

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA MECÂNICA**

**REPROJETO DE EQUIPAMENTOS MECATRÔNICOS COM BASE NA ANÁLISE DE  
CONFIABILIDADE DE SISTEMAS**

Dissertação submetida à  
**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA**

para obtenção do grau de  
**MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**LAUDELINO VIEIRA DE MATOS FILHO**

Florianópolis, Junho de 2007



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA MECÂNICA**

**REPROJETO DE EQUIPAMENTOS MECATRÔNICOS COM BASE NA ANÁLISE DE  
CONFIABILIDADE DE SISTEMAS**

**LAUDELINO VIEIRA DE MATOS FILHO**

**Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de**

**MESTRE EM ENGENHARIA**

**ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA  
sendo aprovada em sua forma final.**

---

**Prof. Victor Juliano De Negri, Dr. Eng. - Orientador**

---

**Prof. Acires Dias, Dr. Eng. – Co-Orientador**

---

**Prof. Fernando Cabral, PhD. - Coordenador do Curso**

**BANCA EXAMINADORA**

---

**Prof. André Ogliari, Dr. Eng.**

---

**Prof. Carlos Alberto Martin, Dr. Ing.**

---

**Prof. Edison da Rosa, Dr. Eng. - Presidente**



As vicissitudes não permitiram render homenagens no momento e da forma mais adequada por isso dedico este trabalho ao meu Avô, onde quer que ele esteja descanse em paz.

Ramiro Alves Pereira

\*13/04/1919 †15/05/2005



## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a meus orientadores, ao Prof. Victor, uma figura incansável, paciente e solícito, uma presença constante cuja postura e conhecimentos transmitidos certamente irão seguir comigo pelo resto da minha vida profissional. Ao Prof. Acires pelo carisma, presteza e os ensinamentos sempre esclarecedores.

Aos colegas do LASHIP, Luizes, Eduardos, Tiagos, Lucianos, Rodrigos e Rafaéis; aos parceiros Henri, Yesid, José Roberto e todos os bolsistas. Em especial aos doutorandos Gilson e Paulo do Carmo pelas dicas e o apoio incondicional nos momentos de insegurança. A secretária Diane pela simpatia e presteza.

Aos amigos de toda vida Rogério Ramos, Renato Lupiano pelas longas divagações e presença constante nos bons e maus momentos.

Aos vizinhos de república Hugo Santos, Welton Roberto pelos longos debates o estímulo e a inspiração.

Ao PosMec pela oportunidade de fazer parte da sua história de excelência e ao CNPQ pelo apoio financeiro sem o qual as coisas seriam bem mais difíceis.

Enfim, a minha família o qual considero uma extensão de mim mesmo.



## SUMÁRIO

Resumo.....	XXI
Abstract.....	XXIII
1. Introdução .....	1
1.1. Contextualizacao .....	1
1.2. Metodologias de reprojeto .....	3
1.3. Definição do problema.....	3
1.4. Objetivos .....	4
1.4.1. Objetivo geral.....	4
1.4.2. Objetivos específicos.....	4
1.5. Contexto do trabalho .....	4
1.6. Estrutura do trabalho .....	5
2. Fundamentos teóricos para o reprojeto de equipamentos mecatrônicos .....	7
2.1. Introdução.....	7
2.2. Projeto de produtos industriais.....	7
2.2.1. Tipos de projeto .....	8
2.2.2. Fases de projeto.....	9
2.3. Engenharia reversa .....	10
2.4. Modelagem de sistemas automáticos .....	13
2.4.1. Modelagem funcional.....	13
2.4.2. Modelo funcional / estrutural.....	14
2.4.3. Modelo comportamental.....	19
2.4.3.1. Tipos de modelos comportamentais.....	20
2.4.3.2. Diagrama de Função Seqüencial (SFC) .....	21
2.4.3.3. Análise da cadeia de medição (propagação de incertezas).....	23
2.5. Modelagem e análise de confiabilidade de sistemas .....	24
2.5.1. Confiabilidade .....	25
2.5.2. A métrica da confiabilidade.....	26
2.5.2.1. Distribuições estatísticas e a confiabilidade .....	29

2.5.3.	Confiabilidade de sistemas .....	32
2.5.3.1.	Estrutura série.....	33
2.5.3.2.	Estrutura paralela .....	34
2.5.3.3.	Interpretação da confiabilidade e o modelo físico .....	36
2.6.	Considerações finais sobre os fundamentos teóricos .....	37
3.	Reprojeto de produtos .....	39
3.1.	Introdução.....	39
3.2.	Critérios de decisão para o reprojeto de sistemas técnicos.....	43
3.2.1.	Análise de custos.....	43
2.1.1.1.	Análise de viabilidade econômica .....	45
3.2.2.	Disponibilidade.....	46
3.2.3.	Produtividade .....	48
3.3.	Metodologias de reprojeto.....	49
3.3.1.	Metodologia Dufour .....	49
3.3.2.	Metodologia Bitencourt .....	51
3.3.3.	Métodologia Otto e Wood .....	54
3.4.	Considerações finais sobre o reprojeto de produtos .....	56
4.	Proposta de metodologia para o reprojeto de equipamentos mecatrônicos .....	57
4.1.	Introdução.....	57
4.2.	Fases do reprojeto de equipamentos mecatrônicos .....	57
4.2.1.	Critérios de decisão para o reprojeto de equipamentos mecatrônicos .....	60
4.2.1.1.	Análise de custos .....	61
4.2.1.2.	Análise de disponibilidade.....	63
4.2.1.3.	Análise de produtividade .....	64
4.2.1.4.	Considerações finais sobre critérios de decisão para o reprojeto.....	65
4.2.2.	Fase informacional do reprojeto (Fase1).....	66
4.2.2.1.	Engenharia reversa para o reprojeto de equipamentos mecatrônicos ...	67
4.2.2.1.1.	Modelagem de sistemas automáticos .....	68
4.2.2.1.2.	Modelagem comportamental .....	70

4.2.2.1.3.	Modelagem confiabilística.....	71
4.2.2.2.	Relatório do reprojeto informacional.....	73
4.2.3.	Fase conceitual de reprojeto (Fase 2).....	77
4.2.3.1.	Desenvolvimento de soluções na fase conceitual de reprojeto .....	78
4.2.3.2.	Análise de SSC e seleção de concepção.....	78
4.2.4.	Fase preliminar de reprojeto (Fase 3).....	79
4.2.5.	Fase detalhada de reprojeto (Fase 4).....	80
4.3.	Considerações finais sobre a metodologia proposta.....	82
5.	Estudo de caso: Reprojeto do sistema de controle de temperatura da UPCH/LASHIP .....	83
5.1.	Introdução.....	83
5.2.	Reprojeto informacional.....	84
5.2.1.	Modelagem funcional / estrutural .....	85
5.2.2.	Modelagem comportamental.....	93
5.2.3.	Modelagem confiabilística.....	95
5.2.4.	Relatório do reprojeto informacional .....	98
5.3.	Fase conceitual de reprojeto.....	101
5.4.	Reprojeto preliminar e detalhado .....	103
5.4.1.	Adaptações e atualização dos modelos.....	103
5.4.2.	Relatório das alterações e expectativas.....	105
5.5.	Considerações finais sobre o estudo de caso.....	106
6.	Considerações finais .....	107
6.1.	Conclusões e comentários.....	107
6.2.	Recomendações.....	109
	Referências bibliográficas .....	111
	Bibliografia .....	117
	Apêndice A.....	119
	Anexo A .....	123



## LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1 - Modelo funcional do processo de projeto para sistemas automáticos, adaptado de De Negri (1996). .....	9
Figura 2-2 - Processo de engenharia reversa, tradução livre de MIL-HDBK-115A, (US ARMY, 2006, pg. 59). .....	12
Figura 2-3 - Representação esquemática da Função Global, adaptado de Forcellini et al. (2005). .....	13
Figura 2-4 - Desdobramento da Função Global em funções mais simples, adaptado de Forcellini et al. (2005). .....	14
Figura 2-5 - Rede Canal/Agência (Rede C/A) (DE NEGRI, 1996). .....	15
Figura 2-6 - Mecanismo de refinamento e condensação de redes C/A (DE NEGRI 1996)...	15
Figura 2-7 - Modelo funcional/estrutural condensado de um sistema automático (DE NEGRI, 1996). .....	16
Figura 2-8 – Sistema automático (mecatrônico) - Modelo funcional refinado (DE NEGRI e VIEIRA, 1997). .....	16
Figura 2-9 - Modelo estrutural e funcional de um sistema automático estendido (SOUTO, 2005). .....	18
Figura 2-10 - Representação genérica de um diagrama SFC de acordo com a norma IEC 1131-3 (IEC, 1993). .....	21
Figura 2-11 - Módulos básicos de um sistema de medição, adaptado de Albertazzi (2005). .....	24
Figura 2-12 - Representação dos valores de confiabilidade e não-confiabilidade sob a curva de densidade de probabilidade de falha (BILLINTON e ALLAN, 1983) .....	27
Figura 2-13 - Variação típica da taxa de falha de componentes, adaptado de Barbosa (2005), Billiton e Allan (1983). .....	28
Figura 2-14 – a) Função densidade de probabilidade de Weibull, b) função probabilidade de Weibull, c) taxa instantânea de Weibull (DIAS, 2005, pg. 9) .....	32
Figura 2-15 - Arranjo série .....	33
Figura 2-16 – Exemplos de configuração série, (a) Circuito elétrico, (b) Conjunto de roletes .....	34
Figura 2-17 - Tipos de redundâncias (PALLEROSI, 2005). .....	35

Figura 2-18 - a) Sistema de bombeamento fisicamente montado; b) Modelo de confiabilidade paralela com redundância ativa; c) Modelo de confiabilidade série, adaptado de Vinadé (2003) .....	36
Figura 3-1 - Curvas S de evolução de produtos; adaptado de Betz (1993) apud Otto e Wood (1998) .....	42
Figura 3-2 - Comportamento dos custos do ciclo de vida de uma unidade geradora, adaptado por Santos (1999) .....	44
Figura 3-3 – Gráfico de custos por unidade de tempo (RELIASOFT, 2006) .....	44
Figura 3-4 - Curva de fluxo de caixa de um produto seu ciclo de vida; Hogarth, 1993 (apud Dufour, 1996).....	45
Figura 3-5 - Diagrama de Gerência Centrada na Disponibilidade GCD, onde $D_0$ é a Disponibilidade obtida e $D_d$ a Disponibilidade desejada (SANTOS et al. 1999).....	47
Figura 3-6 - Influência das solicitações no valor da taxa instantânea de falha (DIAS, 2005) 49	
Figura 3-7 – Destaque do reprojeto dentro do processo de projeto de produtos industriais; Ashim, Juster e Pennington (1994) apud Dufour (1996).....	50
Figura 3-8 – Representação geral da RePMA (BITENCOURT, 2001).....	52
Figura 3-9 – Metodologia de engenharia reversa e reprojeto, adaptado de Otto e Wood (1998) .....	55
Figura 4-1 - Diagrama geral da metodologia de reprojeto de equipamentos mecatrônicos ..	58
Figura 4-2 – Estabelecimento de critério de custo durante o ciclo de vida para o reprojeto de equipamentos .....	61
Figura 4-3 – Exemplo da aplicação de critérios de viabilidade de custos para o reprojeto ...	62
Figura 4-4 – Relatório mensal de disponibilidade de um equipamento hipotético.....	63
Figura 4-5 – Critério de decisão pelo reprojeto com base na evolução da disponibilidade do equipamento .....	63
Figura 4-6 – Exemplo de ações e critérios baseados na produtividade de um equipamento, adaptado de Pinheiro (2006).....	65
Figura 4-7 – Fase informacional de reprojeto.....	66
Figura 4-8 - Modelo em Rede C/A de um equipamento de lavagem automática de roupas .	69
Figura 4-9 – Detalhamento das agências identificadas .....	70
Figura 4-10 - Modelo comportamental de uma máquina de lavar automática .....	71

Figura 4-11 – Modelo confiabilístico da seqüência de operação da máquina de lavar roupa automática.....	72
Figura 4-12 – Modelos confiabilísticos de um sistema hidráulico de deslocamento de carga com dupla velocidade (VINADÉ, 2003).....	72
Figura 4-13 – Fase conceitual de reprojeto.....	77
Figura 4-14 - Matriz morfológica e combinação de princípios de solução.....	78
Figura 4-15 – Fase preliminar de reprojeto.....	80
Figura 4-16 – Fase detalhada de reprojeto.....	81
Figura 5-1 - Diagrama Canal/Agência geral da UPCH.....	85
Figura 5-2 - Refinamento do diagrama C/A da UPCH.....	86
Figura 5-3 - Sistema de atuação e medição de temperatura - Modelo funcional global, adaptado de De Negri e Vieira (1997).....	88
Figura 5-4 - Circuito hidráulico de aquecimento e resfriamento (DE NEGRI e VIEIRA, 1997).....	89
Figura 5-5 – Esquema do circuito elétrico de comando para aquecimento e resfriamento (DE NEGRI e VIEIRA, 1997).....	90
Figura 5-6 - Circuito elétrico de potência para aquecimento e resfriamento (DE NEGRI e VIEIRA, 1997).....	90
Figura 5-7 – Representação simplificada do circuito de comutação da operação entre manual e pelo computador (DE NEGRI e VIEIRA, 1997).....	92
Figura 5-8 - Requisito comportamental para a temperatura do fluido (DE NEGRI e VIEIRA, 1997).....	93
Figura 5-9 - Diagrama trajeto-passo do sistema de atuação em temperatura (DE NEGRI e VIEIRA, 1997).....	93
Figura 5-10 – Diagramas lógicos referentes ao comportamento projetado para o circuito elétrico da Figura 5-5; (a) diagrama geral; (b) diagrama de resfriamento; (c) diagrama de aquecimento.....	94
Figura 5-11 - Diagrama SFC modelo comportamental sistema de controle de temperatura da UPCH.....	95
Figura 5-12 – Modelo confiabilístico para o ciclo de aquecimento do sistema de controle de temperatura da UPCH.....	96

Figura 5-13 - Modelo confiabilístico para o ciclo de resfriamento do sistema de controle de temperatura da UPCH .....	96
Figura 5-14 – Destaque dos componentes sob suspeita nos dois modelos .....	97
Figura 5-15 – Detalhe da agência AOP com base na Figura 5-3 .....	101
Figura 5-16 – Sistema de atuação e medição de temperatura - Modelo funcional global reprojeto.....	104
Figura 5-17 – Diagramas confiabilístico alterados correspondentes ao ciclo de aquecimento e resfriamento do fluido da UPCH.....	104

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1 - Tipos de projeto segundo Pahl e Beitz ,1996 adaptado por Dufour (1996). .....	8
Tabela 2-2 – Classificação dos métodos criativos segundo Forcellini et al, (2005). .....	10
Tabela 2-3 - Alguns modelos comportamentais mais usuais em engenharia, adaptado de De Negri (2004).....	20
Tabela 2-4 - Tabela de qualificação de ações, IEC 1131-3, (IEC, 1993). .....	22
Tabela 2-5 - Evolução da seqüência de passos, IEC 1131-3, (IEC, 1993). .....	22
Tabela 3-1 - Fatores de origem de mercado causadores do reprojeo de produtos industriais; Fundação Volkswagen, 1996 (apud Dufour,1996). .....	39
Tabela 3-2 – Fatores de origem técnica causadores do reprojeo de produtos industriais; Fundação Volkswagen, 1996 (apud Dufour,1996). .....	40
Tabela 3-3 - Fatores de origem de segurança causadores do reprojeo de produtos industriais; Fundação Volkswagen, 1996 (apud Dufour,1996). .....	40
Tabela 3-4 - Fatores de origem legal causadores do reprojeo de produtos industriais; Fundação Volkswagen, 1996 (apud Dufour,1996). .....	41
Tabela 3-5 - Relação entre disponibilidade e estratégias de manutenção em unidades de recuperação de enxofre; adaptado de Pinheiro (2006). .....	47
Tabela 3-6 – Desdobramento do reprojeo de produtos para o meio ambiente, adaptado de Bitencourt (2001) .....	53
Tabela 4-1 - Tabela preliminar de requisitos de reprojeo. ....	74
Tabela 4-2 - Tabela definitiva para classificação dos requisitos para as demais fases de reprojeo. ....	74
Tabela 4-3 - Tabela preliminar de requisitos da máquina automática de lavagem de roupas. ....	75
Tabela 4-4 - Classificação dos requisitos da máquina automática de lavar roupas.....	76
Tabela 4-5 – Exemplo de especificações meta dos requisitos de reprojeo para a máquina de lavar roupas.....	76
Tabela 4-6 – Modelo de matriz de decisão. (FORCELLINI et al., 2005).....	79
Tabela 5-1 - Lista de agências e respectivas funções - UPCH-LASHIP.....	87
Tabela 5-2 – Notação utilizada na figura 5-3.....	88

Tabela 5-3 - Descrição dos componentes e suas funções de acordo com De Negri e Vieira (1997). .....	89
Tabela 5-4 – Notação dos símbolos utilizados nas figuras 5-5 e 5-6.....	91
Tabela 5-5 – Tabela preliminar de requisitos de reprojeto.....	99
Tabela 5-6 – Classificação dos requisitos do sistema de controle de temperatura da UPCH (especificações de reprojeto). .....	100
Tabela 5-7 – Especificações meta dos requisitos de reprojeto.....	100
Tabela 5-8 - Matriz morfológica do reprojeto do sistema de controle de temperatura da UPCH. ....	101
Tabela 5-9 – Matriz de decisão primeira iteração. ....	102
Tabela 5-10 - Matriz de decisão segunda iteração.....	102

**SIMBOLOGIAS E ABREVIATURAS**

AC	Alternating Current
Ana	Analógico
AOP	Área de Operação
APC	Área de Potência e Condicionamento
C/A	Canal / Agência
CAD	Computer Aided Design
Cb	Cabo
CC	Corrente Contínua
CI	Circuito Integrado
CLP	Controlador Lógico Programável
CLT	Consolidação das Leis Trabalhistas
Cmd	Comando
CNC	Controle Numérico Computacional
Dig	Digital
Econ.	Economia
EE	Energia Elétrica
EUA	Estados Unidos da América
IHM	Interface Homem Máquina
LASHIP	Laboratório de Sistemas Hidráulicos e Pneumáticos
LED	Light Emissor Diode (Diodo emissor de luz)
M	Motor Elétrico
MTBF	Mean Time Between Failures (Tempo médio entre falhas)
MTTF	Mean Time To Failure (Tempo médio até a falha)
MTTR	Mean Time To Repair (Tempo médio para reparo)
NBR	Norma Brasileira
O&M	Operação e Manutenção
PC	Personal Computer
PLC	Programmable Logic Controller (Controlador lógico programável)

PTE	Índice de Produtividade Total
QFD	Quality Function Deployment (Casa da qualidade)
RePMA	Reprojeto de Produto para o Meio Ambiente
R&M	Recapacitação e Modernização
SFC	Sequential Function Chart
Si	Step (passo de programa)
SIT	Structured Inventive Thinking
Snl	Sinal
SSC	Sistemas, Subsistemas e Componentes
Tb	Tubo
TIPS	Theory of Inventive Problem solving
Tref	Temperatura de Referência
Trpr	Termopar
UPCH	Unidade de Potência e Condicionamento Hidráulico

## RESUMO

A realidade da indústria atual aponta diversas motivações que levam à opção pelas ações de reprojetos de equipamentos mecatrônicos, dentre as quais é possível considerar o ganho econômico pelo aumento de produtividade, vantagens competitivas com a melhoria de qualidade dos produtos. De forma geral, o foco destas ações visa prolongar a vida útil mediante o reaproveitamento de equipamentos proporcionando a redução dos custos de investimentos em maquinário e instalações. Porém, a inexistência de uma metodologia estruturada que permita atuar de forma efetiva neste tipo de problema, acaba por resultar em uma série de ações sem critério cujos resultados podem trazer mais prejuízos que benefícios. A metodologia proposta considera que os equipamentos analisados estão em uso ou são reutilizáveis, e todo o processo de projeto e validação de soluções é baseado no equipamento original. Na fase inicial é feita a análise de critérios para tomada de decisão para o reprojeto; com a opção pelo reprojeto é aplicada uma segunda fase onde são levantadas as informações necessárias para a geração de requisitos de reprojeto. Para isso é empregada a engenharia reversa com o uso de métodos de modelagem de sistemas automáticos com Rede de Petri Canal/Agência, SFC e, considerando adicionalmente, a modelagem confiabilística. Na seqüência do processo, todas as informações adquiridas são levadas a uma fase de análise de soluções em que uma equipe de reprojeto é estimulada a reavaliar o projeto e propor soluções alternativas com base nos requisitos de reprojeto gerados. As novas propostas de solução originadas nesta fase levam em conta as atuais condições de operação, novas tecnologias e necessidades funcionais, bem como as atuais condições de confiabilidade e manutenibilidade do sistema. Como resultado final é gerado uma proposta de reprojeto contemplando os requisitos levantados e estabelecendo a base para futuras reavaliações. Dentre os benefícios associados a esta abordagem, considera-se o ganho de competitividade pela constante modernização do sistema em uso, e a redução de custos associados a investimentos de atualização e melhoria.

Palavras-chave: Confiabilidade, Reprojeto, Equipamentos Mecatrônicos.



## ABSTRACT

The reality of the industry suggests several reasons to make choice to redesign mechatronic equipments, among which is possible to consider the economic gain by increase in productivity, competitive advantages with the improvement of quality of products. In general, the focus of this process aims at enlarging the life span of the equipments, making them reusable through processes that reduce the costs on investments and installation. However, there is, to date, no structured methodology which guides the resolution of this problem, causing the actions in this direction to be without criterion whose results may bring more damage than benefits. The methodology proposed considers that the equipment examined are equipments in use or reusable, and the whole designing and validation processes is based on original equipment. In the initial phase is made the analysis of criteria for choosing the redesigning of the project. With the option to redesign, is applied a second stage where is prospected the necessary information for the generation of requirements of redesign. For that is employed the reverse engineering process using the modeling methods of automated systems with Petri Net Channel/Agency, SFC and reliability modeling. In the sequence, all the information acquired are brought to a phase of analysis of solutions where a redesign team is encouraged to reassess the design and propose alternative solutions on the basis of the requirements of redesign generated. The new proposals for solving the problems created at this phase take into account the conditions of operation, new technologies and functional needs, as well as the current conditions of reliability and maintainability of the system. The result of the present study consists of a realistic proposal of redesigning of the project upon incorporating the advances identified in the previous phases and establishing the basis for future reevaluations. Among the benefits associated with this approach are the gain in competitiveness through the constant modernization of the system in use and the consequent reduction of costs on modernization and improvements

Keywords: Reliability, Redesign, Mechatronic Equipments.



## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1. CONTEXTUALIZACAO

O aumento da vida útil de equipamentos mecatrônicos é uma prática conhecida no meio industrial. Tipicamente os investimentos nesta área se limitam a ações de manutenção onde equipe de técnicos, ou mesmo empresas especializadas, realizam projetos de “retrofitting” (atualização de máquinas). A natureza destas ações pode ser entendida como uma atividade de projeto sobre um produto pronto, do qual são extraídas todas as informações pertinentes a sua remodelagem para o melhor aproveitamento e conseqüente extensão do tempo de uso.

Tendo por base bens de consumo<sup>1</sup>, o reprojeto é visto como uma oportunidade para ampliação do ciclo de vida (DUFOR, 1996). Neste trabalho o autor relaciona uma série de argumentos para ilustrar que a maioria dos projetos atuais é constituída da combinação e recombinação de princípios de solução existentes e esse processo é entendido como sendo uma ação de reprojeto. O objetivo principal é a sobrevivência do produto dentro do mercado.

De forma geral são muitas as motivações que levam a aplicação do reprojeto, dentre as quais se podem enumerar as seguintes:

- Recapacitação, otimização do equipamento, redução do custo de produção, aumento da segurança, (DUFOR, 1996);
- Recuperação ou revitalização, (BARBOSA, 2005);
- Assegurar a competitividade, melhorar a qualidade e desempenho, (AMARAL, 2001);
- Revisão do projeto original, (ASIMOW, 1968, pg. 59);
- Aumentar o grau de qualidade e inovação da instalação, (DIAS e NUNES 2005).

Independentemente de se tratar de bens de consumo ou bens de capital<sup>2</sup>, todas as motivações acima têm em comum a conjunção de esforços baseados no uso do conhecimento adquirido sobre um sistema técnico existente, e um conjunto de requisitos a serem satisfeitos para o aumento da vida útil. Tais requisitos têm origem em critérios de produtividade,

---

<sup>1</sup> De Guerreiro (2007): “Bens de consumo - destinam-se diretamente ao atendimento das necessidades humanas. De acordo com sua durabilidade, podem ser classificados em: Bens duráveis (por exemplo, geladeiras, fogões, automóveis) e, Bens não duráveis (alimentos, produtos de limpeza, etc.).”.

<sup>2</sup> De Guerreiro (2007): Bens de capital – “são aqueles bens utilizados na fabricação de outros bens, mas que não se desgastam totalmente no processo produtivo. É o caso, por exemplo, de máquinas, equipamentos e instalações. São usualmente classificados no ativo fixo das empresas, e uma de suas características é contribuir para a melhoria da produtividade da mão-de-obra.”.

confiabilidade, manutenibilidade, entre outros, e são manifestados de forma particular em cada nicho de mercado e especialidade técnica.

No caso particular de bens de capital, alguns autores dão conta de que o “retrofitting” é uma prática comum em vários ramos de atividade. Andrade (2006) relata que alguns dos projetos da empresa Odebrecht de atualização de hidrelétricas no Brasil, conseguirão aumentar em até 40 anos a vida útil dessas instalações ao custo de 15% de uma instalação nova. Também Pio (2006) relata casos em que os ganhos referentes à modernização de sistemas de ar condicionado e iluminação podem chegar a 70% na redução de consumo, ainda assim atendendo a novas normas e introduzindo novas funções.

Outra opção para o aumento do ciclo de vida de bens de consumo é apresentada em Lund (1984). O autor sugere a remanufatura como uma forma de reaproveitamento da matéria prima, porém sem a preocupação em questionar os princípios de solução. De acordo com este autor, a remanufatura é um processo industrial onde produtos usados são restaurados em condições de novo. Em um trabalho anterior, Lund (1977) discute uma série de fatores que justificam aumentar o ciclo de vida de produtos, tais como:

- O uso abreviado dos produtos aumenta o consumo de recursos naturais e conseqüentemente pode haver o aumento de custos de matéria prima;
- A evolução tecnológica de produtos leva a um aumento da confiabilidade e redução dos custos em manutenção;
- A única possibilidade de se desconsiderar o aumento do ciclo de vida de um produto é a obsolescência ou perda da sua função.

Apesar das considerações de Lund (1984 e 1977) serem em sua maioria baseadas em bens de consumo, é possível observar nos últimos tempos movimento semelhante na indústria de equipamentos mecatrônicos, onde tornos manuais tem sido substituídos por CNC's, quadros de relés por CLP's, entre outros exemplos.

Mais especificamente para este trabalho, serão considerados os sistemas técnicos automáticos conhecidos como equipamentos mecatrônicos. Segundo De Negri (2004), os produtos que se enquadram nesta categoria são compostos em sua essência por sensores e atuadores conectados entre si e com outros dispositivos por portas físicas como terminais elétricos, eixos, tubulações. Como exemplos têm-se as máquinas-ferramentas, manipuladores, robôs, células de manufatura, dentre outros. Outra característica marcante é que são geralmente equipamentos feitos sob encomenda ou projetados para uma função específica dentro de uma indústria.

Independente da designação (modernização, recapacitação, revitalização, reforma etc.), os esforços de reprojeto para o aumento do ciclo de vida de sistemas técnicos são também causadores da mudança do perfil do trabalhador no meio industrial. As crescentes inovações tecnológicas introduzidas pela automação têm reduzido os postos de trabalho não

especializados (RIGHETTI, 2004). Sob este ponto de vista, existe a necessidade de se planejar o crescimento sustentável entre o desenvolvimento técnico e a força de trabalho. Uma nova fonte de postos de trabalho baseada em serviços especializados pode ser constituída se for considerado o aumento do ciclo de vida de equipamentos mecatrônicos por meio do reprojeto.

## **1.2. METODOLOGIAS DE REPROJETO**

Vários modelos para reprojeto têm sido propostos como Dufour (1996); Otto e Wood (1998); Santos (1999); Amaral (2001); Bitencourt (2001); Barbosa (2005). À exceção de Barbosa (2005), onde é proposta uma metodologia de revitalização com base na confiabilidade, os demais visam trabalhar a experiência acumulada em um projeto existente, na concepção de produtos novos melhorados.

De uma forma um pouco diferente, dada natureza do sistema técnico tratado (usinas hidrelétricas), Dias e Nunes (2005) propõem a Manutenção Integrada em Confiabilidade e Conhecimento (MICC) como um meio de gestão integrada de ativos físicos e conhecimento. No trabalho citado, o reprojeto é entendido como pertinente ao processo de gestão de manutenção uma vez que pretende manter as funções e estender o ciclo de vida do sistema técnico. Os critérios de decisão são inseridos como uma estratégia para obtenção de ganhos de qualidade e inovação das instalações aliando engenharia de projeto à engenharia de manutenção. Nada impede, no entanto, que a atividade de reprojeto se encaixe em um setor de produção ou projeto puro.

Por se tratar evidentemente de uma forma de projeto com menores demandas, onde a maioria dos requisitos dos clientes e princípios de solução pode ser aproveitada do projeto original, o reprojeto faz uso das ferramentas tradicionais de projeto. Ainda levando-se em conta os devidos critérios de decisão, a abordagem pode partir desde metodologias avançadas de projeto, até ações de simples ajuste ou substituição comumente aplicadas por equipes de manutenção.

## **1.3. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA**

Como discutido nos parágrafos anteriores, são várias as ações possíveis para o aumento do ciclo de vida de sistemas técnicos em geral, no entanto em nenhuma delas é apresentada na forma de um método estruturado aplicável a equipamentos mecatrônicos. O reprojeto surge como uma possibilidade em Dufour (1996) e Bitencourt (2001), porém o foco destes métodos está em bens de consumo. A adaptação destes métodos aos propósitos desta dissertação passa pela adequação dos conceitos de projeto de produtos ao reprojeto de produtos em uso ou reutilizáveis.

## **1.4. OBJETIVOS**

### **1.4.1. Objetivo geral**

Este trabalho tem como objetivo propor uma metodologia para o reprojeto de equipamentos mecatrônicos. Esta metodologia será proposta e justificada, como parte de um processo simplificado de projeto, onde as fases de levantamento de necessidades dos clientes e requisitos de produto são identificados e aproveitados a partir do produto original.

### **1.4.2. Objetivos específicos**

- Examinar critérios de decisão para o reprojeto de sistemas técnicos;
- Utilizar as ferramentas de modelagem de sistemas automáticos (Redes C/A, SFC) na engenharia reversa de equipamentos mecatrônicos, dando suporte ao levantamento de requisitos do produto original;
- Usar o modelo confiabilístico para complementar a modelagem de sistemas automáticos e auxiliar no reprojeto.

## **1.5. CONTEXTO DO TRABALHO**

Como será abordado com mais detalhes nos próximos capítulos, são muitos os fatores que sugerem uma ação de reprojeto, no entanto este tipo de decisão pode partir de setores os mais diversos e, em se tratando de sistemas técnicos essencialmente multidisciplinares como são os sistemas automáticos, há a necessidade de se definir o contexto para a aplicação da metodologia a ser proposta:

- Os equipamentos mecatrônicos tratados são equipamentos em uso ou reutilizáveis;
- O sistema estudado é um sistema reparável;
- A função global do sistema é ainda viável ou justificada;
- Os esforços não têm objetivo mercadológico direto, ou seja, a extensão da vida útil do produto para o usuário e não para o mercado.

Portanto, tendo em vista as condições anteriores, deve-se considerar adicionalmente que o reprojeto não é a única opção, e sua relevância tem relação direta com contexto estabelecido.

## **1.6. ESTRUTURA DO TRABALHO**

A estruturação do trabalho visou ordenar as informações e constituir um documento de fácil consulta. No segundo capítulo é feita a revisão bibliográfica da base teórica necessária ao desenvolvimento dos capítulos seguintes, envolvendo a modelagem de sistemas automáticos, modelagem confiabilística e o processo de projeto conceitual. No terceiro capítulo é apresentada a revisão bibliográfica a respeito do reprojeto de produtos. Na seqüência é apresentada, capítulo quarto, a metodologia de reprojeto, que é a contribuição do presente trabalho. O capítulo cinco trata de um estudo de caso onde há a materialização das discussões anteriores em um exemplo prático. Ao capítulo seis são reservadas as considerações finais onde são discutidos o exemplo prático, conclusões e recomendações para novos trabalhos.



