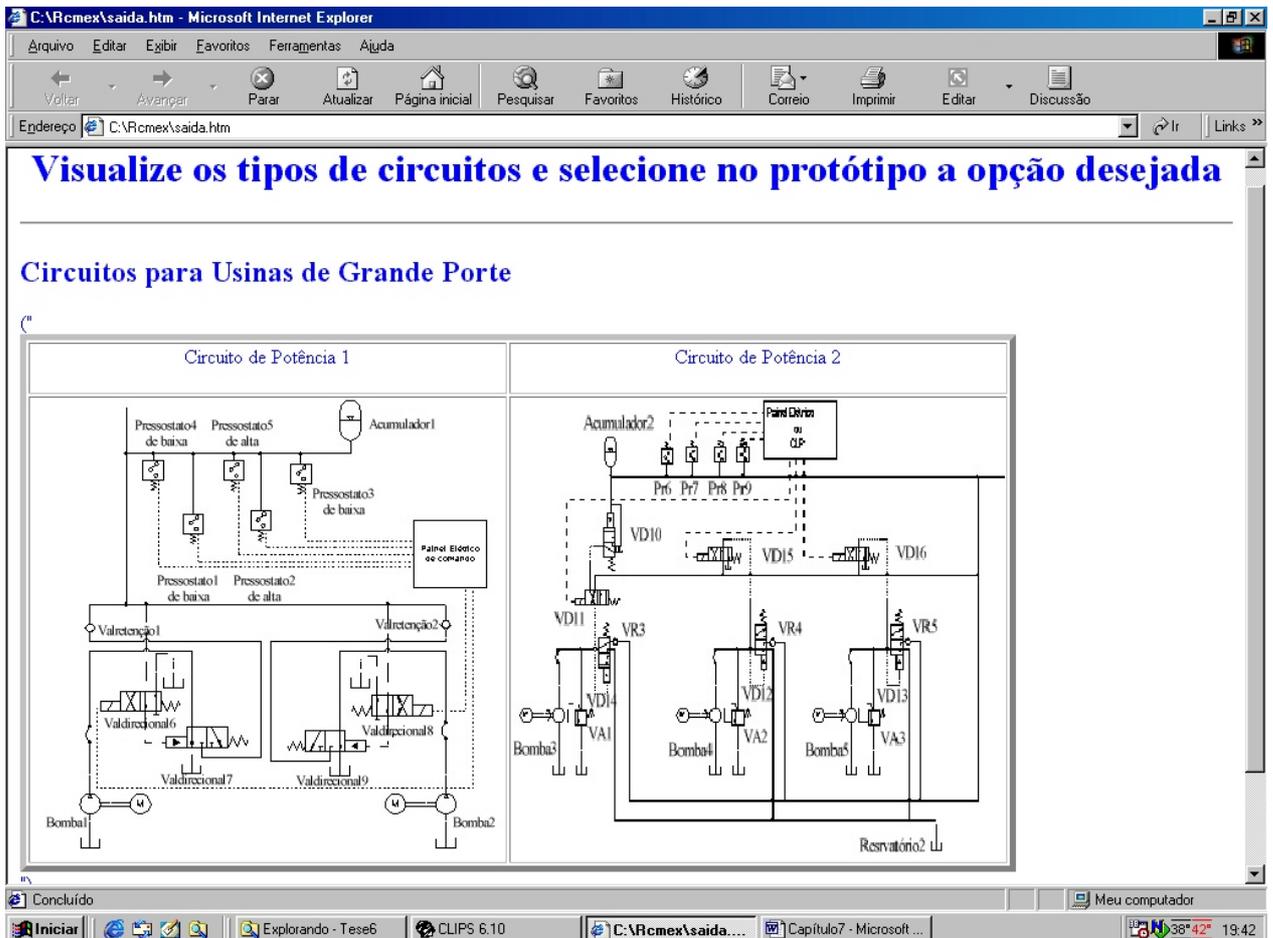


Figura 7.7 - Primeira atualização do arquivo saída.htm, mostrando as opções de circuitos de bombeamento.

Definido o circuito de bombeamento pelo usuário no protótipo em ambiente texto, o arquivo saída.htm é novamente atualizado, mas desta vez apresentando as alternativas de circuitos de atuação para grande porte. Esta segunda atualização é vista na figura 7.8.

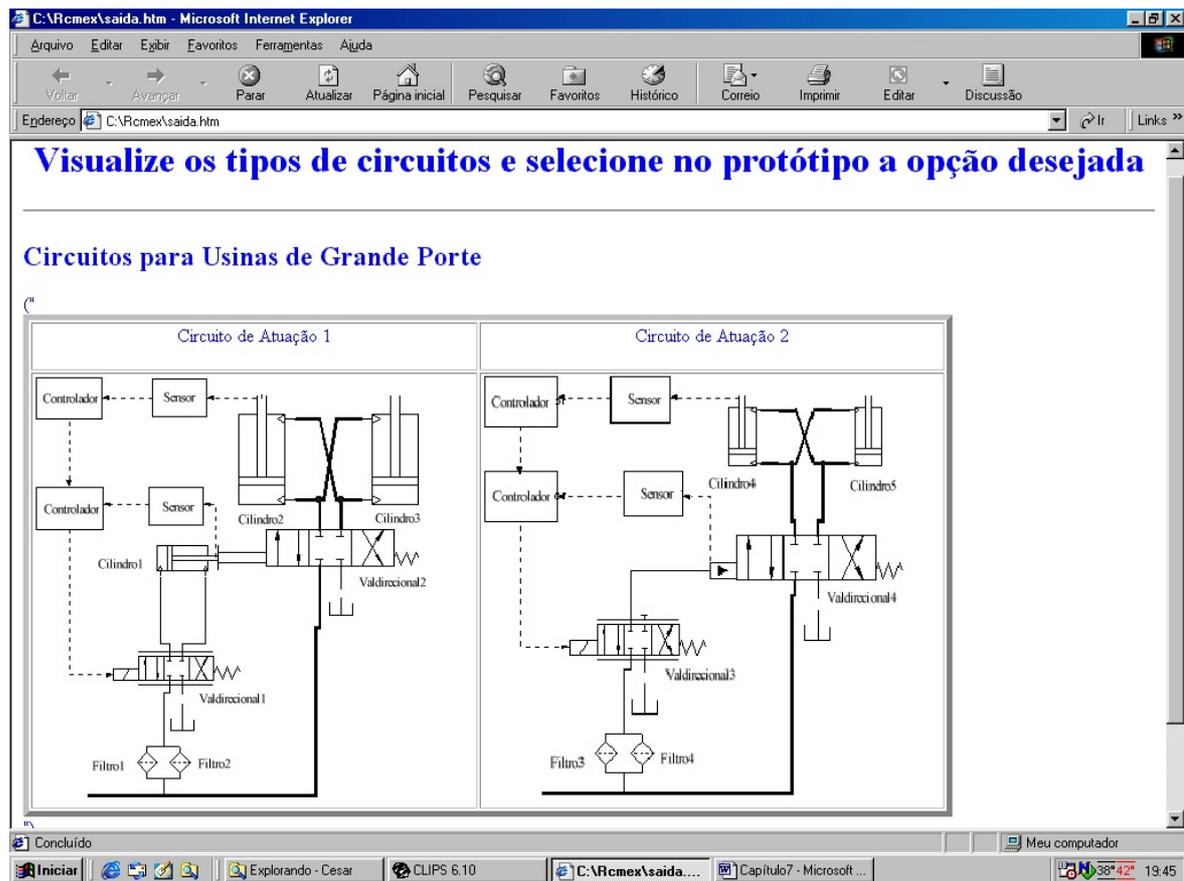


Figura 7.8 - Segunda atualização do arquivo saída.htm, mostrando as opções de circuitos de atuação.

Uma vez constituído o sistema, torna-se necessário a definição do modo de operação das linhas redundantes de bombeamento que podem estar desligados (redundância passiva), acionadas (ativa: fornecendo vazão para o sistema) ou acionada sem carga (redundância ativa: vazão desviada para o tanque). Esta escolha é muito importante para definir o tipo de manutenção a ser alocado no componente. Se o componente estiver operando com ou sem carga, opta-se em aplicar manutenções controladas ou preventivas. Se o componente estiver desligado, é preciso recomendar inspeções periódicas para certificar-se de sua plena disponibilidade.

7.3.2 – Apresentação dos Resultados

Os resultados do protótipo são apresentados num arquivo HTML, onde são mostrados os circuitos de atuação e bombeamento selecionados pelo usuário, além das recomendações para alocação de um tipo de manutenção para cada modo de falha.

A forma como as informações são expostas neste arquivo visa explicitar a lógica de alocação de manutenções aplicáveis. Este intento é visto nas recomendações de inspeções

periódicas para componentes na reserva passiva e para alocação de manutenções a cada modo de falha de um componente na ativa ou reserva ativa.

Na figura 7.9, é mostrada a parte onde justifica o cálculo de inspeções periódicas. Neste caso são apresentados os dois componentes cujos tempos médios entre falhas (MTBFs) serviram de base para cálculo dos intervalos de inspeções. Conforme procedimento descrito no item 6.8 do capítulo 6, estes componentes são os que têm os menores MTBFs, onde um faz o papel de componente protegido (na ativa) e outro o de componentes de proteção (reserva passiva). Esta situação caracteriza o risco de falha múltipla, pois o componente de proteção define uma função oculta.

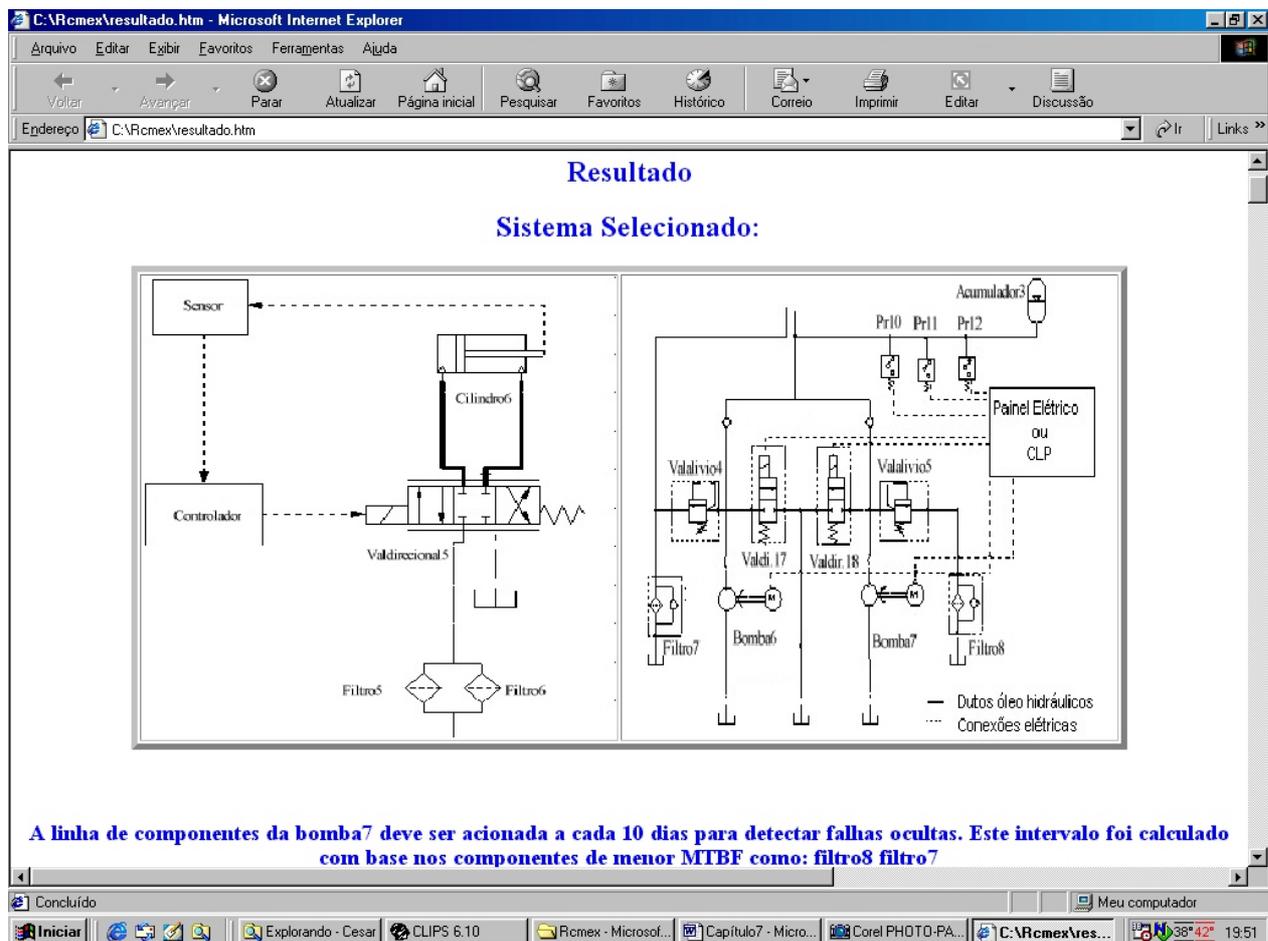


Figura 7.9 - Apresentação do sistema selecionado e a proposta de inspeções periódicas para evitar falha múltipla.

A tabela de alocação de manutenções para cada modo de falha, também busca explicitar a escolha por uma tarefa de manutenção. Isto é feito com apresentação de uma seqüência de informações que levaram a selecionar uma determinada tarefa de manutenção. Esta seqüência de informações é apresentada na ordem de colocação das sete colunas da tabela de alocação. Primeira e segunda colunas correspondem, respectivamente, ao nome do componente e o

modo de falha. A terceira coluna apresenta detalhes do modo de falha que visam explicar o porquê de sua classificação como A, B ou C. Também justifica a decisão do modo de falha ser classificado como isolado e não isolado, e ainda, cita as causas internas e externas. Na quarta coluna é mostrada a condição a ser monitorada, podendo ser uma causa interna do modo de falha, um efeito de aviso ou efeito primário. A quinta coluna é a periodicidade recomendada para executar a tarefa de manutenção selecionada. A sexta coluna é a técnica de manutenção selecionada onde são descritas as vantagens, desvantagens e as principais características operacionais. A última coluna lista as demais técnicas de manutenção aplicáveis para monitorar a condição explícita na quarta coluna, as quais não foram selecionadas por serem opções mais caras e de menor eficiência, conforme tabela 6.3 do capítulo 6. Parte da seqüência mencionada neste parágrafo é apresentada na tabela 7.1, onde são mostradas as principais informações que ajudaram na inferência de manutenções.

Na tabela 7.1 é mostrada a coluna da condição monitorada que é um dos principais conexões entre o modo de falha e a técnica de manutenção. Um modo de falha tem efeitos e condições internas que podem ser usadas para definir uma técnica. Mas uma técnica de monitoração pode monitorar outras condições com diferentes graduações de eficiência, tal como é visto na tabela 6.3 de Troyer (1999). Observando o exemplo apresentado na tabela 7.1, o modo de falha “Viscosidade Baixa” pode ser monitorada por vazamentos ou pela própria viscosidade. A análise de viscosidade pode monitorar a contaminação do fluido por outros fluidos, além da própria viscosidade. As regras do terceiro módulo procuram por técnicas que monitoram viscosidade e vazamento e depois selecionam a que apresentar maior eficiência. Este procedimento é feito observando o tipo de falha (se é A, B ou C), aplicabilidade da técnica no componente.

Tabela 7.1 – Alocação de tarefas de manutenção para modos de falha de componentes em funcionamento.

Componente	Detalhes sobre Modo de falha	Condição Monitorada	Técnica de Monitoração Recomendada
Fluido 3	Modo de falha: Viscosidade Baixa é do tipo não isolado por induzir efeitos como perda do poder lubrificante, provocando aumento de desgaste nos componentes. Seu grau de comprometimento no sistema é A, isto é, compromete a segurança do meio ambiente por apresentar o efeito de aumento de vazamentos externos. As principais causas deste modo de falha são: 1)Aumento excessivo da temperatura devido a perda de carga; 2)Fluido de trabalho inadequado devido a viscosidade;	Viscosidade	Análise de Viscosidade (ASTM D445): Este teste mede o tempo que um dado volume de óleo passa através de um viscosímetro capilar num copo calibrado sob uma aceleração gravitacional especificada numa dada temperatura (100°F ou 38°C). O teste pode ser usado para monitorar a deterioração do óleo com passar do tempo ou indicar a presença de contaminação por combustíveis ou outros óleos. Esta técnica exige um técnico de laboratório treinado (Moubray, 1997). Além do mais esta técnica é parte de um pacote padrão de testes de um laboratório comercial (Nasa, 2001).
Val. Retenção 6	Modo de falha: Pressão anormal na válvula de retenção é do tipo isolado por não induzir efeitos de quebra ou desgaste em outros componentes. O seu grau de comprometimento no sistema é A, isto é, compromete por induzir aumento de vazamentos externos que compromete a segurança do meio ambiente. As principais causas internas do componente que geram este modo de falha são: 1)Desgaste de vedações internas; 2) Desgaste no corpo da válvula.	Desgaste	Espectroscopia (Emissão Atômica, Absorção Atômica, Fluorescência de Raio-X): detecta desgaste de metais tais como ferro, alumínio, cromo, cobre, chumbo, estanho, níquel e prata, além de detectar aditivos contaminantes como boro, zinco, fósforo, cálcio, magnésio. Esta técnica é feita em laboratórios especializados, é de baixo custo e permite várias semanas a meses de aviso de falha eminente. Usa-se um espectrômetro que requer um técnico de laboratório treinado e os resultados devem ser analisados por químico analítico experiente. Segundo Moubray, 1997

7.4 – Consideração Finais

Ao descrever o protótipo no decorrer deste capítulo é possível evidenciar algumas características a serem obtidas em um sistema especialista. Segundo Giatarrano e Riley (1994), um sistema especialista é normalmente desenvolvido para ter as seguintes características: tempo adequado de resposta, robustez, compressível e alto desempenho.

A princípio as características como tempo adequado de resposta e robustez foram obtidos na primeira versão do protótipo. O tempo adequado de resposta, segundo Giatarrano e Riley (1994), consiste em verificar se o sistema não demora mais que o próprio especialista para dar resposta. Neste ponto, o protótipo já obteve sucesso, pois só a análise de FMEA e levantamento de manutenções aplicáveis levam algumas semanas enquanto que o protótipo

apresenta a resposta em 1 a 2 minutos. A robustez foi obtida através da certificação de que o protótipo não é interrompido por nenhum dos cinco exemplos de sistema, independentemente do modo de operação de seus componentes.

As outras características como compreensão e alto desempenho devem ser certificadas pelos próprios especialistas o que será tratado no próximo capítulo.

CAPÍTULO 8

VALIDAÇÃO DO PROTÓTIPO

8.1 – Introdução

Este capítulo descreve o processo de validação do protótipo, onde constam as três principais avaliações: validação de resultados, validação do processo de obtenção dos resultados e aceitação do usuário. Além dessas descrições são feitas algumas considerações em relação aos diferentes planos de manutenção recomendados para um mesmo sistema hidráulico, de acordo com os diferentes modos de operação. Em seguida são apresentadas as opiniões de especialistas e usuário conforme a sistemática descrita para cada avaliação.

8.2 – Validação

O processo de validação de um sistema especialista é bem diferente do usado em programas convencionais, onde as tarefas de verificação dos resultados são prioridade. Nos programas convencionais as avaliações consistem em verificar se os requisitos iniciais são completamente atendidos pelos resultados finais (Durkin, 1994). Para atingir essas metas, os programas convencionais são constituídos por algoritmos destinados a atender especificações, que possam ser medidos e recalculados até obter uma solução ótima e exata. Os sistemas especialistas, conforme abordado no item 4.4, são destinados aos problemas que podem ter uma coleção de soluções, sendo que uma solução é a mais adequada, de acordo com as peculiaridades normalmente observadas por um especialista. Portanto, o processo de avaliação destes sistemas vai além de uma simples tarefa de verificação de resultados.

Uma outra característica dos programas convencionais é o seu processo seqüencial de desenvolvimento. Os programadores seguem um processo desenvolvimento com três etapas diferentes: projeto, codificação e depuração. O programa só é distribuído depois que o programador completar todo esse processo. Com essa finalização, o nível de desempenho do programa já alcançou as especificações originais de projeto. Além disso, o programador trabalha solitariamente na maior parte do tempo, interagindo com outros apenas nos momentos de maiores dificuldades ou na necessidade de novos horizontes. O engenheiro do conhecimento desenvolve o sistema especialista de forma iterativa. Isto é, a cada nova parcela de conhecimento obtida e adicionada na forma de regras pelo engenheiro do conhecimento, o sistema especialista é testado e avaliado pelo especialista humano. Isto faz com que o

engenheiro do conhecimento trabalhe juntamente com especialista humano durante todo o processo de desenvolvimento do sistema especialista (Durkin, 1994).

Logo, avaliação de um sistema especialista é feita com maior frequência que um programa computacional convencional cuja avaliação é feita na última etapa. Além do mais, a avaliação de um programa convencional pode ser feita pelo próprio programador uma vez que avaliação consiste em verificar o cumprimento de especificações, restando ao usuário final a verificação da interface e demais funcionalidades já desenvolvidas. Um sistema especialista é parcialmente construído e em seguida é avaliado pelo especialista humana.

Segundo Giatarrano e Riley (1994), o processo de avaliação usado em um sistema especialista é a validação, que consiste em determinar se uma cadeia de inferências, proveniente das regras, conduz a uma resposta correta. Para Durkin (1994), a tarefa de validação é subjetiva e faz o processo de avaliação de um sistema especialista ser um esforço complexo.

Esta subjetividade está no fato de que um sistema especialista deve modelar as tomadas de decisões de um especialista humano. Se o sistema é corretamente projetado, os seus resultados derivam das mesmas razões que fizeram um especialista humano emití-las. Com base nas considerações de Durkin (1994), um sistema especialista deve ser submetido a:

- Validação dos Resultados;
- Validação do Processo de Obtenção dos Resultados;

8.2.1 – Validação dos Resultados

Este tipo de validação envolve o uso de um caso já resolvido com sucesso no passado. As informações sobre o problema deste caso são repassadas ao protótipo do sistema especialista cujos resultados são comparados com as recomendações bem sucedidas que foram dadas pelo especialista no passado. Estas comparações são feitas por um indivíduo chamado avaliador que também é um especialista no escopo do caso em questão (Durkin, 1994).

Aparentemente esta abordagem de validação parece ser bem simples, pois se o avaliador observar que os dois resultados são iguais, ele considera que o protótipo está correto. Se os resultados não forem iguais o avaliador considera que o sistema está errado. No entanto, um sistema especialista não pode ser avaliado simplesmente pelas similaridades de seus resultados com as do especialista. O sistema deve ser avaliado pelas informações adicionais e relevantes que normalmente um especialista pode não se lembrar ou que levaria tempo e dedicação para inferir sobre tais informações. Segundo Giatarrano e Riley (1994), o alto

desempenho de um sistema especialista é a capacidade de responder num nível de competência igual ou melhor do que um especialista humano, isto é, a qualidade da recomendação dada pelo sistema deve ser muito alta.

Seguindo as orientações deste item, a validação dos resultados do protótipo é baseada na definição de alto desempenho exposta por Giatarrano e Riley (1994), onde se procura observar a relevância das informações dadas pelo protótipo, diante do conhecimento do especialista humano.

8.2.2 – Validação do Processo de Obtenção dos Resultados

Além da avaliação dos resultados do sistema especialista, o avaliador pode desejar saber se o sistema está fornecendo as respostas corretas por razões certas (Durkin, 1994). Este é um outro tipo de validação que visa avaliar o processo de obtenção dos resultados. A validação do processo de obtenção é utilizada para validar um sistema especialista complementando a validação por resultado, principalmente, naquelas situações onde o sistema teve um número limitado de casos teste, mesmo que os resultados obtidos tenham sido considerados de sucesso. Para aumentar a credibilidade é preciso saber do avaliador se o processo de obtenção dos resultados do sistema é coerente com as razões normalmente usadas pelo especialista humano para inferir soluções.

Neste sentido este trabalho valida o processo de obtenção dos resultados utilizando a sistemática apresentada no capítulo 7, tabela 7.1. Na tabela 7.1 é apresentada a seqüência com que as informações foram consideradas para sugerir um tipo de manutenção. Essa abordagem corresponde ao nível macro de validação do processo de obtenção de resultados, conforme Durkin (1994). Isso consiste em permitir ao avaliador acompanhar a ordem com que cada informação foi considerada, até chegar ao resultado final. Já a abordagem nível micro é feita a validação individual de cada regra, e que é normalmente executada pelo próprio engenheiro do conhecimento, dependendo do seu nível de conhecimento sobre o assunto.

A validação do processo de obtenção do resultado está relacionada com a característica de facilidade de explicação ao usuário, a qual foi citada por Giatarrano e Riley (1994). Essa validação procura certificar a habilidade do sistema, explicar os passos executados até chegar ao resultado final. A adoção dessa sistemática, com fundamentação e explicações, é melhor do que simplesmente emitir uma resposta de dentro de uma “caixa preta”.

8.3 – Verificação do Caso Teste Usado para Validação

Para validação do sistema especialista estruturou-se um estudo de caso (teste) aplicado a um sistema hidráulico regulador de velocidade de turbinas “Francis” com similaridades comumente encontradas em algumas usinas no Brasil. Essas similaridades, relativas ao circuito hidráulico, estão relacionadas com a presença de duas bombas no circuito de bombeamento e uso de três cilindros no circuito de atuação, sendo, dois para atuar na abertura e fechamento de passagem d’água para turbina e um para controlar o posicionamento de uma válvula direcional maior, conhecida como válvula distribuidora.

Depois, foi elaborado um conjunto de tarefas de manutenção para esse sistema típico com as sugestões de um especialista (Frari, 2001) que tem mais de 20 anos de experiência na manutenção de sistemas hidráulicos reguladores de velocidade de turbinas hidrelétricas, além de ter acompanhado a montagem e comissionamento desses equipamentos. Atualmente é supervisor de manutenção mecânica de duas usinas hidrelétricas com reguladores hidráulicos de grande porte.

Essas tarefas foram estabelecidas como caso teste a ser comparado com os resultados do protótipo por um especialista avaliador. A figura 8.1 mostra o esquema hidráulico para o qual o especialista sugeriu um conjunto de tarefas de manutenção e que também foi usado pelo protótipo para produzir seus resultados.

O circuito deste sistema permite dois modos de operação. No primeiro modo de operação, as duas bombas estão ligadas para carregar o acumulador, sendo que a Bomba1 (ativa) fornece sua vazão para o circuito de atuação enquanto que a Bomba2 (redundância ativa) tem sua vazão desviada para o tanque. O segundo modo de operação somente a Bomba1 é colocada em carga (ativo) para carregar o acumulador. A Bomba2 (redundância passiva) fica desligada, ou seja, é acionada somente quando a Bomba1 falhar.

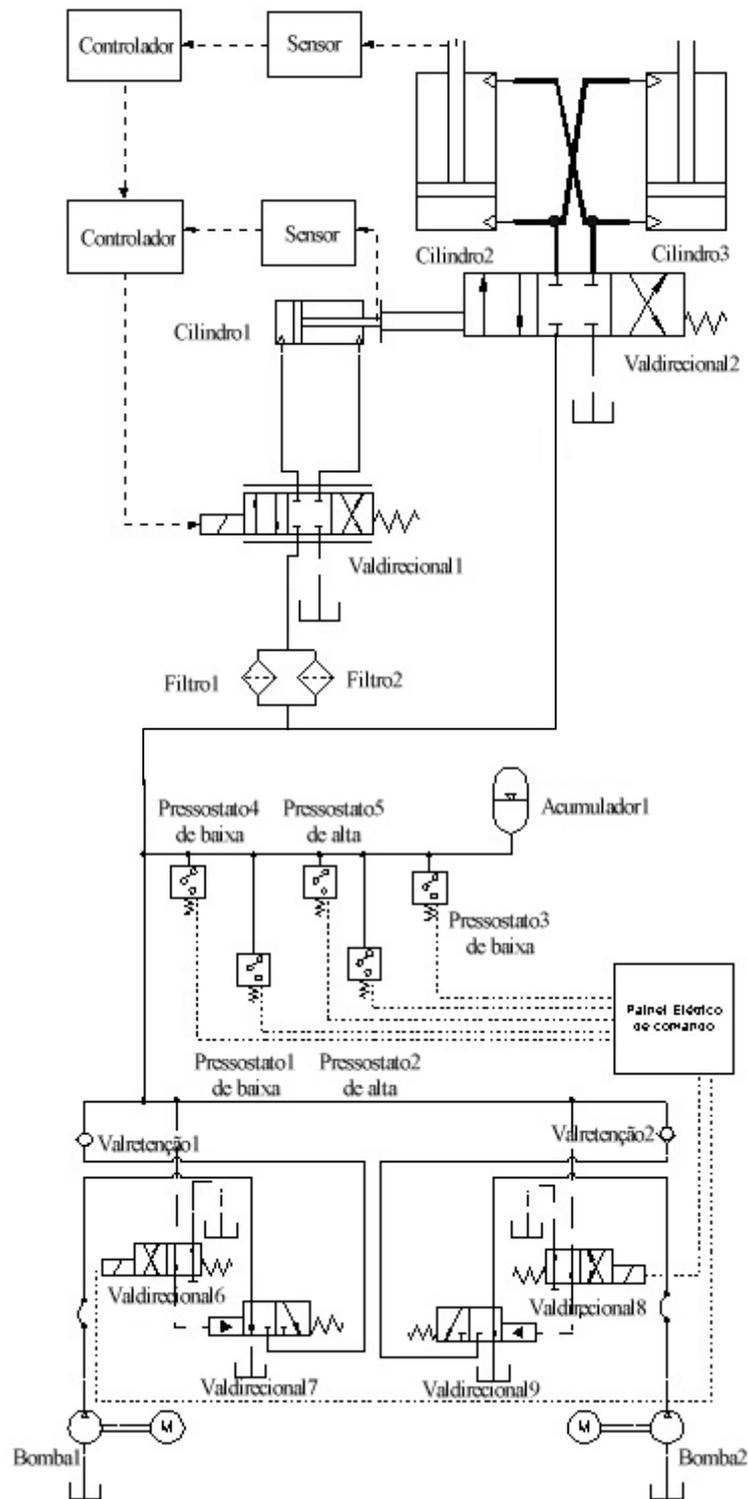


Figura 8.1 - Sistema usado para validação dos resultados.

Antes de dar início ao processo de validação é recomendado que o engenheiro do conhecimento faça uma verificação dos resultados obtidos pelo protótipo. O processo de verificação é diferente do processo de validação. Segundo Giatarrano e Riley (1994), a

verificação do conhecimento tem objetivo de determinar a consistência e abrangência do sistema especialista. A consistência é certificar que não haja conflitos no resultado apresentado pelo protótipo. Um exemplo de conflito é encontrar um tipo diferente de manutenção recomendada para um mesmo modo de falha de um componente a cada execução do protótipo, uma vez que foram mantidas as mesmas entradas dadas pelo usuário. Estes conflitos foram sendo resolvidos corrigindo problemas na cadeia de inferência e nos erros individuais das regras. A abrangência dos resultados visa identificar se não estão faltando informações (Giatarrano e Riley, 1994). Isto é feito observando se todos os modos de falha e componentes hidráulicos foram considerados para inferência de manutenções. Esta etapa é descrita nos próximos itens onde é possível apresentar algumas ponderações.

8.3.1 – Verificação dos Resultados do Protótipo Usando o Sistema com Redundância Ativa

As manutenções recomendadas pelo protótipo para os modos de falha do tipo A exigem prioridade e eficiência, conforme item 6.7. Isto é feito devido a necessidade de controlar ou eliminar os efeitos desses modos de falha cujas conseqüências estão relacionadas com a segurança pessoal ou com a integridade ambiental. Por exemplo, o modo de falha amortecimento insuficiente no acumulador, tem como efeito o golpe de pressão cuja conseqüência põe em risco a segurança pessoal. Uma das causas deste modo de falha poderia ser o desgaste das vedações internas do acumulador. Para detectar o efeito relacionado com golpes de pressão no acumulador, o protótipo indicou ferrografia analítica, como o método de análise para a manutenção controlada. Ela permite acompanhar o desgaste e corrosão de elementos usados para vedação no acumulador. Mas esta técnica só é recomendada quando houver aumento de elementos metálicos constatados pela espectroscopia, ferrografia de leitura direta ou pela contagem eletrônica de partículas (Moubray, 1997; Nasa, 2001)

Todavia, boa parte dos modos de falha do tipo A está relacionada com riscos para integridade ambiental devido aos seus efeitos como vazamentos externos que podem contaminar as fontes hídricas de uma região. Um exemplo de modo de falha com efeito de aumento de vazamentos externos em todo sistema é a vibração mecânica excessiva na bomba devido à causa interna de desalinhamento do eixo. Este modo de falha pode ser efetivamente controlado pela análise da vibração, tal como é verificado na tabela 6.3 do capítulo 6.

No gráfico da figura 8.2, é possível ver o número de modos de falha do tipo A que cada técnica de manutenção pode abordar. A espectroscopia abrange o maior número de modos de falha que são resultantes do desgaste dos itens internos dos componentes, desalinhamento e desbalanceamentos das bombas. A abrangência da espectroscopia se deve a possibilidade de

detectar a maioria dos elementos metálicos que constituem um componente hidráulico, além de ser muito eficiente e de baixo custo (Moubray, 1997; Nasa,2001). No entanto, é necessário saber quais os elementos metálicos que constituem os componentes hidráulicos do sistema. Estas informações servirão para identificar qual componente do sistema estará desgastando além do normal. Os cilindros hidráulicos são constituídos, basicamente, de elementos como ferro, alumínio e cromo; os elementos de vedação contêm estanho e zinco; já alguns tipos de válvulas contêm cobre e níquel (Moubray, 1997). Abrangência da técnica de análise de vibração está relacionada ao número de modos de falha ocasionados pelos desalinhamentos e desbalanceamentos dos itens rotativos das duas bombas do circuito. A terceira técnica mais abrangente é a ferrografia analítica que pode analisar partículas maiores e identificar o tipo de desgaste tal como fricções, cortes e deslizamentos de partículas ferrosas e não ferrosas (Nasa, 2001).

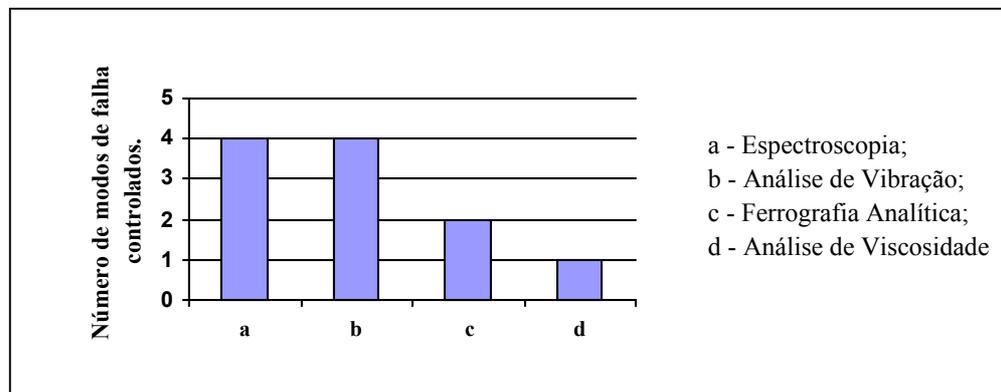


Figura 8.2 – Número de modos de falha do tipo A e respectivas técnicas de detecção.

O gráfico da figura 8.3 mostra a abrangência das manutenções em controlar os modos de falha do tipo B, cujos efeitos são a parada ou movimentação lenta dos atuadores, insuficiência de pressão no sistema e falhas nas válvulas em responder aos comandos, vide tabela 6.2. Novamente, a espectroscopia continua sendo a técnica mais abrangente pelos mesmos motivos citados no parágrafo anterior. A manutenção preventiva é a segunda mais abrangente uma vez que se destina aos modos de falha que apresentam somente efeitos primários para auxiliar na sua detecção. Devido às razões citadas no item 6.5, o protótipo recomenda manutenções preventivas em vez de monitorar os efeitos primários como pressão e vazão.

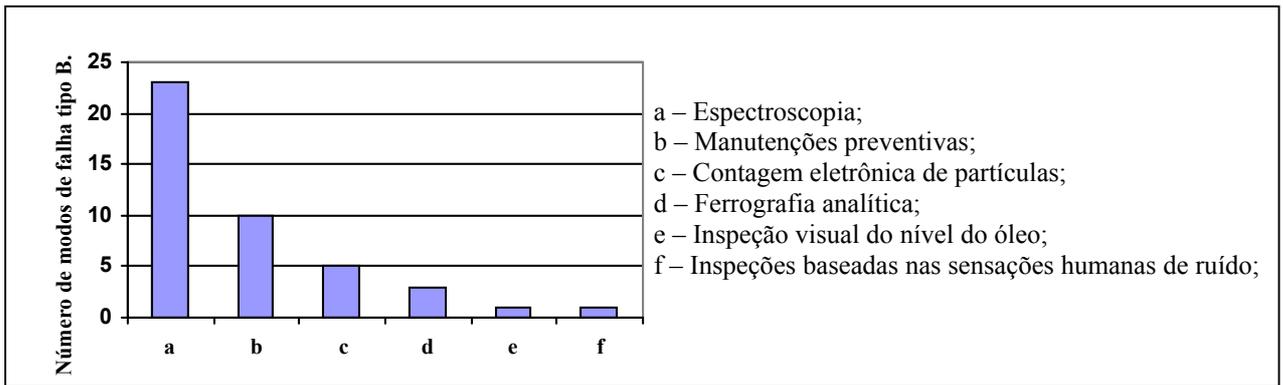


Figura 8.3 –Número de modos de falha do tipo B abordadas por técnicas e ações de manutenções preventivas.

A predominância da espectroscopia também é observada nos modos de falha do tipo C. Neste grupo é possível notar a recomendação de manutenções corretivas e inspeções baseadas nas sensações humanas, que são indicadas para modos de falha sem efeitos com maiores severidades tal como é o caso dos modos de falha do tipo C. Estas constatações são vistas no gráfico da figura 8.4.

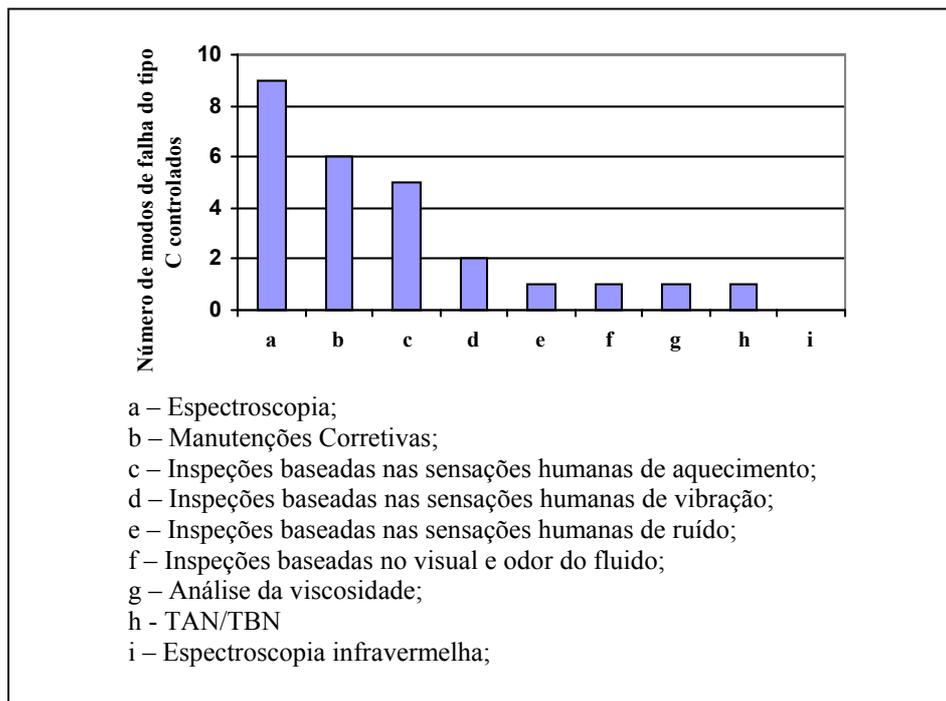


Figura 8.4 – Número de modos de falha do tipo C abordadas por cada técnica, inspeção e por ações de manutenções corretivas.

Juntando-se os resultados dos gráficos das figuras 8.2, 8.3 e 8.4 em um só gráfico tem-se uma idéia do número de tarefas de manutenção recomendadas pelo protótipo. Isto é visto na figura 8.5. Também é importante salientar, segundo Nasa (2001), que as técnicas como espectroscopia, análise de viscosidade, contagem eletrônica de partículas, espectroscopia

infravermelha e TAN/TBN (Número total de acidez e Número total de base) podem fazer parte de um mesmo pacote comercial a ser feito por um laboratório especializado.

Uma observação a ser feita é sobre as peculiaridades das manutenções controladas em relação às manutenções preventivas. As tarefas de manutenções controladas, baseadas em tecnologias de monitoramento ou em sensações humanas, controlam a condição de um ou vários componentes, sem que seja necessária a interrupção do funcionamento do sistema. Isso pode ser exemplificado pela espectroscopia que monitora o desgaste de vários componentes através de uma só amostra de óleo, sem indisponibilizar o sistema. Por outro lado, as manutenções preventivas requerem a parada do sistema para propiciar a substituição de um componente com tempo de serviço já cumprido. Portanto, se existem dez modos de falha para serem eliminados pelas manutenções preventivas poderão ser necessárias dez paradas para substituição dos componentes. Mas se os componentes são idênticos e apresentam o mesmo tempo de serviço, com uma só parada pode-se substituí-los.

Também há a possibilidade de não precisar fazer interrupções se o sistema tiver um componente redundante para aquele que vai ser substituído. Nesta situação, o componente a ser substituído deve estar suficientemente isolado por válvulas de isolamento. Isso deve ser observado para permitir que o componente redundante trabalhe enquanto outro é substituído. Porém, nessa situação existe o risco de ocorrer uma falha repentina no componente em trabalho enquanto outro está sendo substituído, ou no caso de haver a necessidade de pleno funcionamento dos dois componentes ao mesmo tempo. Moubray (1997) sugere que essas tarefas sejam feitas em horários de menor pico de demanda do sistema ou então planejar uma parada do sistema.

As manutenções corretivas recomendadas pelo protótipo também podem requerer paradas do sistema. Entretanto, como são modos de falha sem efeitos na função principal do sistema, estes podem ser corrigidos quando houver uma parada de manutenção preventiva em outros componentes.

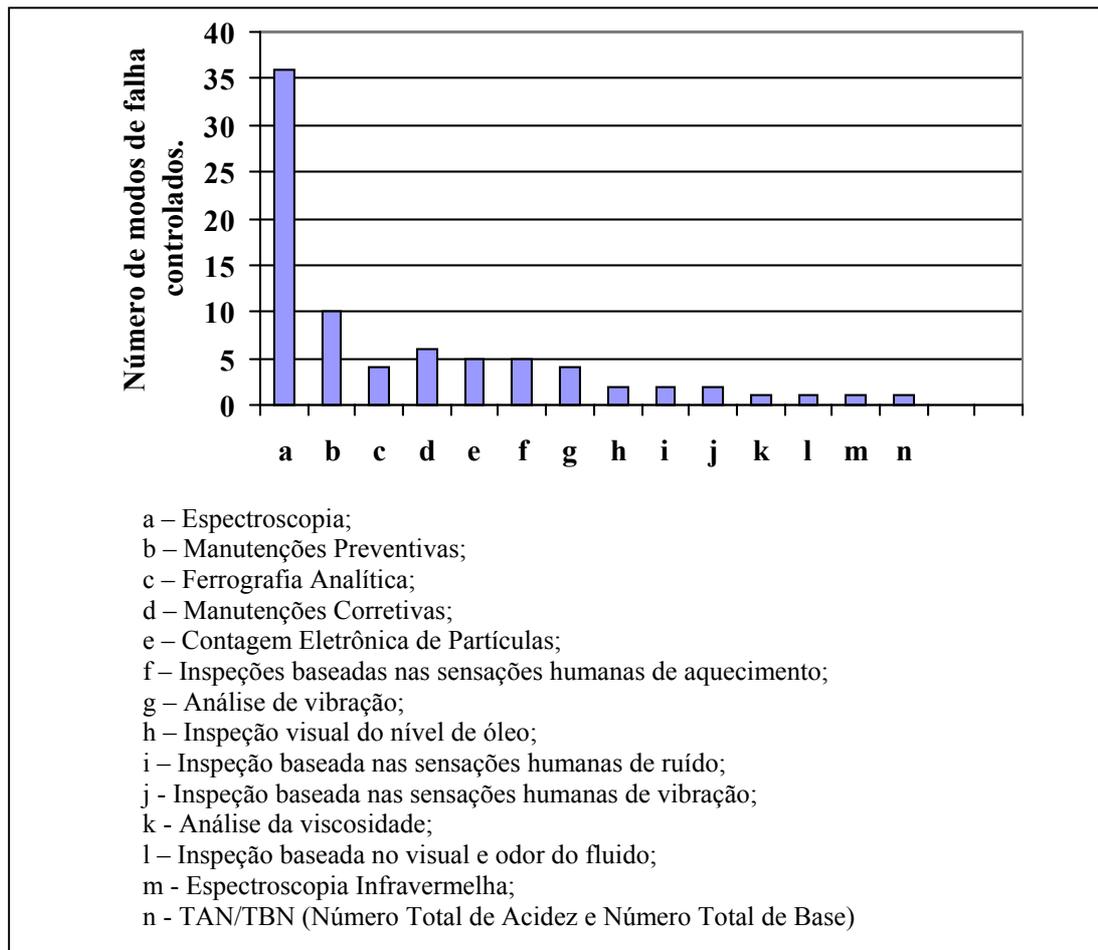


Figura 8.5 – Número de modos de falha alocados para técnicas, inspeções e ações de manutenções preventivas e corretivas.

8.3.2 – Verificação dos Resultados do Protótipo Usando Sistema com Redundância Passiva

Para este modo de operação, as abrangências das manutenções não têm contrastes tão significativos em relação aos gráficos apresentados no item 8.3.1. A maior diferença está na inserção de inspeções para certificação da disponibilidade dos componentes na redundância passiva. Outra pequena diferença é a leve redução do número de modos de falha evitados ou corrigidos pelas demais manutenções aplicadas em componentes ativos e redundantes ativos. Esses modos de falha ausentes nessas manutenções são os pertencentes aos componentes na reserva passiva que passaram a ser controlados pelas inspeções periódicas para certificação da disponibilidade. Isto pode ser observado comparando-se o gráfico da figura 8.5 com o da figura 8.6 mostrada abaixo.

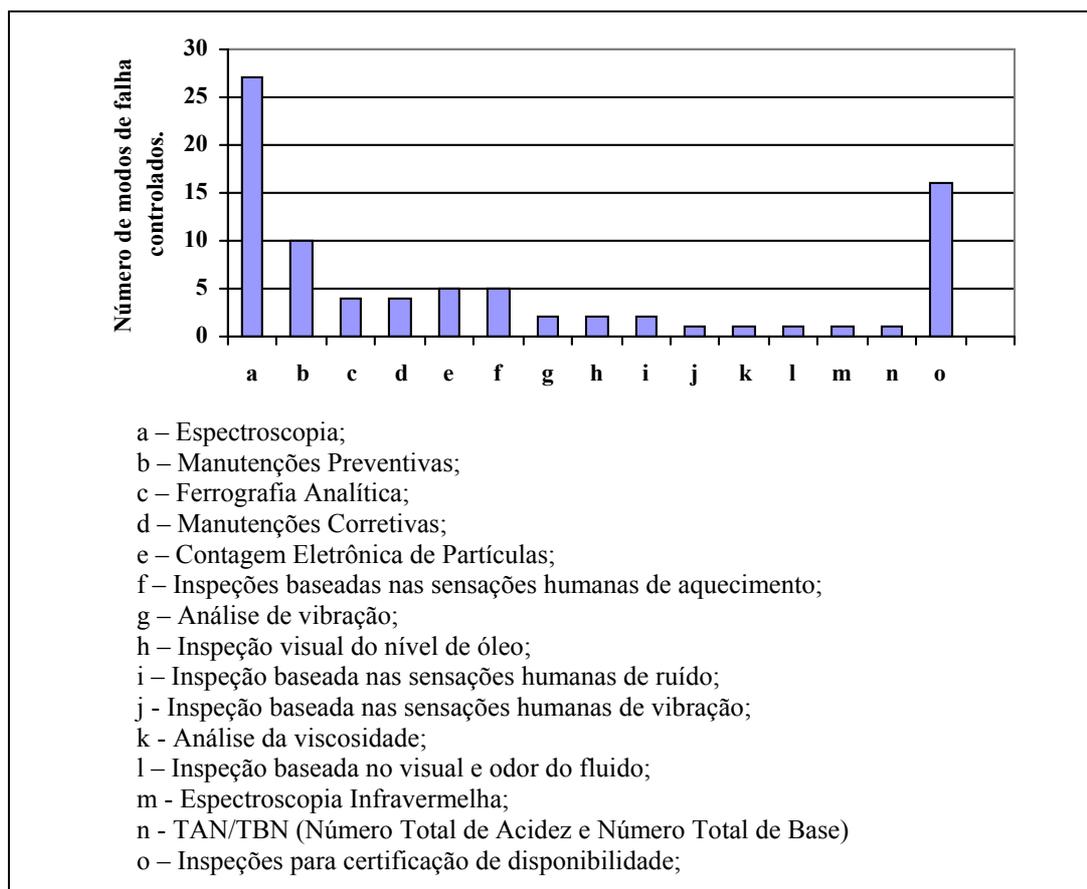


Figura 8.6 – Número de modos de falha controlados por técnicas, inspeções e por ações de manutenções preventivas e corretivas, com presença de redundâncias passivas.

Como foi visto na figura 8.6, o estabelecimento de redundância passiva para alguns componentes ajuda a reduzir o número de modos de falha e seus efeitos. Essa redução no sistema hidráulico da figura 8.1 representou uma redução de 82 modos de falha cadastrados para 66, correspondendo a quase 20% dos modos de falha eliminados ou controlados por manutenções controladas, preventivas ou corretivas.

8.4 – Validação do Especialista Avaliador

Seguindo o procedimento de validação, foram enviados ao especialista avaliador dois planos de manutenção. Um plano de manutenção foi elaborado com ajuda de um especialista experiente e o segundo plano de manutenção é o que foi inferido pelo protótipo. Esses dois planos foram submetidos ao especialista avaliador (Nunes, 2002b) cujas opiniões puderam ser separadas para validação dos resultados e validação do processo de obtenção dos resultados.

O avaliador tem 23 anos de experiência no estabelecimento e gerenciamento de manutenções em centrais hidrelétricas, além de ter sido responsável pela implementação da manutenção centrada na confiabilidade em equipamentos da usina (Nunes, 2001). Atualmente

é assessor da presidência da Binacional Itaipu e é responsável pela instalação de outras duas unidades de geração.