## **2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS PARA O REPROJETO DE EQUIPAMENTOS MECATRÔNICOS**

### **2.1. INTRODUÇÃO**

Isoladamente, de acordo com Dorey e Bradley (1994), a expressão “mecatrônica” provê a integração de dispositivos eletrônicos e de controle e informática com dispositivos mecânicos, em produtos ou processos. Como mencionado no primeiro capítulo, dentro da mecatrônica os equipamentos mecatrônicos se diferenciam pelo fato de constituírem uma estrutura modular de componentes facilmente intercambiáveis (DE NEGRI, 2004). Estes componentes podem eles próprios constituir sistemas mecatrônicos em um nível de detalhamento maior. Ainda, de acordo com que foi apresentado no primeiro capítulo, os produtos aqui estudados são equipamentos que constituem a infra-estrutura produtiva de indústrias, constituindo, portanto, um bem de produção ou bem de capital (GUERREIRO, 2007).

Para o desenvolvimento de uma ação de reprojeto em equipamentos mecatrônicos são necessários vários conhecimentos que darão suporte às mais variadas situações com que a equipe de reprojeto pode se deparar. Neste capítulo é feita a revisão bibliográfica dos principais conceitos sobre os quais a metodologia a ser proposta se baseia que são:

- Projeto de produtos industriais;
- Engenharia reversa;
- Modelagem de sistemas automáticos;
- Modelagem e análise de confiabilidade de sistemas.

Nas próximas seções serão discutidos os itens acima listados dentro da profundidade necessária para o desenvolvimento desta dissertação, maiores informações podem ser obtidas juntos às referências mencionadas no texto.

### **2.2. PROJETO DE PRODUTOS INDUSTRIAIS**

Antes de tratar diretamente do problema de reprojeto, há a necessidade de se considerar de forma mais ampla os conceitos de projeto, dos quais uma metodologia de reprojeto deve se originar. Esta constatação vem do fato de que o reprojeto nada mais é que um caso particular dentro do universo de situações que englobam as atividades de projeto.

Segundo Asimow (1968), a atividade de projeto de engenharia tem como foco o atendimento das necessidades humanas de fundo tecnológico. Bitencourt (2001) afirma que tais necessidades são geradas a partir da identificação de um problema em particular e os esforços que se seguem (a atividade de projeto propriamente dita), são justamente para satisfação das mesmas.

### 2.2.1. Tipos de projeto

A classificação dos tipos de projeto apresenta também uma série de versões. Segundo Pahl e Beitz (1996), são três os tipos de projeto: projeto original, projeto adaptativo e projeto de variantes. No projeto original estão qualificados os projetos cujos princípios de solução<sup>3</sup> podem ser considerados inéditos; os projetos adaptativos se originam de soluções conhecidas adaptadas a novas funções. Já os projetos de variantes dizem respeito a princípios de solução redimensionados. A Tabela 2-1 ilustra esta definição de acordo com as características de princípios de solução e função.

Tabela 2-1 - Tipos de projeto segundo Pahl e Beitz (1996) adaptado por Dufour (1996).

<b>TIPO DE PROJETO</b>	<b>PRINCÍPIOS DE SOLUÇÃO</b>	<b>FUNÇÕES</b>
Original	Inéditos, originais	conhecidas ou novas
Adaptativo	Conhecidos adaptados	novas
De variantes	Conhecidos redimensionados	conhecidas

Outra possível classificação é apresentada em Evbuomwan et al. (1996) apud Bitencourt (2001). Nesta classificação os métodos de projeto podem ser prescritivos ou descritivos; o primeiro é composto basicamente prescreve os passos para a solução. No segundo caso a solução é obtida por um processo de raciocínio; este tipo de projeto se caracteriza pelo fato de agregar informações vindas de uma base de conhecimento adquirida pelos projetistas em outras experiências de projeto.

Para o reprojeto de sistemas mecatrônicos é importante se distinguir o projeto de sistemas automáticos. De Negri (1996), mostra que o projeto de sistemas automáticos se diferencia dos demais pelo fato de agregar múltiplas especialidades tecnológicas, sendo que Santos (2003) lembra que tais especialidades têm forma própria de modelagem e descrição. O desafio maior das metodologias para este tipo de projeto, está em promover um ambiente multidisciplinar onde os diferentes especialistas possam desenvolver suas especialidades de forma colaborativa, e possam atender às especificações da forma mais eficiente e produtiva. Ademais a classificação entre original, adaptativo ou variante pode ser igualmente aplicada aos diversos sistemas mecatrônicos.

---

<sup>3</sup> Em Forcellini et al. (2005) o princípio de solução é apresentado como uma unidade fundamental de solução; seria o elemento que, a partir do correto entendimento da função, materializa o efeito físico que, por meio de determinados comportamentos, realiza o objetivo da função em questão.

### 2.2.2. Fases de projeto

Apesar da multiplicidade de metodologias encontrada na literatura, Ferreira (1997), indica que a maioria das metodologias se aproxima da estrutura de quatro fases baseada na chamada “escola alemã”:

- Projeto informacional;
- Projeto conceitual;
- Projeto preliminar;
- Projeto detalhado.

Esta mesma estrutura é explorada em De Negri (1996) como mostra a Figura 2-1, para organizar as fases de projeto para um sistema automático.

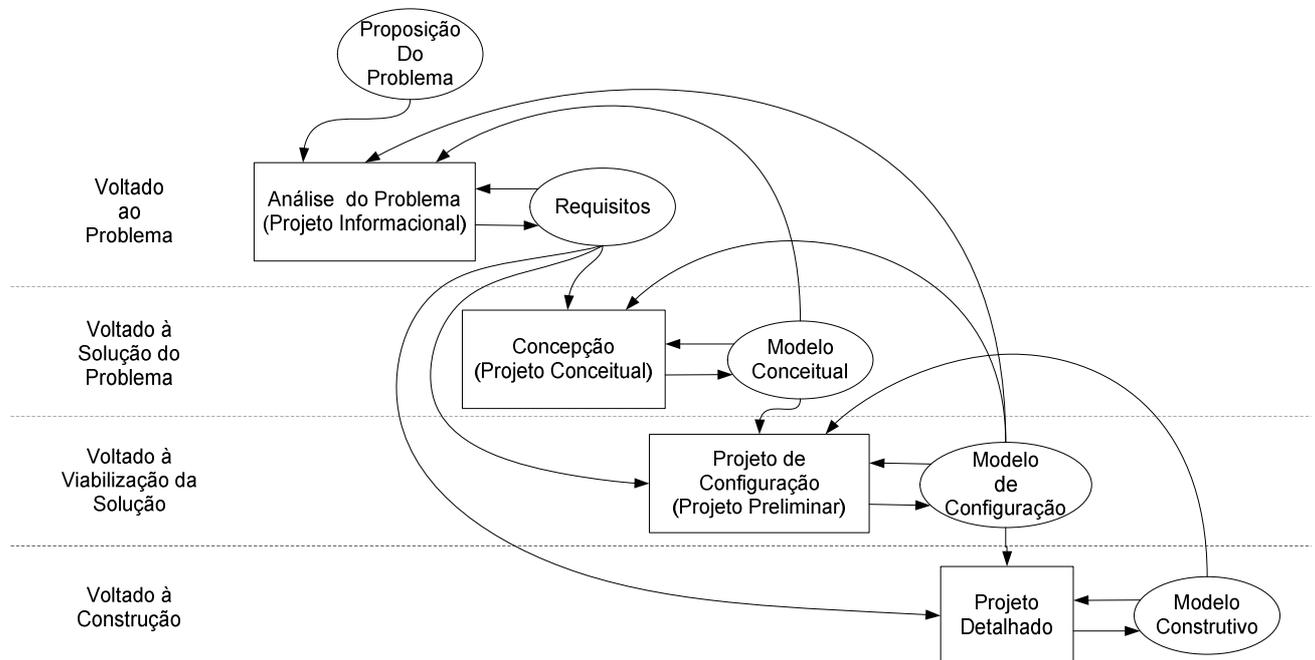


Figura 2-1 - Modelo funcional do processo de projeto para sistemas automáticos, adaptado de De Negri (1996).

Fonseca (2000) define a fase informacional como o momento do projeto onde, mediante ferramentas adequadas, se converte as necessidades dos clientes em especificações de projeto. Esta fase engloba todos os trabalhos de coleta de informações técnicas e de mercado; é também onde se define as necessidades dos clientes com base no ciclo de vida do produto. O resultado final é um conjunto de especificações que irão guiar os projetistas nas demais fases de projeto.

Independentemente do tipo de projeto em questão, a fase conceitual representa o ponto inicial de convergência que todos os esforços de projeto irão refletir no produto final. À fase conceitual é reservada à definição da concepção do produto. Com base nas definições da fase

informacional os projetistas são estimulados por métodos de criação a encontrar as soluções necessárias para satisfazer as especificações levantadas.

Resumidamente o modelo de projeto conceitual apresentado por Forcellini et al. (2005) constam as seguintes etapas:

- Modelar funcionalmente;
- Desenvolver alternativas de solução;
- Analisar sistemas subsistemas e componentes (SSC);
- Selecionar concepções.

Com a etapa da modelagem funcional, a equipe de projeto compõe uma visão abstrata do produto e determina as condições de contorno que irão inspirar a geração de soluções na etapa seguinte. Para o desenvolvimento de soluções inovadoras são vários os métodos empregados, segundo Forcellini et al. (2005) tais métodos podem ser classificados em intuitivos, sistemáticos e orientados (Tabela 2-2):

Tabela 2-2 – Classificação dos métodos criativos segundo Forcellini et al. (2005).

<b>Métodos Intuitivos</b>	<b>Métodos Sistemáticos</b>	<b>Métodos Orientados</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Brainstorming</li> <li>• Método 635</li> <li>• Lateral Thinking</li> <li>• Synetics</li> <li>• Galeria</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Método morfológico</li> <li>• Análise e síntese funcional</li> <li>• Analogia sistemática</li> <li>• Análise do valor</li> <li>• Questionários e cheklists</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• TIPS</li> <li>• SIT</li> </ul>

As soluções geradas são propostas para atender os modelos abstraídos da etapa anterior e, na seqüência, mediante a análise de sistemas, subsistemas e componentes, as soluções são confrontadas com o ciclo de vida; são identificados problemas potenciais relacionados aos mais diversos aspectos como montagem, custos, fabricação, uso, qualidade entre outros. A conclusão da fase conceitual ocorre na seleção da concepção que melhor atende às especificações.

As fases de projeto preliminar e detalhado se complementam mutuamente, a primeira trata de avaliar técnica e economicamente a concepção escolhida na fase conceitual, e a segunda trata de gerar a documentação final que servirá de base para a manufatura do produto.

### **2.3. ENGENHARIA REVERSA**

O trabalho desenvolvido pela engenharia reversa tem sua maior motivação na busca de informações sobre um sistema técnico existente. Anquetil (2002) define a engenharia reversa como uma atividade que reúne esforços para o entendimento do funcionamento e o que um determinado produto existente faz.

Na mesma linha de Otto e Wood (1998), Bitencourt (2001) designa a fase de engenharia reversa como fase de “recuperação e avaliação da concepção do produto”. A motivação em ambos os casos é a identificação dos princípios de solução do produto original e, com base nas especificações de projeto, propor o reprojeto deste mesmo produto. Estes trabalhos serão tratados em detalhes no próximo capítulo.

Musker (1998) afirma que não é possível na prática se recuperar em detalhes a especificação original de um produto pela simples análise, e lista os seguintes estágios como base para a engenharia reversa:

- Análise do produto
- Geração de uma descrição de nível intermediário
- Análise por inspeção para descrição e produção de uma especificação
- Geração de um novo produto usando a especificação

Pelo guia MIL-HDBK-115A (US ARMY, 2006), as forças armadas dos EUA orientam a engenharia reversa como uma atividade para “... duplicação de um item, funcional e dimensionalmente, pelo exame físico e medição das partes existentes para o desenvolvimento de dados técnicos (características materiais e físicas)...”<sup>4</sup> (Figura 2-2). O fator motivador para a metodologia apresentada é o estímulo à competição de fornecedores de peças de reposição.

---

<sup>4</sup> Tradução livre do seguinte trecho do guia MIL-HDBK-115A(US ARMY, 2006, pg. 6):

“...process of duplicating an item, functionally and dimensionally, by physically examining and measuring existing parts to develop the technical data (physical and material characteristics)...”

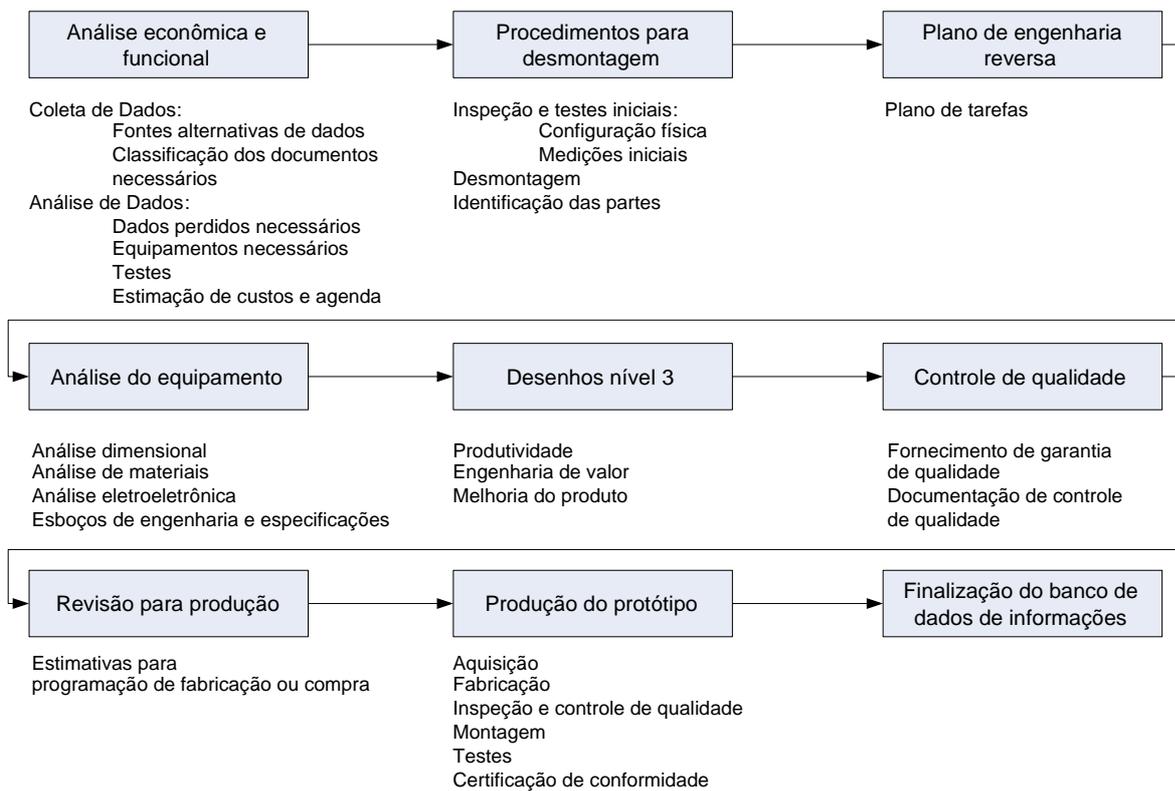


Figura 2-2 - Processo de engenharia reversa, tradução livre de MIL-HDBK-115A, (US ARMY, 2006, pg. 59).

Uma seqüência semelhante a do guia MIL-HDBK-115A, US ARMY (2006), é apresentada por Ingle (1994) apud Barbosa (2005):

- Primeira fase: avaliação e verificação – baseada na desmontagem e no exame das características do produto, além do confronto com dados disponíveis em literatura técnica;
- Segunda fase: geração de dados técnicos - gerar informações que não puderam ser obtidas anteriormente;
- Terceira fase: verificação do projeto;
- Quarta fase: implementação do projeto.

É possível concluir a partir das informações obtidas dos autores pesquisados, que o processo de engenharia reversa objetiva basicamente a coleta de informações sobre um produto pronto. O encaminhamento destas informações serve as diversas finalidades dentre as quais as seguintes:

- Melhoria do produto;
- Análise da concorrência (Benchmarking);
- Manutenção ou reativação de equipamentos usados.

Este último é o de maior interesse nesta dissertação e os demais tópicos deste capítulo servirão de suporte aos procedimentos a serem utilizados metodologia de reprojeto proposta no capítulo 4.

## 2.4. MODELAGEM DE SISTEMAS AUTOMÁTICOS

A aplicação da modelagem de sistemas automáticos neste trabalho tem como principal função o suporte para a engenharia reversa do equipamento mecatrônico estudado. O fato de serem apresentadas várias técnicas de modelagem vem do caráter multidisciplinar das tarefas de projeto de sistemas automáticos, pois em um dado momento os especialistas envolvidos na tarefa de reprojeto podem se sentir mais confortáveis com uma forma de modelagem ou outra.

Outro aspecto de suma importância na modelagem de sistemas automáticos é o seu comportamento. A integração da eletrônica em componentes mecânicos confere um nível de inteligência ao sistema automático em que as modelagens estrutural e funcional não são suficientes para descrevê-lo. Uma das formas de expressão do comportamento do sistema surge a partir dos sistemas de supervisão e controle, pois é onde os operadores e técnicos observam o curso das operações e o estado do sistema técnico. A modelagem destes sistemas permite determinar pontos da estrutura onde o monitoramento é ineficiente ou mesmo questionar a seqüência de atuação para melhoria de tempos de operação, entre outras medidas. Neste trabalho é sugerida como principal ferramenta para modelagem comportamental a linguagem de programação industrial SFC prevista na norma IEC 1131-3 (IEC, 1993); a descrição, características e utilização são objetos da seção 2.4.3.2 deste capítulo.

### 2.4.1. Modelagem funcional

Da mesma forma que em qualquer produto industrial, a abordagem funcional é pertinente a modelagem de sistemas automáticos. De acordo com Forcellini et al. (2005), a modelagem funcional possibilita a abstração do sistema técnico e não limita a busca por soluções específicas. Esta abordagem visa fomentar o processo de criação de um novo produto, mas nada impede que seja usada para o entendimento de um sistema existente.

Sem maiores adaptações, pode-se adotar o método de Estrutura de Funções. Conforme a Figura 2-3, a Estrutura de Funções é uma representação diagramática que serve para descrever os relacionamentos do sistema técnico por meio de fluxos de energia, material e de sinal.



Figura 2-3 - Representação esquemática da Função Global, adaptado de Forcellini et al. (2005).

A partir da função global trabalha-se no desdobramento de funções mais simples (Figura 2-4). O nível de tais desdobramentos dependerá do interesse em algum módulo específico, mas é conveniente que se faça tão detalhado quanto possível a fim de se obter um completo entendimento do sistema. O trabalho mais detalhado tem o mérito de revelar correlações entre módulos que uma análise superficial pode perder.

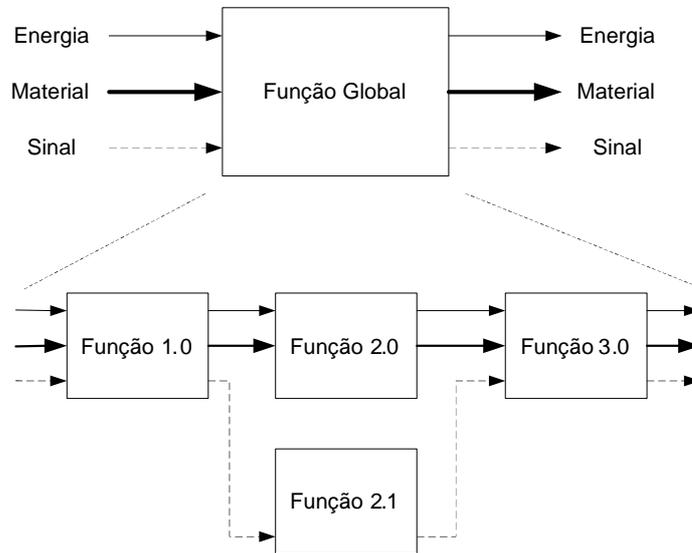


Figura 2-4 - Desdobramento da Função Global em funções mais simples, adaptado de Forcellini et al. (2005).

Em um primeiro momento, a representação funcional é suficiente para o entendimento do sistema técnico, mas com o aumento da complexidade e a integração de diferentes tecnologias pode surgir a necessidade de uma abordagem mais detalhada. Neste sentido, a representação em Rede Canal Agência (Rede C/A), apresentada por De Negri (1996), é a opção mais adequada à estrutura de funções.

#### 2.4.2. Modelo funcional / estrutural

O nível de estruturação obtido com a modelagem em Rede C/A determina a maior vantagem sobre a estrutura de funções. Uma Rede C/A é constituída basicamente de três elementos (Figura 2-5):

- Canal: elemento passivo da rede onde circulam a matéria, energia e informação, é representado pela forma geométrica de um círculo;
- Agência: elemento ativo da rede onde são processadas a matéria, energia e informação, é representado pela forma geométrica de um retângulo;
- Arcos de direção: elemento gráfico indicativo dos fluxos de energia, matéria e informação.

Elementos Básicos			
Símbolo	Nome genérico	Perspectiva funcional	Perspectiva estrutural
□	Unidade ativa	Atividade (função)	Agência
○	Unidade passiva	Recurso	Canal
Interconexão dos elementos			
Símbolo	Tipo de recurso		
→▷	Fluxo de informação		
→▶	Fluxo de energia		
→➤	Fluxo de matéria		
→➦	Fluxo de energia e matéria		

Figura 2-5 - Rede Canal/Agência (Rede C/A) (DE NEGRI, 1996).

Com a diferenciação entre elementos passivos e ativos, o modelo em Rede C/A permite a representação explícita de conexões, ligações, meios físicos de transmissão de forma diferenciada de processadores, motores, bombas etc. Este nível de detalhe é importante para o reprojeto, pois muitos problemas podem ser detectados e resolvidos no estudo destas interações.

Da mesma forma que a representação em estrutura de funções, a Rede C/A possibilita o refinamento ou condensação dos diagramas (Figura 2-6).

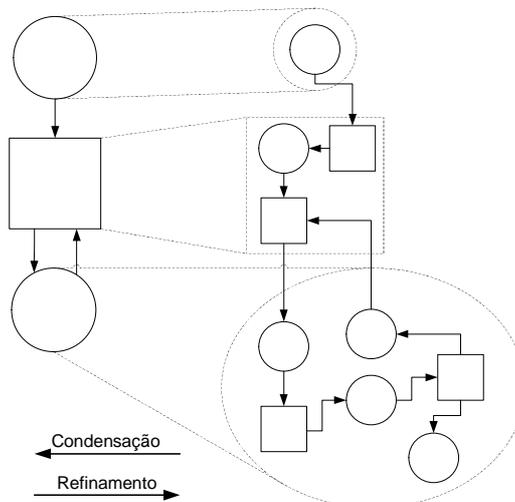


Figura 2-6 - Mecanismo de refinamento e condensação de redes C/A (DE NEGRI 1996).

Novamente o nível de detalhamento é função do interesse em um módulo específico, mas para o pleno conhecimento do sistema é conveniente que se faça o mais detalhado possível.

O detalhamento desta modelagem para sistemas automáticos é proposta por De Negri (1996) e posteriormente complementada por Souto (2005). A Figura 2-7 mostra a estrutura funcional de um sistema automático genérico onde se percebe a troca de informações entre as agências Sistema de Informação e Sistema Energético/Material.

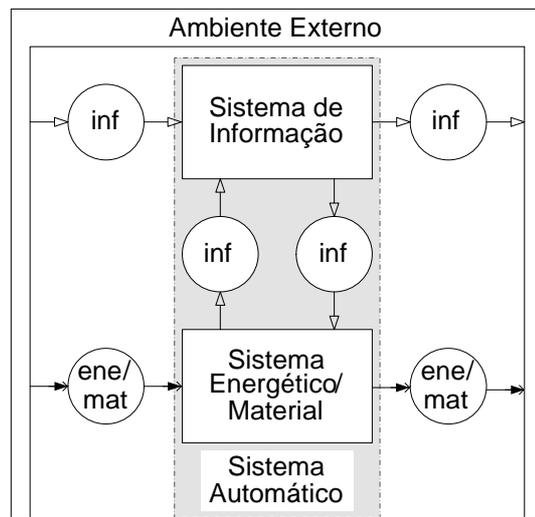


Figura 2-7 - Modelo funcional/estrutural condensado de um sistema automático (DE NEGRI, 1996).

Um detalhamento da Figura 2-7 é apresentado na Figura 2-8. O modelo põe em evidência duas novas estruturas na interação entre o sistema de informação e o sistema energético/material. O primeiro é o Sistema de Medição (SM) no sentido processamento de energia/ matéria para o processamento de informação, o segundo é o Sistema de Atuação (SA) no sentido inverso.

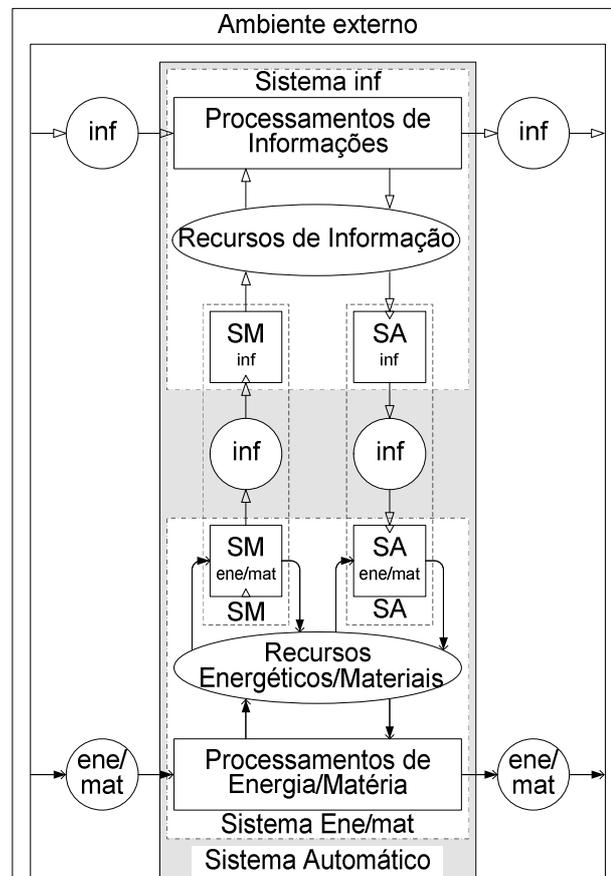


Figura 2-8 – Sistema automático (mecatrônico) - Modelo funcional refinado (DE NEGRI e VIEIRA, 1997).

O complemento proposto por Souto (2005) Figura 2-9, consiste em descrever as interações do sistema automático com ambiente externo mediante a relação de sistemas de pedido e resposta. Nele são apresentadas novas agências, Sistema de Atuação e Medição (SAM), Sistema de Pedido (SP), Sistema de Resposta (SR) e Sistema de Pedido e Resposta (SPR).

A importância desta abordagem se justifica pela universalização da modelagem; os elementos apresentados na Figura 2-9 são comuns, em maior ou menor grau, a todos os sistemas automáticos. As estruturas propostas servem como ponto de partida na análise do sistema e estabelecem uma relação que facilita a modelagem e estimulam o pleno entendimento de sistemas automáticos.

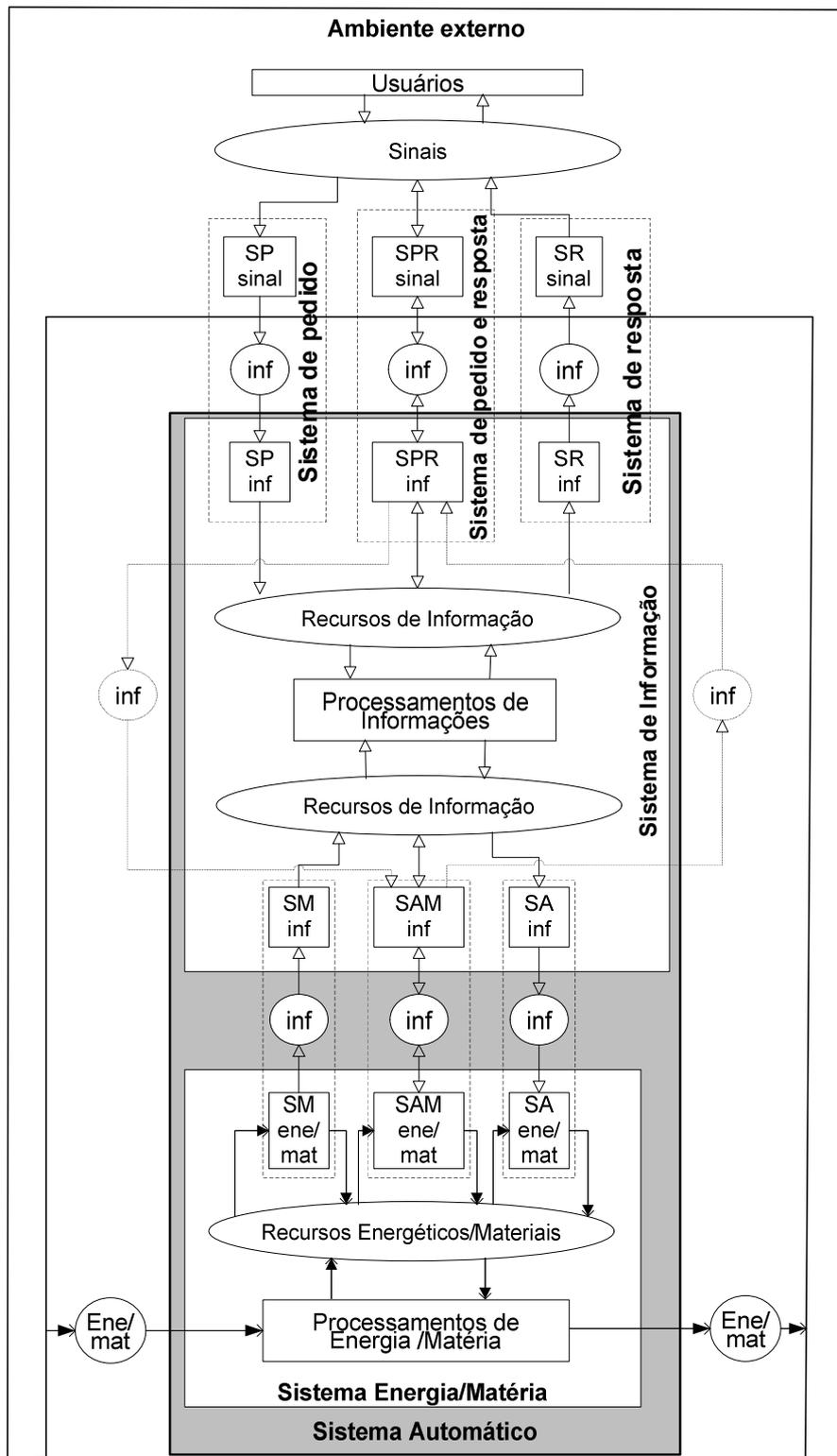


Figura 2-9 - Modelo estrutural e funcional de um sistema automático estendido (SOUTO, 2005).

### 2.4.3. Modelo comportamental

Com o avanço dos mecanismos de inferência por meio de dispositivos sensores e processadores, torna-se possível o controle do comportamento dos sistemas automáticos. Dependendo do nível de complexidade, o real entendimento do funcionamento de um sistema automático só é possível por meio da sua modelagem comportamental.

A materialização do comportamento<sup>5</sup> se dá a partir de um conjunto de ações e reações, e a interface com os usuários é obtida com a troca de informações mediante sistemas de supervisão e parametrização. Para Souto (2005), a troca de informação do usuário e o sistema técnico se dividem em dois grupos principais:

- Os pedidos feitos ao sistema, que informam a este como operar e quando deve iniciar ou terminar a operação – este grupo é composto de eventos que não são controláveis já que não se pode limitar o desejo do usuário de fazer escolhas;
- Os sinais que respondem com os resultados das escolhas feitas pelo usuário e/ou os estados do sistema – este grupo é composto de eventos controláveis, e algumas vezes também por eventos não-controláveis, visto que são informações que o sistema monitora e escolhe passar ou não ao usuário.

Por ser essencialmente abstrato, o modelo comportamental não reflete imperfeições inerentes a dinâmicas não modeladas; um exemplo seria o efeito da inércia de aceleração de um atuador. Tradicionalmente os modelos comportamentais estabelecem relações de estados binários como avançado e recuado; o resultado é que os efeitos das vibrações desconsideradas no modelo comportamental, tomados durante o ciclo de vida do equipamento, resultam em falhas no comportamento projetado.

A importância destas informações no âmbito do comportamento do sistema, está em obter um parâmetro mensurável onde a equipe de reprojeto tenha a real magnitude do efeito dos fluxos de informação em seu modelo. A robustez normalmente associada a elementos físicos do sistema passa a ter um equivalente na parte comportamental, as funções executadas pelo código do programa, que são diretamente responsáveis pelo comportamento do sistema, passam a ser projetadas e mantidas conforme a confiabilidade do canal de ligação entre os sistemas energético/material e informação. Um recurso de software que reflete bem este raciocínio é conhecido como “watch dog”; basicamente o que faz é “vigiar” o sistema, se uma instrução levar um tempo demasiado longo para ser executada, é disparado uma rotina alternativa para avisar o operador ou tentar sanar uma suposta condição de falha. Conhecendo a qualidade do canal, o tempo de resposta de um sensor, por exemplo, tem-se a informação necessária para trabalhar como recurso Watch Dog ou criar outros que atendam a outras características específicas de cada canal.