8.4.1 – Validação dos Resultados pelo Avaliador

O avaliador classificou o conjunto de tarefas de manutenção sugerido pelo protótipo como “muito bom”. Todavia foram solicitadas algumas alterações quanto à periodicidade de algumas técnicas de manutenção controlada como análise de viscosidade, controle de contaminantes químicos, medição de vibração, espectroscopia e contagem eletrônica de partículas. Essas modificações foram prontamente executadas, uma vez que se tratavam simplesmente de informações armazenadas no protótipo.

O avaliador também considerou a falta de ênfase para as inspeções visuais. As ocorrências de vazamentos e problemas na fixação de componentes estão geralmente associadas a diferentes modos de falha, sendo fáceis de serem detectados por inspeções visuais diárias. O mesmo ocorre com a corrosão e a falha da proteção anti-corrosiva dos componentes. Essas falhas foram consideradas e acrescentadas nas tarefas de inspeções visuais diárias, assim como foram rastreados os modos de falha com origens devido à corrosão.

Como uma observação final, o avaliador sugeriu a inserção de um ensaio operacional global periódico (Anual) após cada manutenção de vulto, isto é, após uma atividade importante que possa alterar o comportamento do regulador. Isto implica em certificar se as substituições executadas no decorrer do ano não tenham comprometido a parte comportamental do sistema com controle de malha fechada do circuito de atuação. Essas considerações foram implementadas no protótipo através de uma recomendação deste ensaio global operacional envolvendo o acompanhamento das pressões dinâmicas de abertura e fechamento dos cilindros, além de tempos totais de abertura, fechamento e amortecimento que devem estar conforme as especificações projeto. Entretanto este ensaio carece de um estudo mais aprofundado de confiabilidade e manutenibilidade, uma vez que envolve a integração de componentes hidráulicos (que vão perdendo sua capacidade de executar sua função de forma gradual segundo Fitch, 1998) e elétrico-eletrônicos (que falham de forma repentina, segundo Moubray, 2001).

8.4.2 – Validação do Processo de Obtenção dos Resultados

Quanto às razões que fizeram o protótipo selecionar as tarefas de manutenção, o avaliador (Nunes, 2002b) apresentou outras ponderações a serem acrescentadas. A princípio, o protótipo tinha o custo das multas para as falhas repentinas ou catastróficas como principal atributo para desfazer conflitos na seleção de manutenções controladas. Sobre essa tática de seleção de tarefas de manutenção, o avaliador expôs o seguinte:

Avaliador:

“ A questão de ser fixado um custo para a decisão de qual técnica de manutenção adotar me parece polêmica. Entendo que o custo-benefício associado a alguma tarefa pressupõe ser ela a mais adequada tecnicamente para bloquear um modo de falha. Ainda ao se fixar um valor não estaríamos levando em consideração o custo da oportunidade em se disponibilizar o equipamento. O meu objetivo empresarial não deveria ser deixar de pagar multa e sim perseguir a maior lucratividade. Além disso, os custos de manutenção incorridos em aplicar determinada técnica podem ser compartilhados pela aplicação dessa mesma técnica nos demais equipamentos e sistemas da instalação e também a mão de obra não é exclusiva para aquela atividade. Ocorre uma economia de escala nesse processo.”

Uma forma de atender a observação do avaliador é permitir ao usuário interagir com o protótipo na seleção das manutenções para os modos de falha. Essa interação foi implementada no protótipo e é executada no momento em que um modo de falha apresentasse mais de uma técnica de manutenção aplicável. Para ajudar o usuário nesta seleção, são mostrados dados como custo e eficiência de detecção. Essa implementação permitira a oportunidade de selecionar uma tarefa de manutenção já adotada em um outro equipamento, obtendo assim, uma economia de escala mencionada pelo avaliador.

Contudo, há modos de falha cujo início pode ser detectado por uma única técnica de monitoramento, devido à aplicabilidade, à condição monitorada e também devido à exigência de uma técnica de alta eficiência quando o modo de falha é do tipo A. Logo, vai haver situações em que se terá uma única ação de manutenção para um modo de falha e essa tarefa pode não ser aproveitada nos demais equipamentos de uma usina hidrelétrica. Diante desta limitação, foi colocado ao avaliador se não há uma priorização de equipamentos para aplicação ou adequação de técnicas mais eficientes tal como é explícito abaixo:

Engenheiro do Conhecimento:

“ Sendo o regulador de velocidade um dos principais sistemas para produção de energia elétrica, você concorda que se deve primeiro definir as técnicas e treinamento de pessoal para manutenção desses equipamentos essenciais para produção elétrica, e depois, ver se esses recursos podem ser distribuídos para os demais equipamentos ?

Outra questão que entendi no teu texto, é que as manutenções também devem garantir a lucratividade. A lucratividade de uma usina hidrelétrica está em garantir a disponibilidade, portanto, quanto menor quantidade de paradas para execução de manutenções preventivas e corretivas, maiores as chances de se ter lucro. Logo se tem a seguinte conclusão, quanto mais tarefas de manutenções preditivas (baseadas em técnicas de monitoramento ou nas sensações humanas) maiores as chances de se ter lucro, pois assim não será preciso parar o equipamento para ver um componente em especial. Você concorda com essa visão?”

Como resposta para as duas questões o avaliador fez a seguinte colocação:

Avaliador:

“ Mesmo concordando com você faço questão de destacar que minha visão coincide integralmente com a sua. A disponibilidade operativa é a missão básica da manutenção e buscar ações que minimizem os desligamentos programados e principalmente os intempestivos deve ser a busca permanente.”

Estas recomendações foram de extrema importância na validação de processo de obtenção do conhecimento em dois pontos. Primeiro, tais recomendações relativamente reforçam a seleção de técnicas para detecção dos modos de falha nos equipamentos que poderiam interromper a produção de energia elétrica, ou permitir a sua produção mas com qualidade fora do especificado. Isto permite a exclusividade de um equipamento essencial para produção elétrica em receber uma determinada técnica de manutenção sem que esta seja destinada para outros equipamentos. No entanto, com o desenvolvimento tecnológico e se fazendo as constantes atualizações do protótipo, novas técnicas surgirão e poderão ser mais abrangentes a ponto de serem aplicáveis aos demais equipamentos.

Segundo ponto é a validação da idéia de dar prioridade as manutenções controladas (técnicas de monitoramento e as baseadas nas sensações humanas) antes de adotar manutenções preventivas e corretivas.

8.5 – Aceitação do usuário

Segundo Durkin (1994), um teste final para um protótipo é saber se ele vai ser usado. Mesmo que o protótipo tenha seus méritos técnicos, pode ser facilmente esquecido pelas dificuldades encontradas pelo usuário. Para se ter noção dessas dificuldades o protótipo foi repassado para um segundo avaliador fora do escopo de conhecimento de reguladores de velocidade. O intuito era obter observações sobre o protótipo que não estivessem diretamente ligadas a sua base de conhecimento, mas sim com a validação da interface entre usuário e o protótipo. Para tanto, é necessário que o avaliador faça alguns comentários sobre o protótipo quanto à facilidade de uso, clareza das questões e apresentação dos resultados. O avaliador (Silva, 2002), apresentou as seguintes observações:

Quanto à clareza da questão:

- Na primeira pergunta, foi sugerida a inclusão de uma explicação fazendo a diferenciação entre sistema hidráulico de grande e pequeno porte. Esta inclusão permitiria ao usuário ter uma noção dos tipos de circuitos a serem apresentados como alternativas. Essa diferenciação foi implementada no protótipo através de explicações evidenciando as principais características de cada sistema.

Quanto à apresentação dos resultados e facilidade de uso:

- Fazer uma conexão entre os arquivos HTML. Essa conexão seria entre os arquivos dos circuitos hidráulicos alternativos com o arquivo que mostra a estratégia sugerida pelo protótipo. Também sugere que o arquivo dos resultados seja gravado com o nome estabelecido pelo usuário. Isto facilitaria o registro dos diferentes resultados obtidos pelo usuário. Estas duas recomendações foram implementadas com sucesso no protótipo.
- Registrar as respostas dadas pelo usuário para chegar ao resultado recomendado pelo protótipo. Esta sugestão também foi acrescentada no protótipo que armazena esses registros no arquivo de resultados.
- O protótipo tem como resultado uma tabela com uma extensa lista de componentes, modos de falha e manutenções que são gravados em um só arquivo. Para facilitar a navegação nesta tabela, foi sugerida a inserção de *hiperlinks* que conectariam cada componente listado no início do arquivo com seus respectivos modos de falha e manutenções na tabela. Assim se o usuário quiser saber sobre manutenção na bomba7, basta clicar no respectivo link que será direcionado para a linha correspondente na tabela. Esses *hiperlinks* foram

inseridos no arquivo de resultados os quais melhoraram consideravelmente a interatividade neste arquivo.

- Também foi sugerida inclusão de *hiperlinks* sobre os três tipos de modos de falha A, B e C. Esta sugestão foi atendida juntando-se os *hiperlinks* dos componentes com modos de falha tipo A em uma coluna, depois o mesmo foi feito com os *hiperlinks* dos componentes com modos de falha tipo B e C.
- Por último, foi recomendada colocação de uma opção para o usuário executar o protótipo novamente sem ter que recarregá-lo novamente. Esta recomendação foi implementada sem maiores dificuldades.

Essas foram as principais sugestões dadas pelo avaliador para interface visando melhorar a facilidade de operação do sistema e conseqüentemente sua aceitação. A implementação destas sugestões mais as modificações sugeridas pelo avaliador deram origem para uma segunda versão do protótipo, cujo processo de instalação e execução é descrito no apêndice D.

A segunda versão do protótipo é obtida através da página <http://www.laship.ufsc.br/rcmex>, cujo objetivo é obter novas sugestões tanto para melhorar a aceitabilidade, bem como para inserir novas regras e informações de especialistas na área de reguladores de velocidade.

8.6 – Validação do Especialista na Área de Projeto de Sistemas Hidráulicos Reguladores de Velocidade

Além das considerações dos especialistas na área de manutenção de reguladores de velocidade, também é imperativo saber a opinião de um especialista na área de projeto destes sistemas, uma vez que o protótipo foi destinado para fases iniciais do projeto. Para tanto, a segunda versão do protótipo (já com as modificações sugeridas pelo avaliador e usuário) foi encaminhada para o especialista na área de projeto (Sakurada, 2002) com experiência no cálculo da MTBF e projeto de unidades hidráulicas para reguladores de velocidade.

A primeira impressão do especialista foi muito positiva em relação às informações fornecidas pelo protótipo. Esse contentamento foi evidenciado em três situações onde o sistema especialista poderia contribuir e que são normalmente enfrentadas pelo projetista. A primeira situação é a potencialidade do protótipo tratar de uma variedade maior de falhas durante o projeto. A segunda é a facilidade oferecida pelo protótipo em ajudar na assistência técnica dos reguladores de velocidade. A última situação exposta pelo especialista é o

atendimento de algumas das principais necessidades do cliente que é garantir a disponibilidade do sistema a ser projetado.

A potencialidade do protótipo de tratar com uma variedade maior de falhas, que possam ocorrer no sistema hidráulico, foi colocada pelo especialista no texto a seguir:

“Durante a fase de projeto, não era dada muita preocupação com as falhas. O cuidado maior era dado para ver se os atuadores (cilindros) iriam se movimentar naquele tempo desejado. Tomava-se cuidado com relação ao aquecimento do óleo, à pressão do circuito durante a operação e também ao nível do óleo no reservatório” (Sakurada, 2002).

A constatação da ajuda proporcionada pelo protótipo na assistência técnica foi evidenciada junto com a posição do especialista sobre a importância do sistema especialista para projeto conforme exposto abaixo:

“É claro que o seu sistema especialista ajudaria na fase do projeto. Mas ele seria mais utilizado durante as assistências técnicas, que eram realizadas muitas vezes por telefone. Na verdade, o pessoal da assistência técnica não precisa do sistema especialista. Eles precisam do arquivo de resultado do sistema especialista”.

Por exemplo:

Telefonavam para mim e perguntavam: O cilindro não está se movimentando, ou está muito lento. O que pode ser? Neste momento, eu buscava o circuito hidráulico daquele projeto e realizava várias relações de causa-efeito que poderiam levar a aquele problema. Se eu tivesse o arquivo com as tabelas com os modos de falha, facilitaria o meu serviço” (Sakurada, 2002).

A contribuição do protótipo para disponibilidade do sistema hidráulico foi certificada pelo especialista na seguinte colocação:

“O arquivo de resultados do seu sistema especialista seria também muito útil para os operadores da usina. O ambiente de usina é bastante agressivo, isto é, tem muita poeira, é quente, etc. É fundamental que se tenha um programa de manutenção para as unidades hidráulicas e reguladores de velocidade para garantir a conservação do equipamento, obtendo assim uma maior disponibilidade.

Em resumo, o seu sistema especialista ajuda o projetista? Sim ajuda. O projetista usaria o programa e criaria para cada projeto um arquivo de resultados, por exemplo, “resultado.htm”. E os operadores da usina e o pessoal da assistência técnica só precisariam do arquivo com os resultados armazenados.” (Sakurada, 2002).

Além destas opiniões, o especialista sugeriu algumas implementações no protótipo que exigiriam uma nova perspectiva de estudo. Essa recomendação seria distinguir modos de falha decorrentes da má instalação do sistema, modo de falhas de ocorrência aleatória e modos de falha devido ao tempo de serviço muito longo.

8.7 – Considerações Finais

As validações do protótipo nos resultados e nos procedimentos de obtenção dos resultados não só serviram para indicar alguns pontos fracos do protótipo mas também testar suas potencialidades em relação ao uso e para abrir novas perspectivas de estudo.

As modificações solicitadas para validação dos resultados foram imediatamente implementadas. Além do mais se pensa na possibilidade de que estas modificações sejam feitas pelo próprio usuário, deixando o protótipo sempre atualizado em termos de novas técnicas de manutenção.

As razões usadas para selecionar as manutenções foram também prontamente corrigidas através de modificações nas regras de alocação de manutenções. Essas modificações contribuíram para que as manutenções sugeridas pelo protótipo estejam mais próximas de priorizar a disponibilidade, e assim aos objetivos de manter a lucratividade. Isso foi feito através da participação do usuário na seleção de manutenções que sejam aplicáveis também aos demais equipamentos de uma instalação.

As modificações sugeridas pelo avaliador deram origem para uma segunda versão do protótipo que foi testado por um especialista na área de projeto de reguladores de velocidade. Nesta última avaliação foi possível constatar o cumprimento de algumas das principais metas da validação que é a aceitabilidade do protótipo como uma ferramenta de auxílio ao projeto de sistemas hidráulicos reguladores de velocidade.

CAPÍTULO 9

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

As contribuições obtidas no desenvolvimento deste trabalho direcionam para dois escopos diferentes a saber: projeto para confiabilidade e manutenibilidade, projeto de sistemas hidráulicos assistidos por sistemas especialistas. Nestes domínios, apresentou-se inovações na sistematização e implementação de métodos para inferir ações de manutenção, notadamente, em sistemas hidráulicos de grande e pequeno porte, como o utilizado em reguladores de velocidade de turbinas hidrelétricas. Além disso, foi possível visualizar outras perspectivas de estudo além das relacionadas às inferências de manutenções nas fases iniciais de projeto. As constatações são apresentadas separadamente nos seus respectivos domínios.

a) Projeto para Confiabilidade e Manutenibilidade

A sistemática de estabelecimento de tarefas de manutenção desenvolvida neste trabalho de tese tem como contribuições a inferência de ações de manutenções pela consideração de variáveis como condição a ser monitorada, eficiência das tarefas de manutenção, aplicabilidade e o grau de comprometimento do modo de falha. Tais considerações corresponderam com a realidade dos planos de manutenção baseados nos princípios da manutenção centrada na confiabilidade. Estes princípios são aplicáveis em reguladores de velocidade, segundo Nunes (2001), e estão em contínua expansão em diversas áreas como indústria petroquímica e nuclear (conforme Pradhan, 1994).

Segundo Dias (1996), há duas possibilidades básicas de aumentar a confiabilidade: trabalhar com redundâncias e colocar sensores. A contribuição do protótipo desenvolvido nesta tese é indicar as principais técnicas de monitoramento com seus respectivos sensores para detectar modos de falha em sistemas hidráulicos. No contexto da manutenibilidade, conforme Blanchard et al (1995), a manutenibilidade pode ser medida pela quantidade de recursos monetários e ambientais necessários para execução das tarefas de manutenção. Nesse sentido, o protótipo oferece a oportunidade de prever esses recursos necessários para manter o sistema hidráulico a ser construído, tais como as técnicas de monitoramento, mão-de-obra e a periodicidade necessária para evitar paradas inesperadas.

Outra contribuição no projeto para confiabilidade e manutenibilidade é o enfoque na modelagem confiabilística para inferência de tarefas de manutenção. Através da modelagem

confiabilística baseada no método do Grupo Mínimo de Corte, foi possível distinguir grupos de corte de segunda e terceira ordem, onde podem existir componentes em *standby*. Esses componentes, na condição de *standby*, podem apresentar as chamadas falhas ocultas cujo controle é feito por inspeções periódicas com intuito de certificar a plena disponibilidade de todos componentes de um mesmo grupo de corte. Isto ajuda a detectar a possível indisponibilidade de um componente em *standby*. Essa nova abordagem se distingue do propósito original do método Grupo Mínimo de Corte cujo objetivo é calcular a confiabilidade de um sistema através de eventos de falhas definidos pelas linhas de corte. Além disso, o conhecimento sistematizado para modelagem da confiabilidade e manutenibilidade permite poupar recursos, tempo e focar manutenções aplicáveis e eficientes a fim de controlar ou eliminar falhas em componentes cujo insucesso interrompe a função principal do sistema (Vinadé et al, 2001a).

Embora ainda não calcule a confiabilidade, através do Grupo Mínimo de Corte já se pode ter uma avaliação qualitativa dos caminhos críticos e em função disso, tomar providências para aumentar a confiabilidade. Isso em si, já se constitui um auxílio ao projetista, principalmente, em relação da decisão do que monitorar e como monitorar. Deve-se, entretanto, considerar a influência dos modos de falha de efeitos não isolados que induzem parada no sistema hidráulico mesmo que o componente seja redundante. Para esse tipo de problema sugere-se adoção da teoria Bayesiana (abordada por Lee, 1999). Essa teoria consiste em calcular a probabilidade de ocorrência de um evento dado que tenha ocorrido em um outro tipo de evento. No contexto dos efeitos não isolados, isso seria calcular a probabilidade da falha do sistema hidráulico dado que tenha ocorrido um modo de falha com efeito não isolado num componente de um grupo de corte de segunda ou terceira ordem.

Análise dos modos de falhas e seus efeitos (FMEA) é recomendada por Moubray (1997), Troyer (1999), Nasa (2001) e Nunes (2001) para levantamento de todos modos de falhas a serem eliminados por ações de manutenção. Os efeitos dos modos de falhas servem de base para verificar suas conseqüências na segurança pessoal, no meio ambiente e no desempenho da função principal. Porém neste trabalho de tese, foi possível usar os efeitos como meios de controle de modos de falhas tais como os efeitos de aviso e efeitos primários (mencionados no capítulo 6 e Vinadé et al, 2001b). Estes efeitos apresentam vantagem de não precisarem parar o sistema, de não exigirem equipamentos especiais e nem pessoal altamente especializado, entretanto, deve-se levar em conta a pouca eficiência em detectar a eminência de modos de falhas com bastante antecedência de forma que ofereça tempo suficiente para planejamento e execução de ações preventivas.

Na entrevista com especialista (Nunes, 2002), constatou-se uma constante preocupação em garantir a lucratividade de um sistema na seleção de tarefas de manutenção que possam ser aproveitadas em vários equipamentos de uma usina hidrelétrica. Esta preocupação é uma nova perspectiva de estudo que poderia ser abordada pela manutenção centrada na confiabilidade, explorando ao máximo aquelas técnicas de manutenção com maior abrangência de aplicação que não exijam dispositivos caros de monitoramento e nem mão de obra muito especializada.

b) Projeto de Sistemas Hidráulicos assistido por Sistemas Especialistas

Seguindo o processo de desenvolvimento do protótipo, foram dados importantes passos para sistematização do conhecimento para inferência de tarefas de manutenção. Um destes passos foi na aquisição do conhecimento para modelagem confiabilística. Neste processo comprovou-se a potencialidade do método indutivo na facilidade de obtenção de regras para modelagem confiabilística, a partir de exemplos de circuitos hidráulicos e suas respectivas características relevantes para este processo (Vinadé et al, 2001a; Vinadé et al, 2002).

Pelo processo de validação do protótipo evidenciou-se a importância de seus resultados na atribuição de tarefas de manutenção com base nos efeitos e causas internas dos modos de falhas. Além da boa ênfase dada aos resultados, as razões usadas para emití-las puderam ser incrementadas facilmente com novas ponderações como a seleção de técnicas que fossem úteis para os demais equipamentos. Esta implementação permitiu que o conjunto de manutenções sugerido pelo protótipo estivesse mais próximo das necessidades do usuário que visa a lucratividade.

O diferencial do protótipo desenvolvido neste trabalho de tese é a recomendação de manutenções controladas e preventivas no projeto preliminar de um sistema hidráulico. Esse tipo de aplicação é desconhecido na literatura de sistemas hidráulicos sobre manutenção e projeto (Fitch, 2001; Fitch, 1998; Mitchell e Pippenger, 1997), onde já existem outros exemplos de aplicação como diagnóstico de falhas (Alves, 2001) e projeto (Silva, 1998). Com enfoque de prevenir modos de falhas mais severos, o protótipo estende a utilização de sistemas especialistas para projeto de sistemas hidráulicos com maior responsabilidade, onde não são toleradas falhas inesperadas.

Espera-se com os resultados obtidos pelo protótipo na fase de projeto preliminar, que também seja possível ter algumas perspectivas de estudo para desenvolvimento de sistemas inteligentes embarcados no próprio sistema hidráulico a ser construído. O protótipo forneceria

respostas para perguntas sobre “O que deve ser monitorado?” e “Como deve ser monitorado?” para alertar sistemas inteligentes a tomarem decisões no que concerne aos modos de falhas mais severos, principalmente evitar as falhas que implicam transgressões à segurança e agressões ao meio ambiente.

O protótipo também pode ser utilizado como uma ferramenta para auxiliar no estabelecimento de medidas ergonômicas do sistema hidráulico a ser construído. Esse auxílio seria a indicação de quais as manutenções mais frequentes e que, conseqüentemente, merecem melhor acessibilidade na estrutura física do sistema hidráulico a ser construído. A partir desta contribuição pode-se até pensar na implementação de um novo módulo no protótipo, que contenha regras para inferir medidas antropométricas conforme as exigências de uma tarefa de manutenção recomendada.

No âmbito do projeto de sistemas hidráulicos, o protótipo oferece informações relevantes, conforme opinião dos especialistas, a respeito dos modos de falhas e tarefas de manutenção para manter o sistema hidráulico a ser construído. Essas informações podem servir de comparação entre diferentes concepções físicas ou ainda podem certificar a melhora da manutenibilidade pelo menor número de tarefas necessárias, pelo menor número de recursos para execução das manutenções, etc.

Outra contribuição é o estabelecimento das manutenções baseando-se no modo de operação de cada componente e no seu posicionamento no modelo confiabilístico. As manutenções são normalmente baseadas nos manuais individuais onde as vezes não é considerado o modo de operação do componente e a influência de suas falhas nos demais, como é visto no capítulo 6.

Além destes ganhos, o protótipo oferece informações de periodicidade das tarefas de manutenção que podem ser integradas para aproveitar uma parada oportuna do sistema. Um exemplo seria execução de manutenções corretivas enquanto o sistema está parado para manutenções preventivas. Isto é possível porque a manutenção centrada na confiabilidade destina manutenções corretivas para modos de falhas que não induzem a interrupção da função principal do sistema e nem o comprometimento da segurança pessoal e ambiental.

As tarefas de manutenção sugeridas pelo protótipo também podem evidenciar a necessidade de adoção de sensores adicionais com o intuito de diminuir a atividade humana e/ou propiciar um maior controle de algum modo de falha severo. Um exemplo é a inspeção visual do nível de óleo que é recomendada ser executada diariamente. Mas essa tarefa pode ser substituída por um sensor do nível de óleo, fornecendo um monitoramento contínuo e diminuição de demanda de trabalho.

Durante o processo de validação do protótipo foi possível constatar os aspectos de modularidade e capacidade de expansão proporcionada pela modelagem orientada a objeto e regras para representar o conhecimento. Estas constatações são evidenciadas pela rápida evolução da primeira para segunda versão do protótipo. Essa evolução consistiu na inserção de regras, instâncias e atributos sem comprometer a estrutura básica do conhecimento representado pela modelagem orientada a objeto.

Com a segunda versão do protótipo, percebeu-se um alto grau de aceitação do especialista no desenvolvimento de sistemas hidráulicos reguladores de velocidade (Sakurada, 2002) como uma ferramenta de auxílio ao projeto. Esta aceitação se deve a larga variedade de modos de falhas tratados, ao processo de obtenção de manutenções aplicáveis e eficientes, bem como a participação de especialistas na área de manutenção de reguladores de velocidade (Frari, 2002; Nunes, 2002).

c) Recomendações para Trabalhos Futuros

A estratégia de manutenção sugerida pelo protótipo segue a gestão da manutenção centrada na confiabilidade. Mas existe a possibilidade de acrescentar um outro módulo com regras que sugerem tarefas conforme a gestão da manutenção para produtividade total (TPM-*Total Productive Maintenance*).

Outra possibilidade de estudo, uma vez que o protótipo trabalha com modelos confiabilísticos, é acrescentar regras que façam sugestões para melhorar a confiabilidade. Isto pode ser feito quando se dispõe de componentes ou diagramas funcionais de subsistemas na base de conhecimento que possam ser sugeridos para melhorar a confiabilidade do sistema.

O conhecimento sistematizado para modelagem confiabilística deste trabalho de tese pode ser estendido para as demais áreas de aplicação tais como sistemas pneumáticos, elétricos e eletrônicos (Vinadé et al, 2001). No entanto é bom enfatizar que os componentes elétricos e eletrônicos não apresentam uma deterioração gradual representada pela curva PF da figura 3.15. Conforme Moubrey (2001), estes componentes falham de forma repentina, sem haver uma diminuição gradual de suas respectivas condições de funcionamento. Logo, os sistemas elétricos e eletrônicos têm sua disponibilidade assegurada mais pela adoção de redundâncias do que pelas técnicas de manutenções controladas que são baseadas na condição do componente.

GLOSSÁRIO

Ativo – nesta tese é considerado como um modo de operação de um componente que existe em ação, que trabalha para ser efetivo, que tem resultados (Houaiss, 2001) para contribuir com a função principal do sistema.

Efeitos de Aviso – no contexto desta tese, este termo designa efeitos que podem ser percebidos pelas sensações humanas tais como visão, audição, tato e olfato. Os efeitos de aviso são vazamentos externos, vibrações excessivas, ruídos e aumentos excessivos de temperatura. Referências: Moubray, 1997; Mitchell e Pippenger, 1997.

Efeito Isolado – é o que não induz quebras, desgastes ou emperramentos nos demais componentes do sistema, embora possa perturbar ou parar a função principal do sistema. Quando ocorre esse efeito, basta trocar o componente que o produz para restaurar a função do sistema.

Efeito Não Isolado - é o que induz emperramento, entupimento ou maior desgaste nas partes móveis dos componentes, além de influenciarem a função principal do sistema. Esses efeitos atuam como causas externas de outros modos de falha nos demais componentes do sistema. Quando ocorre esse efeito, deve-se verificar todos os componentes do sistema para certificar que não estão em estado falha.

Efeito Primário – no contexto desta tese são aqueles relacionados diretamente com as variações de pressão e vazão e podem ser observados através de medidores como manômetros e fluxômetros. Referências: Moubray (1997).

Redundância Ativa – nesta tese é interpretada como um modo de operação do componente que não está contribuindo diretamente com a função principal do sistema mas pode assumir imediatamente a função de um componente ativo em paralelo no modelo confiabilístico, sem interrupção da atividade do sistema. Referências: Dias, 1996; Billinton e Allan, 1983.

Redundância Passiva – também conhecida como *standby* é um modo de operação do componente que não está contribuindo diretamente com a função principal do sistema e precisa ser comutado por um elemento externo para assumir a função de um componente ativo falho. Esse elemento externo pode ser o próprio pessoal de operação do sistema ou um subsistema elétrico-eletrônico (painel elétrico constituído

por sensores e comutadores ou simplesmente um controlador lógico programável).

Referências: Dias, 1996; Billinton e Allan, 1983.

Reserva – este termo é usado para identificar um componente redundante que pode assumir dois modos de operação: redundância passiva ou redundância ativa.

REFERÊNCIAS

1. AAC. **Advanced Automation Corporation**; Internet: <www.dreamscape.com/aac> Acesso em 1999.
2. ALVES, G. D. **Sistema Especialista Protótipo para Diagnóstico de Falha em um Sistema Hidráulico Naval**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. UFSC, Florianópolis, 2001.
3. ANDERS, J. **Industrial Hydraulics Troubleshooting**; Mc Graw-Hill, 1983.
4. ANEEL. **Agência Nacional de Energia Elétrica**. Resolução n. 161 de 20 de abril de 2001. Estabelece o arranjo de garantias financeiras e as penalidades vinculadas à compra e venda de energia elétrica no âmbito do Mercado Atacadista de Energia Elétrica. Disponível em <<http://www.aneel.gov.br>> Acesso em setembro 2002a.
5. ANEEL. **Agência Nacional de Energia Elétrica**. Resolução n. 318 de 6 de outubro de 1998. Estabelece penalidade sobre inexecução parcial ou total de obrigações legais e contratuais no artigo 13. Disponível em <<http://www.aneel.gov.br>> Acesso em setembro 2002b.
6. ARAÚJO, C. S.; MENDES, L.A.G.; TOLEDO, L.B. **Modelagem do desenvolvimento de Produtos: Caso Embraer – Experiência e Lições Aprendidas**. 3º Congresso Brasileiro de Gestão de Desenvolvimento de Produto. Florianópolis, SC, 25 a 27 de setembro, 2001.
7. AVSIM+. **Availability and Maintainability Simulation Software**. Item Software Corporation. Internet: <http://www.itemsoft.com/Pro_Asw.html> Acesso em 1999.
8. BACK, Nelson. **Metodologia de Projeto de Produtos Industriais**. Rio de Janeiro: Guanabara dois S.A., 1983.

9. BILLINTON, R. & ALLAN, R. **Reliability Evaluation of Engineering Systems Concepts and Techniques**. Ed. Plenum Press, 1983.
10. BLANCHARD, B. S.; FABRYCKY, W. J. **Systems Engineering and Analysis, Second Edition**. Ed. Prentice Hall, 1990.
11. BLANCHARD, B. S.; VERNA, D.; PETERSON, E. **Maintainability a Key to Effective Serviceability and Maintenance Management**. Ed. Wiley Interscience, 1995.
12. BUUR, J.A. **A Theoretical Approach to Mechatronic Design**. Institute for Engineering Design. IK Publication, Technical University of Denmark, 1990.
13. CARE BASIC TUTORIAL – Reliability Planning & Simulation Tools. BQR Reliability Engineering Ltd. Internet: <<http://www.bqr.com>> Acesso em 1999.
14. CHANG, Ching-Liang; WEI, Chiu-Chi; LEE, Yeong-Hoang. **Failure Mode and Effects Analysis Using Fuzzy Method and Grey Theory**. Kybernetes, Vol. 28, n. 9, 1999. 1072p.
15. COAD, P. & YOURDON, E. **Object Oriented Analysis**. Yourdon Press, Second Edition, 1990.
16. CRAWFORD, M.B. & J. W. ALTMAN. **Human Engineering Guide for Equipment Design, Joint Army-Navy-Air Force Steering Committee**. John Wiley, 1972.
17. DE NEGRI, V.; VIEIRA, A. **A Hidráulica e Pneumática no contexto da Mecatrônica**. Florianópolis: UFSC. Artigo técnico. Revista abhp, número 103 – mar/abr. 1997.
18. DE NEGRI, Victor J. **Estruturação da Modelagem de Sistemas Automáticos e sua Aplicação a um banco de Testes para Sistemas Hidráulicos**. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. UFSC, Florianópolis, 1996.

19. DENSON, W. **The History of Reliability Prediction**. IEEE Transactions on Reliability, Vol. 47, N^o. 3-SP, September, 1998.
20. DHILLON, B. S. **Reliability Testing: bibliography**. Microeletron. Reliab., v. 32, n. 8, p.1115-1135, 1992.
21. DIAS, ACIRES. **Metodologia para Análise da Confiabilidade em Freios Pneumáticos Automotivos**. Tese de doutorado. UNICAMP, Campinas, 1996.
22. DURKIN, J. **Expert Systems Design and Development**. Ed. Prentice Hall, 1994.
23. ESPOSITO, A. **Fluid power with applications**. 5th ed. New Jersey: Prentice Hall, 2000.
24. ELLIOT, MARGARET. **Computer Fault-Tree Construction Using a Knowledge-Based Approach**. IEEE Transactions on Reliability, vol. 43, n. 1, march, 1994.
25. FERREIRA, AURÉLIO BUARQUE DE HOLANDA. **Dicionário Aurélio Eletrônico**. Século XXI, Rio de Janeiro. Editora Nova Fronteira/Lexicon Informática, versão 3.0, 1999. CD-ROM.
26. FITCH, E.C. **Extending Component Life Through Proactive Maintenance**. Internet: <<http://www.bardyne.com/Documents/ttp02.pdf>> Acesso 1998.
27. FITCH, J.C. **Proactive Maintenance can Yield More than a 10-Fold Savings Over Conventional Predictive/Preventive Maintenance Programs**. Internet: <<http://www.maintenanceresources.com/ReferenceLibrary/OilAnalysis/ao-pm.htm>> Acesso 2001.
28. FORCELLINI, F., BACK, N. **Projeto Conceitual**. Apostila do curso de pós graduação da UFSC, 1997.
29. FRARI, D. **Entrevista concedida a Cesar Augusto do Canto Vinadé**. Entre Dois Rios-RS, Dezembro de 2001.

30. FURST, F. L. **Sistematização do Projeto Preliminar de Circuitos Hidráulicos de Controle de Posição**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. UFSC, Florianópolis, 2001.
31. GEIS, H. **Proyecto y Construcción de Equipos Hidráulicos**. Training Hidráulico, Compendio 3. Mannesmann Rexroth, pg 16-48, 1988.
32. GIARRANTANO, J. & G. RILEY. **Expert Systems – Principles and Programming**, 2nd. Ed. PWS Publishing Company, 1994.
33. GOTZ, W. - **Hidráulica, teoria e aplicações, da Bosch**. Stuttgart, Bosch, 1991.
34. HAMILTON, D. M. AND BRESLAWSKI, S. **Knowledge Acquisition for Multiple, Related Domain Expert Systems: Delphi Process and Application**, 1996.
35. HARMON, P. & KING, D. - **Expert Systems**. Ed. John Wiley, 1985.
36. HART, A. - **Knowledge Acquisition for Expert Systems**. Second Edition. Ed. McGraw-Hill, London, 1990.
37. HAWKINS, P.G.; WOLLONS, D.J. **Failures modes Effects Analysis of Complex Engineering Systems Using Functional Models**. Artificial Intelligence in Engineering, n. 12, 1998. 375p.
38. HESS, S.M.; BITER, W.J.; HOLLINGSWORTH, S.D. **An Evaluation Method for Application of Condition-Based Maintenance Technologies**. Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium, 2001. 240-245p.
39. HOUAISS, INSTITUTO ANTÔNIO. **Dicionário Eletrônico Houaiss da Língua Portuguesa**. Editora Objetiva LTDA, versão 1.0, Dezembro de 2001. CD-ROM.
40. **HYDRAULIC STANDARDS LEXICON AND DATA**. Trade and Technical Press LTDA., 1967.

41. KIDD, A. L. **Knowledge Acquisition for Expert Systems A Practical Handbook**, Ed. Plenum Press, New York, 1987.
42. LEE, H.B. **Encoding Design FMEA Casual Models as Bayesian Network Structures**. International Conference on Engineering Design, ICED 99, Munich, August 24-26, Vol 1, 1999. 165p.
43. LINSINGEN, I. - **Fundamentos de sistemas hidráulicos. Disciplina de Sistemas Hidráulicos**. Curso de Graduação em Engenharia Mecânica, UFSC, 1992.
44. LINSINGEN, I. - **Fundamentos de sistemas hidráulicos**. Editora da UFSC, Florianópolis, SC, 2001.
45. MACINTYRE, A. J. **Máquinas Motrizes Hidráulicas**. Ed. Guanabara II, 559p, 1983.
46. MARIBONDO, J. F. **Desenvolvimento de uma Metodologia de Projeto de Sistemas Modulares, Aplicada a Unidades de Processamento de Resíduos Sólidos Domiciliares**. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. UFSC, Florianópolis, 2000.
47. MATOS, F.F.C. **Metodologia para o Planejamento e Estruturação de Sistemas de Manutenção de Frota Automotiva**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. UFSC, Florianópolis, 1999.
48. MIL-STD-472. **Maintainability Prediction**. Department of Defense, Washington D.C., 1966.
49. MITCHELL, R.J. & PIPPENGER, J.J. **Fluid Power Maintenance Basics and Troubleshooting**. Ed. Marcel Dekker, 1997.
50. MONTENEGRO, F.; PACHECO, R. **Orientação a Objetos em C++**. Editora Ciência Moderna LTDA. Rio de Janeiro, 1994.

51. MORETTI, A.B. **Análise dos Modos de Falhas e Efeitos em Sistemas Hidráulicos**. Relatório de Iniciação Científica PIBIC/CNPq. Departamento de Eng. Mecânica, UFSC, 2001.
52. MOSS, M. A. **Designing for Minimal Maintenance Expense – The Practical Application of Reliability and Maintainability**. Ed. Marcel Dekker, 1985.
53. MOUBRAY, J. **Reliability-Centered Maintenance**. Second Edition. Industrial Press Inc, 200 Madison Avenue, New York, NY 10016-4078, 1997.
54. MOUBRAY, J. **Gerenciamento da Manutenção**. Palestra proferida no 16º Congresso e 11º Congresso Ibero Americano de Manutenção. ABRAMAN – Associação Brasileira de Manutenção – Florianópolis, 21 de setembro de 2001
55. NASA. **Programmable Logic Controllers (OPS-5)**. Operations and Operational Design Considerations. Recommended Techniques For Effective Maintainability. Internet: <<http://www.hq.nasa.gov/office/codeq/mtecpage/mtechniq.htm>> Acesso em 1998a.
56. NASA. **Availability Prediction and Analysis (AT-3)**. Analysis and Test. NASA TM 4628A: Recommended Techniques For Effective Maintainability. Internet: <<http://www.hq.nasa.gov/office/codeq/mtecpage/mtechniq.htm>> Acesso em 1998b.
57. NASA. **Reliability Centered Maintenance Guide For Facilities and Collateral Equipment**. Internet:<<http://www.hq.nasa.gov/office/codeq/doctree/88312d.htm>> Acesso em 2001.
58. NBR 5462. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**: Confiabilidade – Terminologia. ABNT, Rio de Janeiro, 1994.
59. NUNES, E. L. **Manutenção Centrada em Confiabilidade (Mcc): Análise Da Implantação em uma Sistemática de Manutenção Preventiva Consolidada**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. UFSC, Florianópolis, 2001.

60. NUNES, E. L. **Entrevista concedida a Cesar Augusto do Canto Vinadé**. Florianópolis-SC, Abril de 2002a.
61. NUNES, E. L. **Entrevista concedida a Cesar Augusto do Canto Vinadé por e-mail**. Florianópolis-SC, Novembro de 2002b.
62. ONS. **Operador Nacional do Sistema Elétrico**; Internet: <www.ons.org.br> Acesso em setembro de 2002.
63. OGLIARI, A. **Sistematização da Concepção de Produtos Auxiliada por Computador com Aplicações no Domínio de Componentes de Plástico Injetado**. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. UFSC, Florianópolis, 1999.
64. PAHL, G; BEITZ, W.; **Engineering Design: A systematic Approach**; Springer Verlag, 1996.
65. PALMIERI, A.C. **Manual de hidráulica básica (Albarus)**. Sétima edição, Racine Hidráulica Ltda, Porto Alegre, 1989.
66. PEASE, D. A. **Basic fluid power**. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1967.
67. PRADHAN, S. **Estratégias de Manutenção para Uma Maior Disponibilidade**; Hydrocarbon Processing; Janeiro 1994;
68. RAC. **Reliability Analysis Center, Automated Databook**. Department of Defense (DoD). CD-ROM, New York, 1999.
69. REIS, D. AND PATI, N. **Applications of Artificial Intelligence to Condition-Based Maintenance**. ERA- Revista de Administração de Empresas, Vol. 40, No. 2, pp 102-107, 2000.
70. RELEX MAINTAINABILITY **Relex Software Corporation**. Internet: <<http://www.innovsw.com/maint.htm>> Acesso em 1999.

71. RODRIGUES, L. A. H.; FURST, F. L.; DE NEGRI, V. J., SOARES, J. M. C. **Análise Teórico-Experimental de um Circuito Hidráulico de Controle de Velocidade de Turbina em Central Hidrelétrica.** XVI Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, Uberlândia, MG, 2001.
72. ROSSI, M. J. **Modernization of Our Fleet.** The Journal of the Reliability Analysis Center (RAC), pg 12-13, Second Quarter, 1999.
73. SAKURADA, E.Y. **As Técnicas de Análise dos Modos de Falhas e seus Efeitos e Análise da Árvore de Falhas no Desenvolvimento e na Avaliação de Produtos.** Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. UFSC, Florianópolis, 2001.
74. SAKURADA, E. Y.. **Entrevista concedida a Cesar Augusto do Canto Vinadé por e-mail.** Florianópolis-SC, Dezembro de 2002.
75. SILVA, J.C. AND DAWSON, D. **Knowledge Acquisition in the Context of Hydraulic System Design – a Case Study.** The Tenth Bath International Fluid Power Workshop. University of Bath, 10-12 September, 1997.
76. SILVA, J. C. **Expert Systems Prototype for Hydraulic System Design Focusing on Concurrent Engineering Aspects.** Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. UFSC, Florianópolis, 1998.
77. SMITH, A.M. **Reliability Centered Maintenance.** Ed. McGraw-Hill, 1993.
78. SANTOS, C. M. P.; COELHO, J.; DIAS, Ac. **Um Modelo para o Aumento de Produtividade do Conjunto Turbina-Gerador em Instalações Hidrelétricas.** Tese de Doutorado. 258f. UFSC, Florianópolis, 1999.
79. SOUZA, Z.; FUCH, R.; SANTOS, A. **Centrais Hidro e Termelétricas.** Editora Edgar Blücher Ltda, 01051, Cx. Postal 5450, São Paulo, 1983.
80. SPERRY-VICKERS. **Manual hidraulica industrial 935100-A.** Terceira edição, São Paulo, 1977.

81. STAMATIS, D.H. **Falure Mode and Effect Analysis, FMEA from Theory to Execution**. Ed. ASQC Quality Press, 1995.
82. TARELKO, W. **The complementary Roles of Knowledge and Data Based Systems in Design for Maintainability**. ICED 95, pg. 976-981, 1995.
83. TARELKO, W. **Knowledge Base Prototype Maintainability Design System**. ICED 99, pg. 1953-1956, 1999.
84. TROYER, D. **RCM and Oil Analysis**. TWI Press, Inc.1999. Internet: <<http://www.maintenanceresources.com/ReferenceLibrary/ezine/rcm.htm>> Acesso em 2001.
85. VINADÉ, C.A.C.; DIAS, Ac.; SILVA, J.C. **Aquisição do Conhecimento em Modelamento para Confiabilidade e Manutenibilidade de Sistemas Hidráulicos**. XVI CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA MECÂNICA, Uberlândia, 26-30 Novembro, 2001a, v. 13, n. , p. 319-328. 1 CD-ROM.
86. VINADÉ, C.A.C.; MORETTI, A.B.; DIAS, Ac; SILVA, J.C. **FMEA Aplicado no Desenvolvimento de Sistemas Hidráulicos**. CD-ROM 3º CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO DE DESENVOLVIMENTO DE PRODUTO, Florianópolis, 25-27 de Setembro, 2001b. 1 CD-ROM.
87. VINADÉ, C.A.C.; DIAS, Ac.; SILVA, J.C.; RODRIGUES, L.A.H. **Reliability Modeling of Speed-Governing Hydraulic Systems for Hydroelectric Turbines**. IFPE – INTERNATIONAL FLUID POWER EXPOSITION. Las Vegas, USA, 19-23 March, 2002. 1 CD-ROM
88. WANG, Kuo-Shong; TSAI, Yuo-Tern; LIN; Ching-Hou. **A Study of Replacement policy for Components in Mechanical System**. Reliability Engineering and System Safety, n. 58, 1998. 191p.
89. WATERMAN, D. A. **A Guide to Expert Systems**. Addison-Wesley Publishing Company, 1986.

90. WIRTH, Rüdiger; BERTHOLD, Bernd; KRÄMER, Anita; GERHARD, Peter. **Knowledge-Based Support of System Analysis for the Analysis of Failure Modes and Effects.** Enging. Applic. Artif. Intell., Vol. 9, n. 3, 1996. 219p.
91. WU, X. **Explicit Schematic Information in Knowledge Representation and Acquisition.** Expert Systems with Applications, No. 15, 1998, 215-221p.
92. YAHIA, M.E., MAHMUD, R., SULAIMAN, N. AND AHMAD, F. **Rough Neural Expert Systems.** Expert Systems with Applications, No. 18 , 2000, 87-99p.

APÊNDICE A:
PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO DE CIRCUITOS ÓLEO-HIDRÁULICOS
DE REGULADORES DE VELOCIDADE

A.1 – Circuitos de Potência de Reguladores de Velocidade

Há situações onde um circuito de potência com uma só bomba e um acumulador de óleo e ar suprem vários circuitos de regulação (Macintyre, 1983). Embora este tipo de circuito não obrigue o funcionamento permanente da bomba, que evita o aumento excessivo da temperatura do fluido, pode resultar na parada de todos circuitos de regulação a cada falha ou intervenção para manutenção no acumulador ou na bomba.

Para instalações de maior importância, a cada circuito de regulação adota-se uma bomba individual e uma válvula de alívio em funcionamento permanente. Outra opção seria uma bomba funcionando permanentemente e uma segunda bomba para casos de emergência (Macintyre, 1983). Todavia, estes circuitos empregariam bombas de vazões bem maiores e mais caras por não haver um acumulador para suprir o circuito de regulação com vazões adicionais. Um acumulador funcionando como fonte auxiliar de energia, possibilita o emprego de bombas de menor capacidade e portanto, mais baratas (Von Linsingen, 2001).

Os reguladores mais recentes e menores são equipados com circuitos de potência individuais com acumuladores hidráulicos a gás. Por serem de pressões relativamente maiores (160 a 190 bar), os componentes são menores ao ponto que acumuladores a gás são suficientes para fornecerem vazões necessárias para fechamento, abertura e fechamento (F-A-F) do servomotor (denominação do cilindro na terminologia dos reguladores de velocidade) do circuito de atuação.

Já os reguladores antigos, com baixas pressões (24 a 25 bar) e grandes vazões (de 170 a 360 l/min), exigem acumuladores bem maiores supridos por compressores de ar. Isto se deve ao fato que os servomotores são bem maiores para exercerem o ciclo F-A-F com forças elevadas através da baixa pressão fornecida.

Além disso, considerando a relevância de uma unidade de regulação no contexto geral de fornecimento de energia elétrica, os circuitos de potência podem ser constituídos por duas bombas, além do acumulador propriamente dito.

Tendo a figura A.1 como exemplo mais elaborado para circuitos de potência, pode-se estabelecer dois modos de operação. Um modo seria as duas bombas funcionando em vazio, isto é, as duas válvulas de descarga VD1 e VD2 estariam acionadas desviando o fluido de volta para o tanque. Quando o acumulador esvaziasse, a pressão do sistema diminuiria até um valor estabelecido no pressostato P1 que desativaria a válvula VD1, colocando a bomba A em carga até atingir a pressão de trabalho. Caso ocorresse a falha no pressostato P1, ou na válvula VD1 ou na própria bomba A, a pressão continuaria diminuindo até um valor estabelecido para o pressostato P2 cuja função é desativar a válvula VD2. Isto implicaria colocar a bomba B em carga e manter a pressão de trabalho. Este modo de operação caracteriza o estado de reserva ativa, onde as bombas A e B estão permanentemente acionadas, sendo que uma estaria contribuindo diretamente com carregamento do acumulador e a outra bomba estaria funcionando em vazio, num estado de prontidão ativa.

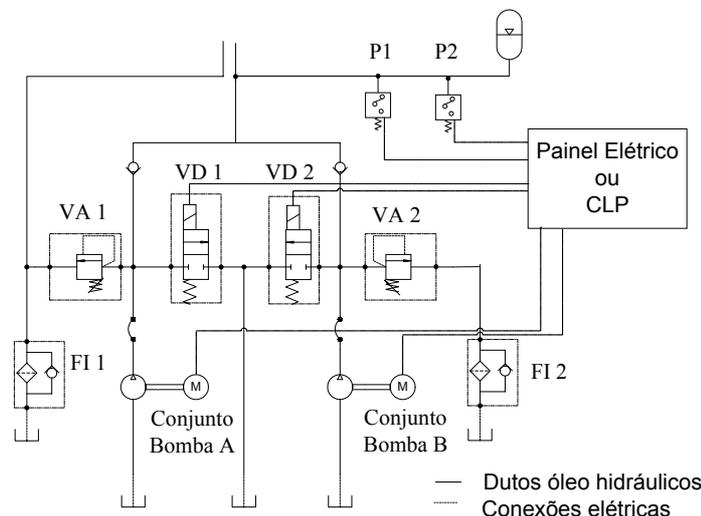


Figura A.1 – Circuito de potência para reguladores de velocidade

O outro modo de operação corresponde as duas bombas desligadas. Quando ocorrer a queda de pressão, a bomba A seria acionada e colocada em carga. Se a pressão continuasse em queda a bomba B seria colocada em carga com desativação da válvula VD2. Chegando a pressão de trabalho, as bombas seriam desligadas. Este modo de operação exemplifica o estado de reserva passiva para a bomba B, válvula VD2, pressostato P2, válvula de alívio VA2 e filtro FI2. Os componentes como bomba A, válvula VD1, pressostato P1, válvula de alívio VA1 e filtro FI1 estariam na condição ativa, embora estivessem fora de operação. Isto se baseia no fato que o acumulador não substituiria as bombas em tempo integral, pois este depende de recargas fornecidas pela bomba A ou B.

A figura A.2 ilustra o diagrama de fluxo funcional do circuito de potência da figura 2.4 para os dois modos de operação. Este diagrama busca mostrar o que cada componente faz com intuito de obter os requisitos de fornecimento de potência óleo hidráulica para circuito de regulação. A tabela A.1 mostra a função de cada componente e a respectiva referência no diagrama de fluxo funcional.