---

<sup>5</sup> Visto do ponto de vista a estado discreto (DE NEGRI, 2004 pg. 16 e 17).

### 2.4.3.1. Tipos de modelos comportamentais

Conforme discutido em De Negri (2004), o comportamento de diversos equipamentos automáticos podem ser classificados em sistemas guiados pelo tempo e sistemas guiados por eventos (ambos a estados discretos). A opção por uma classe ou outra é função do modo como se observa o sistema e não da sua natureza.

Outra abordagem são os modelos a estados contínuos onde são utilizadas principalmente as equações diferenciais e diagramas de bloco. Em linhas gerais os modelos comportamentais utilizados em engenharia são apresentados na Tabela 2-3. Dada a simplicidade de operacionalização e sistematização, os modelos discretos no tempo, como são os equipamentos mecatrônicos controlados por computadores e microprocessadores, serão o foco desta dissertação para a modelagem comportamental.

Tabela 2-3 - Alguns modelos comportamentais mais usuais em engenharia, adaptado de De Negri (2004).

<b>Modelo</b>	<b>Representação no Tempo</b>	<b>Representação</b>	<b>Área Técnica</b>
Diagrama de blocos	Discreto	Diagramático + Matemático	Multitecnológico
Diagrama de estados	Discreto	Diagramático	Software, Microeletrônica
Rede de Petri Marcada	Discreto	Diagramático	Sistemas de manufatura
Diagrama de Função Seqüencial (SFC)	Discreto	Diagramático	Automação, pneumática
Grafos de Ligação (Bond Graphs)	Discreto	Diagramático	Multitecnológico
Funções de transferência	Contínuo	Matemático	Multitecnológico
Equações dinâmicas (Variáveis de estado)	Contínuo	Matemático	Multitecnológico

Como informado anteriormente, neste trabalho é sugerido o diagrama SFC para representação do comportamento do sistema automático discreto. Das motivações que levam a

esta escolha está o fato deste modelo estar previsto em norma específica, ser direcionado a área técnica de automação e também ser de fácil assimilação, o que o torna um agente disseminador de conhecimento dentro de um grupo multidisciplinar.

### 2.4.3.2. Diagrama de Função Seqüencial (SFC) <sup>6</sup>

SFC é uma linguagem de alto nível usada para descrever seqüências de comando em diagramas gráficos. Nos anos 70 um consórcio de empresas francesas e de acadêmicos propôs uma versão simplificada da Rede de Petri (Petri Net) chamada Grafcet, mais tarde em 1988 se tornou base para definição do padrão internacional IEC 848 (IEC, 1988); (“Preparação de diagramas de função para sistemas de comando”). Em 1992 a norma IEC 1131-3 (IEC, 1993) vem instituir o SFC como um padrão internacional com ampla aceitação no meio industrial.

Os elementos básicos de um diagrama SFC são os seguintes (Figura 2-10):

- Transições: causa a transição entre os passos, atua como ponto de coordenação;
- Passo: estado de operação, geralmente está associado a uma ação;

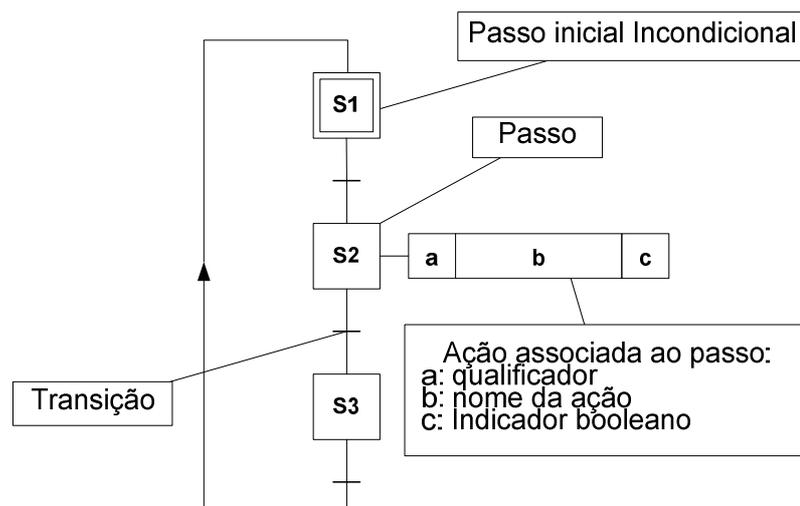


Figura 2-10 - Representação genérica de um diagrama SFC de acordo com a norma IEC 1131-3 (IEC, 1993).

A norma IEC 1131-3 (IEC, 1993), prevê, conforme indicado na Figura 2-10, um qualificador de ação associado ao passo. Os possíveis qualificadores são mostrados na Tabela 2-4:

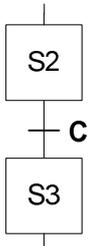
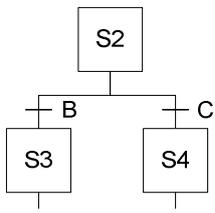
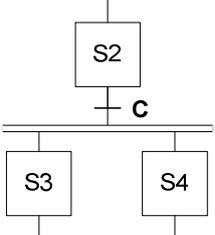
<sup>6</sup> Sequential Function Chart

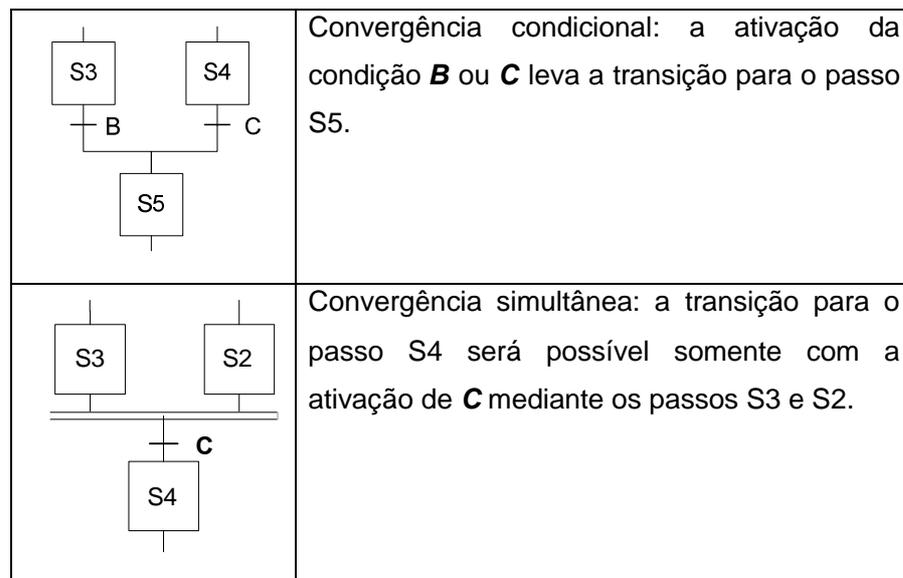
Tabela 2-4 - Tabela de qualificação de ações, IEC 1131-3 (IEC, 1993).

No	Qualificador	Explicação
1	Nenhum	Qualificador nulo, a ação fica ativa enquanto o passo estiver ativo.
2	N	Idem
3	R	Reset (desliga) desativa as instruções S, SD, DS e SL
4	S	Set (liga) mantém a ação ativa
5	L	Tempo limitado (ativo com o passo)
6	D	Retardo na ligação (ativo com o passo)
7	P	Pulso (ativo com o passo)
8	SD	Retardo na ligação (independente do passo)
9	DS	Retardo na ligação (dependente do passo para ligar)
10	SL	Pulso (independente do passo)

Com relação à evolução da seqüência de passos, são cinco as possibilidades básicas (Tabela 2-5):

Tabela 2-5 - Evolução da seqüência de passos, IEC 1131-3 (IEC, 1993).

Exemplo	Explicação
	Seqüência simples: a transição de passos é serial.
	Divergência condicional: a transição para os passos S3 ou S4 estão condicionadas a ativação de <b>B</b> ou <b>C</b> , respectivamente.
	Divergência simultânea: com a ativação da condição <b>C</b> os passos S4 e S3 passam para condição ativa paralelamente.



As muitas variações de combinações e o detalhamento da linguagem SFC podem ser encontrados na norma IEC 1131-3 (IEC, 1993), e inúmeras publicações e manuais de fabricantes de software industrial.

#### 2.4.3.3. Análise da cadeia de medição (propagação de incertezas)

Independentemente da natureza da medição, os sistemas de monitoramento constituem um canal fundamental no projeto de um sistema automático. Em De Negri (1996) um sistema de medição é considerado como um canal de informação dentro do sistema automático entre o ambiente externo e sistema de informação (Figura 2-8). Desta forma, a análise da cadeia de medição constitui uma das fontes de informação que garantem o pleno conhecimento da qualidade das interações entre o universo físico de atuadores e sensores, pertinentes ao sistema energético material, e o sistema informacional.

Do ponto de vista de comportamento, estas informações são fundamentais para saber o nível de confiança que pode ser depositado na seqüência de ações projetadas para o sistema automático.

Em Flesch (2003), Albertazzi e Sousa (2004) é apresentada a análise de propagação de incertezas como forma para determinação da incerteza associada a um sistema de medição. O problema surge da modularização inerente ao processo de medição. Invariavelmente o ato de medir consiste em obter uma grandeza manipulável, o sinal de medição, equivalente a outra de interesse, o mensurando. Neste processo, o princípio de medição, materializado na forma de um transdutor, gera o sinal para um sistema de tratamento de onde parte finalmente para um dispositivo mostrador ou de aquisição. As incertezas de cada uma destas partes interligadas, quando combinadas, constituem a incerteza do sistema de medição como um todo (Figura 2-11).

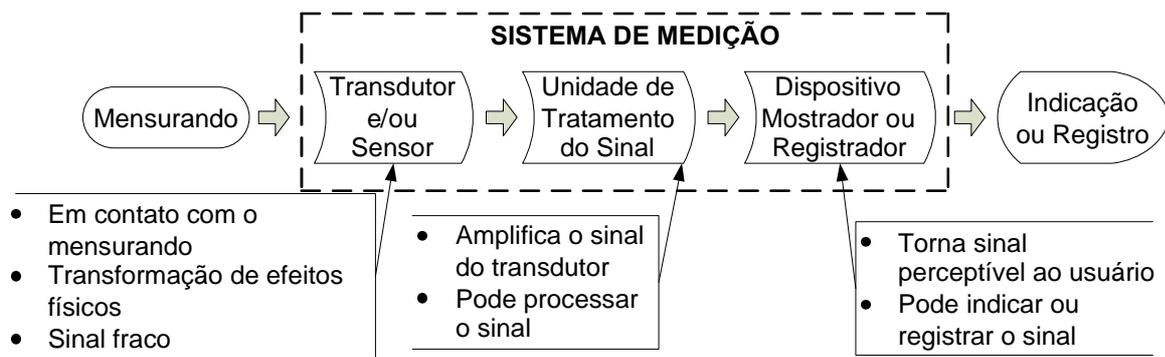


Figura 2-11 - Módulos básicos de um sistema de medição, adaptado de Albertazzi (2005).

Em metrologia as análises de medição servem para que o usuário tenha a idéia mais próxima possível da exatidão com que seu sistema de medição se comporta, e constitui um parâmetro estático que é desejável permanecer constante por toda vida útil do equipamento mecatrônico. No entanto, o sistema de medição está sujeito à degradação temporal da mesma forma que qualquer item do sistema técnico como um todo. Assim têm-se basicamente dois mecanismos fundamentais de falha que tem reflexos no comportamento do sistema:

- Perda da exatidão projetada do sistema por degradação dos componentes do sistema de medição;
- Falha de parte ou total dos módulos que compõe o sistema de medição.

O conhecimento da incerteza do sistema de medição constitui um parâmetro que permite projetar ou ajustar o modelo comportamental para suportar as perdas por degradação e protelar a total falha do sistema. O grau de liberdade com que se trabalham estes parâmetros pode ser a diferença em se substituir completamente o componente monitorado ou estender sua vida útil.

## 2.5. MODELAGEM E ANÁLISE DE CONFIABILIDADE DE SISTEMAS

Existem várias abordagens para a confiabilidade de sistemas. Em Dias (1996) a confiabilidade é introduzida como um parâmetro no projeto de componentes de sistema de freios pneumáticos; Vinadé (2003) contribuiu com um sistema especialista cujo foco está na sistematização da informação de projetos para manutenibilidade e confiabilidade de sistemas hidráulicos; no mesmo ano Barros Filho (2003) contextualizou a confiabilidade dentro das rotinas de manutenção de sistemas de manufatura de classe mundial; finalmente Barbosa (2005), usa a confiabilidade no processo de revitalização de equipamentos.

Assim resumidamente, considerando as quatro referências anteriores, pode-se avaliar a confiabilidade em três momentos:

- Durante o projeto de um produto;
- Durante o uso quando da manutenção de um produto;
- Ao final do ciclo de vida projetado como parâmetro na análise de viabilidade na revitalização ou reutilização.

Independente do momento em questão, a grande vantagem no uso dos métodos confiabilísticos está em se dispor de um parâmetro de referência para tomada de decisão no projeto, reprojeto ou na manutenção de um sistema técnico qualquer. O interesse no estudo da confiabilidade neste trabalho está em ampliar a percepção sobre o sistema técnico utilizando a visão confiabilística. O modelo confiabilístico e os parâmetros de confiabilidade permitem estimar o tempo de uso dos equipamentos e seus componentes e, do ponto de vista de projeto, estabelecer relações de perda e ganho para a satisfação de requisitos ou recomposição dos mesmos dentro do reprojeto.

### **2.5.1. Confiabilidade**

Formalmente a NBR 5462 (ABNT, 1994) define a confiabilidade como:

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

Adicionalmente à definição formal do parágrafo acima, Santos (1999), afirma que a confiabilidade é uma expressão da incerteza da engenharia.

Em uma visão mais ampliada, Blanchard e Fabricky (1990) a definem da seguinte forma:

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

Modarres (1993) apud Barbosa (2005) reconhece duas conotações ao termo confiabilidade. O primeiro de caráter probabilístico, vem da análise quantitativa normalmente relacionada às hipóteses geradas sobre o comportamento do sistema real; o segundo de caráter determinístico, está relacionado a análises de causas e conseqüências.

Detalhadamente Monchy (1989) apud Barros Filho (2003) delimita quatro elementos que caracterizam fundamentalmente a confiabilidade:

- Probabilidade: associada a conceitos estatísticos. Números de casos favoráveis por número de casos possíveis. A confiabilidade é uma probabilidade. É ela que caracteriza a diferença entre equipamentos da mesma natureza. A probabilidade permite estimar a possibilidade de um equipamento funcionar sem falha durante certo tempo. É admitida uma possibilidade de falha do item, que pode ser um produto, equipamento ou sistema;
- Função requerida: associado a um determinado padrão de uso ou cumprir uma missão ou fazer o serviço esperado. A definição da função requerida implica um patamar de admissibilidade abaixo do qual a função não é mais satisfeita;
- Condições de uso: associadas às condições de uso (sobrecarga, alívio), considerando as condições ambientais que geram as falhas (temperatura,

vibrações, radiações, etc.), e as condições de manutenção (reparo, substituição, etc.);

- Período de uso: associado ao tempo de funcionamento, a duração da missão em unidades de uso, um número de ciclos ou quilometragem. A confiabilidade decresce ao longo do uso, conseqüentemente, deve ser a ele relacionada, podendo ser alterada por ações de manutenção (corretiva, preventiva, sistemática ou de condição).

Resumidamente as perspectivas aqui apresentadas colocam a confiabilidade como uma quantidade estatístico/temporal que é função das condições as quais o sistema técnico está submetido. Dentre estas condições pode-se incluir fundamentalmente a satisfação da função para o qual o sistema foi projetado e as condições durante o período de uso.

### 2.5.2. A métrica da confiabilidade

Para ser utilizada como referência, a confiabilidade deve ser medida. A natureza da medida de confiabilidade tem caráter probabilístico e como tal deve comportar grandezas dentro de uma razão, que tratadas de forma estatística, produzam resultados indicativos do grau de confiabilidade que pode ser atribuído ao elemento analisado.

Dias (2005) orienta que para o processamento destas informações não existe uma única metodologia, pois as quantidades envolvidas e as condições de contorno são variáveis. Assim, em termos genéricos a grandeza confiabilidade pode ser obtida da seguinte formulação:

$$R(x) = \frac{N_s(x)}{N_0(0)} \leq 1 \quad (2-1)$$

Onde

$R(x)$  = confiabilidade no tempo;

$x$  = variável aleatória que representa a vida, podendo ser expressa em unidade de tempo (h), número de ciclos (n) ou distância percorrida (km) ou qualquer outra unidade que expresse um intervalo temporal;

$N_s(x)$  = é a quantidade de itens em bom funcionamento para a vida  $x$ ;

$N_0(0) = N_0$  = é a quantidade total de itens em bom funcionamento no início do ensaio ou da observação. Logo  $N_0 = N_s(x) + N_f(x)$  e

$N_f(x)$  = é a quantidade de itens que falharam durante o período de vida  $x$ .

A função de distribuição acumulativa, ou simplesmente probabilidade de falha,  $F(x)$ , é:

$$F(x) = \frac{N_f(x)}{N_0} \quad (2-2)$$

Substituindo  $F(x)$  na  $R(x)$  anterior, obtém-se:

$$R(x) = 1 - F(x) \quad (2-3)$$

A função densidade de probabilidade  $f(x)$  origina-se derivada da função de confiabilidade em relação à  $x$ .

$$f(x) = \frac{dF(x)}{dx} = -\frac{dR(x)}{dx} \quad (2-4)$$

Relacionando as três últimas equações obtém-se:

$$f(x) = \frac{1}{N_0} \frac{dN_f(x)}{dx} \quad (2-5)$$

Com a integração da equação (2-5) é possível reescrever as expressões de  $F(x)$  e  $R(x)$  em função de  $f(x)$ :

$$F(x) = \int_0^x f(x) dx \quad (2-6)$$

e

$$R(x) = 1 - \int_0^x f(x) dx \quad (2-7)$$

Assim a representação da confiabilidade e probabilidade de falha ao longo da vida é equivalente à área sob a curva da função de densidade de probabilidade de acordo com a Figura 2-12.

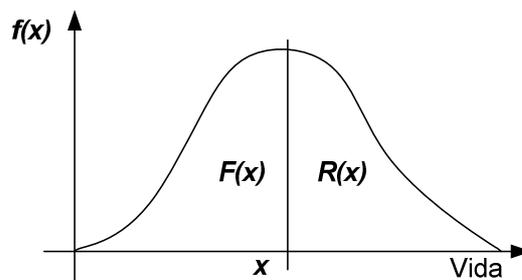


Figura 2-12 - Representação dos valores de confiabilidade e não-confiabilidade sob a curva de densidade de probabilidade de falha (BILLINTON e ALLAN, 1983)

Considerando que a área sob a curva acima é unitária, a equação da confiabilidade é reescrita da seguinte forma.

$$R(x) = \int_x^{\infty} f(x) dx \quad (2-8)$$

Outra forma de expressar a probabilidade de falha é mediante o cálculo da taxa instantânea de falha  $\lambda(x)$ :

$$\lambda(x) = \frac{\text{Número de falhas} / x \text{ (t, km, ciclos...)}}{\text{Número de componentes expostos a falha}} \tag{2-9}$$

Do ponto de vista da definição, a taxa instantânea de falha é comparável à função densidade de probabilidade,  $f(x)$ . No limite, quando o período de análise tende para zero ( $x \rightarrow 0$ ), elas se equivalem. A diferença é que a densidade de probabilidade de falha permite avaliar a probabilidade de falha em qualquer tempo futuro, e a taxa instantânea de falha é indicada para avaliar a probabilidade de falha num período próximo ao de uso, ou para os itens que tenham sobrevivido até o período ( $x$ ).

Outra forma de cálculo da taxa instantânea de falha é a seguinte.

$$\lambda(x) = \frac{f(x)}{R(x)} \tag{2-10}$$

De acordo com Dias (1996) a seguinte equação representa a equação geral da confiabilidade:

$$R(x) = e^{-\int_0^x \lambda(x) dx} \tag{2-11}$$

Também em termos de taxa de falha, Dias (2005) apresenta a análise da curva da banheira (Figura 2-13).

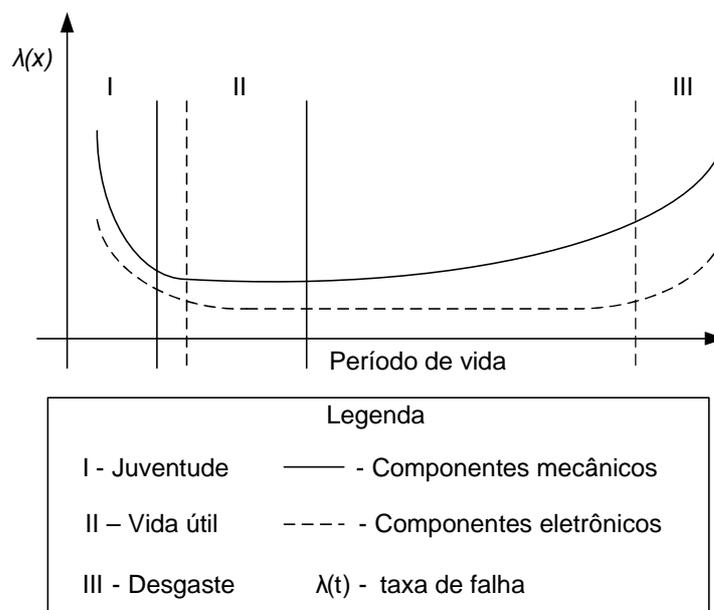


Figura 2-13 - Variação típica da taxa de falha de componentes, adaptado de Barbosa (2005), Billiton e Allan (1983).

É possível obter diversas informações a partir da curva da banheira. O primeiro período ou fase (I) pode ser associado à infância do componente ou produto, Dias (2005) afirma que as falhas desse período são oriundas de erros de manufatura ou de projeto que não foram detectadas no controle de qualidade. As falhas da primeira fase são conhecidas também como falhas prematuras. Em equipamentos mecatrônicos têm uma forte correlação com ajustagem ou assentamento dos componentes na fase de comissionamento logo que o produto é entregue pelo fornecedor.

A segunda fase (II) corresponde à vida útil do produto. As falhas deste período são consideradas aleatórias e de origens que fogem ao controle do usuário ou fabricante. Dias (2005) acrescenta que os componentes não-reparáveis, (geralmente componentes elétricos como lâmpadas, fusíveis e outros) apresentam um período de vida útil mais extenso. Em equipamentos mecatrônicos esta fase pode ser estendida se elaboradas rotinas de manutenção onde o usuário se compromete a substituir certos componentes antes mesmo que ele apresente alguma falha, assim se evita o comprometimento prematuro de todo o sistema, em Billinton e Allan (1983) se referem a esta ação como manutenção preventiva.

Finalmente o último período (III), é onde o produto apresenta um quadro crescente de desgaste ou fadiga. A ruína generalizada dos componentes não permite o completo restabelecimento das falhas pela equipe de manutenção, o produto muitas vezes é relegado ao descarte.

Em linhas gerais, as falhas apresentam perfis diferenciados para cada tipo de componente ao longo do ciclo de vida de um equipamento mecatrônico, as curvas da Figura 2-13, de acordo com Billinton e Allan (1983), representam as curvas típicas de falha de componentes mecânicos e elétricos. Estas curvas representam dois extremos do período de vida útil esperado para um componente.

O estudo do perfil de falha resultante das interações de software em equipamentos mecatrônicos não encontra precedente na bibliografia estudada, no entanto, como discutido na seção 2.4.3, as falhas de comportamento estão diretamente relacionadas a dinâmicas não modeladas e ao fato de que a maioria dos programas para este tipo de equipamento é feita sobre modelos discretos de comportamento. Assim é esperado que o perfil de falha de software siga o perfil de falha dos componentes.

#### **2.5.2.1. Distribuições estatísticas e a confiabilidade**

Um evento pode ser representado em função de variáveis aleatórias discretas ou contínuas dependendo da situação em que o mesmo ocorre. Para cada uma dessas situações, tem-se um conjunto de distribuições que representam esse evento, e podem ser usados tanto para a análise estatística como probabilística. Da mesma forma, um evento relacionado com a confiabilidade pode ser estimado por meio de métodos probabilísticos ou estatísticos (DIAS, 2005).

Globalmente a avaliação dos dados pode ser feita em relação à quantidade de ocorrências ou em função do tempo dessa ocorrência. A síntese da ação pode se dar pela função distribuição da probabilidade, ou da função da densidade de probabilidade.

De acordo com Pallerosi (2000) apud Barros Filho (2003), de todas as distribuições, a mais utilizada para modelagem de confiabilidade é a distribuição Weibull. A curva resultante da distribuição de Weibull é função dos seus parâmetros e pode assumir diferentes perfis (BILLINTON e ALLAN, 1983). Sua dependência com os valores dos parâmetros da função densidade de probabilidade permite a representação de um conjunto de dados que não poderiam ser representados por uma distribuição particular (DIAS, 2005).

A função densidade de probabilidade com base na distribuição de Weibull tem a seguinte formulação:

$$f(x) = \frac{\beta}{\alpha} \left( \frac{x - \gamma}{\alpha} \right)^{\beta-1} e^{-\left[ \left( \frac{x - \gamma}{\alpha} \right)^\beta \right]} \quad (2-12)$$

Onde  $x > 0$ ,  $\beta > 0$  e  $\alpha > 0$  e

$x$  = período de vida útil, pode representar distância percorrida em km, ciclos, tempo de uso em horas etc.

$\gamma$  = Parâmetro local, caracteriza o período de vida inicial do item (o tempo até a primeira falha).

$\alpha$  = parâmetro de escala ou vida característica, apresenta as mesmas grandezas da variável  $x$ . Significa o período de vida transcorrido desde o início do uso até a falha ou entre falhas, na prática o parâmetro mais utilizado é a taxa de falha característica  $\lambda_0$  que corresponde ao inverso da vida característica:  $\alpha = 1/\lambda_0$ .

$\beta$  = parâmetro de forma, é responsável pela aparência da distribuição.

Algumas considerações podem ser feitas a partir de manipulações sobre esta forma geral da distribuição de Weibull:

- De acordo com Dias (1996) pg.30, o período de vida inicial para componentes, sistemas ou subsistemas mecânicos é comparativamente desprezível com relação ao período de vida útil, o que leva a deduzir que  $\gamma \ll x$ . Como consequência, sistemas predominantemente mecânicos ou para a análise da parte mecânica de equipamentos mecatrônicos, a equação da distribuição de Weibull toma a seguinte forma:

$$f(x) = \frac{\beta}{\alpha} \left( \frac{x}{\alpha} \right)^{\beta-1} e^{-\left[ \left( \frac{x}{\alpha} \right)^\beta \right]} \quad (2-13)$$

- A função confiabilidade resultante da integração da equação (2-13) pela variável  $x$  é a seguinte:

$$R(x) = e^{-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^\beta} \quad (2-14)$$

- Quando  $x=\alpha$  na equação (2-14)  $R(x) \cong 36,7\%$  e o ponto correspondente a este valor é conhecido como ponto característico. O valor de  $\alpha$  passa a ser chamado de vida característica cuja notação passa a ser  $\alpha_0$ . Com essa relação as equações originadas da equação (2-13) são as seguintes:

$$f(x) = \beta(\lambda_0)^\beta (x)^{\beta-1} e^{-(\lambda_0 x)^\beta} \quad (2-15)$$

$$F(x) = 1 - R(x) = 1 - e^{-(\lambda_0 x)^\beta} \quad (2-16)$$

$$R(x) = \int_x^\infty f(x) dx = e^{-(\lambda_0 x)^\beta} \quad (2-17)$$

$$\lambda(x) = \frac{f(x)}{R(x)} = \beta \lambda_0^{(\beta)} (x)^{(\beta-1)} \quad (2-18)$$

- Quando  $\beta=1$  a distribuição de Weibull assume o comportamento de uma distribuição exponencial. Neste caso a vida característica  $\alpha_0$ , corresponde ao tempo médio até a falha ou na notação usual em inglês *MTTF*. Assim o cálculo da taxa de falha característica toma a seguinte forma:

$$\lambda_0 = \frac{1}{\alpha_0} = \frac{1}{MTTF} \quad (2-19)$$

Os diversos valores que o parâmetro de forma  $\beta$  pode assumir revelam características do componente ou sistema que podem ajudar nas tomadas de decisão durante o ciclo de vida de um equipamento. Segundo Dias (1996) pg. 31, o parâmetro de forma caracteriza o nível de tecnologia do item em análise e permite fazer inferências sobre as variáveis de projeto, produção e uso. Assim quanto maior o valor de  $\beta$ , menor será a dispersão das falhas na amostra analisada. Quando  $\beta=1$  a taxa de falha é constante, se  $\beta<1$  as falhas se concentram no início do ciclo de vida o que caracteriza problemas de projeto ou no processo de fabricação. Alguns dos diversos valores de  $\beta$  e as curvas resultantes estão representados na Figura 2-14.

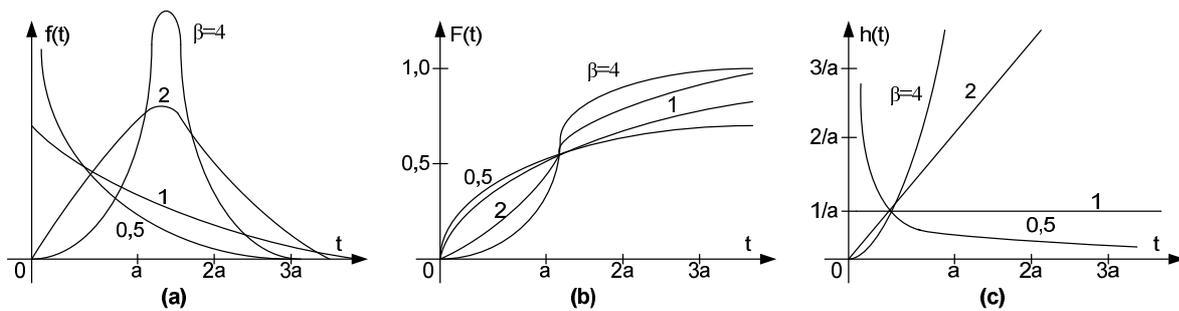


Figura 2-14 – a) Função densidade de probabilidade de Weibull, b) função probabilidade de Weibull, c) taxa instantânea de Weibull (DIAS, 2005, pg. 9)

O cálculo dos parâmetros apresentados anteriormente está vinculado à disponibilidade de dados referente ao uso dos componentes e principalmente aos relacionados com o histórico de falha registrado. Um breve tutorial para o cálculo de  $\beta$  e  $\alpha_0$ , baseado em Dias (2005), é apresentado no Anexo A.

### 2.5.3. Confiabilidade de sistemas

Hubka e Eder (1988) apud De Negri (1996) conceitua sistema como um conjunto limitado de elementos reunidos para formar um todo. Para Barros Filho (2003) sistema é um conjunto de componentes e subsistemas combinados de modo específico para atender funções operacionais desejadas.

O arranjo de componentes ou elementos pode assumir várias formas, cada qual com efeitos específicos na confiabilidade de parte e, conseqüentemente, de todo o sistema. A literatura apresenta três configurações fundamentais:

- Estrutura série;
- Estrutura paralela;
- Estrutura mista.

Pelo reconhecimento dessas estruturas, e o conhecimento das implicações relacionadas à opção por uma ou outra configuração, o projetista dispõe de um meio eficaz para estimação da confiabilidade do sistema projetado.

Em Dias (1996) as referidas configurações são chamadas “arranjos funcionais”, uma vez que se trata de uma representação de um conjunto de itens de um sistema agrupados para desempenhar uma função específica. A concepção de tais arranjos pode partir do fluxo de energia, da seqüência de operações requeridas em um processo de fabricação, ou da seqüência de decisões tomadas pelo próprio equipamento (equipamento automático).

### 2.5.3.1. Estrutura série

Do ponto de vista confiabilístico, a estrutura série se configura quando o sistema entra em falha bastando que apenas um de seus elementos falhe (Figura 2-15). Por outro lado o sistema estará em operação somente se todos os seus elementos estiverem operando.

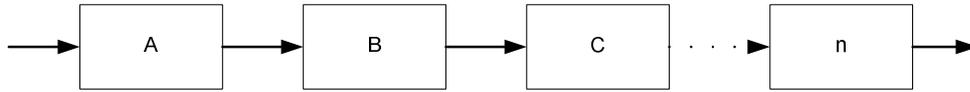


Figura 2-15 - Arranjo série

Matematicamente a confiabilidade de uma estrutura série é calculada pelo seguinte equacionamento:

$$R_{CR} = \prod_{i=1}^n R_{CE_i} \quad (2-20)$$

Onde  $R_{CR}$  é o produtório da confiabilidade dos  $n$  componentes da estrutura série. A notação utilizada está baseada no trabalho de Dias (1996) e considera o arranjo de componentes como “Componente Reduzido (CR)”, e os componentes isoladamente são considerados “Componentes Equivalentes (CE)”.