Neste mesmo diagrama está inserido o painel elétrico ou um controlador lógico programável (CLP) os quais são usados para controlar as bombas e válvulas de descarga, conforme o modo de operação assumido. O importante é salientar que o sucesso do circuito de potência depende do bom desempenho do sistema elétrico/CLP nos dois modos de operação, portanto, esta função é considerada antes da porta OU da figura A.2.

Tabela A.1. Componentes hidráulicos que compõe o sistema da figura e suas expectativas funções.

Referências	Componentes	Funções
1.0	Reservatório	Armazenar Fluido
2.0	Fluido	Transmitir Energia Hidráulica
3.0	Painel Elétrico ou CLP	Controlar bombas e Válvulas de descarga
4.0	Motor elétrico A	Converter Energia Elétrica em Energia Mecânica
5.0	Bomba A	Converter Energia Mecânica em Energia Hidráulica
6.0	Pressostato P1	Enviar sinal qdo. Pressão abaixo de Pr1.
7.0	Válvula de Descarga VD1	Desviar Fluido
8.0	Válvula de Alívio VA1	Limitar Pressão
9.0	Válvula de Retenção	Reter Fluxo Num Sentido
10.0	Filtro FI1	Filtrar Fluido
11.0	Motor elétrico B	Converter Energia Elétrica em Energia Mecânica
12.0	Bomba B	Converter Energia Mecânica em Energia Hidráulica
13.0	Pressostato P2	Enviar sinal qdo. Pressão abaixo de Pr2.
14.0	Válvula de Descarga VD2	Desviar Fluido
15.0	Válvula de Alívio VA2	Limitar Pressão
16.0	Válvula de Retenção	Reter Fluxo Num Sentido
17.0	Filtro FI2	Filtrar Fluido
18.0	Acumulador	Armazenar energia hidráulica

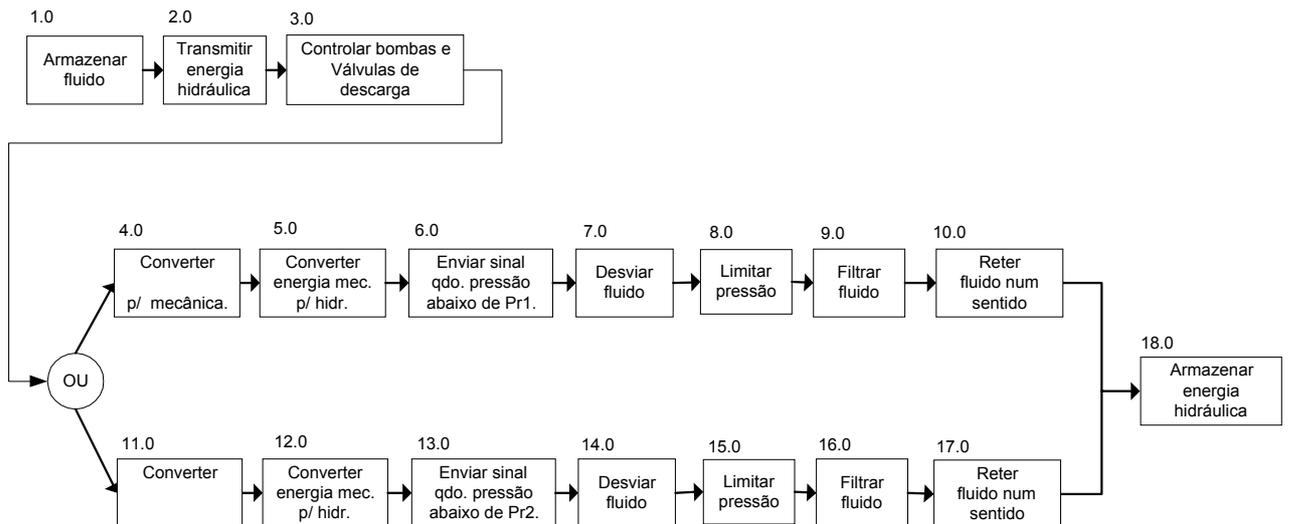


Figura A.2 – Diagrama do fluxo funcional do circuito de potência.

Há que mencionar a existência de outros dispositivos em circuitos de potência como medidores de níveis para monitorar a quantidade de fluido no sistema e termostatos para monitoração da temperatura do fluido hidráulico. Estes dispositivos são componentes de proteção e merecem maior atenção, pois sua falha representa uma consequência drástica para integridade do sistema, isto é, acarreta em falhas em diversos componentes. Logo estes dispositivos de proteção devem ser colocados em série, no ponto de vista do modelo confiabilístico

A.2 – Circuitos de Atuação dos Reguladores de Velocidade

A concepção mais simples de um regulador é baseada nos reguladores isócronos onde as rotações são mantidas constantes para toda faixa de potência gerada. Estes reguladores geram individualmente energia para uma região ou determinam a potência e rotação a ser gerada pelas demais unidades com estatismo.

Os reguladores com estatismo são os que variam a potência gerada pela turbina conforme sua rotação ou abertura para vazão. Este efeito é necessário para o regulador colocar uma turbina em funcionamento com as demais unidades de geração, visando atender uma parcela de uma demanda relativamente elevada para um só sistema gerador/turbina. Estes reguladores serão mais detalhados nos próximos itens.

Ainda neste item, são descritos os reguladores com estatismo transitório que visam controlar não só a potência, frequência elétrica gerada, mas também são responsáveis pela proteção dos dutos contra o golpe de aríete.

As demais concepções são arranjos adaptados e atualizados a partir dos três tipos de reguladores mencionados acima, sendo que alguns agregam objetivos como por exemplo, a melhora do desempenho de turbinas através do ajuste do ângulo das pás. Portanto, para melhor entender a universalidade de reguladores existentes, serão descritos desde os mais básicos (reguladores isócronos) aos dois princípios mais usados em turbinas hidrelétricas (regulador com estatismo, regulador com estatismo transitório) e depois, os de dupla regulação com demais peculiaridades.

a) Reguladores com Isócronos

Um regulador isócrono mantém a rotação da turbina independente da carga solicitada. O termo carga se refere ao torque magnético criado no gerador quando este é solicitado para demandar uma potência elétrica extra. A demanda de potência elétrica varia aleatoriamente com o tempo, tendo alguns picos em certos horários do dia. Logo o regulador isócrono deve permitir maior vazão d'água para turbina quando a carga aumenta e fechar quando a carga diminuir, sempre mantendo a rotação constante.

O modelo sucinto do regulador isócrono é mostrado na figura A.3, onde são explícitos: o pêndulo de Watt, válvula direcional e o cilindro. Na terminologia dos reguladores de velocidade, os cilindros são denominados como servomotores e são normalmente usados na movimentação de mecanismos para fechamento e abertura de passagens d'água tais como distribuidores usados em turbinas Francis e Kaplan. Em grandes instalações, onde predomina sistemas hidráulicos de pequenas pressões e grandes vazões adotam-se conjunto de válvula distribuidora e válvula transdutora, as quais serão abordadas mais adiante. No primeiro momento, o modelo da figura 2.6 tem por objetivo exemplificar o princípio de funcionamento isócrono, embora as concepções atuais sejam bem mais complexas.

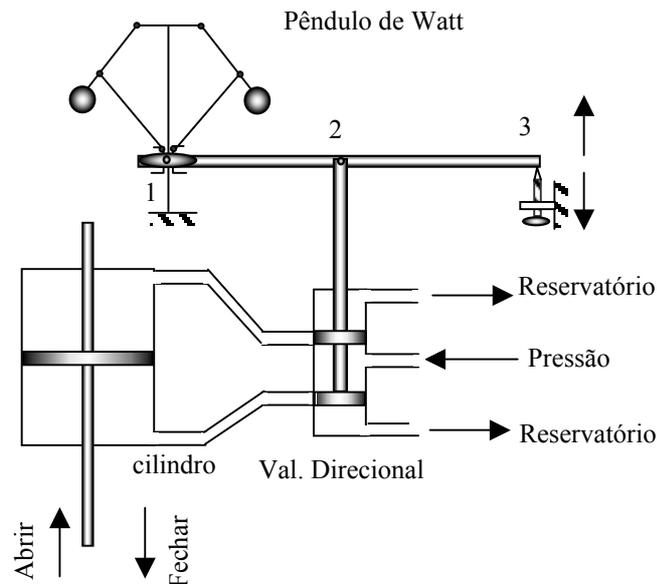


Figura A.3 – Modelo de um Regulador isócrono (Souza et al, 1983)

Supondo que o circuito da figura A.3 esteja controlando uma passagem d'água para uma turbina com rotação w , a qual recebe uma potência de entrada $Pe1$ e fornece uma potência de saída $Ps1$. Havendo uma diminuição de carga no gerador e conseqüentemente na turbina, a potência de saída cairá para $Ps2$, menor que $Ps1$. Nesta situação, a turbina tenderá acelerar uma vez que a potência de entrada $Pe1$ é maior que $Ps2$. Imaginando o pêndulo de watt conectado a turbina, o aumento da rotação provoca o afastamento das massas girantes do pêndulo devido ao efeito da força centrífuga o que causa a elevação dos pontos 1 e 2, mantendo fixo o ponto 3. Este movimento retira o carretel da válvula proporcional de sua posição central, permitindo passagem de óleo pressurizado para câmara superior do servomotor. Isto provocará um fechamento parcial da passagem d'água que reduz a potência de entrada para $Pe2$. No entanto, até chegar a potência de entrada $Pe2$, as massas girantes estariam alternadamente se afastando e aproximando até chegar a uma posição de equilíbrio. Este movimento oscilatório é transmitido para válvula direcional cujo ponto de equilíbrio corresponde a sua posição central. Esta estabilidade só ocorrerá quando a rotação voltar a condição inicial $w1$ (baseado em Souza et al, 1983). O gráfico da figura A.4 ilustra a oscilação da rotação até chegar ao estado estável.

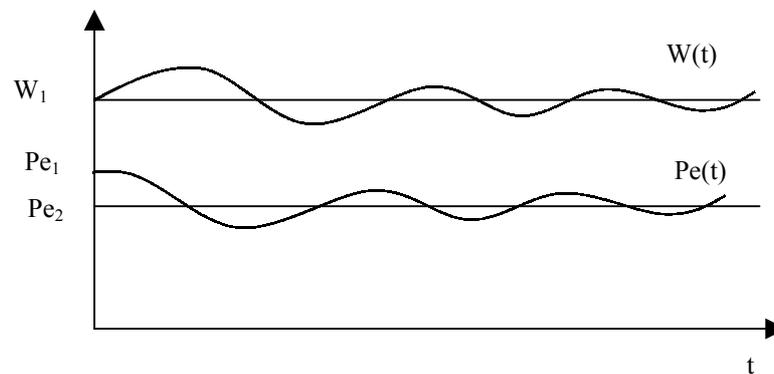


Figura A.4 – Comportamento dinâmico do regulador isócrono (Souza et al, 1983).

O modelo da figura A.3 também permite alteração da velocidade através do ajuste do ponto 3, denominado como ponto de referência. Com a elevação do ponto 3 por meio de um parafuso, terá como conseqüência a elevação do ponto 2 que forçará o servomotor deslocar no sentido de fechamento até que as massas girantes se aproximem, devido a diminuição da rotação w_1 . Isto faz o ponto 1 baixar e colocar o ponto 2 na posição original. Esta seqüência de movimentos tem como resultado o gráfico da figura A.5, onde é estabelecido um novo valor w_3 , representado pela linha tracejada.

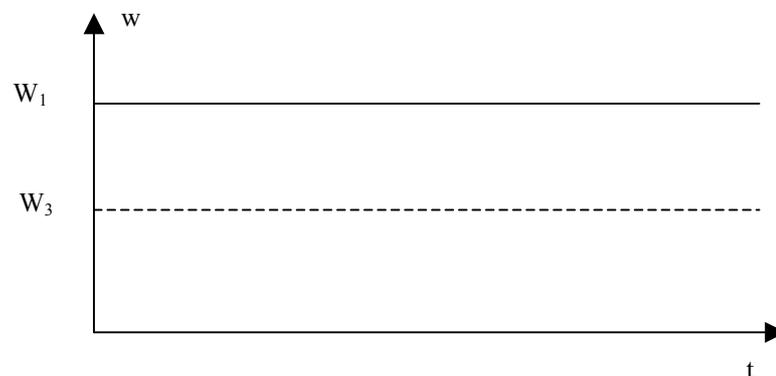


Figura A.5 – Comportamento do regulador Isócrono com modificação do ponto 3 (Souza et al, 1983).

O modelo do regulador isócrono é um bom exemplo para ilustrar o princípio de funcionamento, porém não pode ser ligado a um sistema de potência ou a um outro regulador isócrono. Um sistema de potência constituído por várias máquinas comporta-se tal como uma grande máquina com um regulador isócrono, formando uma linha horizontal infinita no gráfico $w \times t$ (definido como barramento infinito), com mesma freqüência para qualquer faixa de potência de saída. A colocação de um regulador isócrono em paralelo com sistema de

potência é factível, igualando-se o ponto de referência com a frequência de referência do sistema. Entretanto, para qualquer pequena variação na frequência do sistema, o regulador isócrona não encontrará um ponto de intersecção que estabeleça uma potência de saída e uma frequência com o novo deslocamento do barramento infinito (figura A.6). Isto fará com que o regulador feche ou abra totalmente a admissão da turbina, não encontrando um ponto de operação, com uma potência de saída definida (Ler Souza et al, 1983).

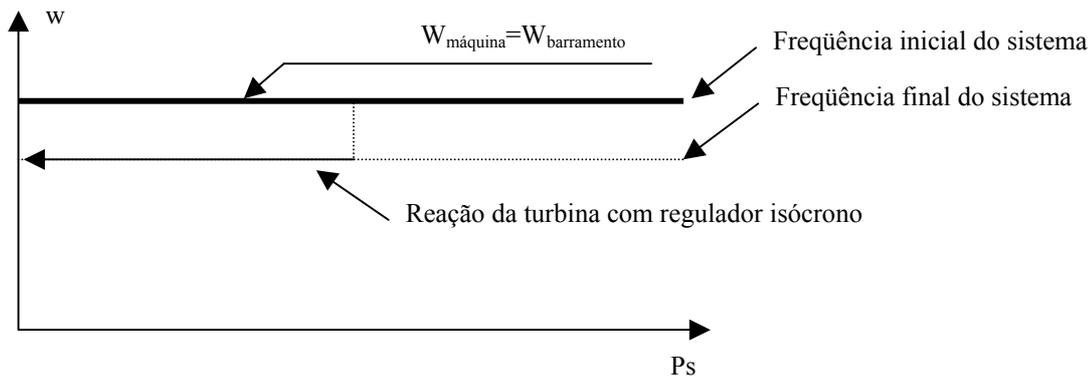


Figura A.6 – Operação de uma máquina com um regulador isócrona em paralelo com barramento infinito (adaptado de Souza et al, 1983).

Portanto, o regulador isócrona é aconselhado para ser usado como fonte única de geração ou para ditar uma frequência ao sistema.

b) Reguladores com Queda de Velocidade ou Estatismo Permanente

Os reguladores com queda de velocidade têm o princípio de funcionamento semelhante ao mecanismo mostrado na figura A.7. Este mecanismo oferece estatismo no momento do aumento ou diminuição da potência solicitada pela rede de consumo. Quando ocorre uma diminuição de carga na turbina, a sua rotação aumenta e é transmitida ao pêndulo de Watt cuja reação é elevar as massas e o ponto 1 da figura A.7. Com isto, elevam-se os pontos 2 e 3, mantendo-se o ponto 4 fixo. Com a elevação de 3, desloca-se a válvula direcional, fazendo o cilindro atuar em um bico injetor (turbina Pelton) ou distribuidor (no caso de turbinas Francis ou Kaplan) que diminuirá a vazão de água para turbina. Com o movimento do cilindro, o ponto 4 desloca-se para baixo, puxando o ponto 3 e fazendo com que a válvula direcional volte para posição fechada. Esse mesmo movimento do cilindro também abaixa o ponto 1 deixando-o numa posição diferente da posição inicial. Isto implica deixar numa rotação diferente da inicial, isto é, em torno de 3 a 5% acima da inicial e com potência menor para

evitar o disparo da turbina, conforme a demanda solicitada. Estas variações de rotação geram o estatismo desejado.

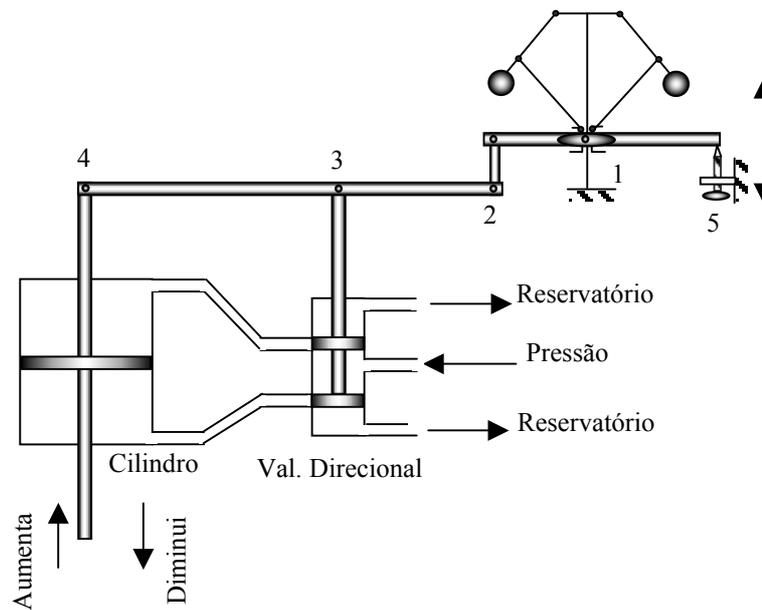


Figura A.7 - Regulador com queda de velocidade (Souza et al, 1983)

A figura A.8 mostra o comportamento dinâmico do regulador com estatismo descrito no parágrafo anterior, onde W_1 é a rotação inicial junto com a potência de entrada Pe_1 enquanto que W_3 é a rotação final com a potencia final de entrada Pe_3 .

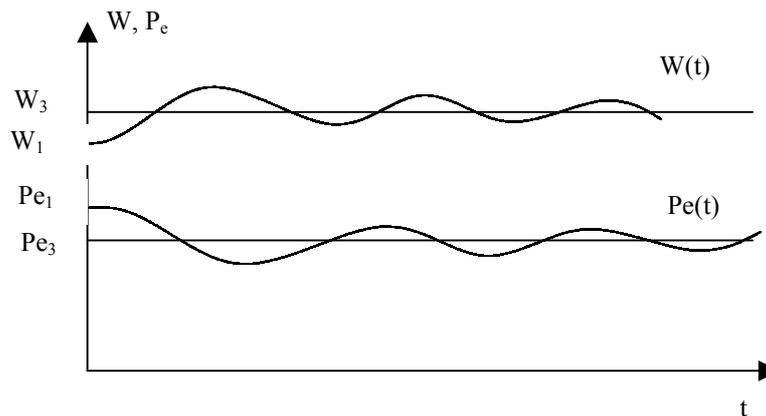


Figura A.8 – Comportamento dinâmico do regulador com estatismo (Souza et al, 1983).

O trabalho em paralelo com um sistema de potência é iniciado igualando-se a rotação da turbina em vazio com a frequência do sistema, por meio da elevação do ponto 5. Elevando-se este ponto, estaremos deslocando para cima o ponto 1, sem elevar o ponto 3 da válvula direcional. Isto implica que o cilindro não se movimentará, e conseqüentemente a carga é

de fluxo funcional, no entanto deve-se ter o cuidado com a representação, pois cada bloco pode ilustrar um efeito de um circuito com vários componentes. A não constatação deste detalhe pode acarretar na omissão de um componente relativamente relevante para o desempenho da função principal do sistema. Observando a figura A.10 com o diagrama de blocos do regulador da figura A.7, é possível notar que o primeiro bloco representa o efeito combinado de dois componentes: pêndulo de Watt e a alavanca 51. Interpretando o restante do diagrama de blocos, percebe-se o interesse nas principais variáveis do sistema como os deslocamentos: ΔX_{32} - corresponde ao deslocamento da posição 3 devido ao movimento de 2; ΔX_{34} - deslocamento do ponto 3 devido ao movimento de 4; ΔX_3 - corresponde ao movimento resultante do ponto 3; Δy e ΔP_s - estas variações correspondem respectivamente ao deslocamento do servomotor e potência de saída.

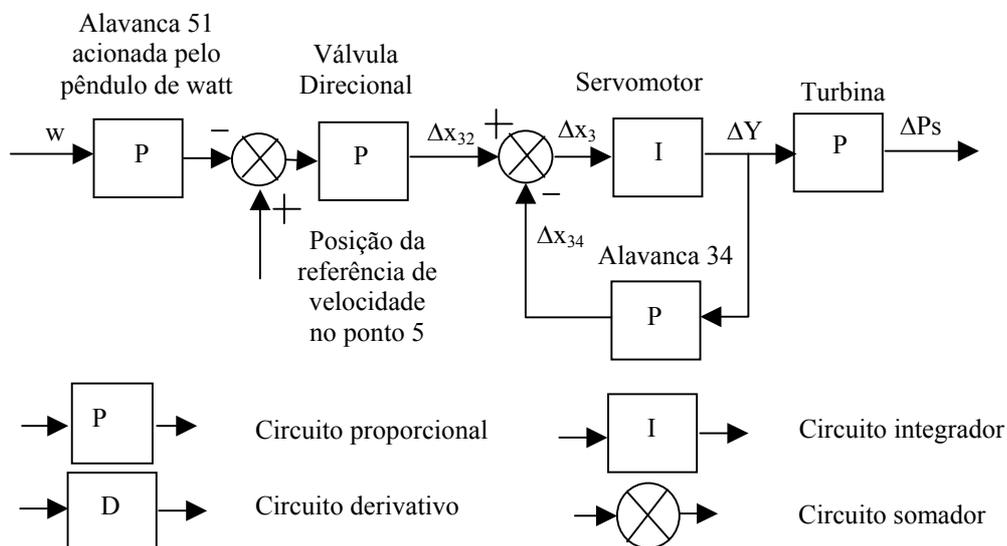


Figura A.10 - Diagrama de blocos do regulador de queda de velocidade e os símbolos convencionais (Baseado em Souza et al, 1983).

O diagrama de fluxo funcional deduzido da figura A.10 tem uma peculiaridade de uma linha de retorno entre o servomotor e a alavanca 34. Isto foi a forma utilizada para caracterizar uma malha fechada, onde o sinal de entrada e o sinal realimentado (que neste caso corresponde a ação proporcional do movimento Δx_{34}), é repassado para válvula direcional de modo a reduzir o erro e trazer a saída do sistema a um valor desejado.

O regulador de queda de velocidade tem as funções de seus componentes discriminados na tabela A.2 e o diagrama de fluxo funcional resultante é mostrado na figura A.11.

Tabela A.2 – Funções, Entradas e Saídas dos componentes do regulador de velocidade

Componentes	Referência	Diagrama de fluxo funcional		
		Função	Entrada(s)	Saída(s)
Pêndulo de Watt	1.0	Elevar proporcionalmente a alavanca 51 conforme rotação	-x-	Alavanca 51
Alavanca 51	2.0	Transmitir e movimento proporcional para alavanca 34	Pêndulo de Watt	Alavanca 34
Alavanca 34	3.0	Transmitir proporcionalmente movimento da alavanca 51 e do servomotor	Servomotor Alavanca 51	Válvula direcional
Válvula direcional	4.0	Direcionar fluido proporcionalmente ao deslocamento ΔX_3	Alavanca 34	Servomotor
Servomotor	5.0	Converter energia óleo hidráulica em energia mecânica	Válvula direcional	Alavanca 34 Turbina
Turbina	6.0	Converter energia hidráulica em energia mecânica	Servomotor	-x-

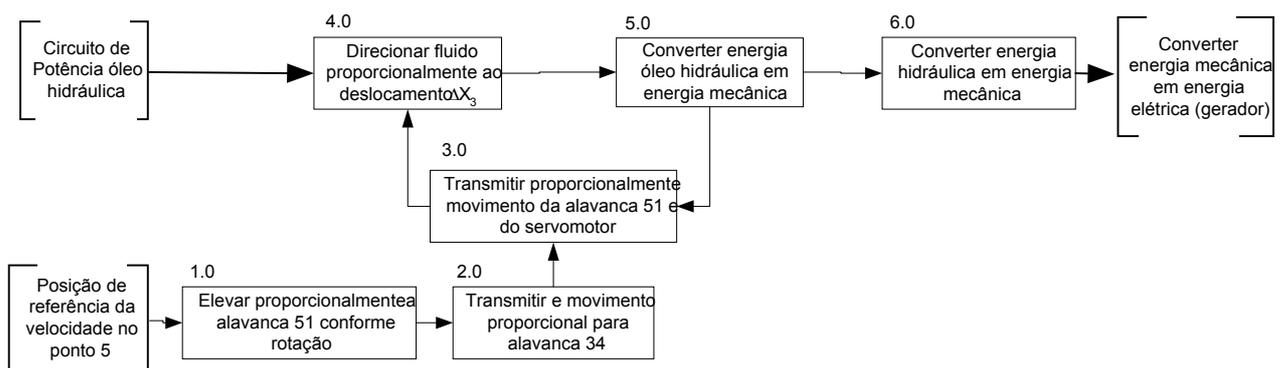


Figura A.11 - Diagrama de fluxo funcional do regulador de queda de velocidade.