Generalizando para a distribuição Weibull:

$$R_{CR} = \prod_{i=1}^n e^{-(\lambda_{0_{ce_i}} x_i)^{\beta_{ce_i}}} \quad (2-21)$$

Onde  $\lambda_{0_1}(x), \lambda_{0_2}(x), \dots, \lambda_{0_i}(x)$  são as taxas de falhas e  $\beta_1(x), \beta_2(x), \dots, \beta_i(x)$  os parâmetros de forma de cada componente do sistema série.

Quando os itens que compõe o arranjo forem iguais:

$$R_{CR} = (R_{CE})^n \quad (2-22)$$

Diversas estruturas dentro de sistemas técnicos podem ser consideradas configurações série. Os dois exemplos da Figura 2-16 são configurações série onde a falha de um dos componentes caracteriza a falha de todo o sistema.

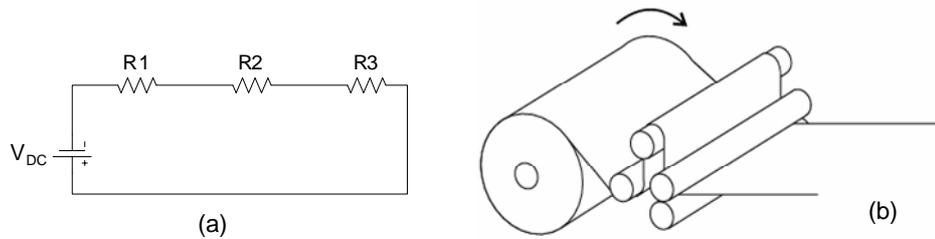


Figura 2-16 – Exemplos de configuração série, (a) Circuito elétrico, (b) Conjunto de roletes

A estrutura série tem um caráter fortemente seqüencial e a satisfação da função global é obtida pela seqüência de operações realizadas em cada elemento constituinte do sistema. Assim, por ser o caminho mais curto para satisfação da função, o arranjo série é o mais econômico e de mais fácil manutenção, porém a complexidade (número de elementos) pode tornar o sistema demasiado frágil. Em tal situação é interessante se considerar algum nível de redundância em elementos-chave ou reconhecidamente frágeis.

### 2.5.3.2. Estrutura paralela

O arranjo paralelo de componentes constituindo uma estrutura paralela, dependendo da interação entre estes componentes, pode ser interpretada como uma redundância. De acordo com Pallerosi (2005) a redundância é uma expressão elementar da natureza; os seres humanos possuem dois pares de membros, narinas, olhos, etc. Todas estas redundâncias são recursos para o aumento da confiabilidade do sistema “ser humano”. Portanto, quando um projetista aplica paralelismos em sistemas técnicos está trabalhando com mecanismos de redundância para o aumento da sua confiabilidade.

Basicamente são três os tipos principais de redundâncias:

- Redundâncias ativas (simultâneas);
- Redundâncias passivas (espera);
- Redundâncias compostas (mistas).

Nas redundâncias ativas todos os elementos estão interligados de forma paralela e funcionando de forma simultânea, em redundâncias passivas os elementos dispostos de forma paralela aguardam um chaveamento para entrar em operação. Já a configuração composta combina as redundâncias passiva e ativa (Figura 2-17, a, b, c).

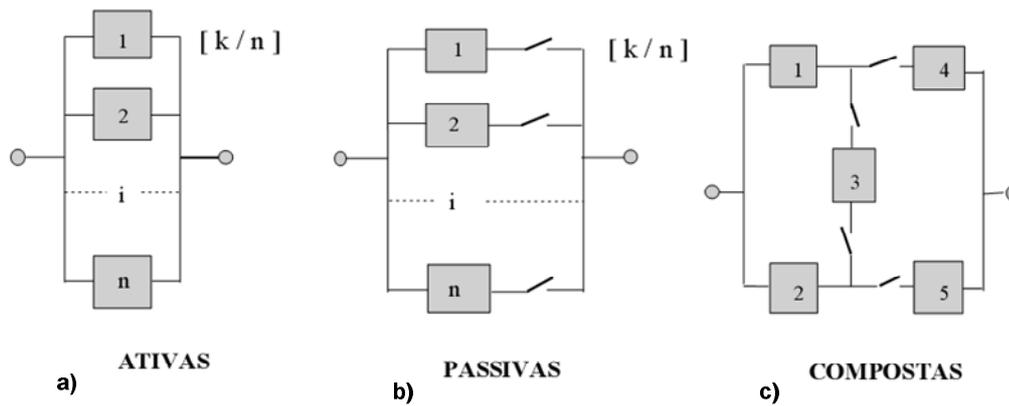


Figura 2-17 - Tipos de redundâncias (PALLEROSI, 2005)

Onde  $[k/n]$  significam  $k$  elementos ativos em um total de  $n$ .

Nas redundâncias ativas, a falha de um componente pode causar a degradação por sobrecarga dos demais componentes, apesar disso esta configuração é mais eficiente no aumento da confiabilidade e do tempo médio até a falha do sistema, se comparado com uma configuração com redundância passiva (PALLEROSI, 2005). A situação é que determina o equacionamento necessário para conhecer a confiabilidade deste tipo de sistema, a mais simples ocorre na condição de um componente bom em  $n$ .

$$R_{CR} = 1 - \prod_{j=1}^n (1 - R_{CE_j}) \tag{2-23}$$

Quando os itens que constituem o arranjo forem iguais, tem-se:

$$R_{CR} = 1 - (1 - R_{CE})^n \tag{2-24}$$

Quando a configuração exige que mais de um componente do arranjo esteja bom em  $n$ , a confiabilidade tem duas formulações; uma para o caso em que todos os itens são iguais:

$$R_{CR} = 1 - \sum_{i=1}^k \binom{n}{i-1} R_{CE}^{i-1} (1 - R_{CE})^{n-i+1} \tag{2-25}$$

Onde

$$\binom{n}{i-1} = \frac{n!}{(i-1)!(n-i+1)!} \tag{2-26}$$

A outra formulação ocorre quando os itens são diferentes. O exemplo seguinte é para o caso de 2 itens bons em 3 (DIAS, 1996).

$$R_{CR} = [(R_{CE1} R_{CE2} R_{CE3}) + (R_{CE1} R_{CE2})(1 - R_{CE3}) + (R_{CE1} R_{CE3})(1 - R_{CE2}) + (R_{CE2} R_{CE3})(1 - R_{CE1})] \tag{2-27}$$

No caso particular das redundâncias passivas, há a degradação dos elementos que não estão em uso. Uma solução é o rodízio programado dos componentes em desuso. A condição de chaveamento inerente a estes tipos de sistemas é a causadora da menor expectativa de confiabilidade, porém em condições ideais a probabilidade está mais relacionada aos procedimentos de troca e reparo (PALLEROSI, 2005). Maiores informações sobre os modelos desta configuração podem ser encontradas na referência Dias (1996) Pg. 76-78.

### 2.5.3.3. Interpretação da confiabilidade e o modelo físico

De acordo com Vinadé (2003) a modelagem confiabilística algumas vezes transcende à disposição física dos componentes. O exemplo apresentado pelo autor na Figura 2-18 ilustra bem esta condição. Um sistema de bombeamento constituído por duas bombas tem um modelo confiabilístico série na condição de operação onde as duas bombas são solicitadas. Quando a capacidade de uma bomba é suficiente o modelo passa a ser paralelo de redundância ativa.

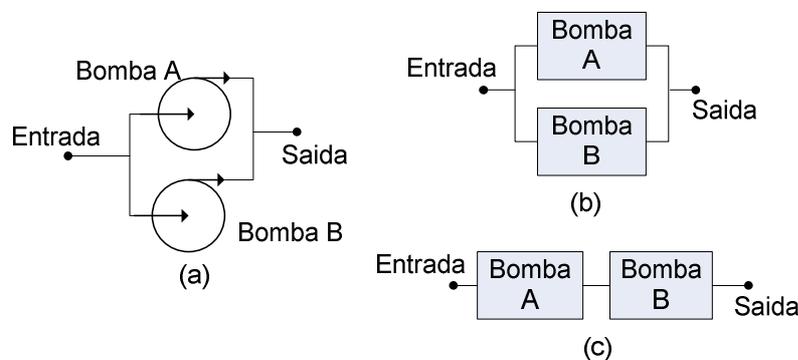


Figura 2-18 - a) Sistema de bombeamento fisicamente montado; b) Modelo de confiabilidade paralelo com redundância ativa; c) Modelo de confiabilidade série, adaptado de Vinadé (2003)

Esta característica se observa em sistemas que admitem condições intermediárias de carregamento. Para a escolha do modelo confiabilístico mais adequado o projetista deve ter primeiramente absorvido bem as informações relativas à função, estrutura e comportamento do sistema.

## **2.6. CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE OS FUNDAMENTOS TEÓRICOS**

Neste capítulo foram revistos os conceitos necessários ao entendimento das metodologias de reprojeto a serem apresentados no capítulo 3, e da metodologia proposta no capítulo 4.

A partir dos fundamentos em projeto de produtos a equipe de reprojeto dispõe do conhecimento necessário para o entendimento do processo de concepção de produtos. Com a estruturação baseada na escola alemã de projeto será possível coordenar os esforços de reprojeto e sistematizar as ações para obtenção dos melhores resultados, atendendo assim à necessidade de orientação de esforços citados no primeiro capítulo.

O trabalho de engenharia reversa, inerente ao grupo de produtos a que se destina a presente dissertação, vê-se reforçado com as atividades de modelagem de sistema automático e modelagem confiabilística. A base de dados levantada mediante estas ferramentas irá auxiliar no entendimento do equipamento estudado, bem como na tomada de decisão com relação ações que podem e devem ser tomadas para a extensão do ciclo de vida do sistema técnico.

Vale lembrar, no entanto, que os métodos até aqui apresentados não são únicos, e nem estão na profundidade plena de cada matéria. A dose de informações visa somente subsidiar as discussões dos próximos capítulos, onde serão abordadas as metodologias de reprojeto correntes e a proposta de reprojeto de equipamentos mecatrônicos, que é o objeto principal desta dissertação.



### 3. REPROJETO DE PRODUTOS

#### 3.1. INTRODUÇÃO

Etimologicamente a palavra reprojeto é formada por prefixação da palavra raiz “projeto” e o prefixo “re”. De acordo com Almeida (1985) o prefixo “re” tem origem no latim e denota repetição ou reforço, assim a forma da palavra significa a repetição da ação de projeto no sentido de reforçar as medidas para alcançar os objetivos estipulados na concepção de um produto. Tipicamente o reprojeto é uma ação realizada dentro da própria rotina de projeto, onde, concluída uma fase ou o projeto todo, o projetista ou a equipe responsável aplica uma avaliação sobre os resultados obtidos e, de acordo com estes resultados, retorna ao problema inicial para fazer as correções necessárias. No entanto, a busca por maior produtividade e qualidade, aliada à redução de custos, e respostas cada vez mais rápidas as necessidades do mercado, constituem um quadro de competição onde a aplicação das metodologias de projeto, apresentadas no capítulo 2 representam um diferencial. Desta forma, o reprojeto, a exemplo do projeto, tem surgido como uma opção à parte, sobre a qual diversos autores têm sugerido metodologias próprias para a satisfação de novas demandas mercadológicas.

Para Dufour (1996) o agente determinante das causas que levam ao reprojeto é a necessidade dos clientes, e dentro desta perspectiva a subdivisão típica entre clientes externos, intermediários e internos é a mesma das rotinas de projeto. O resumo de causas e os respectivos fatores que levam ao reprojeto são apresentados na Tabela 3-1, Tabela 3-2, Tabela 3-3 e Tabela 3-4.

Tabela 3-1 - Fatores de origem de mercado causadores do reprojeto de produtos industriais; Fundação Volkswagen (1996) apud Dufour (1996)

<b>FATOR</b>	<b>DEFINIÇÃO</b>
Introdução em novos nichos de mercado	Nichos de mercado não considerados durante o projeto ou novos mercados que aparecem por mudanças culturais, políticas, comerciais, sociais, etc.
Perda de mercado.	Porque a concorrência baixou os preços de seus produtos, porque existe uma queda constante de vendas do produto atual, ou porque o produto está saindo de moda para o mercado consumidor ou o produto concorrente é melhor.
Mudanças nas necessidades do consumidor.	Modificações ocorridas nas necessidades do consumidor com o decorrer do tempo, obsolescência.
Matéria prima	Saiu de mercado ou de único fornecedor

Tabela 3-2 – Fatores de origem técnica causadores do reprojeto de produtos industriais;  
Fundação Volkswagen (1996) apud Dufour (1996)

<b>FATOR</b>	<b>DEFINIÇÃO</b>
Aplicação inadequada de meios (recursos) durante o projeto.	Idéias, habilidades e informações não utilizadas durante a fase de concepção do projeto.
Custos excessivos.	Durante o projeto a viabilidade técnica foi provada e estava adequada; análises de custos posteriores revelam a presença de custos excessivos.
Questionamento de especificações.	As tolerâncias foram extrapoladas em função de julgar impróprias as especificações dos usuários.
Avanços na tecnologia.	Incorporação de novos materiais, componentes, técnicas ou processos que não foram devidamente avaliados durante o projeto.
Avaliações de testes.	Modificações de projetos baseados em avaliações de testes que indicaram parâmetros exagerados de especificações e até erros.
Aplicação inadequada de processos de fabricação.	Novos processos de fabricação que não são usados e que repercutem nos custos do produto acabado.
Método inadequado de montagem.	Durante o projeto não se considerou como teria que ser a montagem mais adequada
Problemas de manutenção.	Durante o projeto não se considerou como teria que ser a manutenção.
Deficiência do projeto.	Desempenho inadequado, deficiência técnica, má qualidade, etc.

Tabela 3-3 - Fatores de origem de segurança causadores do reprojeto de produtos industriais;  
Fundação Volkswagen (1996) apud Dufour (1996)

<b>FATOR</b>	<b>DEFINIÇÃO</b>
Deficiência no manuseio do produto.	Quando o produto possui alguma característica que pode ser perigosa para o usuário.
Aplicação inadequada de materiais.	Quando o produto contém substâncias ou materiais tóxicos.
Deficiência do projeto no aspecto ergonômico.	Quando o produto não contempla aspectos ergonômicos.

Tabela 3-4 - Fatores de origem legal causadores do reprojeto de produtos industriais; Fundação Volkswagen (1996) apud Dufour (1996)

FATOR	DEFINIÇÃO
Cumprimento de normas.	Não foram consideradas ou surgem novas normas de produtos, para exportação, segurança, etc.
Motivos ecológicos.	Porque o produto é agressivo ao meio ambiente
Situações específicas regulamentadas.	Obriga-se a cumprir com especificações próprias de produtos infantis, deficientes físicos, etc.
Surgimento de novas leis.	No projeto inicial não se considerava a reciclagem, descarte, etc.

Em Amaral (2001), o objetivo do reprojeto considerado é a redução de custos e a melhoria de produtos; esta visão se encaixa no âmbito das causas de mercado citados na Tabela 3-1.

Otto e Wood (1998) esclarecem o processo mercadológico que estimula o reprojeto. Como indicado na Figura 3-1, o produto primeiramente entra no mercado como um novo conceito e por um tempo permanece sem nenhuma inovação, em seguida a concorrência passa a introduzir uma série de inovações até que a capacidade técnica ficar alcançar seu limite. O perfil resultante no gráfico é algo semelhante a uma letra "S" o qual dá o nome a mesma. Ainda dentro da análise de Otto e Wood (1998), existem dois níveis para futuros reprojeto de produtos, o primeiro deles estão adaptações paramétricas, variações e adaptações menores, mudanças na manufatura entre outros, as alterações nesta fase são estimuladas principalmente pelas necessidades e o retorno dos clientes.

Já a segunda fase se caracteriza por uma descontinuidade nas características do produto, neste ponto são introduzidas novas tecnologias, novos processos de produção ou outras mudanças fundamentais no produto. Em linhas gerais a causa é mercadológica e a intenção é manter o produto competitivo no mercado.

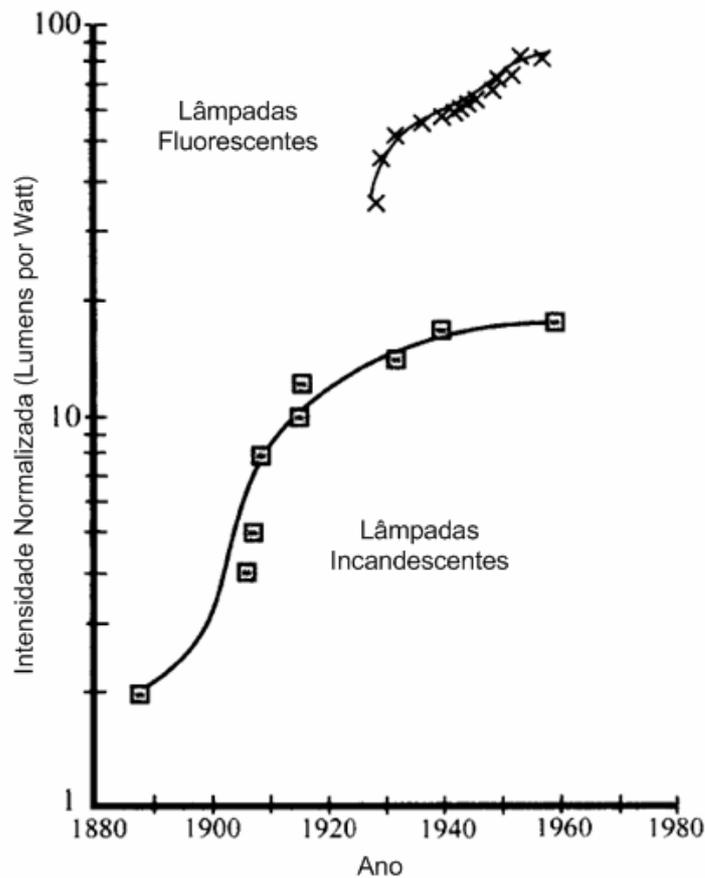


Figura 3-1 - Curvas S de evolução de produtos; adaptado de Betz (1993) apud Otto e Wood (1998)

Conforme Bitencourt (2001), o reprojeto é uma oportunidade de se adequar o produto a uma série de demandas de orientação ecológica constituindo, de acordo com a Tabela 3-1, Tabela 3-2, Tabela 3-3 e Tabela 3-4, uma combinação de causas técnicas, causas legais, de mercado e segurança. Especificamente:

- Demandas legais: novas leis mais rígidas e específicas;
- Demandas dos consumidores: sob o efeito da mídia e de organizações não governamentais, a população tem se conscientizado cada vez mais da importância dos temas ecológicos;
- Concorrência: certificações ambientais, selos de qualidade ambiental tem se firmado como um diferencial no mercado;
- Normalização e acordos empresariais: acordos internacionais de fornecimento têm exigido ações ecológicas e de responsabilidade social.

Pode-se tomar como uma tendência natural que a garantia da existência do mercado pela consciência ecológica, deva suplantar em alguns momentos as necessidades individuais do consumidor.

Outros autores dão um enfoque diferenciado ao reprojeto. Em Barbosa (2005) o reprojeto é um processo de reabilitação de máquinas usadas onde é feito um estudo de viabilidade, o qual o autor designa como análise de exequibilidade física. O procedimento inclui estimação da vida residual da máquina e verificação da possibilidade de adaptações e incorporação de itens modernos. Francis e Tay (2003) colocam o reprojeto como parte integrante de uma metodologia de projeto por evolução, o objetivo desta metodologia é o aumento da produtividade dos projetistas e a sistematização da reutilização do conhecimento adquirido em outros projetos. Já Santos (1999) inclui o reprojeto no conjunto de alternativas do seu modelo de gestão de manutenção centrado na disponibilidade. O autor não faz referência de como realizar a tarefa de reprojeto, mas sugere a disponibilidade como um indicador a ser considerado na tomada de decisão.

### **3.2. CRITÉRIOS DE DECISÃO PARA O REPROJETO DE SISTEMAS TÉCNICOS**

Muitas vezes a busca de indicadores que possam guiar as decisões em uma ação de reprojeto tem seu maior desafio justamente no critério que irá desencadear todo o processo. Esta preocupação surge do fato que normalmente as ações de projeto requerem o dispêndio de recursos humanos e materiais aos quais, se aplicados sem uma base metodológica, podem gerar mais prejuízos que benefícios.

Desta forma, a importância da definição de critérios claros e objetivos é o primeiro passo para garantia do sucesso de uma ação de reprojeto. Dos vários atributos abordados na literatura referenciada os seguintes se destacam:

- Custo;
- Disponibilidade;
- Produtividade.

Nas próximas seções serão apresentados critérios sobre estes atributos, e os devidos esclarecimentos dados a fim de permitir sua utilização no próximo capítulo.

#### **3.2.1. Análise de custos**

O monitoramento dos custos durante o ciclo de vida de um sistema técnico, é uma fonte para os primeiros indicadores de que alguma atitude deve ser tomada com relação algum comportamento anômalo do sistema. Entenda-se por comportamento anômalo o aumento de despesas para substituição de componentes danificados, perda de produtividade, desperdício de matéria prima, enfim toda condição técnica de um equipamento que de uma forma ou de outra reflete negativamente no balanço financeiro de uma empresa. Dieter (1983) apud Barbosa (2005) sugere uma classificação de custo de acordo com a ocorrência na vida do produto. A fase inicial é caracterizada pelo custo de investimento, os demais, por conta do uso, estariam em custos operacionais e manutenção. Neste último se enquadram os custos de mão-de-obra, combustível, energia, materiais de suprimento, peças de reposição, reparos, entre outros. Tais custos, se

projetados durante certo período de uso do sistema técnico, podem representar um montante equivalente ao próprio valor de aquisição do sistema em questão (BARRINGER, 1996).

Os custos operacionais e de manutenção como sugeridos, levam a uma visão da análise de custos semelhante à explorada por Santos (1999). A Figura 3-2, mostra que o momento ótimo para uma avaliação da ação de reprojeto, ou Recapacitação e Modernização (R&M) para o autor, se situa na inflexão da curva de custo total. Neste ponto, a amortização dos custos de aquisição não é mais suficiente para cobrir os custos operacionais e de manutenção.

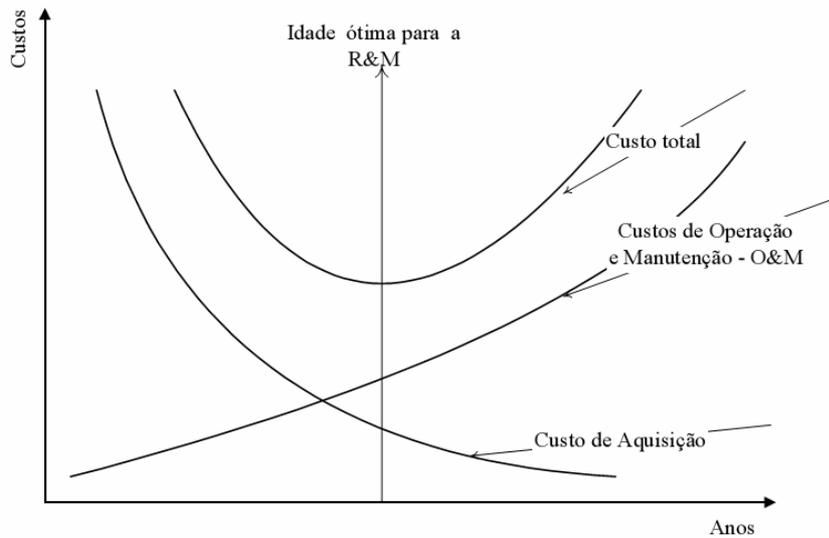


Figura 3-2 - Comportamento dos custos do ciclo de vida de uma unidade geradora, adaptado por Santos (1999)

Uma curva semelhante é apresentada pela empresa ReliaSoft (2006) para justificar a manutenção preventiva na progressão dos custos (Figura 3-3).

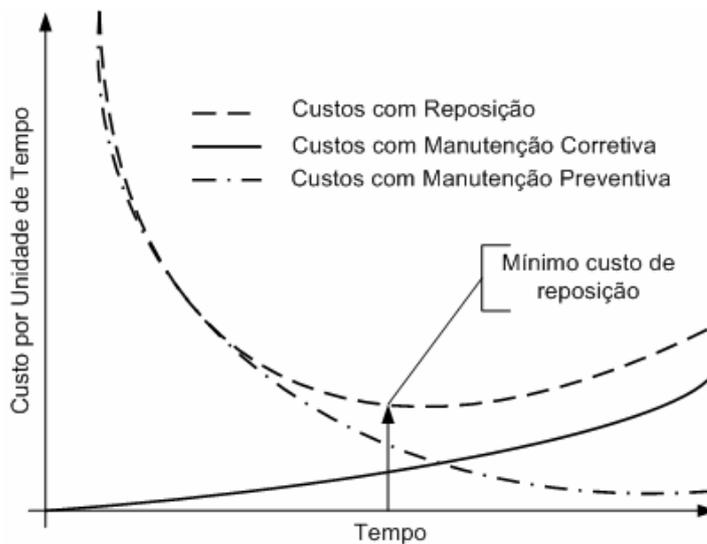


Figura 3-3 – Gráfico de custos por unidade de tempo (RELIASOFT, 2006)

O ponto de “mínimo custo de reposição” ilustra a condição a partir do qual os esforços de manutenção corretiva excedem os esforços de manutenção preventiva. O referido ponto constitui

um marco temporal onde o reprojeto pode ser considerado para reverter o avanço dos custos de reposição, e colocar o produto novamente nas condições iniciais de custo.

Em uma abordagem voltada ao desenvolvimento de bens de consumo, Hogarth, 1993 (apud Dufour, 1996), apresenta a curva do fluxo de caixa como referência ao que o autor designa por “fase de reprojeto”, Figura 3-4.

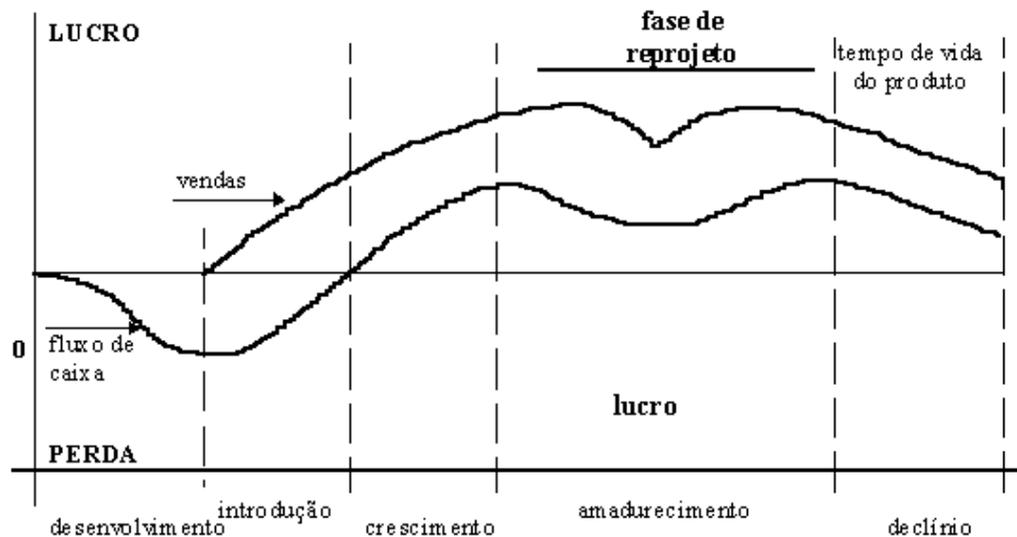


Figura 3-4 - Curva de fluxo de caixa de um produto seu ciclo de vida; Hogarth, 1993 (apud Dufour, 1996)

A fase de reprojeto sugerida pela figura anterior, que corresponde ao período de amadurecimento do produto, é também onde o fluxo de caixa está em alta e é constante e o produto apresenta maior lucratividade para ao fabricante. Com relação a bens de capital, a fase de reprojeto passa a ser uma preocupação do usuário, e o amadurecimento se torna um processo de melhoria contínua em que o fornecedor pode tomar parte ou não.

#### 2.1.1.1. Análise de viabilidade econômica

Mais importante que viabilidade técnica, a viabilidade econômica é o fator indispensável na ação de reprojeto. Dado o grande período de existência esperado para os equipamentos mecatrônicos, os critérios de decisão relacionados à viabilidade econômica do reprojeto destes sistemas, pedem uma estimativa de custos relacionados à reposição ou substituição de partes, ou mesmo de todo sistema.

Dhillon (1983) apud Barbosa (2005) apresenta uma coletânea de métodos para estimação de custos:

- Utilização de opinião de especialistas – Quando não há dados suficientes ou não há confiança na precisão destes dados, uma boa alternativa é considerar o parecer técnico de especialistas que possuam boa experiência com o material a ser analisado.

- Utilização de dados catalogados – Uma peça cujo preço deva ser estimado é identificada em um grupo específico. Seu custo é obtido a partir de literatura técnica acerca deste grupo. Exemplo: utilização de literatura consolidada sobre elementos de máquina para obter o custo de um sistema que é uma montagem destes elementos.
- Analogia com produtos similares – Dados sobre experiências antigas com itens similares podem ser utilizados, considerando o efeito das inovações do produto para a estimativa de custo.
- Método “cost-to-cost” – Este método é baseado na hipótese de que a estimativa de um fator do custo do produto específico tenha alguma relação com outro fator conhecido de custo. Por exemplo, supõe-se que o custo periódico de manutenção de um equipamento seja proporcional ao custo de aquisição do mesmo.
- Método “non-cost-to-cost” – Peso, dimensões ou algumas características de desempenho podem ser usados como referência aproximada para estimativas de custos. Por exemplo, supor que o custo de manutenção de um equipamento seja função do peso do equipamento.

A relevância da estimação de custos será tão maior quanto mais rigoroso forem os levantamentos, e a qualidade deste trabalho é elemento chave na tomada de decisão com base nos custos.

### 3.2.2. Disponibilidade

A disponibilidade é um índice definido em norma:

“Disponibilidade é a capacidade de um item estar em condições de executar certa função em um dado instante ou durante um intervalo de tempo determinado, levando-se em conta os aspectos combinados de sua confiabilidade, manutenibilidade e suporte logístico, supondo que os recursos externos requeridos estejam assegurados” NBR 5462 (ABNT, 1994).

Em outras palavras, disponibilidade é a probabilidade de um sistema técnico estar funcionando ou disponível para ser utilizado. Quantitativamente a disponibilidade pode ser expressa da seguinte forma:

$$D = \frac{\textit{período de tempo disponível}}{\textit{período de tempo sob observação}} \quad (3-28)$$

Ou ainda:

$$D = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (3-29)$$

Onde,

(*MTBF*): Tempo médio entre falhas

(*MTTR*): Tempo médio para reparo

Os tempos de parada a serem tomados devem considerar todas as situações em que o equipamento estiver fora das condições de uso, inclusive o período das manutenções programadas. O mesmo não se aplica à falta de matéria prima ou qualquer outro fator alheio à disponibilidade do equipamento ou instalação (DIAS, 2005).

Um modelo de gestão de manutenção centrado na disponibilidade foi proposto por Santos (1999), Figura 3-5.

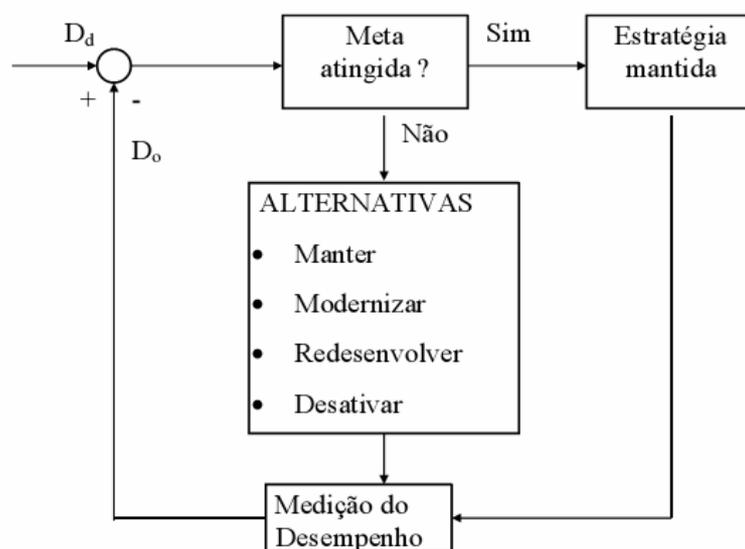


Figura 3-5 - Diagrama de Gerência Centrada na Disponibilidade GCD, onde  $D_o$  é a Disponibilidade obtida e  $D_d$  a Disponibilidade desejada (SANTOS et al. 1999)

Como apresentado, o modelo de gestão é bastante flexível, pois os índices de interesse podem ser trocados livremente. Por exemplo, ao invés da disponibilidade poder-se-ia considerar a confiabilidade, manutenibilidade ou algum outro atributo de interesse. As alternativas podem igualmente se adaptar aos diferentes índices.