Uma outra consideração a ser feita na elaboração do diagrama de fluxo funcional é a modernização dos referidos reguladores para melhorar a qualidade de energia elétrica fornecida, através da produção de estreitas faixas de variação da frequência (Rodrigues et al, 2001; Pons et al, 1999). Como foram mencionados anteriormente, os reguladores de velocidade são interligados com os reguladores de outras turbinas, constituindo um sistema de potência maior, responsável pelo fornecimento de energia para demanda de uma região. É sabido que a demanda de consumo de energia varia aleatoriamente e obriga o sistema de potência a retirar ou recolocar em carga algumas unidades para responder ao consumo requerido. Uma forma de monitorar o consumo de energia é a alteração da rotação das turbinas em carga. Sendo assim, um regulador de velocidade deve ter uma sensibilidade mínima de constatar variação de rotação devido a oscilações no consumo de energia elétrica, e

também, devido a falha de uma outra unidade de geração dentro do mesmo sistema de potência. A falha inesperada do regulador gera um débito de potência para demanda de energia, e conseqüentemente, resulta em diminuição da rotação nas demais turbinas do sistema.

Conforme as normas internacionais e exigências atuais de qualidade de energia (CESP, 1979), essa sensibilidade é 0,01% da frequência da rede elétrica e está diretamente relacionada com a rotação das turbinas. A obtenção deste requisito só é possível com a implementação de dispositivos eletrônicos para recebimento de velocidade de referência, controle da válvula direcional e sensoriamento da posição do servomotor.

Um outro requisito também obtido por dispositivos eletrônicos é a estabilidade de frequência e de potência. Estes parâmetros oscilam com amplitudes admissíveis em torno de valores desejados, apesar de qualquer tipo de perturbação. Quanto mais estável o regulador, menor é a amplitude de oscilação na frequência e na potência nominais (CESP, 1979).

Considerando as modernizações, os reguladores de queda de velocidade adotam dispositivo eletrônico tipo P (controlador) com realimentação negativa. A letra P representa o efeito proporcional do dispositivo eletrônico e o termo de realimentação negativa (que pode ser visto na figura 2.13 nos diagrama de blocos) indica o tipo de resposta do dispositivo que é diminuir a tendência de aumento da rotação da turbina através do fechamento do bico injetor ou distribuidor. Assim o controlador do tipo P procura manter estatismo desejado de w_0 a w_1 , após a queda de potência na demanda, com auxílio de um transdutor de posição do servomotor para realimentação do controlador. Em suma, o controlador relaciona uma posição do servomotor para cada frequência de referência solicitada, e fica mantendo esta posição sob qualquer tipo de perturbação com intuito de garantir rotação e potência desejadas. Diante destas implementações, o novo diagrama de fluxo funcional é descrito na tabela A.3 e ilustrado na figura A.12.

Tabela A.3 – Funções, Entradas e Saídas do regulador de velocidade com controlador P.

Componentes	Referência	Diagrama de fluxo funcional		
		Função	Entrada(s)	Saída(s)
Válvula direcional	1.0	Direcionar fluido proporcionalmente ao deslocamento ΔX_3	Controlador Proporcional 1 Circuito de potência óleo hidráulica	Servomotor
Servomotor	2.0	Converter energia óleo hidráulica em energia mecânica	Válvula direcional	Transdutor Turbina
Transdutor	3.0	Medir posição real do servomotor	Servomotor	Controlador Proporcional
Controlador Proporcional	4.0	Realimentar com sinal proporcional da posição real do servomotor e comparar com a posição desejada do servomotor para obter frequência de referência.	Transdutor	Válvula Direcional
Turbina	5.0	Converter energia hidráulica em energia mecânica	Servomotor	Gerador

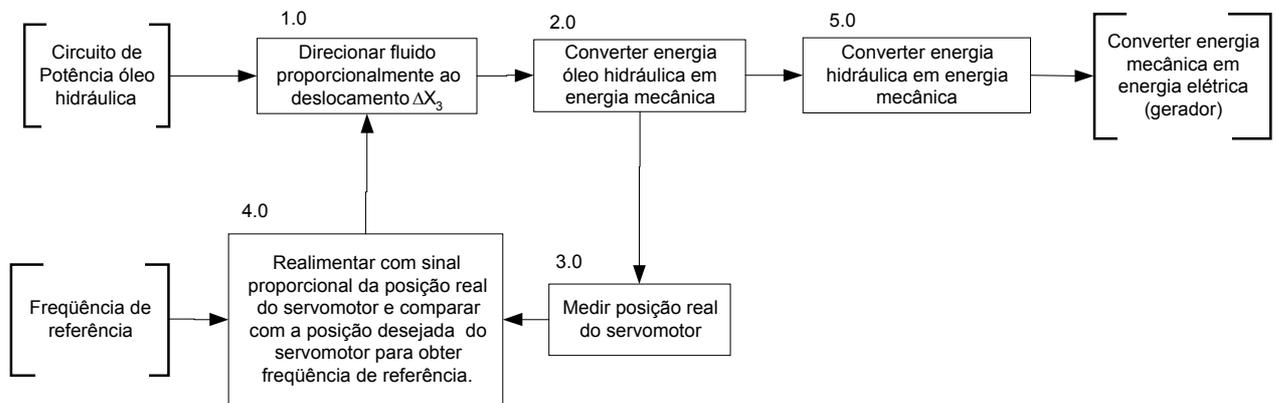


Figura A.12 - Diagrama de fluxo funcional do regulador de queda de velocidade com controlador proporcional.

c) Reguladores com Estatismo Transitório

Em determinados tipos de turbinas, a atuação rápida do regulador pode ser prejudicial aos dutos de instalação devido ao golpe de aríete. Para evitar este tipo de problema foi desenvolvido o regulador com estatismo transitório cuja diferença está no emprego de dois

estágios de controle da rotação da turbina. Quando ocorre um desvio de rotação na turbina, o circuito responde primeiro com um estatismo transitório e permanente, e depois de um certo tempo, resta somente o estatismo permanente. Esta seqüência é executada pelo circuito da figura A.13.

O regulador com estatismo transitório pode ser melhor entendido exemplificando-se dois modos de operação. O primeiro modo de operação é idêntico ao regulador da figura A.7, desde que o registro *r* do amortecedor da figura A.13 encontra-se fechado, evitando transferência de óleo de uma câmara para outra. Desta forma, quando diminui a carga da turbina, a rotação aumenta e o ponto 2 da figura A.13 sobe, puxando consigo os pontos 3,4 e 7. Com essa seqüência de movimentos, a válvula direcional é puxada fazendo com que o cilindro feche o distribuidor.

Com movimento do cilindro, o ponto 8 é deslocado para baixo fazendo com que a válvula direcional volte para posição central. Esta seqüência de movimentos é semelhante ao regulador de queda de velocidade, onde o cilindro fecha a válvula direcional, mas também abaixa os pontos 6, 5 e 4. Tal como mencionado por Souza et al (1983), o circuito apresenta um segundo caminho para fechar a válvula direcional.

Abrindo o registro *r*, o ponto 5 é abaixado e o ponto 6 sobe imediatamente. No entanto existe o efeito da mola no ponto 5 que puxa o êmbolo fazendo o óleo da câmara superior passe para a câmara inferior, até que a carcaça com o ponto 6 chegue a posição original. O deslocamento do ponto 6 é transitório e influencia os pontos 4 e 7. Logo, assume-se um estatismo transitório e permanente enquanto o ponto 6 é deslocado. Após este movimento o circuito adota o estatismo permanente.

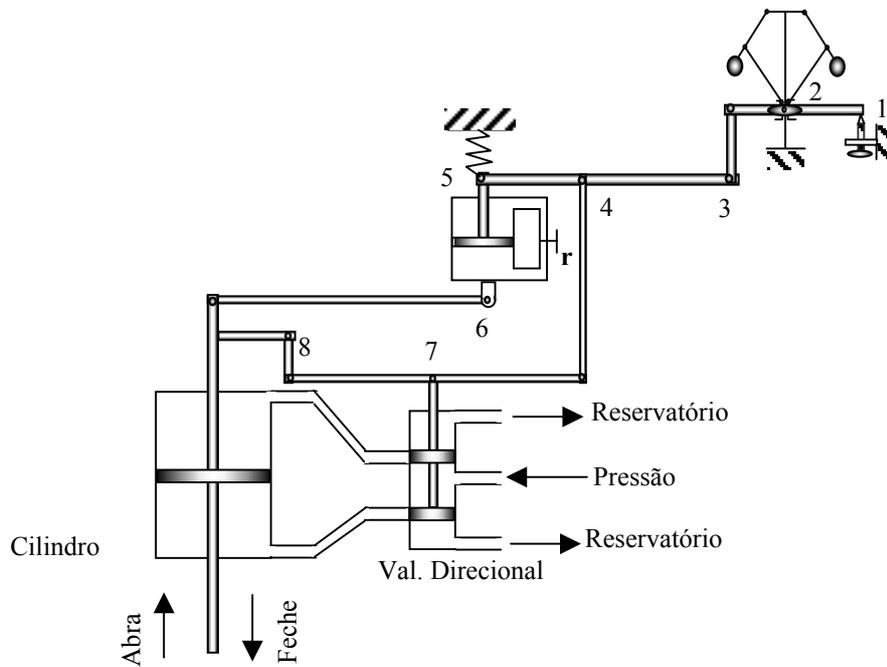


Figura A.13 - Regulador com estatismo transitório (Souza et al, 1983)

Observando este comportamento no gráfico da rotação em função da potência da figura A.14, constata-se duas retas: uma de estatismo inicial (transitório e permanente) e outra com estatismo final (permanente). Supondo a turbina fornecendo uma potência P_1 com uma rotação w_1 . Ocorrendo uma queda de potência de P_1 para P_2 , a rotação seguiria a reta do estatismo inicial de w_1 até w_2 , no entanto, essa tendência vai desaparecendo e o sistema irá estabilizar-se em w_3 .

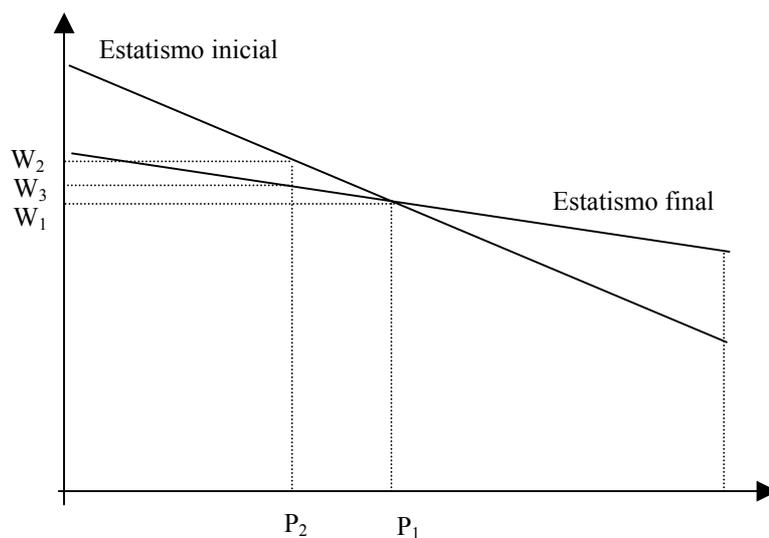


Figura A.14 - Comportamento de um regulador com estatismo transitório (Souza et al, 1983).

O diagrama de blocos do referido regulador, na figura A.15 apresenta uma segunda realimentação além da atuação proporcional das alavancas 4, 7 e 8 . Esta segunda

realimentação seria a parte transitória com amortecedor entre os pontos 5 e 6 cujo efeito é derivativo. Este efeito consiste num atraso na resposta na válvula proporcional. Isto evita uma reação rápida por parte do regulador que reduz consideravelmente o comprometimento dos dutos de instalação em grandes níveis de queda d'água.

A configuração apresentada na figura A.13 tem um objetivo didático e é desatualizada em relação as novas tendências tecnológicas provenientes das exigências de sensibilidade e estabilidade. Para tanto, a realimentação no regulador de estatismo transitório é feito por controlador do tipo PD, onde a letra D representa o efeito equivalente ao amortecedor, que confere o estatismo transitório. O efeito D consiste na derivada da posição do servomotor cujo resultado é um sinal retardado com realimentação negativa com intuito de chegar na posição desejada. A ação derivativa ora realimenta com sinal nulo quando ocorre picos de deslocamento, ora realimenta com sinal máximo contrário (realimentação negativa) quando ocorre máxima taxa de variação de deslocamento, proporcionando assim, maior estabilidade.

Considerando a inserção de um controlador do tipo PD o diagrama de fluxo funcional (figura A.17) não apresenta diferenças significantes em relação ao regulador de queda de velocidade. Isto se deve ao fato que o controlador agrega funções das alavancas, do amortecedor e do pêndulo de watt. Através da tabela A.4 é possível ver as funções dos referidos componentes agregados ao controlador PD.

Tabela A.4 – Funções, Entradas e Saídas do regulador de velocidade com controlador PD.

Componentes	Referências	Diagrama de fluxo funcional		
		Função	Entrada(s)	Saída(s)
Válvula direcional	Ref.: 1.0	Direcionar fluido proporcionalmente ao deslocamento ΔX_{73}	Controlador Proporcional	Servomotor
			Circuito de potência óleo hidráulica	
Servomotor	Ref.: 2.0	Converter energia óleo hidráulica em energia mecânica	Válvula direcional	Transdutor
				Turbina
Transdutor	Ref.: 3.0	Medir posição real do servomotor	Servomotor	Controlador Proporcional
Controlador Proporcional e Derivativo.	Ref.: 4.0	Realimentar com sinal proporcional e derivada da posição real do servomotor e comparar com a posição desejada para obter frequência de referência.	Transdutor	Válvula Direcional
Turbina	Ref.: 5.0	Converter energia hidráulica em energia mecânica	Servomotor	Gerador

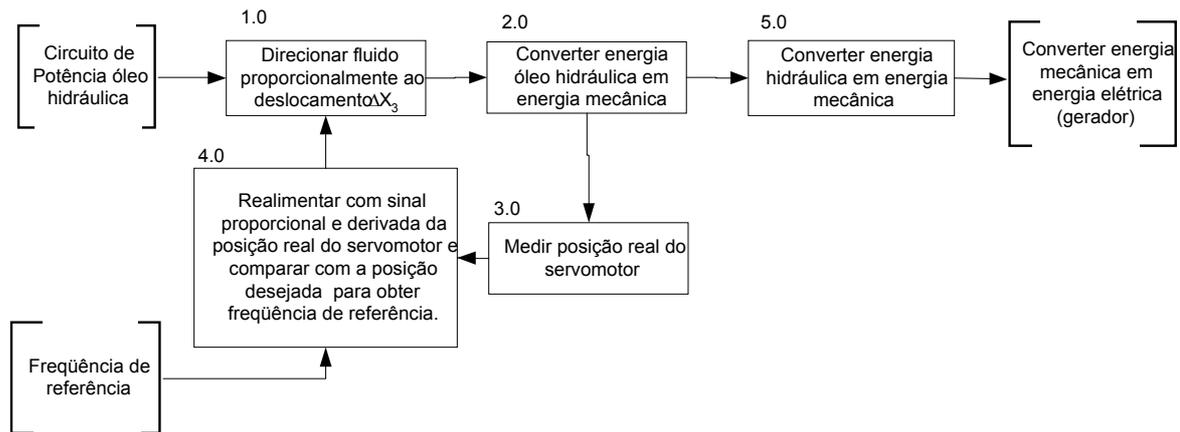


Figura A.17 - Diagrama de fluxo funcional do regulador de estatismo transitório com controlador proporcional derivativo.

d) Reguladores com Dupla Regulagem e demais Peculiaridades

Conforme Souza et al (1983), os reguladores em geral apresentam estatismo e estatismo transitório em virtude das características de instalação, independentemente do tipo de turbina utilizada (Pelton, Francis, Kaplan e outras). Estas características de instalação às vezes obrigam a dupla regulagem devido ao tempo de resposta d'água na tubulação e ao aumento do rendimento da turbina.

O tempo de resposta d'água na tubulação ou tempo de inércia d'água é um valor relacionado com a facilidade da água, confinado em dutos, em responder a uma alteração de vazão solicitada pela máquina (Souza, et al, 1983). Quando este valor é maior que 1 segundo, o uso de dupla regulagem é imperativo. Isto obriga um regulador a ter um servomotor de fechamento lento de passagens d'água, com objetivo de evitar o golpe de aríete, e outro mecanismo ou servomotor para desviar a vazão da turbina. Isto geralmente ocorre em turbinas Pelton que apresentam um servomotor para controlar a vazão através do bico injetor e um segundo servomotor para desviar o jato d'água através de um defletor. O defletor de jato é usado junto com o bico injetor quando a turbina está partindo, parando ou em estado de emergência tal como a rápida queda de consumo de energia elétrica o que acaba fazendo a turbina aumentar sua rotação repentinamente. Mas em operações normais, apenas o bico injetor trabalha com regulagens precisas.

Supondo uma turbina Pelton seja controlada por dupla regulagem: um circuito para regular o bico injetor e outro para o defletor de jato. Ambos os circuitos podem usar controladores. Com esta configuração, os circuitos atuam de forma simultânea quando a

rotação da turbina está fora da faixa recomendável para frequência de referência. O diagrama de fluxo funcional do referido regulador é ilustrado na figura A.18 e tabela A.5.

Tabela A.5 – Componentes hidráulicos do regulador de velocidade com dupla regulação.

Referências	Componentes	Funções
1.0	Válvula Direcional Proporcional	Direcionar fluido com movimento proporcional conforme sinal do controlador
2.0	Servomotor do bico injetor	Converter energia óleo hidráulica em deslocamento do bico injetor
3.0	Transdutor de posição	Medir posição real do servomotor do bico injetor
4.0	Controlador	Realimentar com sinal elétrico a posição real do bico injetor e comparar com a posição desejada para obter a frequência de referência.
5.0	Turbina Pelton	Converter energia potencial em energia mecânica.
6.0	Válvula direcional Proporcional	Direcionar fluido com movimento proporcional conforme o sinal do controlador
7.0	Servomotor do defletor de jato	Converter energia hidráulica em deslocamento do defletor
8.0	Transdutor de posição	Medir posição real do servomotor do defletor
9.0	Controlador	Realimentar com sinal elétrico a posição real do defletor de jato e comparar com a posição desejada para obter a frequência desejada.

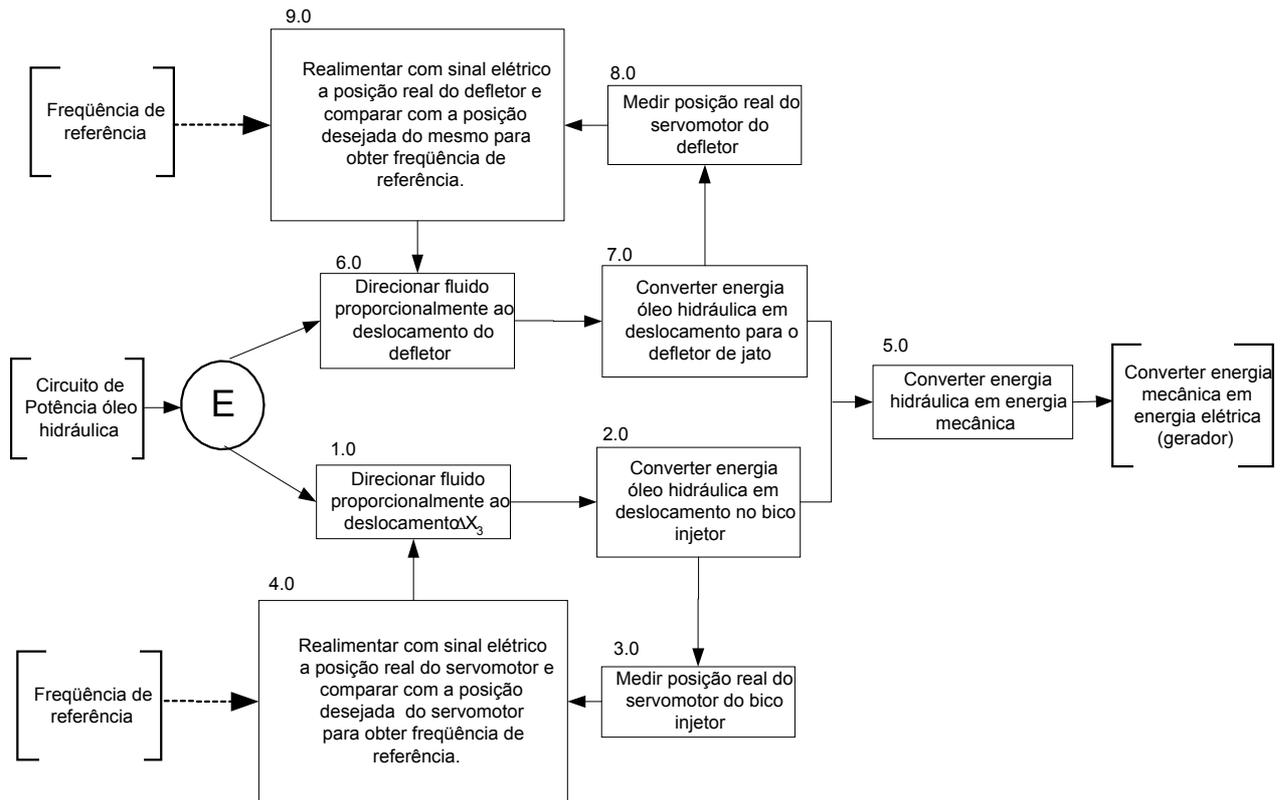


Figura A.18 - Diagrama de fluxo funcional do regulador de queda de velocidade com dupla regulagem.

Em alguns casos, em pequenas usinas hidrelétricas, as turbinas Francis podem ter um tempo de inércia d'água que requerem dupla regulagem. Isto consiste de um circuito de atuação para o distribuidor (anel de Fink) que controla a vazão e um outro mecanismo ou circuito para válvula bypass, a qual é destinada para situações de emergência tal como aumento repentino da rotação da turbina. Nesta situação, os dois circuitos funcionam de forma conjugada: quando o distribuidor fecha, a válvula bypass abre, o que evita o golpe de aríete. Em operação normal, apenas o circuito do distribuidor trabalha para manter a função principal. Logo o circuito de controle de vazão é protegido pela válvula bypass tal como as turbinas Pelton com dupla regulagem.

As turbinas do tipo Kaplan usam dupla regulagem com o propósito de melhorar o rendimento hidráulico. Este tipo de sistema apresenta um circuito de atuação para controlar a vazão e outro para posicionamento das pás. Ambos trabalham de forma seqüencial pois a cada posição do distribuidor (dispositivo que controla a vazão) há um ângulo ótimo das pás para melhor rendimento (Rodrigues et al, 2001).

Além da regulagem dupla, outra característica a ser observada em usinas hidrelétricas de grande porte é o uso de válvulas distribuidoras. Os circuitos com estas válvulas trabalham com três componentes principais: válvulas proporcionais, válvulas distribuidoras e o servomotor (Rodrigues et al, 2001). A válvula direcional proporcional recebe um sinal em forma de tensão que é convertido em um deslocamento no carretel, permitindo a passagem de óleo para deslocar o carretel da válvula distribuidora. Esta válvula libera a passagem de vazões maiores para o servomotor atuar no deslocamento das pás (figura A.19 e tabela A.6).

Tabela A.6 – Componentes Hidráulicos de reguladores de velocidade com controle de vazão e de posição de pás.

Referências	Componentes	Funções
1.0	Válvula Direcional Proporcional	Direcionar fluido com movimento proporcional para acionar válvula distribuidora
2.0	Válvula Distribuidora	Converter pequenas vazões em grandes vazões
3.0	Transdutor de Posição	Medir a posição real da válvula distribuidora
4.0	Controlador	Controlar posição da válvula distribuidora através da válvula direcional.
5.0	Servomotor	Converter energia óleo hidráulica em deslocamento das pás
6.0	Transdutor de Posição	Medir posição real das pás
7.0	Controlador	Controlar posição das pás através do controlador 4.0.

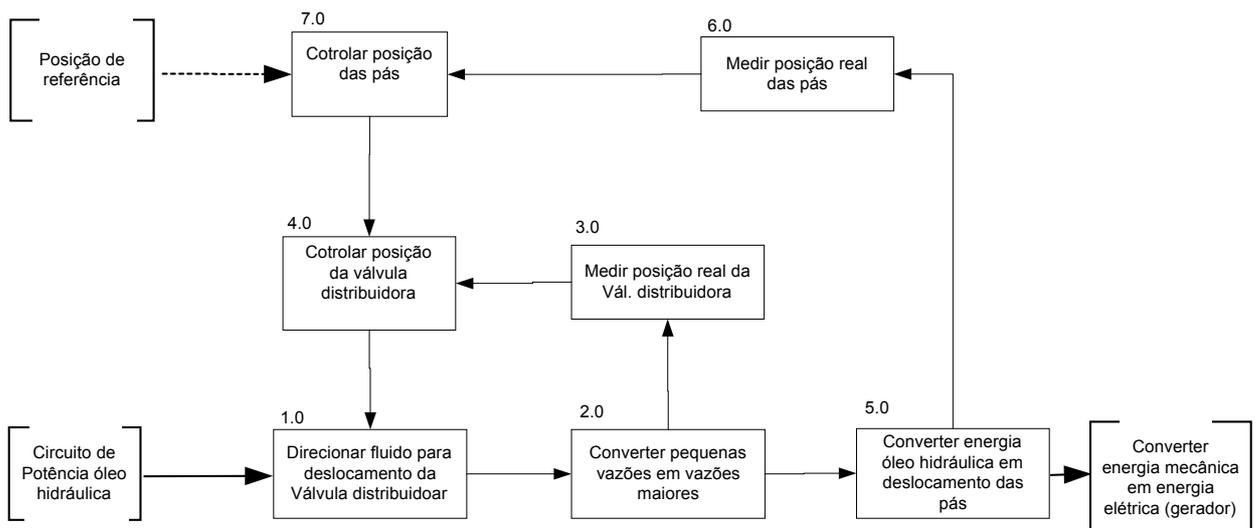


Figura A.19 - Diagrama de fluxo funcional do circuito de controle da posição das pás.

O uso destes circuitos é justificado em instalações antigas, onde existem servomotores de grandes dimensões com vazões maiores e baixa pressão. Nestas instalações, a válvula direcional teria que ser bem maior se fosse ligada diretamente ao servomotor, o que acarretaria em um componente mais caro. Redução de custos e modernização destas instalações são feitas através da adoção de controladores digitais e válvulas distribuidoras, visando melhorar a sensibilidade e estabilidade destes circuitos.

**APÊNDICE B:
RELAÇÃO IDADE CONFIABILIDADE E
EXPLORAÇÃO DE IDADE**

B.1 – Cálculo da Confiabilidade Baseado no Tempo de Serviço

Neste anexo é dado o conceito de confiabilidade no ponto de vista matemático. A confiabilidade é tratada como uma função dependente do tempo t.

A confiabilidade pode ser definida como a probabilidade que um componente, sistema ou produto desempenhará de forma satisfatória a sua função num período de tempo, quando operado sob condições especificadas. A função confiabilidade, R(t), pode ser expresso como:

$$R(t) = 1 - F(t) \quad (1)$$

$$R(t) = 1 - \int_0^t f(t) \cdot dt \quad (2) \quad \text{ou}$$

$$R(t) = \int_t^{\infty} f(t) \cdot dt \dots\dots\dots(3)$$

- Onde: $f(t)$ – função densidade de probabilidade de falha;
- $F(t)$ – Função acumulada de probabilidade de falha;
- $R(t)$ – Função Confiabilidade;

A função densidade de probabilidade de falha $f(t)$ é a probabilidade do item falhar no tempo t, enquanto que a função cumulativa de falha $F(t)$ é a probabilidade do item irá falhar até o tempo t. A função $R(t)$ pode ser interpretada como a probabilidade do componente funcionar com sucesso até tempo t, uma vez que $R(t)$ é o complemento da função $F(t)$.

Assumindo a função de densidade de falha $f(t)$ como exponencial, considerando a taxa de falha (λ) constante, a função confiabilidade é expressa na seguinte forma:

$$R(t) = \int_t^{\infty} \lambda e^{-\lambda \cdot t} \cdot dt \quad (4)$$

$$\lambda = \frac{1}{MTBF} \quad (5)$$

$$R(t) = e^{-\lambda \cdot t} \quad (6)$$

- Onde: λ - taxa de falha;
- MTBF – Tempo médio entre falhas (*Mean Time Between Failure*)

Nos componentes mecânicos a taxa de falha varia com tempo nas fases iniciais do ciclo de vida, onde são realizadas varias modificações no projeto para diminuir a taxa de falha em níveis admissíveis. Na fase de utilização, a taxa de falha é considerada constante. A fase final de operação do item é caracterizada pelo aumento progressivo da taxa de falha, indicando a fase de desgaste ou envelhecimento. Estas três fases do ciclo de vida do item formam um gráfico conhecido como curva da banheira, conforme é mostrado na figura B.1.

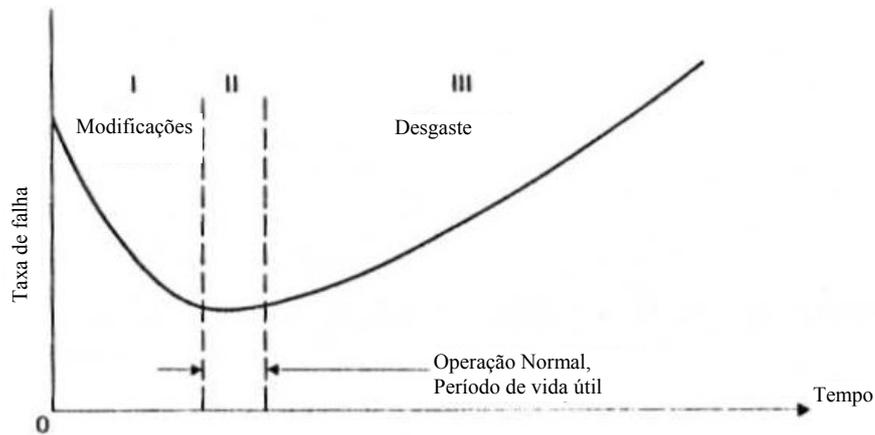


Figura B.1 - Curva da banheira de componentes mecânicos.

A fase de maior interesse é a vida útil do componente com taxa de falha constante, onde assume-se uma função exponencial para função $f(t)$. Portanto a função de densidade de falha é expressa:

$$f(t) = \lambda \cdot e^{-\lambda \cdot t} \quad (7)$$

A probabilidade cumulativa de falha da exponencial corresponde a:

$$F(t) = \int_0^t \lambda \cdot e^{-\lambda \cdot t} \cdot dt = 1 - e^{-\lambda \cdot t} \quad (8)$$

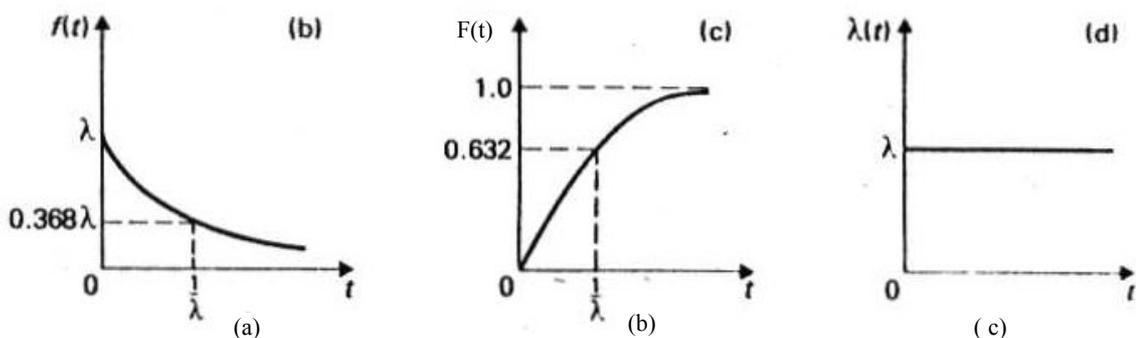


Figura B.2 - Funções Exponenciais da Confiabilidade. (a) Função densidade de probabilidade de falha. (b) Distribuição cumulativa da probabilidade de falha. (c) Taxa de falha x tempo.

Através da função cumulativa de falha $F(t)$ pode-se definir quando devem ser executadas as tarefas de manutenções preventivas. Estas informações são suficientes para estabelecimento de intervalos entre as manutenções preventivas. Com a função cumulativa de falha de uma população de modos de falha, pode-se selecionar um intervalo entre tarefas a partir do seu conhecimento estatístico, determinando o nível de risco deste modo de falha ocorrer com o usuário. Por exemplo, determinando-se um risco 0.1% ($F(t)=0,001$) ao usuário de um componente com taxa de falha $\lambda=1 \times 10^{-6}$ falhas/horas. Substituindo-se esses valores na equação 8 e isolando a variável t , o intervalo entre as manutenções é de aproximadamente 1000 horas. No entanto, o risco de falha é acumulado a cada operação de manutenção, tendo-se 100% de ocorrência de falha após execução de mil substituições. Portanto, deve-se assumir intervalos para manutenções preventivas bem menores, com baixíssimo risco ao usuário. Deves salientar que neste caso não foi levada em conta a probabilidade de falha humana cujo risco é maior quanto maior o número de intervenções humanas.

Torna-se importante enfatizar que não é uma prática recomendável adotar um intervalo entre as manutenções igual ao tempo médio entre falhas (MTBF – Mean Time Between Failures). Isso porque o MTBF corresponde ao inverso da taxa de falha ($1/\lambda$), cujo o risco do componente já ter falhado é de 63,2 %, conforme mostrado no gráfico da função cumulativa da probabilidade de falha (figura B.2 b).

B.2 – Exploração de Idade

Quando não se dispõe de uma relação idade confiabilidade, deve-se pensar na manutenção baseada na condição (CD, manutenção preditiva) ou baseado na inspeção (FF, inspeção) aplicando a técnica Exploração de Idade, abordada por Smith (1993).

A técnica Exploração de Idade consiste primeiramente determinar um parâmetro de medida para identificar o grau de desgaste do componente ou que indique o prenúncio de falha. Estes parâmetros podem ser monitorados por sensores (manutenção baseada na condição - CD) ou através de inspeções e testes (FF) antes do funcionamento do sistema. A medida que o prenúncio de falha não aparece, vai se registrando as medidas dos parâmetros e o tempo decorrido. Uma vez que os parâmetros saem dos limites tolerados, caracterizando o prenúncio de falha, faz-se o registro definindo como tempo de falha. Executando esta técnica para uma coleção de componentes similares, torna-se factível a criação de uma função densidade de probabilidade de falha e estabelecer uma manutenção baseada no tempo (TD), isto é, manutenção preventiva.

Esta técnica também é usada em componentes cujo intervalo de troca recomendado pelos fabricantes é muito curto, resultando um alto custo ao usuário. A empresa United Airlines estendeu o intervalo de manutenção das bombas hidráulicas dos seus aviões de 6000 horas para 14000 horas, utilizando a técnica Exploração de Idade (Smith, 1993).

**APÊNDICE C:
ANÁLISE DOS MODOS DE FALHA E
SEUS EFEITOS (FMEA)**

C.1 – Análise dos Modos de falha e seus Efeitos

Seguindo as definições e determinações do item 3.5 do capítulo 3, o FMEA foi feito baseando-se em catálogos, manuais de manutenção e livros de diagnóstico de falha descritos no item A.3. A tabela do FMEA foi montada apresentando as colunas de componentes, funções, modos de falha, efeitos e as causas que podem ser internas ou externas. As causas externas ajudam identificar modos de falha com efeitos não isolados enquanto que as causas internas é útil identificar as condições a serem monitoradas como desgaste, corrosão, desalinhamento, desbalanceamento, etc. Os efeitos além de ajudarem a identificar o tipo de comprometimento de um modo de falha também ajudam na predição de uma falha eminente como os efeitos primário e de aviso.

C.2 – Abreviaturas usadas:

CI - Causas internas: são causas oriundas de: Falhas de itens internos de componentes devido a defeitos de fabricação e uso intensivo (desgaste);

CE – Causas Externas: são causas oriundas de: Falha induzida por modos de falha de outros componentes; Falha devido a manutenção imprópria; Falha no projeto do sistema; Falha de operação;

MF – Modo de Falha;

C.3 - Referências bibliográficas utilizadas:

ANDERS, J. - Industrial Hydraulics Troubleshooting; Mc Graw-Hill, 1983.

ESPOSITO, A. - Fluid power with applications. 5th ed. New Jersey: Prentice Hall, 2000

GOTZ, W. - Hidráulica, teoria e aplicações, da Bosch. Stuttgart: Bosch, 1991.

HYDRAULIC STANDARDS LEXICON AND DATA. Trade and Technical Press LTDA., 1967.

LINSINGEN, I. - Fundamentos de sistemas hidráulicos. Disciplina de Sistemas Hidráulicos. Curso de Graduação em Engenharia Mecânica, UFSC, 1992.

MITCHELL, R.J. & PIPPENGER, J.J. – Fluid Power Maintenance Basics and Troubleshooting. Ed. Marcel Dekker, 1997.

PALMIERI, A.C. - Manual de hidráulica básica (Albarus). Sétima edição, Racine Hidráulica Ltda, Porto Alegre, 1989.

PEASE, D. A. - Basic fluid power. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1967.

RAC – Reliability Analysis Center, Automated Databook. Department of Defense (DoD). CD-ROM, New York, 1999.

SPERRY VICKERS - Manual hidráulica industrial 935100-A. Terceira edição, São Paulo, 1977.

Componente	Função	Modos de falha	Efeitos	Causas
<p>Válvulas Controladoras de Vazão</p>	<p>Regular ou controlar o fluxo de fluido (vazão) do sistema e consequentemente a velocidade e estabilidade de movimentação dos atuadores. - Nº de Funções: 1</p>	<p>1)Fornecimento de vazão instável , i.e. vazão oscilante (para as controladoras de vazão);</p> <p>2)Fornecimento de vazão anormal (fora dos requisitos desejáveis) ;</p> <p>3)Perda de carga excessiva.</p>	<p>1.1) Perda de precisão no posicionamento dos atuadores;</p> <p>1.2)Velocidade do atuador instável;</p> <p>1.3)Fonte de vibração no sistema;</p> <p>1.4)Oscilação da pressão no sistema.</p> <p>2.1)Perda da precisão de posicionamento dos atuadores;</p> <p>2.2)Velocidade anormal dos atuadores;</p> <p>2.3)Alteração da pressão normal de trabalho;</p> <p>3.1)Aumento excessivo da temperatura (redução da viscosidade do fluido);</p> <p>3.2)Queda do rendimento do sistema;</p> <p>3.3)Insuficiência de pressão nos atuadores;</p> <p>3.4)Parada ou movimentação lenta dos atuadores</p>	<p>1.1)Variação na queda de pressão no orifício de controle (as controladoras de vazão possuem compensação de pressão): a)mola do compensador com defeito (Fadiga-CI); b)vazamento interno excessivo no compensador de pressão (CE-Fluido: MF1) ; c)entupimento do orifício do estrangulador (CE-Fluido:MF3; Filtro:MF1 ou MF2); d)vias piloto obstruídas (CE-Fluido:MF3; Filtro:MF1 ou MF2); e)Emperramento do carretel do compensador de pressão (CE-Fluido:MF3; Filtro:MF1 ou MF2); f)Fornecimento de vazão irregular (CE-Bomba:MF1 ou Acumulador: MF1);</p> <p>2.1)Ajuste inadequado do estrangulador (CE-Manutenção imprópria);</p> <p>2.2)Variação na temperatura (CE-Reservatório:MF1);</p> <p>2.3)Variação na viscosidade (CE-Fluido:MF1,MF4);</p> <p>2.4)Mola do compensador com defeito (Fadiga-CI);</p> <p>2.5)Bomba / acumulador fornece vazão anormal(CE-Bomba:MF1 ou Acumulador: MF1);</p> <p>2.6)Filtro entupido (CE-Filtro:MF3);</p> <p>2.7)Linhas de passagem obstruídas (CE-Fluido:MF3; Filtro:MF1 ou MF2);</p> <p>3.1)Área da redutora de vazão muito pequena (queda de pressão muito acentuada)(CI)</p> <p>3.2)Viscosidade do fluido muito elevada(CE-Fluido:MF2);</p>

Componente	Função	Modos de falha	Efeitos	Causas
Válvulas Controladoras de Pressão	Influir na pressão do sistema em uma instalação ou parte dela de um modo definido pré-determinado. Nº de Funções: 1	<p>1)Válvula provoca insuficiência de pressão;</p> <p>2)Válvula causa pressão excessiva;</p> <p>3)Válvula não mantém pressão estável (para as redutoras de pressão).</p>	<p>1.1)Insuficiência de pressão nos atuadores;</p> <p>1.2)Parada ou movimentação lenta dos atuadores;</p> <p>2.1)Golpes de pressão;</p> <p>2.2)Maior desgaste dos componentes do sistema;</p> <p>2.3)Aumento excessivo da temperatura (maior perda de carga);</p> <p>3.1)Perda da precisão no posicionamento dos atuadores;</p> <p>3.2) Velocidade do atuador instável;</p>	<p>1.1)Elementos de controle falham ao mover-se: a)Emperramento do carretel (CI ou CE-Fluido:MF3); b)dreno ou passagens piloto bloqueadas (CE-Fluido:MF3; Filtro:MF1 ou MF2); c)elementos de vedação danificados (desgaste-CI); d)mola danificada(Fadiga-CI); e)desgaste excessivo do obturador e/ou sua sede (da válvula piloto)(desgaste-CI);</p> <p>2.1)Elementos de controle falham ao mover-se: a)Emperramento do carretel(CE-Fluido:MF3; Filtro:MF1 ou MF2); b)dreno ou passagens piloto bloqueadas(CE-Fluido:MF3; Filtro:MF1 ou MF2); c)elementos de vedação danificados(desgaste-CI); d)mola danificada(Fadiga-CI);</p> <p>3.1)Movimentação instável dos elementos de controle: a)Ar dentro da válvula(CE-Fluido:MF4); b)Emperramento do carretel b.1)sujeira no fluido (CE-Fluido:MF3; Filtro:MF1 ou MF2); b.2)temperatura fora da faixa de operação (CE-Reservatório:MF1);</p>
Válvulas de retenção	- Nº de Funções: 1	<p>1)Válvula não funciona (ou opera parcialmente)</p> <p>2)Válvula causa pressão anormal</p> <p>3) Vazamento na válvula(atraves da vedação)</p>	<p>1.1)Elementos de controle falham ao se mover apropriadamente</p> <p>1.2)Pressão de retorno excessivo</p> <p>1.4)Fluxo excessivo</p> <p>2.1)Vazamento externo</p> <p>3.1) Pressão não é mantida</p> <p>3.2) Vazamento externo</p>	<p>3.1)Elementos de vedação danificados (incompatibilidade com o fluido-CE ou desgaste-CI)</p>

Componente	Função	Modos de falha	Efeitos	Causas
Fluido hidráulico	Transmitir potência; Lubrificar partes móveis; Dissipar calor; Remoção de agentes contaminantes; Vedar as folgas entre as peças. Nº de Funções: 5	1)Viscosidade baixa; 2)Viscosidade elevada; 3)Excesso de partículas contaminantes; 4)Ar no fluido. 5) Oxidação do Fluido 6) Água no fluido	1.1)Perda do poder lubrificante; 1.2)Aumento de vazamentos internos (bomba, cilindro); 1.3)Aumento de vazamentos externos (perdas pelas vedações e folgas); 2.1)Aumento da resistência ao escoamento (aumento das perdas por atrito); 3.1)Maior desgaste dos componentes do sistema; 3.2)Emperramento ou entupimento de componentes (nas folgas entre partes móveis) 4.1)Variação na compressibilidade (variação na pressão do sistema); 4.2)Cavitação na bomba 4.3)Perda do poder Lubrificante; 5.1)Maior Desgaste dos componentes do sistema; 5.2)Acúmulo de sujeira mais freqüente de sujeira; 6.1)Perda do Poder Lubrificante; 6.2)Redução da Viscosidade do fluido; 6.3)Maior desgaste dos componentes do sistema;	1.1)Aumento excessivo da temperatura (perda de carga excessiva em partes do sistema) (CE- Reservatório:MF1); 1.2)Fluido de trabalho inadequado (CE - Manutenção imprópria) ou (CI) óleo inadequado; 1.3)Água no fluido (CE- Reservatório:MF5) 2.1)Temperatura do ambiente muito baixa (CE- Falha induzida pelo ambiente de trabalho) ; 2.2)Fluido de trabalho inadequado (CE - Manutenção imprópria) ou (CI); 3.1)Falha no filtro (CE- Filtro:MF1 ou MF2); 3.2)Falha na execução da manutenção apropriada (CE - Manutenção imprópria); 4.1)Ruptura de dutos ou elementos de união e vedação da canalização de sucção (CE- Dutos...:MF1); 4.2)Nível de óleo muito baixo no reservatório (CE- Reservatório:MF3) 4.3) Perda da capacidade dos aditivos inibidores de espuma; 5.1)Os inibidores de oxidação estão perdendo sua capacidade (CI) 5.2)Oxidação do óleo ocorre quando o oxigênio combina-se quimicamente com moléculas do óleo, deixando o óleo com maior acidez (CI); 6.1) Vedações desgastadas; 6.2) Água proveniente da condensação;

Componente	Função	Modos de falha	Efeitos	Causas
Controle direcional (válvulas direcionais de carretel deslizante)	Tem por função promover o isolamento ou a interligação entre as tubagens afluentes e estabelecer várias possibilidades de percurso interno. É atuando sobre estas válvulas que se influencia o sentido de circulação da vazão e a propagação da pressão, de modo a realizar o comando de receptores (cilindros ou motores hidráulicos) em termos de Parada arranque e sentido de movimento. Nº de Funções: 1	1)Válvula não responde adequadamente ao comando (referência à movimentação do carretel); 2)A pressão na saída da direcional não é mantida; 3)Tempo de comutação insatisfatório; 4)Vazamento externo.	1.1)Velocidade anormal dos atuadores; 1.2)Oscilação da pressão no sistema; 1.3)Perda de precisão no posicionamento dos atuadores; 1.4)Tempo de comutação insatisfatório; 2.1)Movimentação lenta ou ausência de movimento no atuador (insuficiência de pressão); 2.2)Perda da precisão no posicionamento dos atuadores; 2.3) Golpes de pressão (pressão excessiva); 2.4)Maior desgaste de componentes do sistema (pressão excessiva); 3.1)Tempo de resposta (movimentação do atuador) insatisfatório; 4.1)Insuficiência de pressão para movimentação dos atuadores; 4.2)Parada ou movimentação lenta dos atuadores; 4.3)Perda da precisão no posicionamento dos atuadores.	1.1)Ar no fluido dentro da válvula (CE-Fluido:MF4); 1.2)Carretel principal falha em responder ao comando da válvula piloto (solenóide-CI); 1.3)Carretel piloto falha ao operar apropriadamente (solenóide-CI); 2.1)Carretel principal falha em responder ao comando da válvula piloto (desgaste-CI); 2.2)Falha do carretel piloto (CI); 2.3)Vazamentos internos excessivos (CE-Fluido:MF1 ou desgaste- CI); 2.4)Ar no fluido dentro da válvula (CE-Fluido:MF4); 2.5)Restrições na linha de dreno (CE-Dutos...:MF2); 3.1)Diferença de pressão entre câmaras adjacentes inadequada (CI); 3.2)Estanquidade interna alterada (perda da vedação contra vazamentos internos, referência ao recobrimento de posição)(desgaste - CI); 3.3)Folga radial entre carretel e corpo da válvula inadequado (CI); 3.4)Amortecimento da comutação muito pronunciado (CI). 4.1)Parafusos estirados (deformados)(CI); 4.2)Elementos de vedação gastos ou danificados (desgaste-CI); 4.3)Corpo da válvula desgastado ou danificado (desgaste-CI); 4.4)conectores falham ao vedar apropriadamente (desgaste-CI); 4.5)Pressão excessiva (CE-Válvulas manométricas:MF2)
Filtro	Reduzir para um nível aceitável o tamanho e a concentração de partículas contaminantes, de modo a proteger os componentes contra um desgaste prematuro. Nº de Funções: 1	1)Ruptura do elemento filtrante; 2)Elemento filtrante inadequado para o sistema (em termos da porosidade do filtro) 3)Entupimento	1.1) Emperramento ou Entupimento das partes móveis de componentes; 1.2) Acúmulo de sujeira mais freqüente que as tarefas de limpeza; 2.1) Maior desgaste nos componentes do sistema; 2.2) Emperramento ou Entupimento das partes móveis de componentes; 2.3)Acúmulo de sujeira mais freqüente que as tarefas de limpeza (porosidade demasiado reduzida) 3.1) Parada ou movimentação lenta dos atuadores;	1.1)Vazão muito elevada para o filtro selecionado (CE-Erro de projeto); 1.2)Pressão alta devido ao acúmulo de sujeira (CE-Fluido:MF3); 1.3)Desintegração do papel do elemento filtrante (CE- vibração no sistema); 1.4)Desgaste dos componentes do elemento filtrante (CI); 2.1)Erro de projeto (CE- na seleção da porosidade) 3.1) Obstrução da passagem de óleo devido a contaminação do fluido (CE-Fluido:MF3);