O uso do índice de disponibilidade como referência para a ação de reprojeto tem um exemplo no trabalho de Pinheiro (2006). Segundo este autor o índice de disponibilidade é usado na tomada de decisão entre as estratégias de manutenção manter, modernizar, reprojeto ou desativar. O modelo de manutenção assim concebido para uma das empresas químicas da Petrobras, toma como base os índices da Tabela 3-5.

Tabela 3-5 - Relação entre disponibilidade e estratégias de manutenção em unidades de recuperação de enxofre; adaptado de Pinheiro (2006)

Disponibilidade	Estratégia de manutenção
80%	MANTER
40%	MODERNIZAR
20%	REPROJETAR
10%	DESATIVAR

A disponibilidade, da forma sugerida, configura um índice de fácil aplicação, pois basta a medição de períodos de inatividade associados à falhas ou manutenção para que a equipe de gestão possa tomar a decisão mais adequada a política da empresa.

Há ainda que se observar dentro da abordagem de Pinheiro (2006) e Santos (1999), que ambos os autores tem seus trabalhos direcionados à gestão da manutenção e colocam separadamente as ações reprojeto, modernizar e redesenvolver, sem explicitar as diferenças. O presente trabalho tem como foco o reprojeto com base no modelo de quatro fases inspirado na escola alemã de projeto (seção 2.2) e não a gestão da manutenção. A expressão reprojeto é entendida no nível mais genético de ação onde modernizar, atualizar, melhorar, redesenvolver, etc. estão incluídos. De qualquer forma o setor de gestão da manutenção é uma importante fonte de informações para a equipe de reprojeto, e os pontos de vista disponibilidade ou produtividade podem igualmente ser entendidos sobre uma planta industrial inteira ou para um equipamento.

### 3.2.3. Produtividade

No ambiente competitivo do meio industrial, o fator produtividade pode muitas vezes significar a sobrevivência de uma empresa. Como indicador de reprojeto, os sinais de que a produtividade está aquém da necessidade se revela em situações bastante comuns na rotina de produção:

- Aumento de paradas por conta do aumento da produção;
- Constante substituição de componentes em condições de desgaste prematuro;
- Desperdício de matéria prima;
- Ajustagem dificultada pelo nível de produção.

Todos estes sintomas revelam a incapacidade de atendimento de uma nova demanda devido a limites no dimensionamento original do sistema técnico. Uma outra evidência do comportamento do sistema técnico relativo à sua solicitação é encontrada na Figura 3-6 (DIAS, 2005). A aplicação de uma carga mais acentuada sobre os componentes, leva a uma taxa de falha instantânea ( $\lambda$ ) mais elevada. Quando tal efeito é observado em bens de capital, a monta dos prejuízos pode ser reduzida significativamente mediante uma ação de reprojeto para adequação do sistema à nova demanda.

Santos (1999) apresenta uma metodologia de tomada de decisão com o objetivo do ganho de produtividade em unidades hidrogeradoras (hidroelétricas). Os sinalizadores nesse caso são, além das novas demandas do mercado, a existência de novas tecnologias que proporcionam ganhos de rendimento em novas instalações. O foco na produtividade orienta as ações de reprojeto na introdução de novas tecnologias de construção, materiais e projeto.

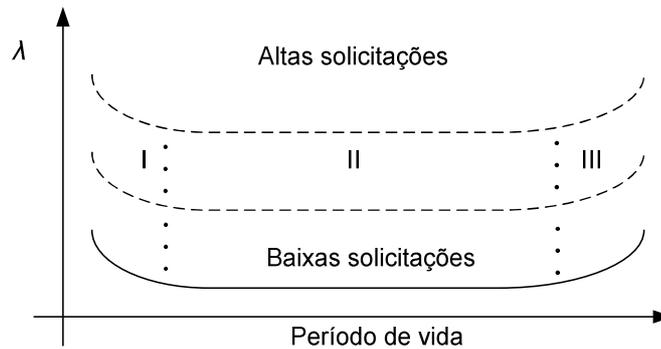


Figura 3-6 - Influência das solicitações no valor da taxa instantânea de falha (DIAS, 2005)

Um outro parâmetro lembrado por Riis et al. (1997) apud Santos (1999), é o Índice de Produtividade Total (*PTE*) aplicado a “empresas de padrão mundial”. O índice esperado para esta classe de empresa deve ser acima de 85%. O cálculo do *PTE* é feito a partir da seguinte equação:

$$PTE = D\eta v \quad (3-30)$$

Onde:

$D$  = disponibilidade

$\eta$  = rendimento do equipamento

$v$  = qualidade expressa pelo quociente entre produção efetiva especificada e a produção total

O índice *PTE* mínimo pode não representar a realidade de alguns setores, tanto que Santos observa ainda, que no caso de hidroelétricas, o valor de *PTE* esperado deve se situar acima dos 90%.

### 3.3. METODOLOGIAS DE REPROJETO

As próximas seções tratam da literatura referente às metodologias de reprojetos com o intuito de fundamentar o conhecimento na elaboração de métodos de reprojetos, se inteirar de experiências passadas e, com base nestas informações, conduzir para a proposta de metodologia de reprojetos do capítulo 4.

#### 3.3.1. Metodologia Dufour

O processo de reprojetos proposto por Dufour (1996), está inserido dentro do processo de projeto de produtos industriais (Figura 3-7).

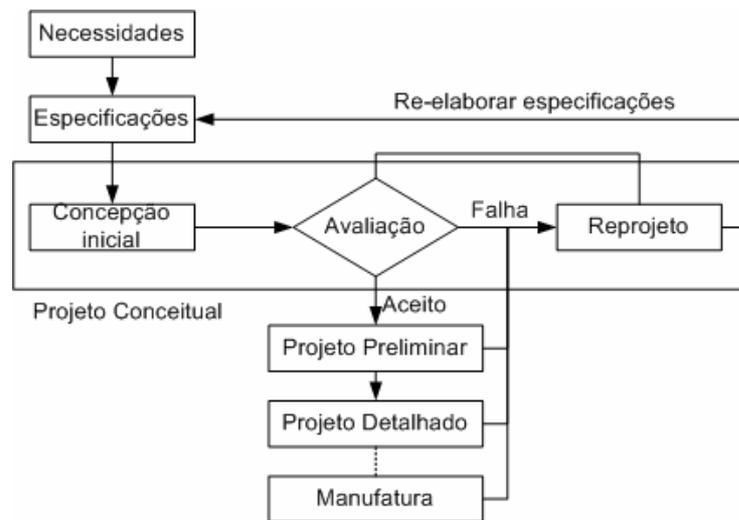


Figura 3-7 – Destaque do reprojeto dentro do processo de projeto de produtos industriais; Ashim, Juster e Pennington (1994) apud Dufour (1996)

Como condição inicial para o reprojeto é necessário coletar as informações referentes ao projeto original. As fontes a se considerar são as seguintes:

- Experiências do cliente final, uso diário e informações dos clientes;
- Experiências dos clientes intermediário e interno, conhecimento acumulado no processo produtivo;
- Material acumulado durante todo o ciclo de vida do produto, fotos, desenhos, relatórios entre outros.

A forma de organização da informação sugerida pelo autor deve, preferencialmente, considerar uma distribuição cronológica, e uma especial atenção deve ser dada às partes consideradas mais importantes e aos materiais que forem apresentados de forma resumida.

A estrutura de trabalho sugerida pela Figura 3-7 gera a seguinte seqüência de fases:

Fase 1 – Elaboração da nova lista de requisitos: três recursos podem ser utilizados nesta fase do reprojeto; a primeira é a lista de perguntas sobre o produto, a segunda é a análise do ambiente do produto a terceira e última é análise dos ciclos de vida do produto. O resultado desta fase será a especificações de projeto de produto.

Fase 2 – Abstração da estrutura funcional: estabelecer a nova estrutura funcional do produto a ser melhorado.

Fase 3 – Reprojeto conceitual: busca pelas soluções para as funções parciais geradas na fase anterior. Os métodos sugeridos para esta fase são os seguintes:

- Listagem de atributos;
- Instigação de questões;
- Matriz morfológica;

- Análise de valor;
- Inverso da síntese funcional.

Ao final da fase 3 deve-se verificar a satisfação das especificações geradas na primeira fase.

Fase 4 – Reprojeto preliminar: nesta parte do reprojeto são feitas as escolhas das soluções para a melhor concepção do projeto. O processo consiste em gerar combinações das soluções parciais e avaliar as que melhor atendem as especificações de produto.

Fase 5 – Reprojeto detalhado: a esta fase é reservada a especificação dos componentes, o projetista realizará os cálculos necessários para determinação das dimensões das peças, detalhes construtivos, materiais, processo de fabricação, montagem, transporte e demais atividades necessárias a composição final do produto.

Em linhas gerais o método proposto por Dufour (1996), nada mais é que o processo de projeto convencional feito sobre um produto pronto. A diferença fundamental está no fato de que se está trabalhando sob uma perspectiva de produto já idealizado o qual, em função da decisão pelo reprojeto, espera-se proporcionar uma sobrevida, ou seja, a ampliação da vida útil do produto.

### **3.3.2. Metodologia Bitencourt**

A metodologia apresentada por Bitencourt (2001), tem por objetivo atender demandas de ordem ecológicas. O produto sob reprojeto deve seguir os preceitos ambientais durante todo o ciclo de vida, e para tanto o projetista deve levar em consideração estas características na opção pelas alterações do produto.

A estrutura de projeto da Figura 3-8 segue a mesma discutida na seção 2.2.2; o mérito da metodologia está em direcionar ações de acordo com o nível de reprojeto necessário. Partindo da fase informacional o projetista tem subsídios para escolher entre os três tipos de reprojeto:

- Reprojeto original;
- Reprojeto adaptativo;
- Reprojeto paramétrico.

Tomando a opção pelo reprojeto original o projetista terá que passar por todas as fases de projeto. Na opção pelo reprojeto adaptativo a fase seguinte à informacional será o reprojeto preliminar, e finalmente se for considerado um reprojeto paramétrico o procedimento parte da fase informacional para o reprojeto detalhado.

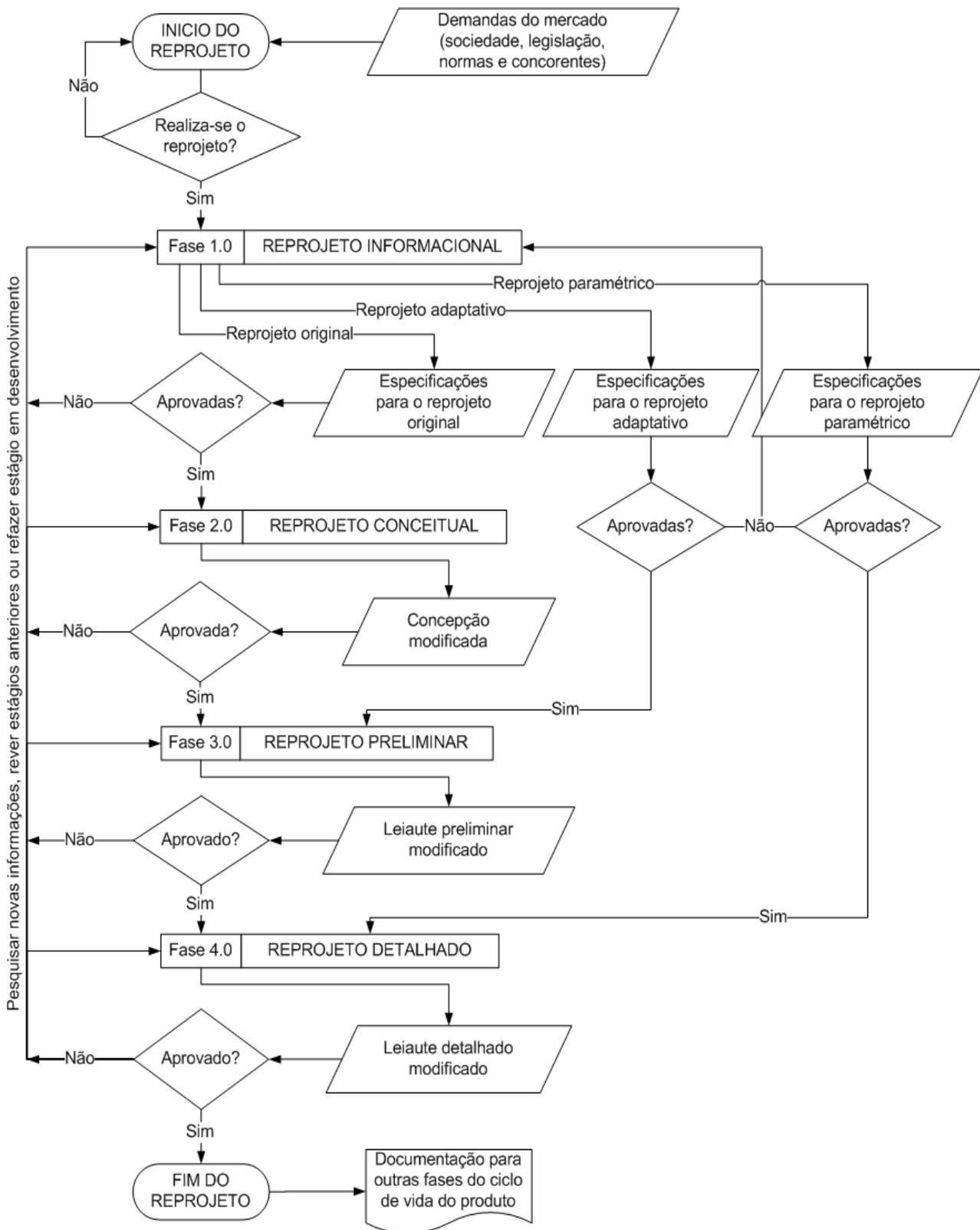


Figura 3-8 – Representação geral da RePMA<sup>7</sup> (BITENCOURT, 2001).

Em cada fase é sugerida uma seqüência de etapas as quais estão associadas uma seqüência de tarefas e um conjunto de ferramentas para execução (Tabela 3-6).

<sup>7</sup> Reprojeto de Produto para o Meio Ambiente.

**Tabela 3-6** – Desdobramento do reprojeto de produtos para o meio ambiente, adaptado de Bitencourt (2001)

<b>Fase</b>	<b>Etapa</b>	<b>Tarefas</b>	<b>Ferramentas</b>
1.0 Reprojeto Informacional	1.1 Recuperação de informações	1.1.1-6 recuperar informações, pesquisar legislação e normas, traduzir informações em requisitos, avaliar produto segundo requisitos.	- Quadro de registro de características; - Questionário estruturado; - Quadro de requisitos.
	1.2 Elaboração de requisitos ambientais	1.2.1-6 definir objetivos e escopo, elaborar unidade física e funcional, descrever ciclo de vida, avaliar impacto ambiental, verificar e interpretar resultados, elaborar requisitos ambientais.	- Análise de Ciclo de Vida.
	1.3 Determinação do nível de reprojeto		- Matriz de seleção do nível de reprojeto.
	1.4 Elaboração das especificações para reprojeto	1.4.1-3 elaborar requisitos, hierarquizar, elaborar lista de especificações.	- Matriz casa da qualidade; - Modelo para preenchimento das especificações.
2.0 Reprojeto Conceitual	2.1 Recuperação e avaliação da concepção	2.1.1-2 recuperar concepção, avaliar concepção.	- Inverso da síntese funcional; - Matriz avaliação da concepção
	2.2 Estabelecimento e seleção da estrutura funcional modificada	2.2.1-3 avaliar impacto ambiental das funções, propor alterações, selecionar estrutura funcional.	- Quadro de avaliação ambiental; - Matriz de seleção de alternativas de funções.
	2.3 Geração de concepções	2.3.1-3 gerar princípios de solução, avaliar influencia ambiental dos princípios de solução, gerar concepções alternativas.	- Métodos de estímulo a criatividade; - Matriz morfológica orientada ao meio ambiente.
	2.4 Seleção da melhor concepção	2.4.2-3 verificar viabilidade técnica e ambiental, avaliar absoluta e relativamente as concepções alternativas.	- Matriz passa não passa; - Matriz de avaliação.
3.0 Reprojeto Preliminar	3.1 Elaboração de leiautes	3.1.1-2 selecionar as especialidades de reprojeto, elaborar configurações alternativas.	
	3.2 Modelagem e simulação ambiental		
	3.3 Seleção da melhor configuração		
4.0 Reprojeto Detalhado	4.1 Detalhamento ou recuperação do leiaute		

	4.2 Seleção de parâmetros		
	4.3 Otimização paramétrica		
	4.4 Mudança nos materiais e processos de produção		
	4.5 Detalhamento do produto		
	4.6 Verificação dos ganhos ambientais		
	4.7 construção de protótipo para teste		
	4.8 Elaboração da documentação		

O estudo de impacto ambiental se caracteriza como principal diferencial oferecido pela metodologia de Bitencourt. Outro aspecto interessante é o uso do inverso da síntese funcional. Esta ferramenta consiste em recompôr funcionalmente o produto existente; com base nesta informação é que são aplicados os métodos de matrizes para concepção e seleção de novos princípios de solução. Os demais procedimentos e orientações se assemelham com os métodos de projeto tratados no capítulo 2.

### 3.3.3. Metodologia Otto e Wood

A proposta de Otto e Wood (1998) consiste em aplicar a engenharia reversa e o reprojeto para a evolução de produtos. O processo de reprojeto consiste de três fases distintas: engenharia reversa, modelagem e análise, e reprojeto (Figura 3-9). Para os autores o processo de engenharia reversa consiste em observar, desmontar, analisar, testar e documentar em termos de funcionalidade, forma, princípios físicos, manufatura e montagem do produto em questão. A representação resultante permite trabalhar o produto sob diferentes aspectos como subsistemas, configuração, componentes ou parâmetros. Outro aspecto marcante é a engenharia reversa em duas etapas, a primeira teórica onde são levantados a documentação técnica e são gerados modelos preliminares; a segunda fase, de fundo prático, parte para ações de desmontagem, medições e operação do equipamento na intenção de levantar os dados necessários ao reprojeto.

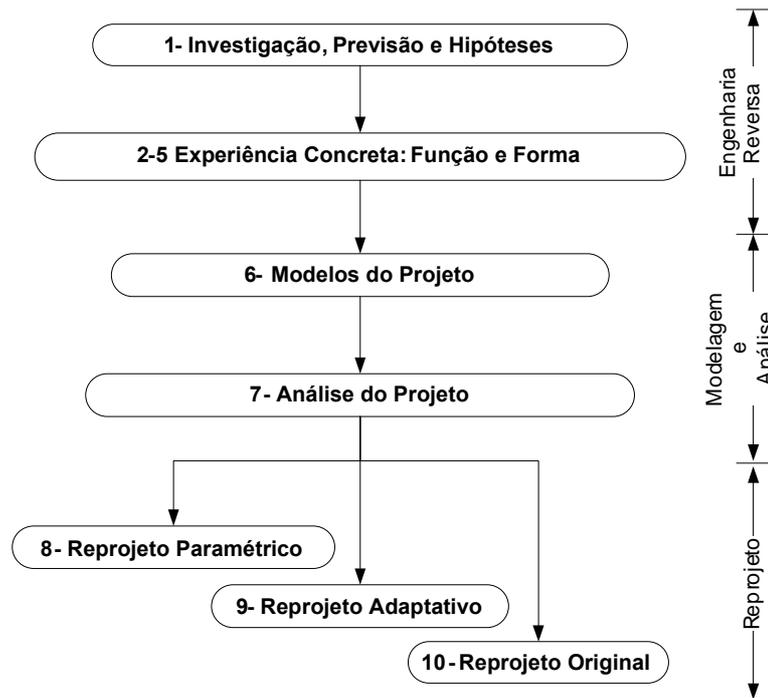


Figura 3-9 – Metodologia de engenharia reversa e reprojeto, adaptado de Otto e Wood (1998)

Ao contrário de Bitencourt (2001), a opção pelo tipo de reprojeto é deixada para última etapa de análise. Todas as etapas de coleta de informação, modelagem e teste de componentes geram um conjunto de requisitos e opções de projeto com os quais o projetista terá condições de optar pelo reprojeto paramétrico, adaptativo, original ou a combinação deles.

### 3.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE O REPROJETO DE PRODUTOS

De acordo com a proposta inicial, este capítulo apresentou informações relevantes e tendências atuais no reprojeto de produtos. A primeira preocupação foi responder quando fazer o reprojeto, a segunda como. Na resposta de “quando realizar o reprojeto” foram apresentadas as análises de custo, disponibilidade e produtividade como referência na tomada de decisão; e na resposta de “como” algumas das metodologias encontradas na literatura pesquisada ilustraram o problema.

Com relação às metodologias de reprojeto, observa-se que todas acompanham a estrutura de quatro fases apresentada no capítulo 2, e o aumento do ciclo de vida de bens de consumo. O meio pelo qual as metodologias atacam o problema do reprojeto se diferencia basicamente pela importância focalizada em algumas etapas. A filosofia pregada por Otto e Wood (1998) parte da divisão entre engenharia reversa e reprojeto, a primeira qualifica a equipe de projeto no entendimento do produto existente, e a segunda estrutura a ação para obter a nova versão reprojeta. A importância da engenharia reversa é reduzida em Bitencourt (2001), no entanto a decisão pela melhor opção de reprojeto já na primeira fase torna a metodologia mais objetiva dependendo da opção selecionada. Já a abordagem de Dufour (1996) enfatiza o desvio para o reprojeto dentro da estrutura de quatro etapas da escola alemã de projeto.

A busca pelo modelo de reprojeto para equipamentos mecatrônicos, ao qual a presente dissertação se propõe, passa pela avaliação dos métodos apresentados, e pela argumentação com base na literatura apresentada até o momento. De acordo com o exposto, a metodologia de reprojeto de equipamentos mecatrônicos é o objeto do capítulo 4.

## **4. PROPOSTA DE METODOLOGIA PARA O REPROJETO DE EQUIPAMENTOS MECATRÔNICOS**

### **4.1. INTRODUÇÃO**

De acordo com os objetivos expostos no primeiro capítulo a proposta de metodologia de reprojetado a ser apresentada destina-se a atender a equipamentos mecatrônicos. O enfoque dado neste trabalho estabelece três situações para a metodologia que está sendo proposta:

- Adaptar um equipamento mecatrônico a uma nova linha de produção;
- Restabelecer um equipamento mecatrônico em uso às condições operacionais de “tão bom quanto novo” mediante ações específicas de reprojetado como atualização tecnológica e recapacitação;
- Ampliar o campo de utilização de um equipamento mecatrônico usado.

Em linhas gerais as três situações visam estender a vida útil do equipamento mecatrônico. Após a ação de reprojetado o equipamento deverá apresentar características de um produto novo, e os princípios de solução devem atender as novas especificações, ou especificações de reprojetado, demandadas pelos clientes.

### **4.2. FASES DO REPROJETO DE EQUIPAMENTOS MECATRÔNICOS**

Fundamentalmente a metodologia de reprojetado proposta segue a estrutura de quatro fases inspirada na chamada “escola alemã” de projeto de produtos, apontada por Santos (2003) e Ferreira (1997). Dada importância da tomada de decisão para o desencadeamento do processo é colocada uma fase inicial onde são discutidos os aspectos referentes a este processo de decisão. Segue abaixo a síntese das fases onde o detalhamento das mesmas é feito nas próximas seções.

Fase 0 - Antes de partir para uma ação de reprojetado do equipamento mecatrônico em estudo, é necessário se estabelecer a decisão de realizar o reprojetado. Para esse expediente, no entanto, uma solução única e determinística foge à natureza diversificada dos equipamentos mecatrônicos. No presente trabalho é sugerido uma fase de planejamento, que é anterior às fases de reprojetado propriamente ditas, onde diversos indicadores são avaliados no sentido de sinalizar uma condição adequada para realização do reprojetado. Os parâmetros trabalhados nesta fase são originados das discussões sobre critérios de reprojetado na seção 3-2. Os mesmos tratam de critérios aplicados sobre os atributos de custo (DUFOUR,1996; SANTOS, 1999; BARBOSA, 2005; RELIASOFT, 2006), disponibilidade (SANTOS, 1999; PINHEIRO, 2006) e produtividade (SANTOS, 1999).

Com a opção pelo reprojetado, a seqüência de fases ilustradas na Figura 4-1, adaptado do modelo de Bitencourt (2001), Figura 3-8, segue considerando o padrão de projeto de produtos industriais apresentado no capítulo 2, e a definição dos tipos de reprojetado do capítulo 3.

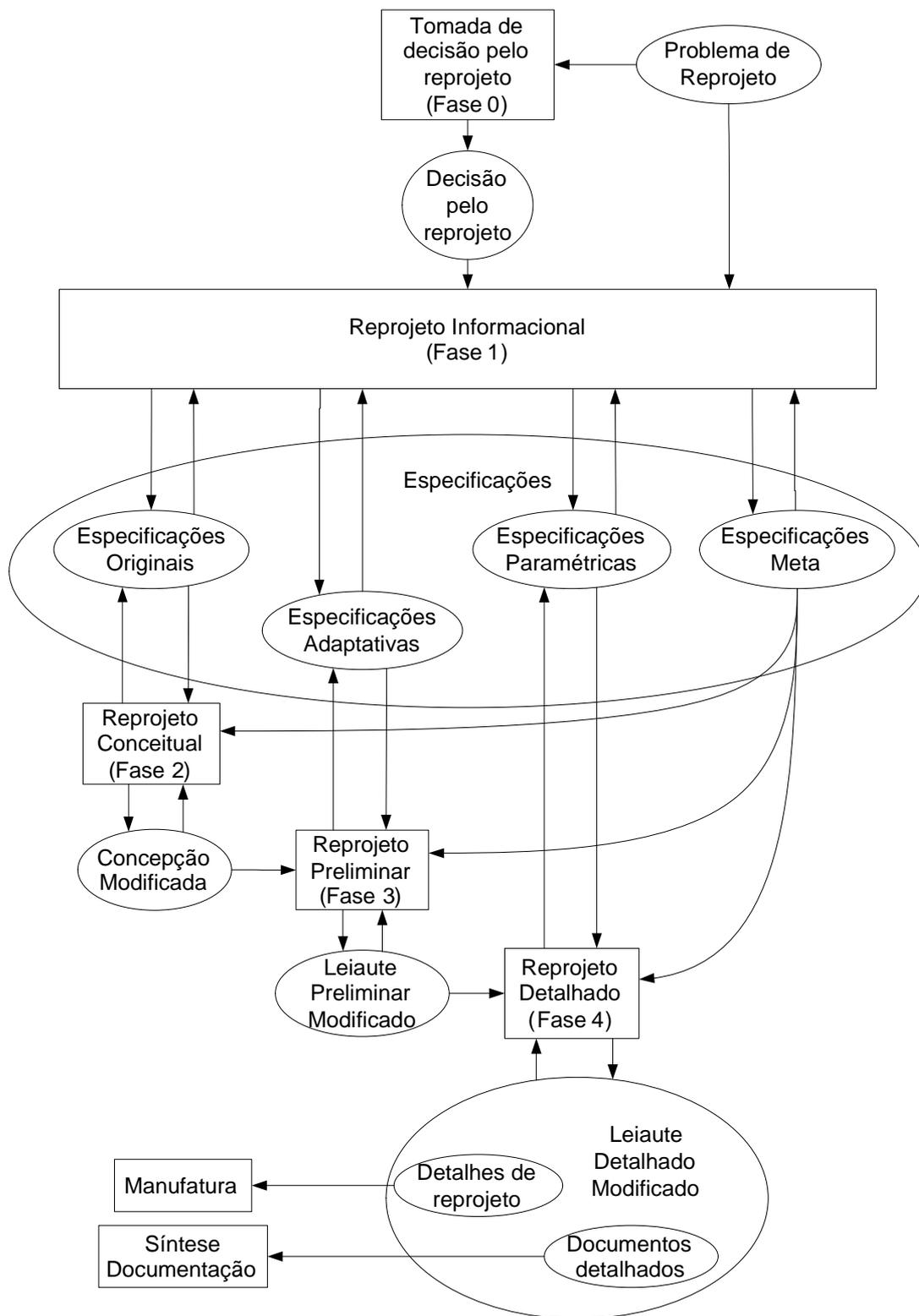


Figura 4-1 - Diagrama geral da metodologia de reprojeto de equipamentos mecatrônicos

A opção pela representação em Rede C/A na Figura 4-1 tem inspiração no modelo funcional de projeto de sistemas automáticos proposto por De Negri (1996) (Figura 2-1). As agências correspondem ao processamento de informação e os canais são elementos resultantes ou que alimentam esse processamento.

Fase 1 - A primeira fase efetivamente de reprojetado é a fase informacional, conforme indicado no diagrama da Figura 4-1. A agência “Reprojetado Informacional” é acionada pelo canal “Decisão pelo reprojetado” e alimentada pelo canal “Problema de reprojetado”. O processamento desta fase implica que nesse momento a equipe responsável pelo reprojetado deve buscar todas as informações necessárias para tomada de decisão das fases seguintes. Essa fase tem duas fontes principais, o histórico do equipamento e a sua própria configuração. Além disso, conforme indicado na Figura 4-1, as informações do contidas no problema de projeto que desencadearam todo o processo.

Entende-se por histórico do equipamento as informações relacionadas com histórico de uso dentre as quais as seguintes:

- Relatórios de manutenção;
- Relatórios de produção;
- Relatórios de acidentes.

Da configuração do equipamento entendem-se como informações de ordem técnica geradas durante a concepção do mesmo, e normalmente fornecidas pelo fabricante. Entre outras são consideradas as seguintes:

- Projeto elétrico, hidráulico/pneumático, mecânico;
- Leiaute da instalação;
- Manuais de funcionamento e de manutenção;
- Normas técnicas relacionados com o equipamento;
- Catálogos dos componentes.

Há casos em que o histórico do equipamento não está disponível dada a falta de cultura e estrutura para dispor de base de informação. Há situações em que também as informações de configuração, quando fornecidas pelo fabricante, se perdem no tempo ou são extraviadas. Nesses casos sugere-se dispor de conhecimento e técnicas de engenharia reversa para atuar no equipamento. Estes temas serão tratados na seção 4.2.2.1.

Para conclusão desta fase é feito um trabalho de síntese das informações levantadas mediante a elaboração de um relatório da fase informacional. Seguindo a classificação proposta por Bitencourt (2001), são gerados três tipos de especificações:

- Especificações originais;
- Especificações adaptativas;
- Especificações paramétricas.

O final da primeira fase ocorre com a criação da tabela de especificações meta. Basicamente é atribuído um valor meta a cada especificação relacionada na classificação de

especificações processada anteriormente. Com a geração das especificações meta, a equipe de reprojeto é estimulada a estabelecer uma valoração sobre as especificações geradas, o conjunto de especificações meta estabelece as condições de contorno (valores limite, estados, características desejáveis, etc.) sob as quais as novas soluções a serem propostas deverão estar incluídas.

Fase 2 – O nível de reprojeto mais abrangente é aplicado na fase conceitual de reprojeto. Nesta fase as especificações originais deverão dar origem a novos princípios de solução sobre o equipamento estudado. Para isso a equipe de reprojeto é estimulada a criar novas concepções mediante o preenchimento da matriz morfológica de reprojeto.

A conclusão da fase conceitual de reprojeto é alcançada com a escolha da melhor concepção. As concepções geradas na matriz morfológica são confrontadas com as especificações meta dentro da matriz de decisão. O resultado final esperado é a “concepção modificada” do equipamento.

Fase 3 – Nesta fase é feita a adaptação dos princípios de solução ou fase adaptativa de reprojeto. Nesse momento a equipe de reprojeto tem a preocupação de adaptar, ao equipamento existente, os princípios de solução gerados na fase conceitual de reprojeto, e atender às especificações adaptativas geradas na fase informacional. O reprojeto adaptativo consiste no planejamento da troca de componentes obsoletos por outros mais modernos, bem como dos trabalhos de infra-estrutura, montagem e ajuste de novos componentes que viabilizam esta troca.

Fase 4 - A última fase é reservada à fase de detalhamento do reprojeto. Com o reprojeto detalhado são estabelecidos os parâmetros definitivos dos princípios de solução gerados na fase conceitual, os parâmetros dos componentes adaptados na fase 3, e a reparametrização dos componentes existentes, conforme as especificações paramétricos da fase informacional . Entenda-se por parâmetros todas as informações dimensionais e comportamentais (códigos de programa ou lógica e dinâmica de acionamentos), necessárias ao funcionamento do equipamento. Para a finalização da fase de detalhamento deverá ser disponibilizado o “leiaute detalhado modificado”, este canal alimentará o processo de “manufatura” e “síntese de documentação”.

#### **4.2.1. Critérios de decisão para o reprojeto de equipamentos mecatrônicos**

A definição de critérios de decisão é de fundamental importância para o sucesso de uma ação de reprojeto. Tais critérios constituem uma parte importante no processo de reprojeto, uma vez que estes compõem os indicadores a serem monitorados, e farão parte da rotina do usuário do equipamento.

O universo de critérios podem se tornar demasiado amplo considerando-se os perfis industriais existentes. Na revisão bibliográfica apresentada no capítulo 3, considerando ainda fatores de ordem prática como a diversidade de tecnologias aplicadas, o grau e a quantidade de

atributos relacionados à natureza dos equipamentos mecatrônicos, apontam para os seguintes atributos gerais:

- Custo;
- Disponibilidade;
- Produtividade;

As referências utilizadas no capítulo sobre métodos de reprojetado (capítulo 3) dizem respeito a bens de consumo; a adaptação aos bens de capital e o detalhamento dos critérios para estes atributos será objeto das próximas seções deste capítulo.

#### 4.2.1.1. Análise de custos

O atributo custo está presente em todas as atividades desenvolvidas dentro de uma empresa. Para decidir pelo reprojetado de um equipamento com base em custos devem-se considerar dois momentos. O primeiro, durante o ciclo de vida do equipamento, como uma forma de monitoramento contínuo, e o segundo, na verificação da viabilidade da ação de reprojetado.

Durante o ciclo de vida do equipamento são vários os custos que se relacionam direta ou indiretamente com o uso do equipamento, no entanto, neste trabalho, maior ênfase será dada aos custos de manutenção, por se entender que estes melhor refletem a ação do tempo e na confiabilidade do equipamento.

Uma referência baseada nos custos de manutenção deve levar em consideração uma média histórica dos custos, e o critério de decisão pode ser um percentual de elevação dos valores, ou a projeção do somatório desses valores em um determinado período comparada a uma condição específica. No diagrama representado pela Figura 4-2, é sugerida a opção pelo reprojetado quando a média dos custos com manutenção supera em 50% a média histórica, ou quando a projeção dos custos para o próximo ano excede o valor de um equipamento novo.

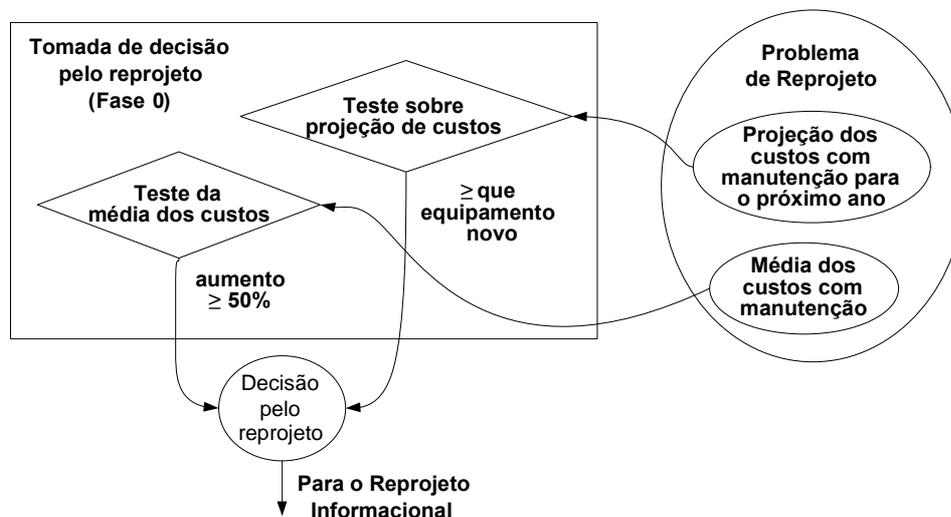


Figura 4-2 – Estabelecimento de critério de custo durante o ciclo de vida para o reprojetado de equipamentos

Já a análise de custo com base na viabilidade do reprojeto, pressupõe que esta é uma alternativa tecnicamente realizável, e sua aplicação está vinculada unicamente ao balanço entre os custos de reprojeto e o retorno desses investimentos. Os critérios nesse caso podem considerar a redução de custos, o aumento de ganhos financeiros ou ambos.

A redução de custos relacionados ao equipamento estudado é possível de diversas formas, pela redução do consumo de energia substituindo componentes antigos por outros mais modernos e econômicos, pela melhoria de projeto para reduzir desperdício de matéria prima, etc. Os ganhos financeiros podem vir da própria redução dos custos, mas também da melhoria da qualidade dos produtos produzidos pelo equipamento reprojeto, aumento da produtividade ou ao agregar novas funções ao equipamento. Os patamares podem ser estabelecidos em percentual sobre as características do produto atual como indicado no exemplo da Figura 4-3.

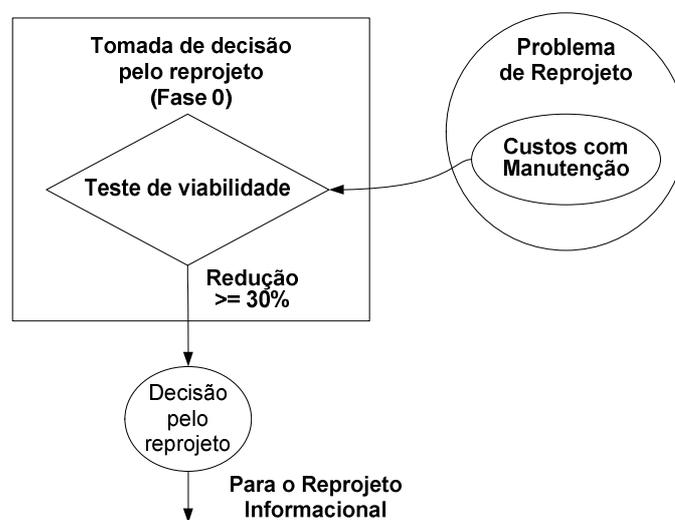


Figura 4-3 – Exemplo da aplicação de critérios de viabilidade de custos para o reprojeto

Uma decisão coerente pela ação de reprojeto parte do pressuposto que o equipamento já tenha coberto os custos de aquisição ou, no caso da aquisição de um equipamento usado, tenha-se esta essa expectativa. De outra forma a ação se justifica somente se o equipamento nunca conseguiu atender plenamente aos propósitos aos quais foi inicialmente projetado, e existe a disposição em tentar recuperar o que já foi investido. Neste último caso a opção extrema pelo descarte pode ser a mais realística se for considerado os prejuízos por um longo período de utilização.

Para a estimação de custos é sugerida a coletânea de métodos de Dhillon, 1983 (apud Barbosa, 2005), apresentadas no capítulo anterior (seção 2.1.1.1). É necessário se observar que o enfoque dos custos para bens de capital estão relacionados basicamente com sua manutenção, enquanto que em bens de consumo estes valores se concentram em sua produção.

### 4.2.1.2. Análise de disponibilidade

A análise de disponibilidade está relacionada ao histórico de manutenção do equipamento e manifesta o nível de deterioração do mesmo, ou a inadequação de um item em relação ao *benchmarking* existente. Quando se avizinha o período de descarte do equipamento é esperado um aumento dos tempos de parada, e conseqüentemente, a redução da disponibilidade do equipamento. Como indicado por Santos (1999), os critérios com base na disponibilidade são essencialmente decisões de gestão de engenharia de manutenção. A razão do somatório das paradas pelo tempo de produção, deve atingir um valor referência requerido para a empresa ou tipo de indústria.

Como indicado no exemplo da Figura 4-4, um relatório de disponibilidade deve ser utilizado como referência na tomada de decisão. O nível crítico indicado corresponde ao critério de referência estipulado para tomada de decisão sobre qual ação deve ser aplicada no equipamento monitorado.

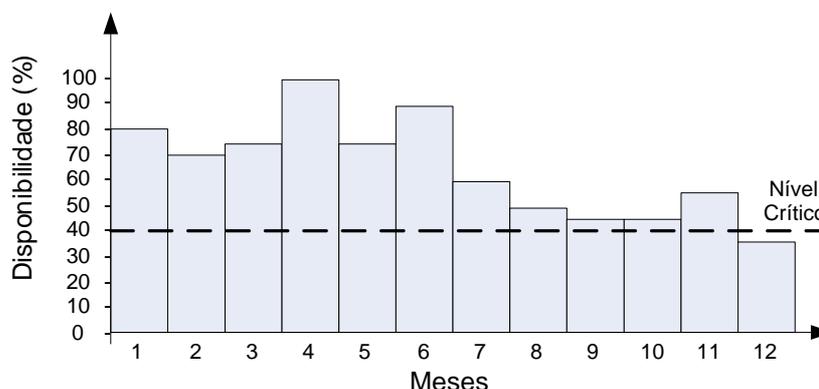


Figura 4-4 – Relatório mensal de disponibilidade de um equipamento hipotético

Dentro da sistemática proposta o diagrama da Figura 4-5 corresponde ao mecanismo de decisão com base na disponibilidade.

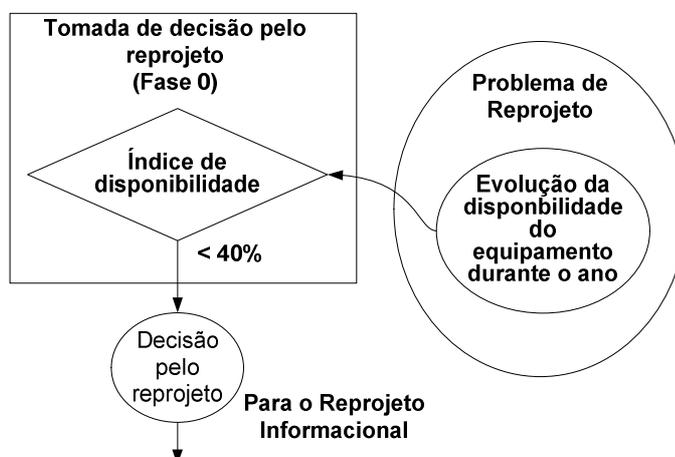


Figura 4-5 – Critério de decisão pelo reprojeto com base na evolução da disponibilidade do equipamento

A decisão pelo reprojeto deve considerar a filtragem de fatores relacionados com procedimentos, que possam contribuir para um nível abaixo ao referido nível crítico e não tem relação direta com o estado de desgaste do equipamento, como:

- Instalação ou manutenção inadequada;
- Operação inadequada;
- Sobrecarga do equipamento;
- Situações diversas como a qualidade da matéria prima, produtividade exigida, ambiente inadequado, etc.

Para a definição do nível crítico, deve-se estar atento aos benefícios resultantes das ações sobre o equipamento; as já citadas vantagens do reprojeto são um bom ponto de partida nesta decisão. Como em Pinheiro (2006), é possível considerar situações intermediárias onde o reforço da manutenção ou a modernização podem ser estipulados, ou ainda condições extremas a qual seria aconselhável o descarte do equipamento.

#### **4.2.1.3. Análise de produtividade**

A produtividade é um indicador típico na rotina da gerência de produção, e constitui uma fonte de informação de fácil acesso. Os relatórios de produção transcendem à visão técnica do sistema, e estabelecem uma referência que indica a capacidade da empresa atender certa demanda por um produto, sob o qual, o equipamento analisado, é total ou parcialmente responsável. Particularmente as seguintes situações se apresentam como fatores que influenciam a produtividade de um equipamento:

- Queda da capacidade produtiva pela obsolescência de partes ou todo o equipamento;
- Necessidade do aumento da produtividade por pressões mercadológicas;
- Situações diversas como adaptação a novo nicho de mercado, demandas de qualidade, adaptação a normas trabalhistas ou ambientais, entre outras.

De forma semelhante ao tratado nos critérios de disponibilidade, um critério baseado na produtividade deve partir de um histórico de produtividade do equipamento. Toma-se a média de produtividade como valor típico, e definem-se as ações a partir de patamares específicos, como sugerido em Pinheiro (2006), para a disponibilidade de uma planta industrial.

No exemplo genérico da Figura 4-6 são estabelecidos três patamares. Para um índice de produtividade entre 60% e 80% deverá ser feita a manutenção, no caso do índice ficar entre 60% e 20% é sugerido um reprojeto e, se ficar abaixo de 20%, o equipamento deverá ser desativado. Os valores dos patamares devem levar em consideração a realidade do equipamento estudado, o ramo da empresa que o utiliza, até mesmo a área dentro da empresa onde o equipamento esta

instalado. O importante é estabelecer critérios que contemplem as necessidades da empresa para uma tomada de decisão segura pelo reprojeto.

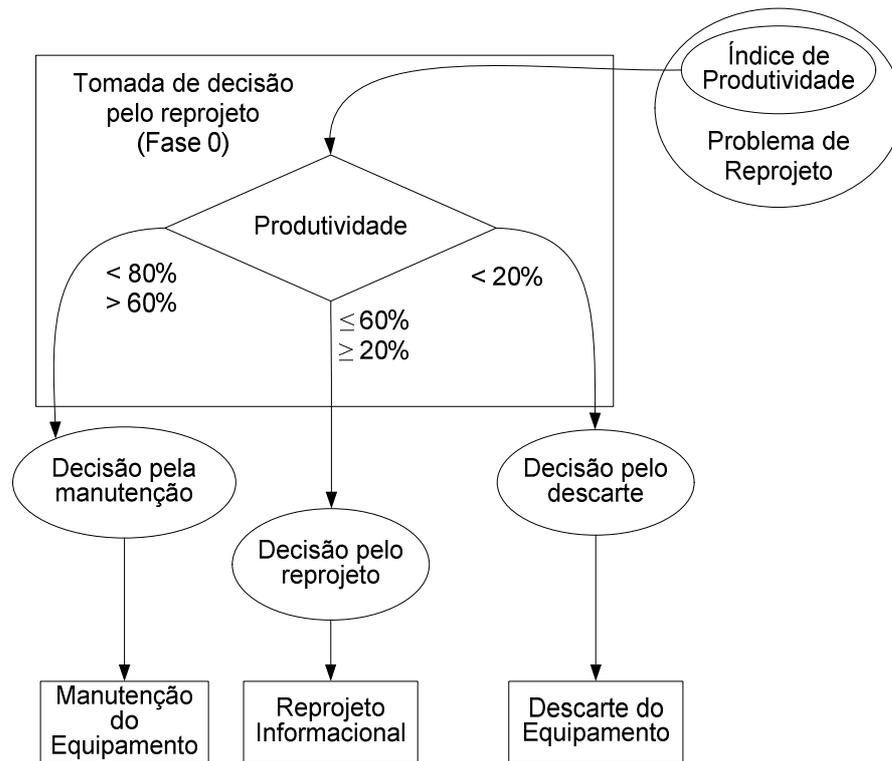


Figura 4-6 – Exemplo de ações e critérios baseados na produtividade de um equipamento, adaptado de Pinheiro (2006)

#### 4.2.1.4. Considerações finais sobre critérios de decisão para o reprojeto

Os diversos indicadores apresentados constituem uma referência básica. Adicionalmente podem-se considerar as seguintes situações como adequadas para um reprojeto:

- Aquisição de um equipamento usado, reativação de um equipamento fora de uso;
- Dificuldades na obtenção de peças de reposição para manutenção de um equipamento;
- Desenvolvimento ou experimento de novos conceitos dentro da rotina de manufatura.
- Aumento de produção, adequação de qualidade;
- Adequação de novos processos de gerenciamento: produção e manutenção entre outros.

A ação de reprojeto é também um momento para se rever conceitos, aplicarem novas idéias e até mesmo ousar, o que não implica necessariamente em satisfazer uma necessidade imediata ou latente, e sim a busca de um diferencial dentro do mercado. Motivações desta natureza estão vinculadas a área de atuação e também as estratégias da empresa com relação ao seu mercado.

### 4.2.2. Fase informacional do reprojeto (Fase1)

Como exposto anteriormente, a fase informacional é a mais importante do processo de reprojeto proposto. São a partir das informações levantadas nesta fase que serão dados os encaminhamentos necessários ao bom desenvolvimento das demais fases. Como o próprio nome diz, esta fase objetiva o levantamento de informações para esclarecimento do funcionamento do equipamento, e a determinação das especificações para as demais fases de reprojeto.

O processo proposto para a fase informacional se apresenta em dois momentos básicos. O primeiro, considerando a terminologia de Bitencourt (2001), é a recuperação e aquisição de informações relacionadas ao produto, o segundo é a materialização das informações adquiridas com a elaboração de um relatório onde estarão as especificações que alimentam as demais fases de reprojeto (Figura 4-7).

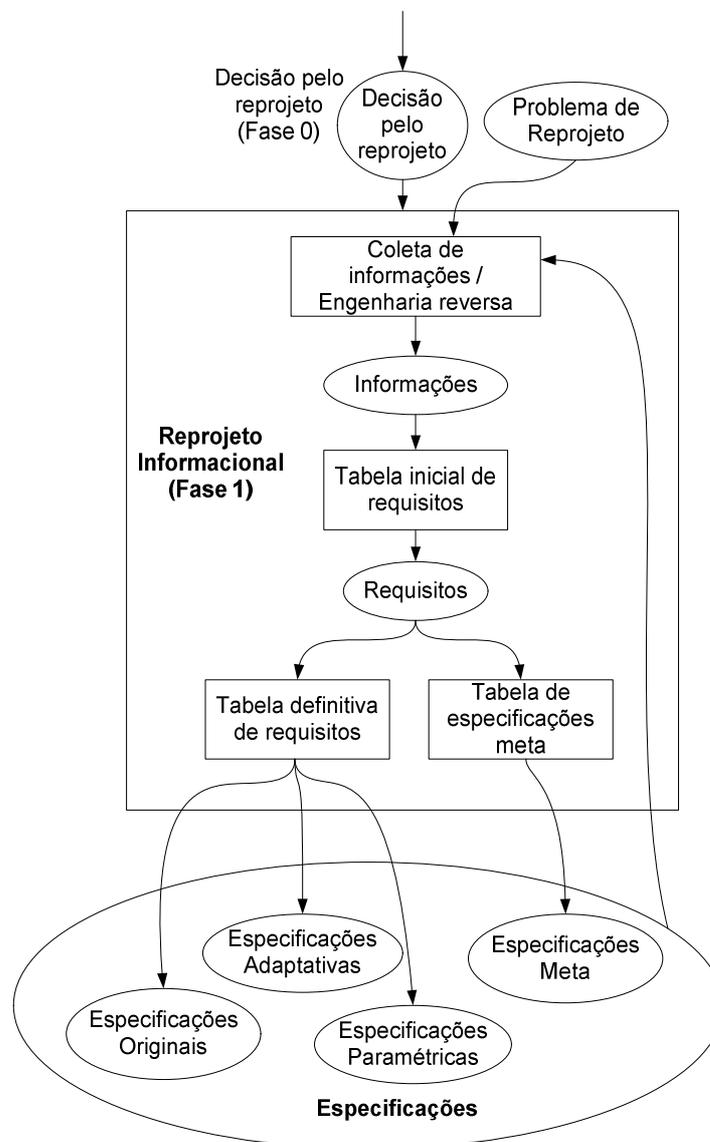


Figura 4-7 – Fase informacional de reprojeto

Consta da recuperação e aquisição de informações o levantamento de documentação existente, a aplicação de questionários aos diversos clientes relacionados ao equipamento em estudo, e a engenharia reversa do mesmo. A busca de documentação deve atingir os mais variados aspectos relacionados ao produto analisado, dos quais é possível considerar:

- Relatórios de produtividade,
- Relatórios de manutenção
- Manuais de operação, manutenção e componentes;
- Normas relacionadas ao equipamento;
- Registro de alterações anteriores;
- Projeto elétrico, mecânico, software.

Para elaboração do questionário deve-se ter em mente a estimulação do interlocutor no sentido de transferir a experiência com o equipamento, ou alguma outra informação que não tenha sido possível recuperar com os documentos encontrados. Os seguintes tópicos são sugeridos:

- Informações sobre falhas: frequência e possíveis causas de paradas, identificação de componentes ou partes que apresentam maior índice de problemas, substituição de componentes danificados;
- Informações sobre o de uso: mudanças de parâmetros, regime de utilização;
- Informações sobre ergonomia: afinidade com os modos de operação e sinais do equipamento, experiências sensoriais (vibração, ruído, queimadura, choque elétrico, etc.) com o equipamento;
- Críticas e sugestões: informações gerais como o nível de satisfação com o equipamento, comparação com equipamentos semelhantes etc.

O fato dos equipamentos mecatrônicos serem geralmente produtos personalizados implica que o *benchmarking* seja feito principalmente com relação aos componentes e, eventualmente, sobre equipamentos similares dentro da própria empresa, em empresas parceiras ou fabricantes. Outra consequência deste fato é que este procedimento seja realizado após a engenharia reversa do equipamento, pois é o momento em que a equipe de reprojeto estará dominando as informações de funcionamento e os componentes responsáveis dentro da estrutura do equipamento.

#### **4.2.2.1. Engenharia reversa para o reprojeto de equipamentos mecatrônicos**

O propósito da engenharia reversa é estabelecer a base de conhecimento de onde serão gerados os requisitos e tomadas todas as decisões do processo de reprojeto do equipamento estudado. À medida que a equipe de reprojeto se intera dos mecanismos de funcionamento,

princípios de solução, dimensões, especificações, entre outros dados, forma-se todo o esboço teórico e prático de onde pode-se justificar as alterações decididas nas demais fases de reprojeto. Portanto a continuidade dos trabalhos de recuperação e aquisição de informações se dá pela utilização de técnicas para aplicar a engenharia reversa no equipamento. Para isso a seguinte seqüência de trabalho é proposta:

- Modelagem de sistemas automáticos com Redes C/A;
- Levantamento dos diagramas elétrico, pneumático, hidráulico e mecânico;
- Modelagem comportamental com diagramas SFC;
- Modelagem confiabilística.

Esta seqüência é auto realimentada. A modelagem de sistemas automáticos irá subsidiar a geração de diagramas que por sua vez é base na modelagem comportamental e termina com a modelagem confiabilística. As dúvidas em uma etapa irão estimular as melhorias na etapa anterior e assim sucessivamente até a obtenção dos documentos finais.

#### 4.2.2.1.1. Modelagem de sistemas automáticos

Por se tratar de equipamentos mecatrônicos a modelagem por diagramas C/A é a mais adequada, o exemplo da Figura 4-8 ilustra o modelo de um sistema automático de lavagem de roupas. Nele é explicitado o fluxo de energia e matéria, são determinadas as agências, suas responsabilidades, e identificadas as relações com ambiente externo ao equipamento. Com este modelo a equipe de reprojeto dispõe de um guia nas ações de reprojeto. Por exemplo, supondo-se que o histórico de falhas ou as entrevistas apontem pela ineficiência do sistema de limpeza, sabe-se pelo modelo que além da própria agência “Sistema de Limpeza”, a causa pode estar relacionada com interação entre as agências “Quadro de Comando” e “Sistema de Aquecimento”. Seguindo o modelo pode-se concluir que o sistema de cabos e sensores, da forma que estão organizados, não é adequado para o correto funcionamento do equipamento.

O processo de modelagem da máquina automática de lavar roupas inicia por uma breve inspeção; primeiramente se observa um ambiente externo de onde devem vir a água, energia elétrica, as roupas sujas e a interface com o operador, e um ambiente interno, que compõe o sistema automático propriamente dito. A partir dos manuais, catálogos, ou um cuidadoso processo de desmontagem, busca-se explicitar as partes constituintes do sistema automático. O desmembramento resultante terá sempre duas partes, uma das partes é o sistema de informação, a outra é o sistema energia/matéria. Fazem parte do sistema de informação os componentes da máquina que interagem com o operador, e que são responsáveis pela operação automática. Já os componentes responsáveis pela transformação de energia, correspondem ao sistema energia/matéria.



componentes de uma placa de circuito, ou em um desenho hidráulico detalhar os elementos de uma válvula. Os componentes identificados farão parte da lista de princípios de solução associados a sua agência de origem. Com esta orientação a equipe de reprojeto dispõe de uma referência na geração de novos princípios de solução durante a fase de reprojeto conceitual.

Um sinal de que o modelo não foi refinado suficientemente surge quando um número elevado de componentes problemáticos está associado a uma única agência, para este caso a elaboração de um novo diagrama específico sobre a agência problemática pode ajudar a compreender melhor o problema.

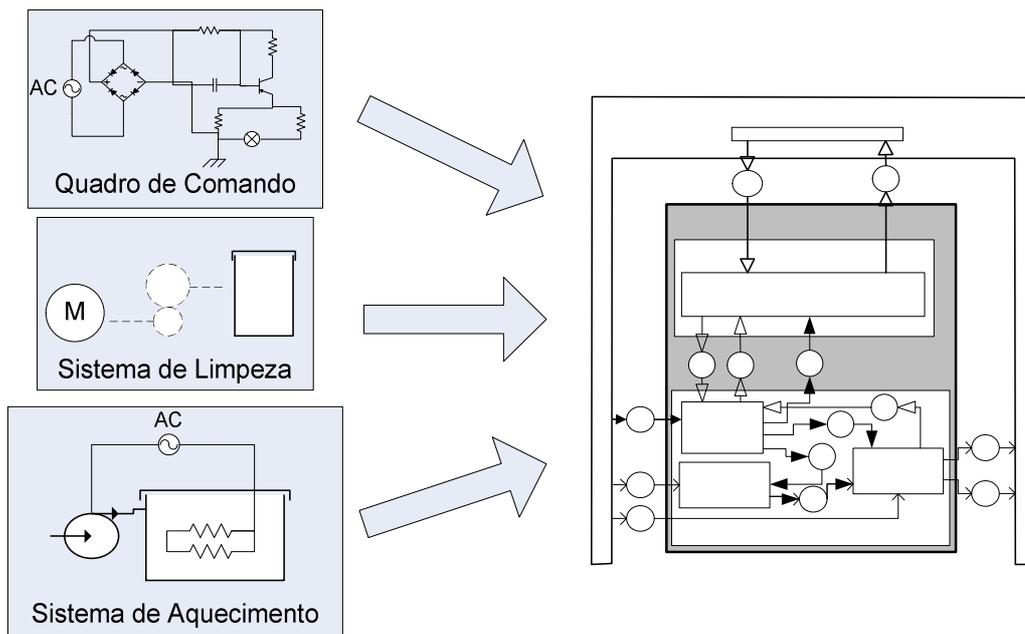


Figura 4-9 – Detalhamento das agências identificadas

#### 4.2.2.1.2. Modelagem comportamental

Os modelos na forma de Redes C/A, diagramas elétricos, desenhos mecânicos e outros servem para esclarecer a ligação e a função de cada componente dentro do equipamento. Um projetista experiente muitas vezes já consegue visualizar o comportamento do sistema a partir destes diagramas, no entanto, à medida que o sistema torna-se mais complexo, a seqüência de atuação e acionamentos pode não ser de identificação fácil, e se o equipamento for programável, as dificuldades podem se tornar ainda maiores sem um modelo comportamental do sistema.

Portanto, são os objetivos do modelo comportamental informar ao projetista a seqüência de acionamentos, hierarquia dos comandos, sinais esperados, enfim, tudo que diz respeito ao comportamento do equipamento de forma padronizada.

Voltando ao exemplo da máquina de lavar roupas, pode-se observar pela Figura 4-10 uma estrutura típica de modelagem comportamental de um equipamento automático, a modelagem por SFC apresentada no capítulo 2 esclarece as convenções adotadas.

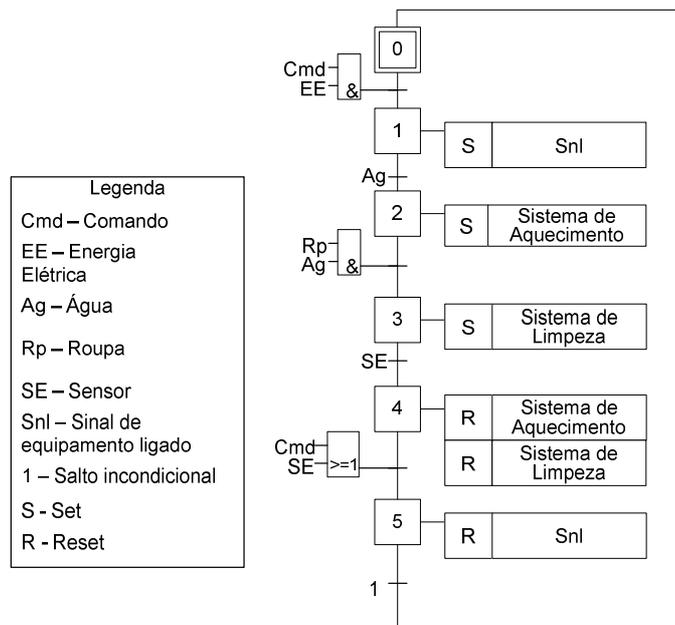


Figura 4-10 - Modelo comportamental de uma máquina de lavar automática

A geração do modelo comportamental parte do entendimento das funções dos elementos destacados na modelagem funcional/estrutural. Dentro da seqüência de operação do equipamento, cada componente identificado tem um instante particular onde entrar em operação. O projetista deve estar ciente do estado dos componentes a cada transição, assim é possível prever com segurança os eventos que irão resultar na função fim do comportamento modelado.

#### 4.2.2.1.3. Modelagem confiabilística

O uso da modelagem confiabilística tem por objetivo complementar a visão do sistema técnico estudado. Com as visões estrutural, funcional e comportamental obtidos na modelagem de sistemas automáticos, o projetista conhece as condições ideais de funcionamento e, agregando-se o modelo confiabilístico, o projetista terá também uma expectativa da longevidade dessas condições ideais e, em conjunto com os demais setores da empresa, poderá trabalhar melhor as soluções e as estratégias para sua manutenção.

Muitas vezes o usuário ainda não tem pleno conhecimento dos princípios de solução aplicados em seu equipamento, mas já sabe quais componentes apresentam falhas mais freqüentemente. O conhecimento, formal ou informalmente constituído da freqüência de falhas, aliado ao trabalho técnico de modelagem durante a fase informacional do reprojeto, pode incrementar significativamente a capacidade da equipe de reprojeto em identificar os pontos falhos do equipamento que necessitam de um reprojeto.

Para a escolha do modelo mais adequado o projetista deve ter primeiramente absorvido bem as informações relativas à função, estrutura e comportamento do sistema. A Figura 4-11 mostra um provável modelo confiabilístico da seqüência do comando de limpeza para uma máquina de lavar automática genérica. Como não foram explicitados os componentes das

agências identificadas na Figura 4-11, o diagrama é gerado a partir da ordem das agências e canais esperada para a ação de lavar roupa. O exemplo ilustra que o operador aciona o “Painel de operação”, que liga o “Quadro de comando” através do canal de comando (Cmd), que por sua vez ativa o “Sistema de limpeza” pelo canal cabo (cb); a saída esperada é a “Roupa limpa”.

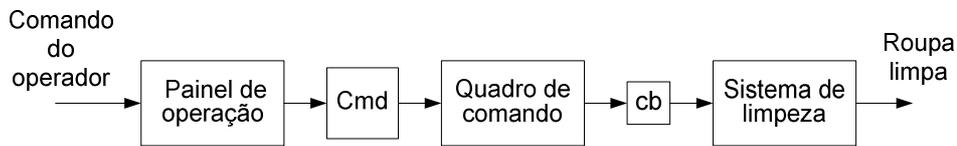


Figura 4-11 – Modelo confiabilístico da seqüência de operação da máquina de lavar roupa automática

Em um sistema mais complexo, e em um nível de detalhamento onde são identificados os componentes, cada modo de operação ou função deve ter um diagrama confiabilístico próprio. O diagrama da Figura 4-12 ilustra esta condição, nela é representado um sistema hidráulico de deslocamento de carga.

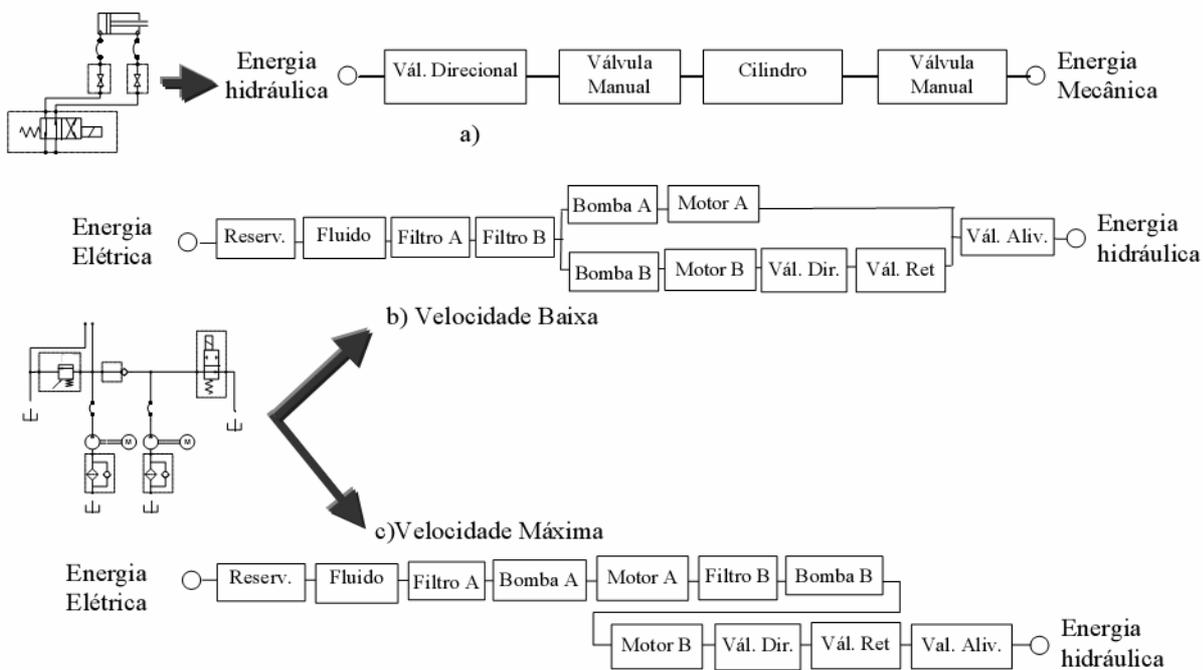


Figura 4-12 – Modelos confiabilísticos de um sistema hidráulico de deslocamento de carga com dupla velocidade (VINADÉ, 2003)

Os modos de operação “velocidade Máxima” e “Velocidade Baixa” possuem configurações diferentes de componentes e pedem, portanto, uma modelagem adequada a cada modo de operação. Deve-se observar que a representação do diagrama da Figura 4-11 tem pouco efeito prático para o cálculo da confiabilidade, neste caso há a necessidade do detalhamento dos componentes sugerido pela Figura 4-9, neste detalhamento devem constar a configuração e a confiabilidade individual de cada componente. Em ambos os casos, na impossibilidade de se calcular ou estimar a confiabilidade do sistema, os diagramas servem para

visualização da rota de falha de uma função específica ou modo de operação do equipamento analisado.