Componente	Função	Modos de falha	Efeitos	Causas
Atuador* linear (cilindro)	Transformar força, potência ou energia hidráulica em força, potência ou energia mecânica. Nº de Funções: 1	<p>1)Força (pressão) insuficiente ou excessiva;</p> <p>2)Velocidade incorreta ou instável;</p> <p>3)Atrito interno elevado; MF Influenciado por</p> <p>4)Vazamento externo;</p> <p>5)Emperramento do êmbolo ou da haste do cilindro</p>	<p>1.1) Parada ou movimentação lenta dos atuadores;</p> <p>1.2)Golpes de pressão; (pressão excessiva);</p> <p>1.3)Velocidade instável dos atuadores;</p> <p>2.1) Velocidade instável dos atuadores;</p> <p>2.2)Perda da precisão de posicionamento;</p> <p>2.3)Fonte de vibração e ruído no sistema (instabilidade no movimento);</p> <p>3.1) Aumento de vazamentos internos;</p> <p>3.2)Maior desgaste dos componentes do sistema;</p> <p>3.3)Aumento da temperatura do sistema.</p> <p>4.1)Insuficiência de pressão nos atuadores;</p> <p>4.2)Parada ou Movimentação lenta dos atuadores;</p> <p>5.1)Parada ou Movimentação lenta dos atuadores;</p> <p>5.2)Golpes de pressão;</p>	<p>1.1)Vazamentos externos em qualquer parte do sistema (pressão insuficiente)(CE-Controlle, Dutos...:MF1, direcional:MF4;CE-Bomba:MF4)</p> <p>1.2)Falha ou ajuste inadequado do controle de pressão do sistema (CE-Válvulas Manométricas:MF1;CE-Acumuladores:MF2);</p> <p>1.3)Pressão não mantida na saída da direcional (CE-Controlle Direcional:MF2);</p> <p>1.4)Ar no fluido dentro do sistema (pressão insuficiente) (CE-Fluido:MF4);</p> <p>1.5)Cilindro desalinhado (desalinhamento-CI);</p> <p>1.6)Emperramento do êmbolo do cilindro devido ao desgaste da vedação (desgaste - CI);</p> <p>1.7)Viscosidade do fluido inadequada (CE-Fluido:MF1,MF2);</p> <p>2.1)Ar no fluido dentro do sistema(CE-Fluido:MF4);</p> <p>2.2)Defeito ou ajuste inadequado no controle de vazão (válvulas fluxométricas)(CE-Val. Fluxométricas:MF2);</p> <p>2.3)Bomba fornece vazão incorreta (CE-Bomba:MF1);</p> <p>2.4)Acumulador fornece vazão incorreta(CE-Acumulador:MF1);</p> <p>2.5)Viscosidade do fluido inadequada(CE-Fluido:MF1,MF2);</p> <p>2.6)Perda de carga excessiva no sistema (temperatura elevada)(CE-Reservatório: MF1);</p> <p>2.7)Vazamento interno excessivo (desgaste dos elementos de vedação internos e das partes móveis do cilindro)(desgaste-CI)</p> <p>3.1)Sujeira no fluido (concentração de partículas contaminantes muito elevada)(CE-Fluido:MF3; Filtro:MF1 ou MF2)</p> <p>3.2)Viscosidade do fluido elevada (CE-Fluido:MF2);</p> <p>4.1)Falha dos elementos de vedação da haste e do êmbolo (desgaste-CI);</p> <p>4.2)Cilindro desalinhado (desalinhamento-CI);</p> <p>5.1)Temperatura fora da faixa (CI) permissível (fabricante do cilindro): expansão térmica das partes móveis</p> <p>5.2)Fluido com concentração alta de contaminantes; (CE-Fluido:MF3; Filtro:MF1 ou MF2)</p> <p>5.3)Vedações com rupturas (Fadiga-CI).</p>

Componente	Função	Modos de falha	Efeitos	Causas
Bomba (deslocamento fixo)	Fornecer vazão para o sistema hidráulico. Nº de Funções: 1	<p>1) Bomba fornece vazão anormal ou instável;</p> <p>2) Vibração excessiva;</p> <p>3) Ruído excessivo;</p> <p>4) Vazamento externo.</p>	<p>1.1) Alteração da pressão do sistema (pressão baixa ou errática);</p> <p>1.2) Parada ou Movimentação lenta dos atuador;</p> <p>2.1) Afrouxamento ou soltura de elementos de união ;</p> <p>2.2) Vazamento externo;</p> <p>2.3) Ruído;</p> <p>3.1) Ruído;</p> <p>4.1) Insuficiência de pressão nos atuadores;</p> <p>4.2) Velocidade de anormal dos atuadores;</p>	<p>1.1) Cavitação (CE-Dutos.:MF1);</p> <p>1.2) Ar no fluido(CE-Fluido:MF4);</p> <p>1.3) Quebra nos rolamentos e/ou nos dentes da engrenagem (desgaste-CI);</p> <p>1.4) Sentido de rotação invertido (CE- Acionamento externo);</p> <p>1.5) Viscosidade do fluido muito alta (CE-Fluido:MF2);</p> <p>1.6) Vibração excessiva devido desgaste ou danos interno(CI) ou instalação incorreta ou imprópria da bomba (CE);</p> <p>1.7) Linha de sucção obstruída (CE-Fluido:MF3; Filtro:MF1 ou MF2);</p> <p>1.8) Vazamento interno excessivo (desgaste excessivo da carcaça)(CI);</p> <p>1.9) Nível de óleo no reservatório muito baixo(CE-Reservatório: MF3);</p> <p>1.10) Ondas de pressão provenientes de outros componentes ou através de diferentes cargas do equipamento hidráulico (CE-Acumulador:MF3; Atuador:MF5,MF1; Controle Direcional:MF2; Val. Manométricas:MF2);</p> <p>2.1) Desgaste irregular do estator(CI);</p> <p>2.2) Eixo desalinhado (CI);</p> <p>2.3) Flutuação na pressão (CE-Vál. fluxométricas:MF1; Controle direcional:MF1);</p> <p>3.1) Cavitação na bomba (CE-Dutos.:MF1; Filtro: MF3);</p> <p>3.2) Ar no fluido (CE-Fluido:MF4);</p> <p>3.3) Vibração na bomba devido ao desbalanceamento interno (CI);</p> <p>3.4) Sentido de rotação invertido(CI);</p> <p>4.1) Pressão excessiva dentro da carcaça da bomba (CI - selamentos danificados);</p> <p>4.2) Flutuação da pressão na bomba (CE-Vál. Fluxométricas:MF1; Controle direcional:MF1);</p> <p>4.3) Eixo de acionamento desalinhado (CI);</p> <p>4.4) Fluido excessivamente quente (CE-Reservatório:MF1);</p> <p>4.5) Abrasivos no eixo da bomba (CE-Fluido:MF3; Filtro:MF1 ou MF2);</p> <p>4.6) Vibração excessiva devido ao desbalanceamento interno na bomba (CI);</p> <p>4.7) Elementos de vedação da bomba desgastados ou danificados (CI);</p>

Componente	Função	Modos de falha	Efeitos	Causas
Acumulador (hidropneumático)	<p>Fonte de energia auxiliar(para reduzir potência de acionamento, em regime intermitente); Reserva de energia (para emergência, p. ex. por avaria da bomba); Amortecimento de choques e golpes de pressão; Compensação de fugas e vazamentos; Compensação de variações volumétricas, de origem térmica ou manométrica; Nº de Funções: 5</p>	<p>1)Fornecimento de vazão inadequada para o sistema; 2)Compensação de variação volumétrica inadequada (ou insuficiente); 3)Amortecimento ineficiente de ondas de pressão; 4)Perda total da funcionalidade.</p>	<p>1.1)Velocidade anormal nos atuadores; 1.2)Insuficiência de pressão nos atuadores ; 2.1)Insuficiência de pressão nos atuadores ; 2.2) Parada ou Movimentação lenta dos atuadores; 3.1)Golpes de pressão: danos em outros componentes; 3.2)Perda de precisão de posicionamento do atuador; 3.3)Perda do controle da movimentação do atuador; 4.1) Insuficiência de pressão nos atuadores ;</p>	<p>1.1)Pressão de funcionamento (no gás) insuficiente devido ao desgaste da vedação (CI); 1.2)Válvula de acesso do óleo obstruída (CE-Fluido:MF3; Filtro:MF1 ou MF2); 1.3)Válvula de acesso do óleo com defeito (CE-Manutenção imprópria); 2.1)Vazão de fornecimento do óleo insuficiente (CE-Bomba:MF1,MF4); 2.2)Carregamento insuficiente do acumulador (CE-Bomba:MF1,MF4); 2.3)Volume útil de gás insuficiente devido ao desgaste da vedação (CI); 3.1)Pressão de funcionamento (no gás) insuficiente devido ao desgaste de vedação (CI); 4.1)Ruptura da bexiga (Fadiga-CI); 4.2)Falha na válvula de acesso do óleo devido a fadiga da mola da válvula (CI); 4.3)Falta pressão de preenchimento devido a operação imprópria do pressostato (CE);</p>

Componente	Função	Modos de falha	Efeitos	Causas
Reservatório	<p>Armazenar o fluido de trabalho Dissipar parte do calor gerado Permitir que os contaminadores do fluido se assentem (decantem) Remoção de ar não dissolvido Separação de água condensada Nº de Funções: 5</p>	<p>1)Dissipação de calor insuficiente: a)tamanho inadequado; b)formato inadequado; c)tubagens de aspiração e retorno muito próximas; d)Disposição inadequada ou ausência de chicanas (paredes separadoras); e)afastamento do chão insuficiente ou ausente;</p> <p>2)Contaminantes em suspensão: a)Disposição inadequada ou ausência de chicanas (paredes separadoras); b)tubagens de aspiração e retorno muito próximas; c)ausência de bujão de dreno;</p> <p>3)Redução muito acentuada do nível de óleo no reservatório: falha ou ausência de indicadores de nível;</p> <p>4)Não remove o ar dissolvido: a)Não possui rede de remoção de ar; b)Disposição inadequada ou ausência de chicanas (paredes separadoras);</p> <p>5)Não separa a água condensada: a)Disposição inadequada ou ausência de chicanas (paredes separadoras); b)ausência de bujão de dreno;</p>	<p>1.1)Aumento excessivo da temperatura; 1.2)Aumento de vazamentos internos</p> <p>2.1) Acúmulo de sujeira mais freqüente que as tarefas de limpeza (porosidade demasiado reduzida);</p> <p>3.1) Variação na compressibilidade (variação na pressão do sistema devido entrada de ar no sistema);</p> <p>4.1)Cavitação na bomba; 4.2) Variação na compressibilidade (variação na pressão do sistema devido a entrada de ar no sistema); 4.3) Velocidade anormal nos atuadores; 4.4)Falha de válvulas ao responder ao comando adequadamente; 4.5)Ruído;</p> <p>5.1)Redução na viscosidade do fluido</p>	<p>Os modos de falha do reservatório possuem como causa básica um erro de concepção (de projeto)</p>

Componente	Função	Modos de falha	Efeitos	Causas
Pressostato	<p>-Enviar sinal elétrico para algum ponto do sistema que receba e transforme esse sinal em acionamento mecânico (ex. acionamento de uma bomba)</p> <p>-Deixar de enviar o sinal elétrico que vinha sendo feito;</p> <p>-Deixar de enviar um sinal elétrico e o envia para outro ponto;</p> <p>Nº de Funções: 3</p>	1) Falta de Indicação e Comando	<p>1.1) Oscilação da pressão no sistema;</p> <p>1.2) Insuficiência de pressão nos atuadores;</p> <p>1.3) Parada ou movimentação lenta dos atuadores;</p> <p>Falha de válvulas em responder comandos</p>	<p>1.1) Ajuste incorreto de contato (CE- manutenção imprópria)</p> <p>1.2) Quebra de mecanismo interno (CI)</p> <p>1.3) Obstrução de fluxo (CE- Fluido, MF3; Filtro, MF1)</p>
Dutos, Tubulação, elementos de união e vedação em geral (inclui as dos componentes do sistema)	<p>Conduzir o fluido hidráulico entre os componentes de um circuito hidráulico (transportar energia hidráulica) com a menor perda de carga possível;</p> <p>A vedação é necessária para manter a pressão, impedir a perda de óleo e manter afastada a contaminação.</p> <p>Nº de Funções: 4</p>	<p>1)Desgaste e/ou ruptura;</p> <p>2)Perda de carga excessiva;</p>	<p>Para a tubulação de aspiração:</p> <p>1.1) Variação na compressibilidade (variação na pressão do sistema devido entrada de ar no sistema);</p> <p>1.2) Acúmulo de sujeira mais freqüente que as tarefas de limpeza;</p> <p>Para a tubulação de pressão:</p> <p>1.1)Aumento de vazamentos externos;</p> <p>1.2)Insuficiência de pressão nos atuadores;</p> <p>Para os elementos de união:</p> <p>1.1)Vibração (quando o desgaste / ruptura dos conectores provoca seu afrouxamento ou soltura);</p> <p>Para os elementos de vedação:</p> <p>1.1)Emperramento ou entupimento de componentes (válvulas, bomba, atuadores) no momento em que se desprendem e alcançam partes móveis destes componentes;</p> <p>1.2) Acúmulo de sujeira mais freqüente que as tarefas de limpeza;</p> <p>2.1)Queda no rendimento do sistema;</p> <p>2.2)Aumento excessivo da temperatura;</p> <p>2.3)Aumento de vazamentos internos;</p>	<p>1.1)Sobrepessão (a pressão de trabalho excedeu a pressão de ruptura) (CE- Acumulador:MF3; Atuador:MF5,MF1;Controle Direcional:MF2;Val. Manométricas:MF2);</p> <p>1.2)Desgaste decorrente do uso (CI);</p> <p>1.3)Incompatibilidade com o fluido (CE-Manutenção imprópria);</p> <p>1.4)Contaminantes no fluido (aceleram o processo de desgaste);</p> <p>1.5)Pressão muito elevada (acelera o processo de desgaste)(CE-Val. Manométrica:MF2);</p> <p>2.1)Rugosidade superficial muito elevada (CI);</p> <p>2.2)Comprimento da tubulação mal dimensionado (muito longo, com muitos joelhos) (CE- Erro de projeto);</p>

APÊNDICE D

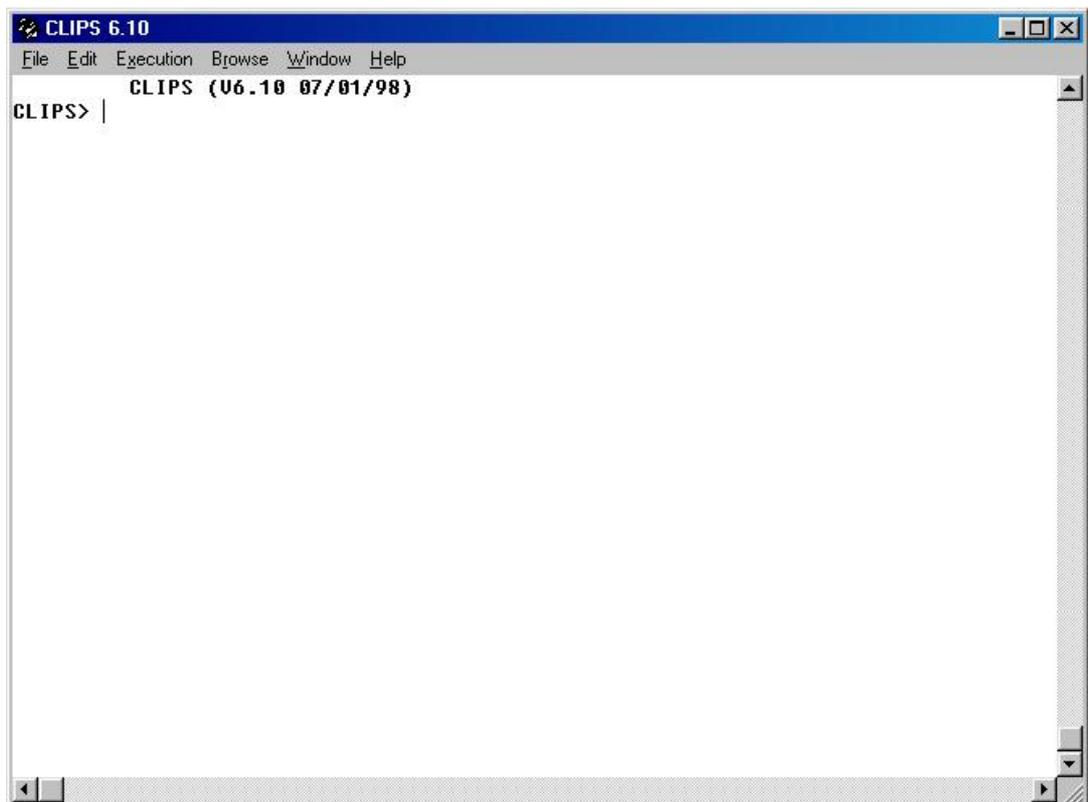
PASSOS PARA EXECUÇÃO DA SEGUNDA VERSÃO DO PROTÓTIPO

D.1 - Procedimentos para instalação do protótipo (RCMEX):

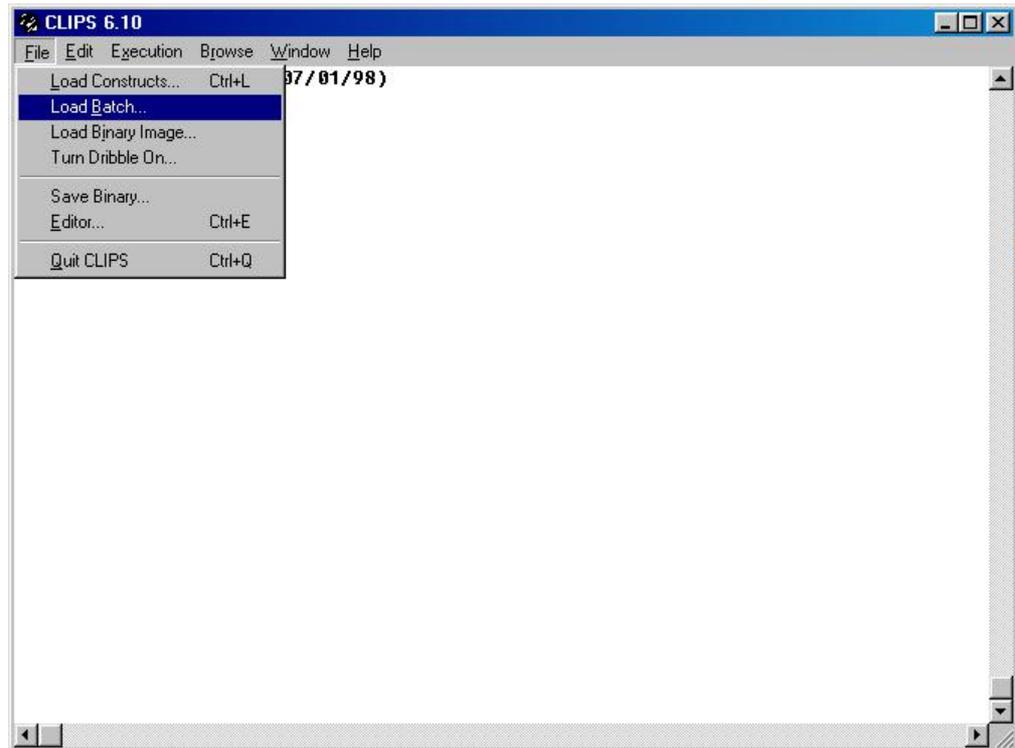
- 1) Abra o aplicativo Windows Explorer e clique na unidade de disco flexível (A:)
- 2) Clique duas vezes no executável RCMEX.EXE. Esta ação dará início ao procedimento de descompactação dos arquivos usados pelo RCMEX.
- 3) Defina o diretório onde será criado um diretório RCMEX onde serão armazenados os arquivos para execução do protótipo.

D.2 - Procedimento para Execução do RCMEX:

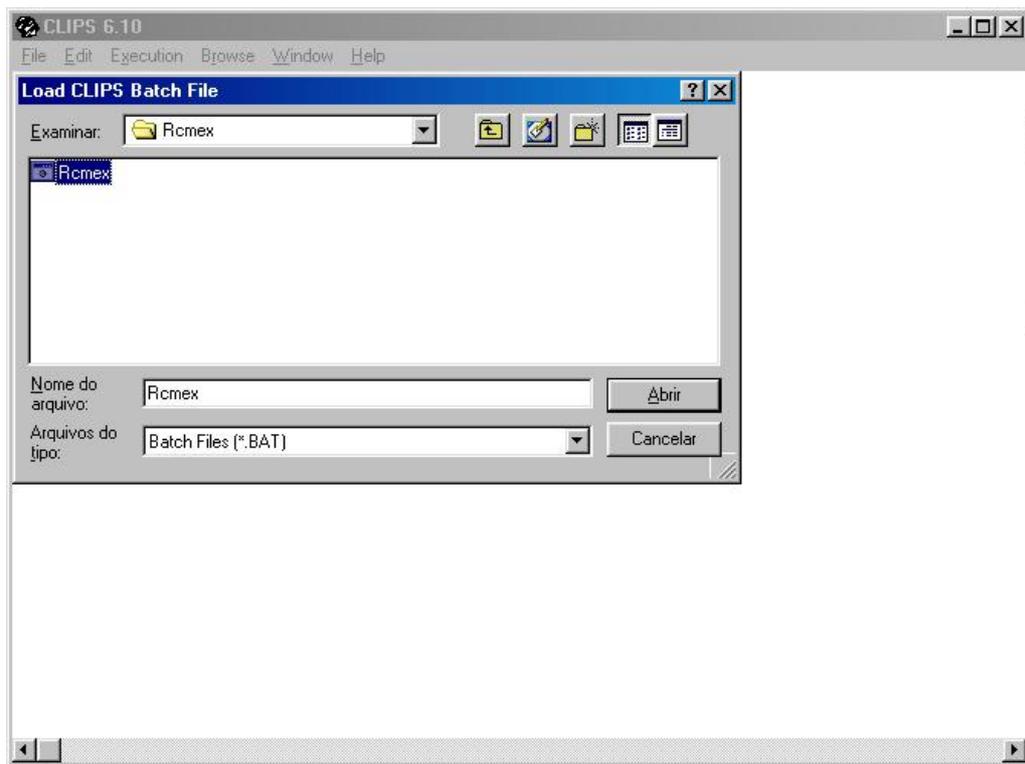
- 1) No Windows Explorer com o diretório RCMEX aberto, clique duas vezes no aplicativo clipswin.exe. Com esse procedimento será aberta uma tela mostrada abaixo:



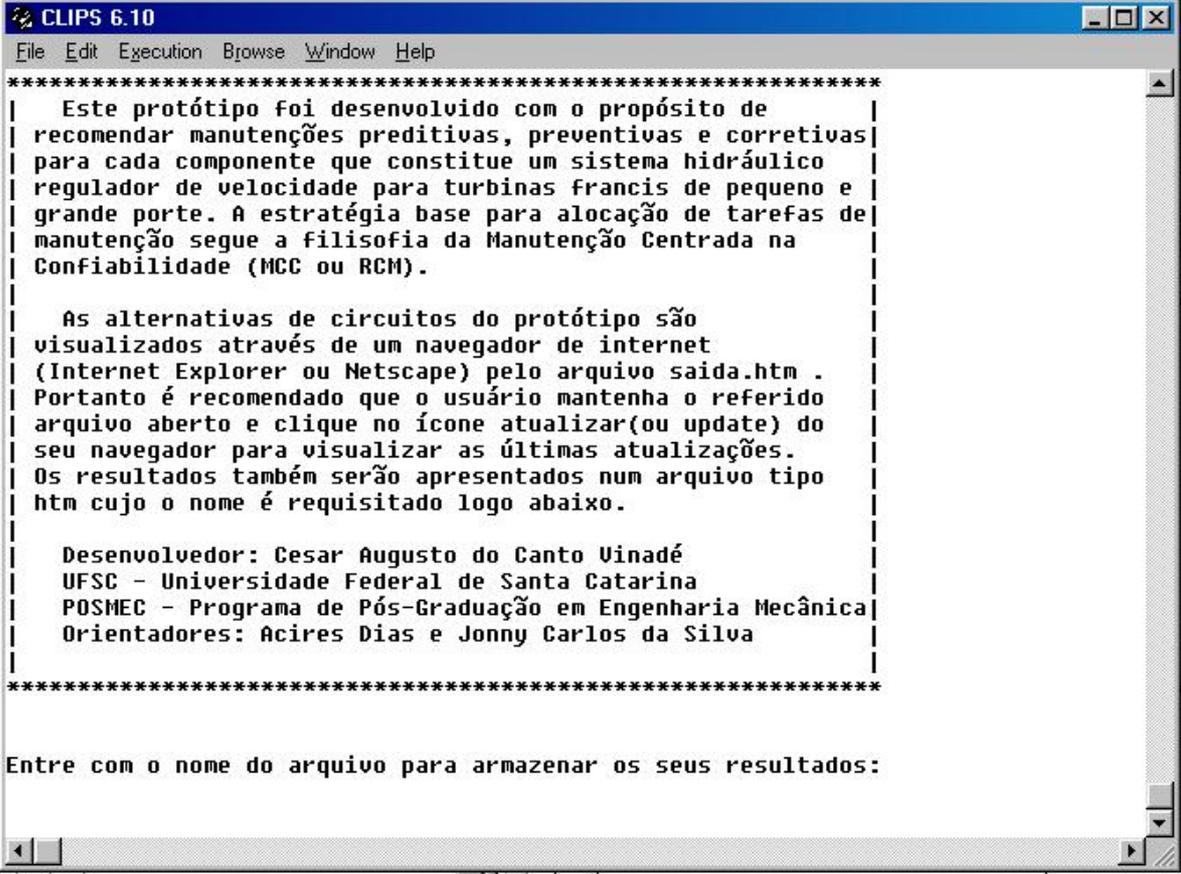
- 2) Clique uma só vez no menu “File” e depois clique em “Load Batch”:



- 3) Abra o arquivo Rcmex.bat:



4) Agora siga as instruções de execução do programa.



```
CLIPS 6.10
File Edit Execution Browse Window Help
*****
| Este protótipo foi desenvolvido com o propósito de
| recomendar manutenções preditivas, preventivas e corretivas
| para cada componente que constitui um sistema hidráulico
| regulador de velocidade para turbinas francis de pequeno e
| grande porte. A estratégia base para alocação de tarefas de
| manutenção segue a filisofia da Manutenção Centrada na
| Confiabilidade (MCC ou RCM).
|
| As alternativas de circuitos do protótipo são
| visualizados através de um navegador de internet
| (Internet Explorer ou Netscape) pelo arquivo saida.htm .
| Portanto é recomendado que o usuário mantenha o referido
| arquivo aberto e clique no ícone atualizar(ou update) do
| seu navegador para visualizar as últimas atualizações.
| Os resultados também serão apresentados num arquivo tipo
| htm cujo o nome é requisitado logo abaixo.
|
| Desenvolvedor: Cesar Augusto do Canto Vinadé
| UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina
| POSMEC - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
| Orientadores: Acires Dias e Jonny Carlos da Silva
|
|*****
Entre com o nome do arquivo para armazenar os seus resultados:
```

5) Durante a execução do RCMEX, mantenha o arquivo Saida.htm aberto no seu navegador de internet e clique no botão atualizar do navegador ou *update* quando for solicitado.