#### **4.2.2.2. Relatório do reprojeto informacional**

Ao final do reprojeto informacional todas as informações devem ser compiladas no intuito de subsidiar as demais etapas do reprojeto. Seguindo a orientação do diagrama proposto na Figura 4-1, as informações obtidas nesta fase devem gerar as especificações de reprojeto na classificação entre originais, adaptativos, paramétricos e as especificações meta. A mudança de nomenclatura entre as expressões “requisito” e “especificação” tem o efeito da mudança de ponto de vista. Na geração de requisitos o enfoque é o entendimento do problema de reprojeto, com a passagem para a fase conceitual o conjunto de requisitos mais as especificações meta e suas informações adicionais, passa ser uma especificação a ser alcançada. Esta constatação vem de encontro com a afirmação de Bitencourt (2001) pg. 67 de que “O conjunto dos requisitos de reprojeto apresentados na forma utilizável no processo de reprojeto são as especificações de reprojeto”.

Independentemente do critério ou motivação que desencadeou o processo de reprojeto, os requisitos de reprojeto devem refletir as atuais condições do equipamento e as expectativas dos clientes. Com este objetivo, a presente dissertação propõe confrontar todas as informações obtidas na forma de documentos, projetos, normas, questionários etc., com o entendimento do equipamento obtido na engenharia reversa.

Espera-se que após todo o trabalho de coleta de dados os responsáveis pelo reprojeto já tenham o conhecimento suficiente sobre os elementos e as suas funções dentro do sistema que compõe o equipamento estudado, bem como as necessidades dos clientes, a obsolescência de componentes e eventuais erros do projeto original. O processo de tradução da base de conhecimento adquirida em requisitos de reprojeto tem início com o preenchimento da tabela inicial de reprojeto (Tabela 4-1). Na primeira coluna são listadas as agências identificadas pela modelagem de sistemas automáticos, onde se observou alguma oportunidade de reprojeto. Já para a primeira linha estão colocados os fatores causadores do reprojeto sugerida pela Fundação Volkswagen (1996) apud Dufour (1996), Tabela 3-1, Tabela 3-2, Tabela 3-3 e Tabela 3-4. Basicamente a equipe de reprojeto deve organizar as oportunidades de reprojeto identificadas em cada agência selecionada com os possíveis fatores causadores do reprojeto, têm-se assim um meio de questionar os problemas encontrados e convertê-los em requisitos de reprojeto.

Tabela 4-1 - Tabela inicial de requisitos de reprojeto

		Classificação de causas para o reprojeto			
		<i>Técnicas</i>	<i>Mercado</i>	<i>Segurança</i>	<i>Legais</i>
AGÊNCIAS IDENTIFICADAS	<i>Agência 1</i>	Requisitos técnicos relacionados a agência 1	Req. de mercado relacionados a agência 1	Req. de segurança relacionados a agência 1	Requisitos legais relacionados a agência 1
	<i>Agência 2</i>	Req... agência 2	Req... agência 2	Req... agência 2	Req... agência 2
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
	<i>Agência n</i>	...	...	...	Req... agência n

Na tabela definitiva, (Tabela 4-2) são classificados os requisitos gerados na tabela inicial entre especificações originais, adaptativas e paramétricas. O procedimento a ser adotado para o preenchimento da tabela definitiva consiste em questionar o nível de reprojeto necessário para a satisfação do requisito identificado. Tomando por base as informações coletadas na fase informacional, espera-se que a equipe de reprojeto domine todas as informações importantes relacionadas ao equipamento analisado, isto implica que os requisitos gerados surgiram da identificação de oportunidades de reprojeto. Portanto a definição do nível de reprojeto vem da expectativa de ação necessária para a satisfação do requisito identificado. Por exemplo, o requisito cuja origem é um problema do projeto atual pode requerer a busca por uma solução original; se por outro lado um requisito surgiu da necessidade da substituição de um componente envelhecido, a situação pode ser resolvida pela adaptação de um componente similar, no caso de se verificar que a atual capacidade de suprimento de energia ou matéria é insuficiente pode-se optar pela mudança de parâmetro dos componentes.

Dispondo da classificação definitiva dos requisitos de reprojeto, a equipe de reprojeto, a partir do diagrama da Figura 4-1, sabe em que fase do reprojeto as especificações deverão ser satisfeitas, ou seja, a informação classificada na forma definitiva é a informação que será manipulada nas suas respectivas fases de reprojeto.

Tabela 4-2 - Tabela definitiva para classificação dos requisitos para as demais fases de reprojeto

		Classificação dos requisitos para o reprojeto (Especificações de reprojeto)		
		<i>Originais</i>	<i>Adaptativos</i>	<i>Paramétricos</i>
AGÊNCIAS IDENTIFICADAS	<i>Agência 1</i>	Req. originais relacionados a agência 1	Req. adaptativos relacionados a agência 1	Req. paramétricos relacionados a agência 1
	<i>Agência 2</i>	Req... agência 2	Req... agência 2	Req... agência 2
	⋮	⋮	⋮	⋮
	<i>Agência n</i>	...	...	Req... agência n

Para exemplificar e detalhar o procedimento segue o exemplo da máquina automática de lavar roupas. Mesmo em se tratando de uma atividade de reprojeto, certo nível de abstração é necessário para estimular a capacidade criativa dos responsáveis pelo reprojeto. Portanto, como primeira medida na montagem da tabela inicial, as funções identificadas como agências na modelagem do sistema automático devem ser colocadas na coluna de agências da Tabela 4-3.

Tabela 4-3 - Tabela inicial de requisitos da máquina automática de lavagem de roupas

		Classificação de causas para o reprojeto			
		<i>Técnicas</i>	<i>Mercado</i>	<i>Segurança</i>	<i>Legais</i>
<b>AGÊNCIAS IDENTIFICADAS</b>	<b>Sistema de Limpeza</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>•Aumentar a capacidade de roupas no ciclo de limpeza</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>•Reduzir o nível de ruído aos novos patamares legais</li> </ul>
	<b>Sistema de Aquecimento</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Aumentar a confiabilidade do sistema de aquecimento.</li> <li>•Atualizar sistema de controle.</li> </ul>			
	<b>Quadro de Comando</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Automatizar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Ampliar capacidade de programação</li> </ul>		
	<b>Painel de Operação</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>•Modernizar display</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Sinalizar defeitos</li> </ul>	

Os requisitos devem seguir a orientação adaptada de Fonseca (2000) na elaboração do texto, ou seja, os requisitos devem ser configurados na forma de uma frase curta composta por um verbo, seguida de um ou mais substantivos descrevendo características desejadas para o componente ou sua função.

Pelo exemplo, o resultado dos cruzamentos da agência “Quadro de Comando” com as causas, foi identificado o requisito técnico “Automatizar” e o requisito de mercado “Ampliar a capacidade de programação”. Resumidamente o cruzamento consiste em se fazer o seguinte questionamento:

“Tendo em mente a base conhecimento adquirido, que requisito técnico (de mercado, de segurança, legal) se identifica uma oportunidade de reprojeto necessário para ampliar a vida útil da Agência Sistema de Limpeza (Sistema de Aquecimento, Quadro de Comando, Painel de Operação)?”.

A etapa seguinte visa estimular o grupo de reprojeto a decidir o nível de reprojeto abstraído na elaboração de requisitos. Para isso os requisitos levantados deverão ser distribuídos, quando for o caso, entre as três próximas fases de reprojeto. Os requisitos aos quais serão criados novos princípios de solução devem ser qualificados como especificações originais. Para os requisitos onde um trabalho de adaptação da tecnologia existente será processado deverão ser qualificados como especificações adaptativas. E finalmente para os requisitos cuja satisfação basta uma alteração dimensional de parâmetros ou grandezas, a qualificação é de especificação paramétrica.

Para o exemplo da Tabela 4-3, a Tabela 4-4 ilustra uma possível classificação para os requisitos gerados.

Tabela 4-4 - Classificação dos requisitos da máquina automática de lavar roupas

		Classificação dos requisitos para o reprojeto (especificações de reprojeto)		
		<i>Originais</i>	<i>Adaptativos</i>	<i>Paramétricos</i>
<b>AGÊNCIAS IDENTIFICADAS</b>	<b>Sistema de Limpeza</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reduzir o nível de ruído aos novos patamares legais</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aumentar a capacidade de roupas no ciclo de limpeza</li> </ul>
	<b>Sistema de Aquecimento</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aumentar a confiabilidade do sistema de aquecimento.</li> <li>• Atualizar sistema de controle.</li> </ul>	
	<b>Quadro de Comando</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Automatizar</li> <li>• Ampliar capacidade de programação</li> </ul>	
	<b>Painel de Operação</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Modernizar display</li> <li>• Sinalizar Defeitos</li> </ul>	

É possível observar na Tabela 4-3 e Tabela 4-4 que descrição os requisitos identificados pode não apresentar uma correlação explícita com o componente responsável pelo problema. Por exemplo, não é possível dizer qual componente é responsável pelo ruído na especificação original do “Sistema de Limpeza”. Por outro lado a especificação “modernizar display” da agência “painel de Operação” é mais direta e aponta o componente a ser alterado. Este resultado é indicativo da tendência da equipe de reprojeto em direcionar os requisitos para potenciais soluções. Essa, no entanto, é uma característica inerente ao processo de reprojeto. Uma vez que se está partindo de uma solução resolvida, toda discussão tem inspiração em um princípio físico existente e as soluções alternativas serão fatalmente aplicadas sobre este mesmo princípio.

Uma última tabela é necessária para concluir o relatório da fase informacional, é a tabela das especificações dos requisitos de reprojeto. De acordo com Fonseca (2000), os requisitos de projeto são expressões mensuráveis dos alvos a serem atingidos pelas soluções a serem concebidas, na Tabela 4-5 a coluna “Valor Meta” indica esta informação. Adicionalmente na tabela deve constar os objetivos e restrições que couberem as especificações estipuladas, neste caso a coluna “Observações” atende esta orientação. A tabela de especificações meta, tem a função de orientar a equipe de reprojeto nos processos de escolha e parametrização dos princípios de solução levantados para os requisitos de reprojeto.

Tabela 4-5 – Exemplo de especificações meta dos requisitos de reprojeto para a máquina de lavar roupas

<b>Requisito de Reprojeto</b>	<b>Valor meta</b>	<b>Observações</b>
Reduzir o nível de ruídos aos novos patamares legais	=< 80 dB	Em conformidade com norma da CLT
Aumentar a capacidade de roupas no ciclo de limpeza	>= 7 kg	De acordo com pesquisa de mercado.
...	...	...

Com as informações coletadas, organizadas e documentadas a equipe de reprojeto está pronta para as próximas etapas de reprojeto.

#### 4.2.3. Fase conceitual de reprojeto (Fase 2)

A fase de conceitual de reprojeto, na estrutura da metodologia, é implementada quando o reprojeto apresenta uma lista de especificações originais, como pode ser visto na Figura 4-13. Considerando que as especificações geradas têm origem, dentre outras informações, do entendimento da estrutura funcional do equipamento, a etapa de modelagem funcional é suprimida do modelo de projeto conceitual do capítulo 2. As demais etapas continuam sendo as seguintes:

- Desenvolver alternativas de solução;
- Analisar sistemas, subsistemas e componentes (SSC);
- Selecionar concepções.

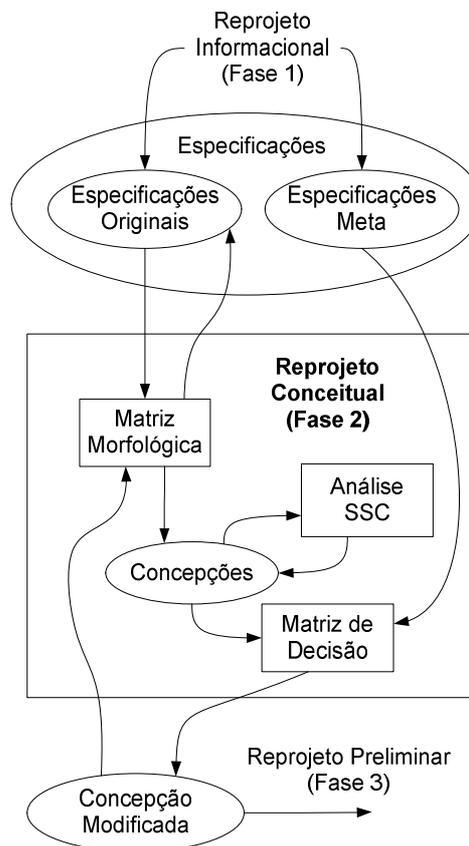


Figura 4-13 – Fase conceitual de reprojeto

Outra diferença fundamental com relação às metodologias de projeto conceitual, é que por se tratar de um equipamento existente, o grau de liberdade na proposição de soluções possui um forte componente restritivo. As soluções devem ser adaptáveis à realidade existente, e estar dentro do orçamento previsto. De outra forma poderá desencadear uma série de ajustes e correções que, além de descaracterizar o produto original, podem superar o orçamento programado.

**4.2.3.1. Desenvolvimento de soluções na fase conceitual de reprojeto**

Para o desenvolvimento de soluções inovadoras são várias as metodologias empregadas nos métodos de projeto apresentados no capítulo 2 (Tabela 2-2). Por ser o mais dinâmico, simples e aplicado em diversas das metodologias estudadas, uma versão adaptada ao reprojeto do método morfológico será aplicada neste trabalho. Conforme ilustrado na Figura 4-14 a saída desta fase do reprojeto conceitual será uma lista possíveis combinações de princípios de solução que serão analisadas na próxima etapa.

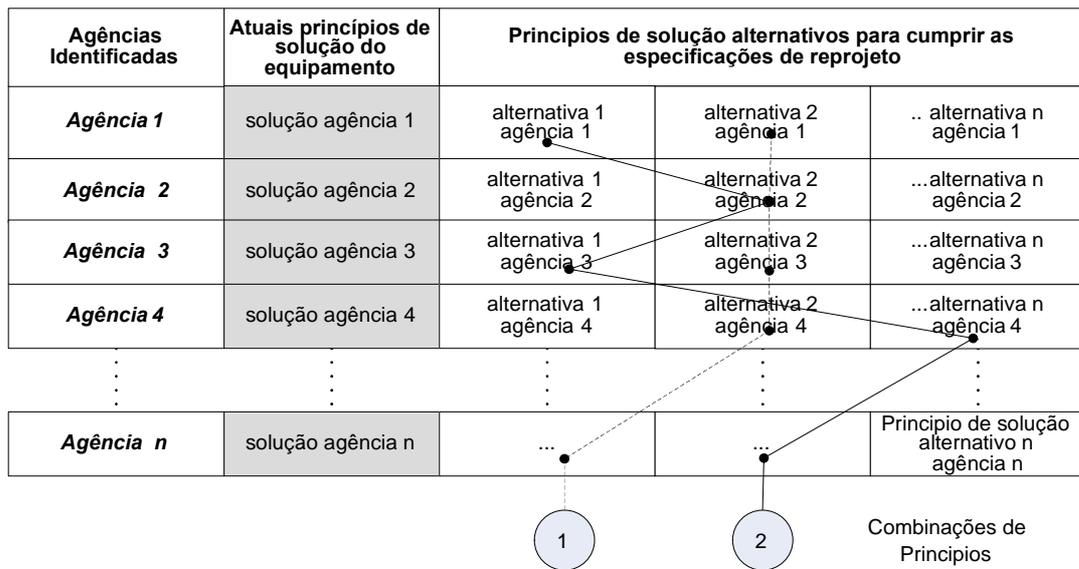


Figura 4-14 - Matriz morfológica e combinação de princípios de solução

**4.2.3.2. Análise de SSC e seleção de concepção**

O processo de reprojeto conceitual é concluído com a análise de sistemas, subsistemas, componentes e a seleção da concepção mais adequada aos requisitos levantados. A análise de SSC para o reprojeto consiste na avaliação das alternativas selecionadas. São definidos os parâmetros (formas, dimensões, etc.) que são importantes para o correto funcionamento do equipamento em estudo. Esta análise permite definir potenciais fornecedores de componentes e serviços, estimar custos traçar as estratégias para execução do reprojeto para a alternativa que for escolhida. Inclusive, esta análise feita antes da seleção da concepção, é um meio de aumentar à base de informações necessárias a decisão mais adequada.

A seleção da concepção ocorre de forma interativa utilizando a **Tabela 4-6**. O método sugerido é o método de Pugh apresentado em Forcellini et al. (2005). Tal método consiste em tomar as especificações metas elaboradas na fase informacional como critério na seleção da melhor concepção. Adicionalmente a equipe de reprojeto pode considerar algum outro critério que não pertença a lista de especificações, ou mesmo exclua as que não sejam um critério adequado.

Tabela 4-6 – Modelo de matriz de decisão. (FORCELLINI et al., 2005)

		Concepções				
		Concepção 1	Concepção 2 (referência)	Concepção 3	...	Concepção n
Critérios	<i>Critério 1</i>		0		....	
	<i>Critério 2</i>	...	0	...	...	...
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
	<i>Critério n</i>	...	0	....	...	...
	<i>Total +</i>	...	0	....	...	...
	<i>Total -</i>	...	0	....	...	...
	<i>Total Global</i>	...	0	....	...	...

O primeiro passo é eleger uma das concepções como referência, em seguida comparar as demais concepções com a referência escolhida. A comparação consiste simplesmente analisar cada concepção sob um ponto de vista relativo à referência do tipo “melhor que”, “igual” ou “pior que”. O procedimento não tem a intenção de atribuir uma quantidade, por isso cada quadro deve ser preenchida de forma absoluta com os sinais “+” ou “-” de acordo com a análise da equipe de reprojeto.

Ao final do procedimento espera-se que haja uma das concepções com uma contagem superior de qualificações “+”. Porém alguns aspectos devem ser considerados:

- Os critérios naturalmente possuem diferentes níveis de importância, nesse caso pode-se introduzir uma nova coluna com o peso do critério, um valor multiplicativo proporcional à importância do critério;
- Se um critério obtiver a mesma qualificação na maioria ou em todas as concepções deve-se rever o critério aprofundando o conhecimento a respeito;
- Colocar a concepção com maior pontuação como referência e refazer o processo é uma forma interativa de melhor conhecer o problema.

Na conclusão desta fase a equipe de reprojeto terá definido a “Concepção Modificada” que será trabalhada nas demais fases de reprojeto.

#### 4.2.4. Fase preliminar de reprojeto (Fase 3)

Para o reprojeto a necessidade da fase preliminar aparece como uma forma de integrar as especificações adaptativas a seqüência de fases do reprojeto (Figura 4-15), ou simplesmente dar os encaminhamentos necessários a estas especificações quando não existirem especificações originais. Assim todas as considerações a respeito da adaptação da solução ao leiaute do equipamento original, e mesmo a adaptação à concepção selecionada na fase conceitual, tem lugar nessa fase. Cabe à fase preliminar as seguintes tarefas:

- Determinar as alterações necessárias (modificações na estrutura) para instalação de componente novo com mesmo princípio de solução do original;
- Gerar os modelos em Rede C/A, Confiabilístico e Comportamental com as alterações decididas até o momento;
- Pesquisar fornecedores e levantar orçamentos;
- Planejar os procedimentos para montagem dos novos componentes;
- Gerar relatório preliminar com as informações levantadas para a fase de detalhamento.

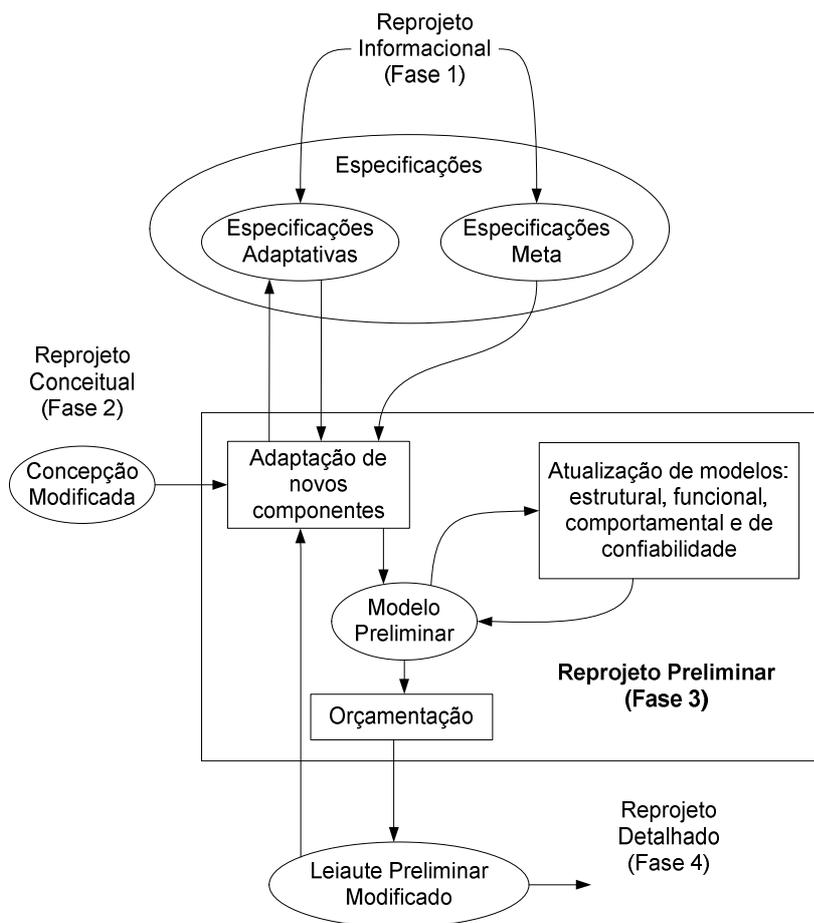


Figura 4-15 – Fase preliminar de reprojeto

#### 4.2.5. Fase detalhada de reprojeto (Fase 4)

Concluída a fase preliminar cabe a fase de detalhamento do reprojeto a geração do “Leiaute Preliminar Modificado” (Figura 4-16). A entrada das especificações paramétricas implica no redimensionamento dos princípios de solução atuais. Como exemplo, o aumento das bitolas de tubos para aumentar a vazão de suprimento, aumento da potência de fontes de tensão para comportar os novos componentes das alterações definidas nas fases anteriores, etc.

Com base em toda documentação gerada nas fases anteriores, a equipe de reprojeto deve produzir o material necessário à execução do reprojeto. Dentre os documentos esperados para esta etapa consideram-se os seguintes:

- Especificação final com a lista de componentes dos fornecedores ou opções de fornecedores;
- Atualização dos diagramas com indicações claras dos pontos de alteração;
- Relatório técnico final relacionando as alterações, benefícios, estimação de custos e plano de reprojeto.

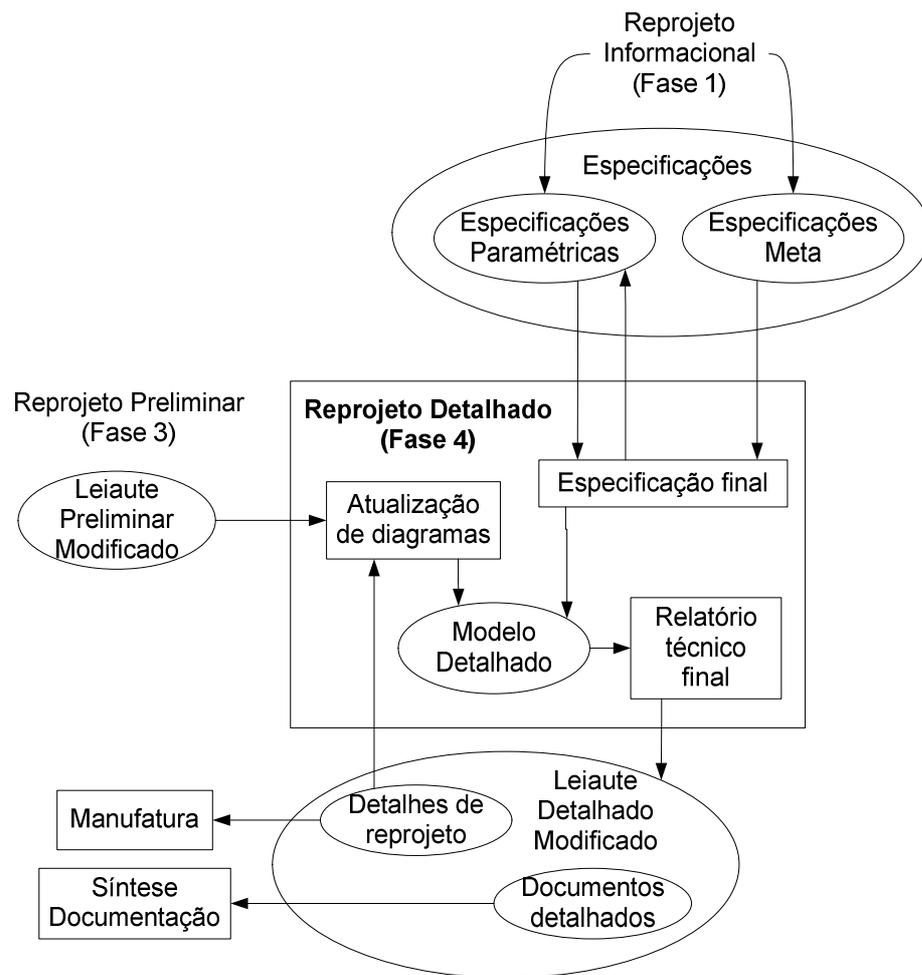


Figura 4-16 – Fase detalhada de reprojeto

Do plano de reprojeto constam os trabalhos de infra-estrutura, alocação de pessoal interno ou externo, seqüência de trabalhos, estimativa de tempo dos trabalhos, responsáveis pelas tarefas e coordenação, alocação de instrumentos, serviços externos, etc.

A conclusão do reprojeto detalhado marca o início da execução. Com o final da seqüência de fases cabe a equipe de reprojeto efetuar os planejamentos, e comunicar aos interessados os detalhes para o desenvolvimento das atividades.

### 4.3. CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE A METODOLOGIA PROPOSTA

Conforme previsto, este capítulo apresentou a proposta de metodologia de reprojeto para equipamentos mecatrônicos. É de fundamental importância colocar o contexto de aplicação desta metodologia onde, por se tratar de um equipamento em uso ou reutilizável, a estrutura do produto é um dado concreto. Portanto:

- A maior fonte de inspiração nos requisitos, para um reprojeto com base na confiabilidade, são os elementos que apresentam falhas, o que facilita o processo de geração de requisitos e soluções;
- Tipicamente o cliente tem a expectativa ou tolera um tempo mais curto para por em marcha um equipamento reformado que uma encomenda nova, a consequência é a necessidade de uma abordagem mais objetiva que as tradicionais metodologias de projeto;
- Como indicado na Figura 4-1, a realização de todas as fases é função da existência de especificações nos três níveis de reprojeto, portanto não é obrigatório que haja especificações em todas as agências identificadas, e as que existirem devam cobrir todos os níveis;
- Considerando que reprojeto é uma ação sobre um problema resolvido, o número de requisitos é menor que de um projeto normal, como consequência a viabilidade das ações pode ser comprometida e o reprojeto deve ser descartado para um número exagerado de alterações.

De acordo com os objetivos apresentados no capítulo 1, considera-se que a metodologia apresentada atende as metas estipuladas e constitui uma referência na elaboração do reprojeto de equipamentos mecatrônicos. No próximo capítulo será apresentado um exemplo prático onde serão demonstrados em sua maioria os conceitos abordados, e esclarecidos alguns aspectos necessários à utilização da metodologia.

## **5. ESTUDO DE CASO: REPROJETO DO SISTEMA DE CONTROLE DE TEMPERATURA DA UPCH/LASHIP**

### **5.1. INTRODUÇÃO**

O objetivo do sistema de controle de temperatura dentro de uma Unidade de Potência e Condicionamento Hidráulico (UPCH) é evitar que a temperatura do fluido ultrapasse os limites operacionais dos componentes, especialmente vedações; a temperatura altera a viscosidade do fluido e, conseqüentemente os vazamentos e atritos. Assim, a temperatura acaba por alterar o comportamento dos componentes do circuito hidráulico e, conseqüentemente, as vazões e pressões nas várias regiões do circuito hidráulico. Particularmente para a UPCH do LASHIP, o domínio sobre grandezas como vazão e pressão são fundamentais na garantia da qualidade dos trabalhos de pesquisa e ensino desenvolvidos.

Como na maioria dos casos para o qual o presente trabalho pretende se aplicar, o sistema de controle de temperatura da UPCH do LASHIP não apresenta documentação detalhada do processo de concepção dos princípios de solução. Não dispõe também de um controle com histórico de falhas que permita estabelecer uma relação clara entre causa e efeito vinculada ao projeto original do sistema. Por outro lado, se for considerado o quadro atual de constante evolução tecnológica e novas demandas de qualidade e exatidão metrológica, pode-se estabelecer uma condição de obsolescência onde, em algumas situações, a própria utilidade das instalações fica comprometida por falhas e paradas inevitáveis.

Existe ainda um conjunto de elementos com forte relação temporal, dentre eles os custos associados a insumos e instrumentos industriais, a atualização e criação de novas normas, bem como a demanda por novas funcionalidades decorrentes dos objetos de estudo e pesquisa desenvolvidos no LASHIP. A referida relação temporal tem um exemplo que coincide com atual situação da maioria dos componentes originais da instalação da UPCH do LASHIP, pois a mesma já tem mais de dez anos. Ou seja, se forem considerados todos estes fatores e o tempo decorrido entre sua concepção e montagem até os dias de hoje, independentemente da falta de um histórico de falhas formal, tem-se motivos mais que suficientes para se considerar o reprojetado do sistema de controle de temperatura da UPCH.

Além dos aspectos acima, uma série de outros fatores levam a abreviar a Fase 0 de decisão pelo reprojetado, dentre os quais pode-se considerar os seguintes:

- O LASHIP não apresenta o perfil de empresa ou indústria;
- O regime de utilização do equipamento mecatrônico UPCH é irregular e de propósitos diversos, o que impossibilita traçar um perfil de disponibilidade ou produtividade;

- Considerar o critério custo é igualmente inviável uma vez que o LASHIP é uma unidade sem fins lucrativos, e investimentos em manutenção ou melhorias estão vinculados a provisão de recursos de fonte não permanente.

Porém os fatores listados em nada invalidam o estudo de caso uma vez que as fases de reprojeto da metodologia proposta independem das limitações citadas.

Como colocado no capítulo 4 o processo de reprojeto proposto no presente trabalho se divide nas seguintes etapas:

- Reprojeto informacional:
  - Modelagem funcional / estrutural;
  - Modelagem comportamental;
  - Modelagem confiabilística;
  - Geração de requisitos de reprojeto por matriz inicial;
  - Classificação dos requisitos na matriz definitiva;
  - Elaboração da matriz de especificações meta;
- Reprojeto Conceitual:
  - Análise de SSC e seleção de concepções;
  - Geração de princípios de solução por matriz morfológica;
- Reprojeto preliminar e detalhado;
  - Adaptação do conceito;
  - Atualização dos modelos e desenhos;
  - Relatório alterações e expectativas.

As próximas seções exploram as etapas propostas e buscam elucidar a aplicabilidade do método a uma situação prática.

## 5.2. REPROJETO INFORMACIONAL

As informações referentes ao histórico de uso deste sistema de controle de temperatura estão comprometidas pelo regime de utilização das instalações. O uso é esporádico e está vinculada às seguintes condições de uso:

- Desenvolvimento de pesquisa em nível de mestrado;
- Desenvolvimento de pesquisas em nível de doutorado;
- Serviços de consultoria;
- Parcerias em teste e desenvolvimento de produtos.

Cada condição tem associada uma série de pessoas cuja permanência nas instalações está limitada ao tempo programado para os projetos; como consequência, a operação, ajuste e relatos de falhas ou uso problemático têm sido transferidos oralmente de pesquisador para pesquisador. Portanto, tomou-se como primeira medida a compilação destas informações a partir dos usuários. As informações resultantes da interação com os usuários têm origem na vivência do autor ao longo de mais de quatro anos com o ambiente do LASHIP, e são, apesar da realidade dos fatos, de conteúdo informal. Não foi sugerida a elaboração de questionário estruturado em virtude do perfil de usuários esporádicos, e por se entender que tal tarefa

demandaria um estudo específico que pouco ampliaria as informações já levantadas. A referida compilação tem lugar, neste estudo de caso, dentro relatório de reprojetado informacional e faz parte nos processos de decisão descritos nas próximas etapas.

O passo seguinte foi a engenharia reversa da UPCH aplicando as modelagens funcional, estrutural, comportamental e confiabilística.

### 5.2.1. Modelagem funcional / estrutural

Para obtenção do modelo funcional estrutural do sistema de controle de temperatura é necessário primeiramente conhecer o sistema UPCH globalmente. Para isso, partindo do diagrama geral da Figura 5-1 fez-se repetidos refinamentos até o nível de interesse onde as decisões foram tomadas.

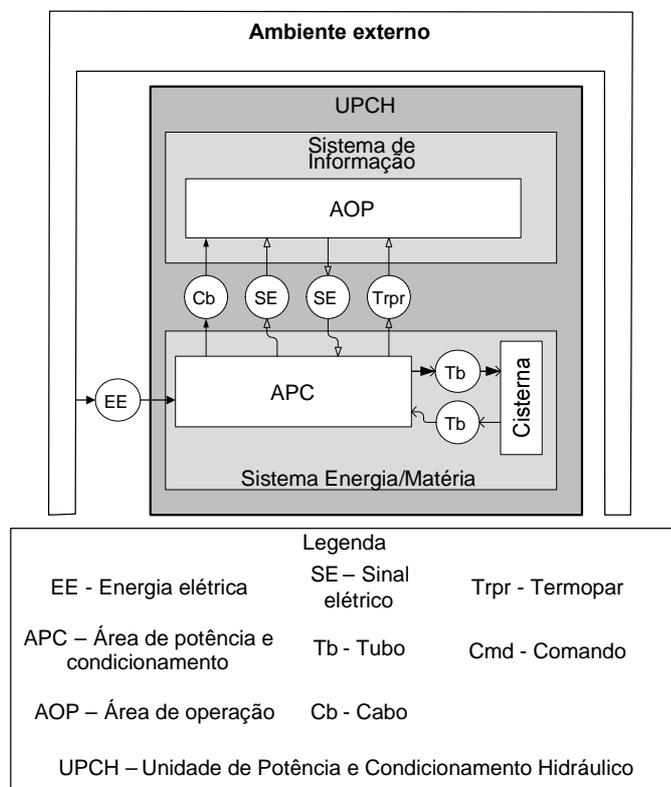


Figura 5-1 - Diagrama Canal/Agência geral da UPCH

A Figura 5-1, obtida por inspeção das instalações, representa uma visão geral da UPCH do LASHIP. O diagrama consiste na divisão em três agências, a Área de Potência e Condicionamento (APC), Área de Operação (AOP) e Cisterna. A ligação entre as agências APC e AOP é resumida a quatro canais principais. Outra divisão mostrada é a separação entre sistema de energia/matéria e sistema de informação. Neste primeiro diagrama estão evidenciados os elementos mais importantes para o sistema de controle de temperatura.

O canal Sinal Elétrico (SE) na área do sistema de informação da AOP para a APC compreende toda a fiação de comando responsável pelo acionamento das bombas, válvula direcional e resistências de aquecimento, o mesmo tipo de canal no sentido inverso corresponde

aos sensores fim de curso das manoplas, o estado das contadoras e contatos auxiliares. Empregando o canal Termopar (Trpr), o sistema de informação realiza o controle de temperatura e o canal Cabo (Cb), correspondente à via de alimentação da agência Rack e Computador. A interação com o ambiente externo é evidenciada pelo canal de energia elétrica (EE).

O modelo refinado da Figura 5-2 proporciona uma melhor visualização global do sistema de controle de temperatura.

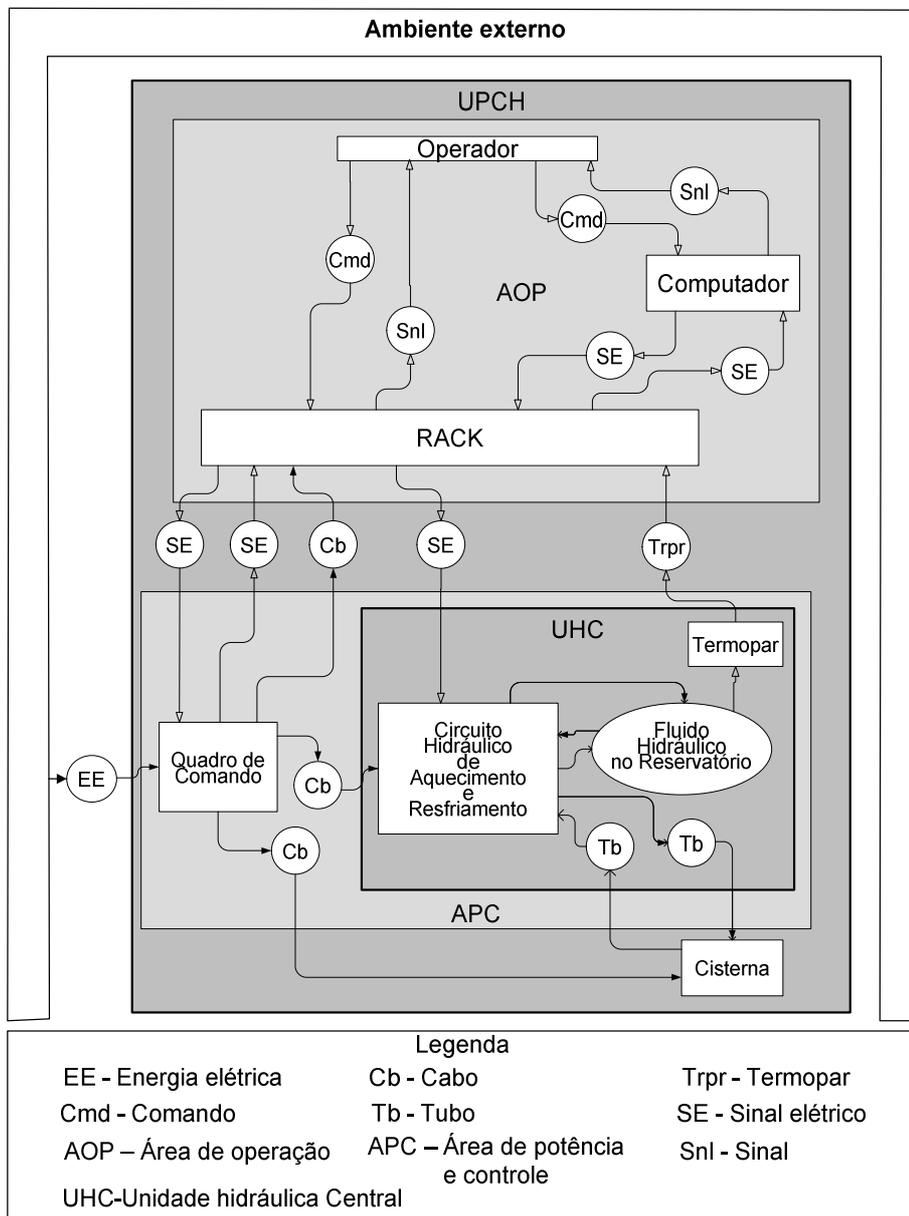


Figura 5-2 - Refinamento do diagrama C/A da UPCH

Neste diagrama são apresentadas todas as agências relacionadas ao controle de temperatura bem como os canais de ligação. Foram detalhadas as agências AOP e APC do diagrama inicial. Pela coincidência e para não tornar o diagrama demasiadamente carregado, optou-se por suprimir a representação do sistema de informação e energia/matéria. O novo diagrama refinado privilegia a representação física entre as agências, deixando o detalhamento dos canais para outra representação.

A complementação do modelo é feita com a lista das agências e uma breve explicação sobre cada uma na Tabela 5-1.

Tabela 5-1 - Lista de agências e respectivas funções - UPCH-LASHIP

<b>Agência</b>	<b>Função</b>
Quadro de Comando	Acionar os elementos do circuito hidráulico de aquecimento e resfriamento.
Circuito hidráulico de aquecimento e resfriamento	Condicionar o fluido hidráulico à faixa de temperatura desejada.
Rack	Prover Interface para o operador com o controle de temperatura, comandos de ligamento e desligamento do sistema.
Cisterna	Armazenar água para o sistema de resfriamento do fluido hidráulico.
Computador	Opção de interface com o operador para operação, parametrização e controle da temperatura do sistema.
Termopar	Transformar o sinal de temperatura em sinal elétrico.
Operador	Operar, ajustar e tomar de decisões.

O modelo detalhado da Figura 5-3 é uma adaptação do material original disponível (DE NEGRI e VIEIRA, 1997). Neste diagrama, diferentemente do formato adotado até o momento, a notação utilizada é a mesma apresentada no capítulo sobre modelagem de sistemas automáticos (Figura 2-8). A representação é uma visão ampliada do sistema de atuação e medição (SAM). Nela constam as agências responsáveis pelo condicionamento da temperatura do fluido. Para facilitar o entendimento as linhas pontilhadas delimitam as áreas equivalentes as figuras 5-1 e 5-2, e o detalhamento da agência Rack é indicado na mesma figura.

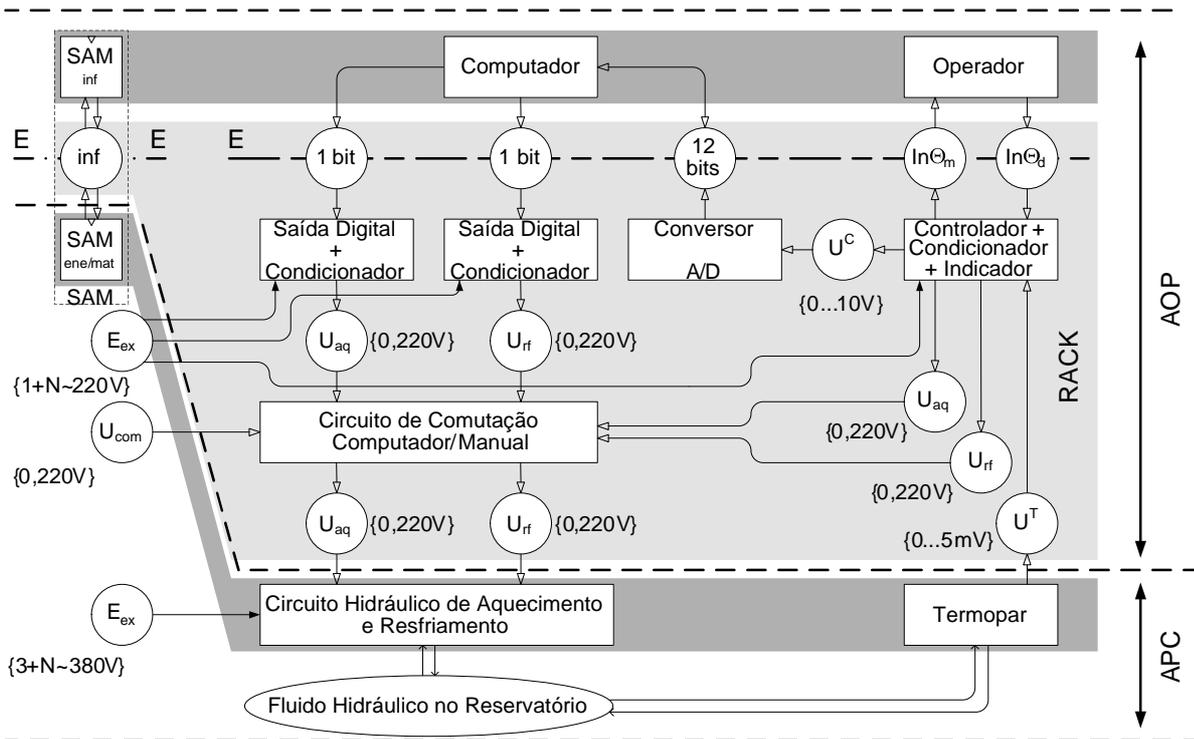


Figura 5-3 - Sistema de atuação e medição de temperatura - Modelo funcional global, adaptado de De Negri e Vieira (1997)

A notação adotada na figura anterior consta na Tabela 5-2.

Tabela 5-2 – Notação utilizada na figura 5-3

Símbolo	Descrição	Símbolo	Descrição
$E_{ex}$	Energia elétrica externa	$U_{com}$	Tensão de comutação comp/man.
$In\theta_m$	Indicação da temperatura medida	$U^c$	Tensão de saída do condicionador
$In\theta_d$	Indicação da temperatura desejada	$U_m^c$	Tensão med. referente ao condicionador
$\theta_m$	Temperatura medida	$U^{H1}$	Tensão de entrada no aquecedor 1
$\theta_d$	Temperatura desejada	$U^{P1}$	Tensão de entrada na bomba 1
$U_{aq}$	Tensão de aquecimento	$U^{P2}$	Tensão de entrada na bomba 2
$U_{aqd}$	Tensão de aquecimento desejada	$U^{S2}$	Tensão de saída do sensor 2
$U_{rf}$	Tensão de resfriamento	$U^T$	Tensão de saída do termopar / Sonda C1
$U_{rfd}$	Tensão de resfriamento desejada	$U^{V2}$	Tensão de entrada na válvula 2

Inevitavelmente, dado o caráter multitecnológico dos equipamentos mecatrônicos, as representações passam ter um caráter particular de cada especialidade. O circuito hidráulico do sistema de controle de temperatura disponível da documentação da UPCH encontra-se ilustrado na Figura 5-4, a respectiva tabela com a lista dos componentes representados e suas funções estão na Tabela 5-3.

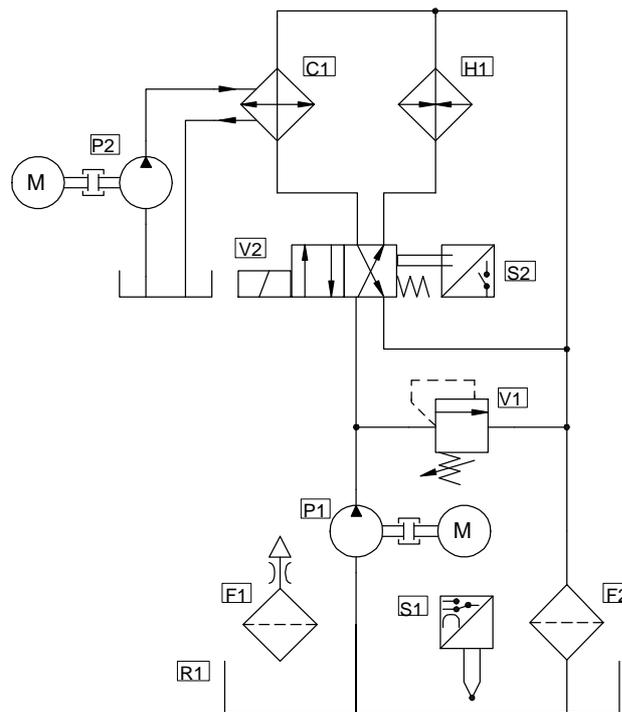


Figura 5-4 - Circuito hidráulico de aquecimento e resfriamento (DE NEGRI e VIEIRA, 1997)

Tabela 5-3 - Descrição dos componentes e suas funções de acordo com De Negri e Vieira (1997)

Código (ISO1219-2)	Descrição do componente (ISO 1219-1)	Função no circuito
C1	Resfriador	Retirar calor do fluido hidráulico para redução de sua temperatura
F1	Filtro de ar	Filtragem do ar do reservatório
F2	Filtro hidráulico	Filtragem do fluido hidráulico no retorno
H1	Aquecedor	Transferir calor ao fluido hidráulico para elevação de sua temperatura
P1	Bomba hidráulica	Promover a circulação de fluido hidráulico mediante o circuito de aquecimento e resfriamento.
P2	Bomba d'água	Promover a circulação de água no resfriador
R1	Reservatório a pressão atmosférica	Armazenamento do fluido hidráulico
S1	Transdutor analógico e contato à temperatura	Medição e controle analógico de temperatura do fluido hidráulico no reservatório
S2	Contato ao deslocamento	Detectar o acionamento da válvula direcional
V1	Válvula de alívio de pressão	Limitar a pressão de trabalho do circuito hidráulico
V2	Válvula de controle direcional 4/2	Direcionar o fluido hidráulico para o resfriador ou para o aquecedor

A parte elétrica é mostrada com os esquemas elétricos correspondentes ao circuito de comando e de potência para acionamento das bombas de óleo e de água, e a resistência de aquecimento (Figura 5-5 e Figura 5-6).

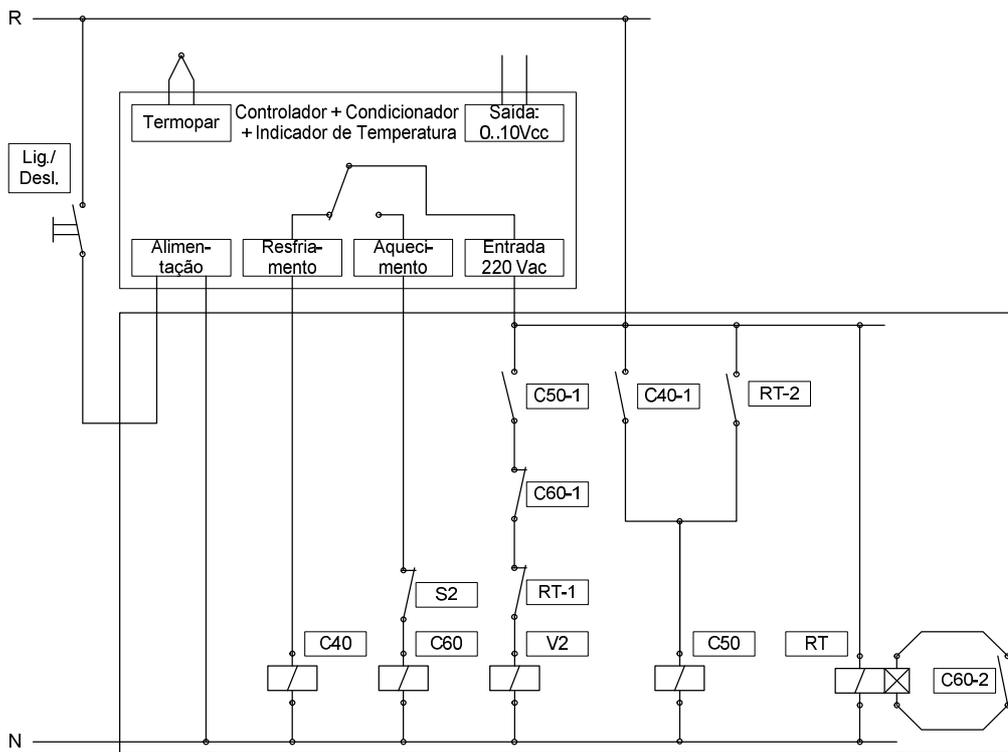


Figura 5-5 – Esquema do circuito elétrico de comando para aquecimento e resfriamento (DE NEGRI e VIEIRA, 1997)

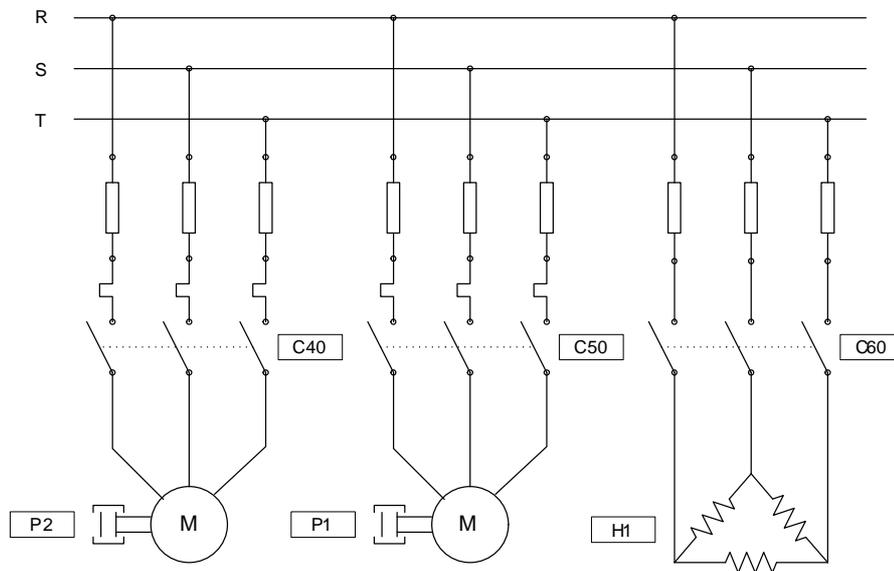


Figura 5-6 - Circuito elétrico de potência para aquecimento e resfriamento (DE NEGRI e VIEIRA, 1997)

A notação adotada nas figuras 5-6 e 5-7 está representada na Tabela 5-4.

Tabela 5-4 – Notação dos símbolos utilizados nas figuras 5-5 e 5-6

<b>Símbolo</b>	<b>Descrição</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Descrição</b>
C40	Circuito para acionamento da bomba d'água	C60-2	Contato auxiliar normalmente aberto da resistência de aquecimento do fluido hidráulico
C40-1	Contato auxiliar normalmente aberto da bomba d'água	RT	Relé temporizado
C50	Circuito de acionamento da bomba hidráulica	RT-1	Contato auxiliar normalmente fechado da resistência de aquecimento do fluido hidráulico
C50-1	Contato auxiliar normalmente aberto da bomba hidráulica	R, S, T	Fases da alimentação trifásica
C60	Circuito para acionamento da resistência de aquecimento do fluido hidráulico	N	Neutro
C60-1	Contato auxiliar normalmente fechado da resistência de aquecimento do fluido hidráulico	S2 P2, P1 V2, H1	Idem Tabela 5-3

O circuito da Figura 5-7 esclarece o mecanismo de seleção entre a operação via computador ou manual. Basicamente a saída digital 01 do computador dispara a comutação dos relés R09, R10 e R11 assim os comandos de aquecimento e resfriamento passam a ser comandados via computador e sua interface digital.

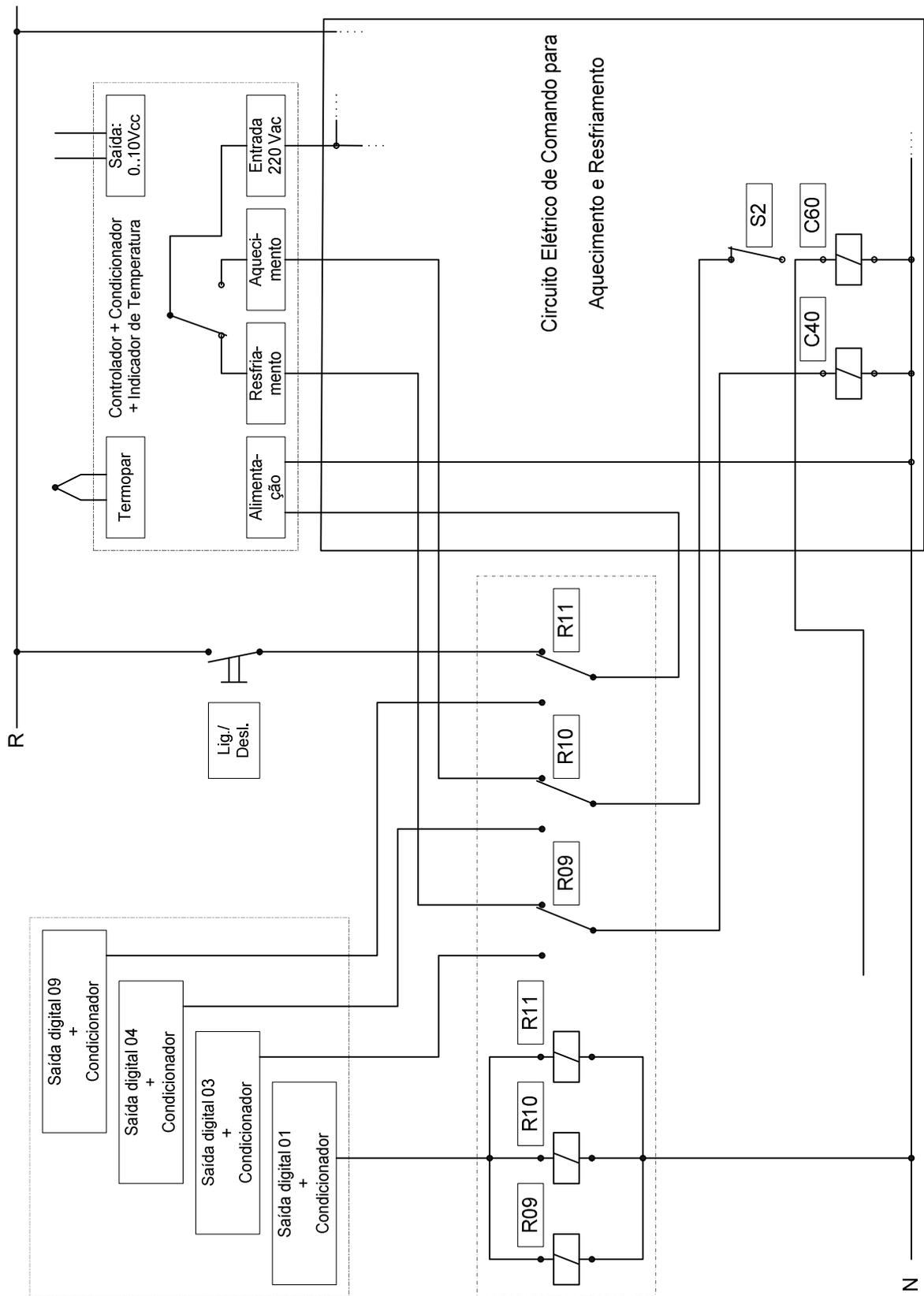


Figura 5-7 – Representação simplificada do circuito de comutação da operação entre manual e pelo computador (DE NEGRI e VIEIRA, 1997)

A complementação das modelagens mediante diagramas de especialistas é o ultimo nível de detalhamento esperado para as agências. Com o levantamento dos circuitos elétricos e hidráulicos ficam conhecidos os componentes que efetivamente cumprem as funções modeladas nos diagramas C/A.

**5.2.2. Modelagem comportamental**

A lógica de funcionamento segue a especificação de projeto apresentada em De Negri e Vieira (1997). O circuito hidráulico deve manter o fluido condicionado termicamente entre 20 e 80 °C, com uma faixa de dispersão entre +/-1 °C a +/-5 °C em relação à temperatura de referência (Figura 5-8).

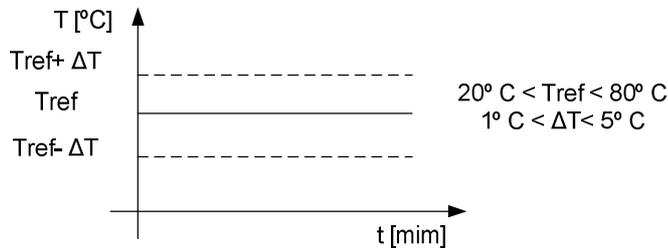


Figura 5-8 - Requisito comportamental para a temperatura do fluido (DE NEGRI e VIEIRA, 1997)

Da mesma forma que na representação funcional/estrutural, o diagrama comportamental possui seu equivalente em diferentes especialidades. Um exemplo são os diagramas trajeto-passo da Figura 5-9. Tipicamente esta representação é utilizada na implementação de automatismos em circuitos hidráulicos ou pneumáticos e constitui uma ferramenta comum a especialistas destas áreas.

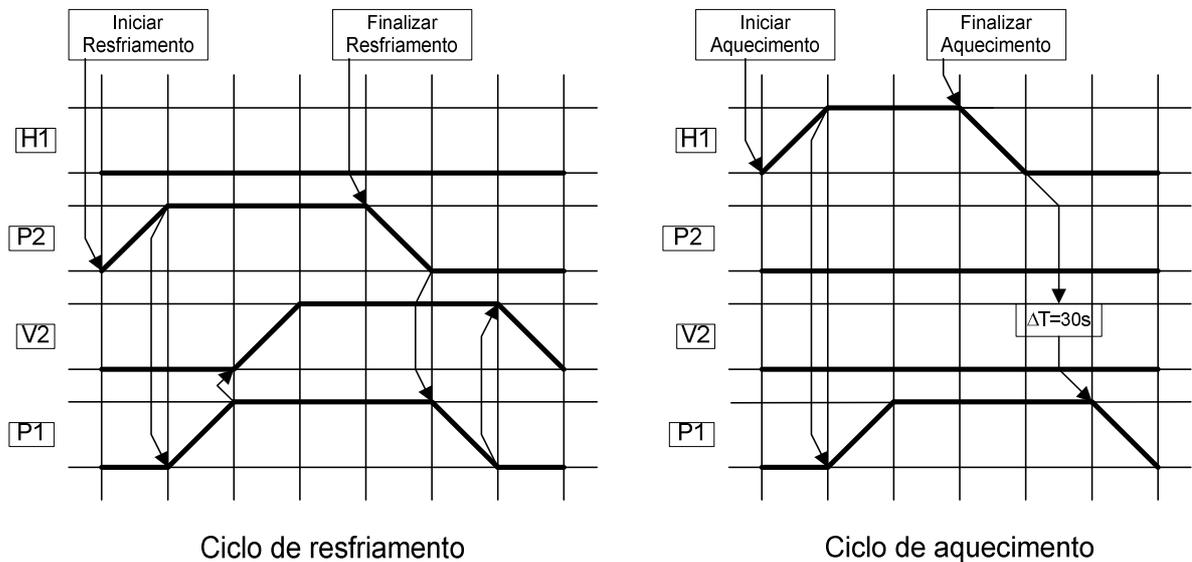


Figura 5-9 - Diagrama trajeto-passo do sistema de atuação em temperatura (DE NEGRI e VIEIRA, 1997)

O comportamento esperado para o circuito elétrico da Figura 5-5 está representado nos diagramas lógicos da Figura 5-10.

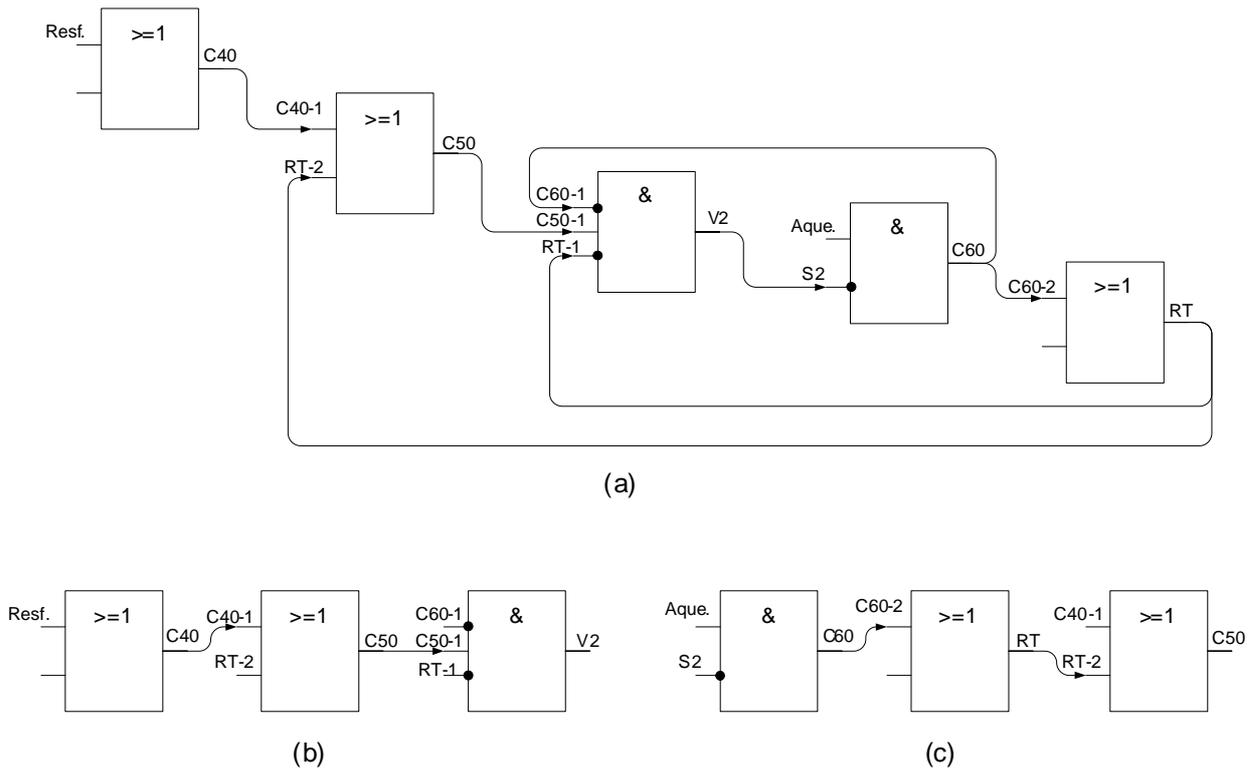


Figura 5-10 – Diagramas lógicos referentes ao comportamento projetado para o circuito elétrico da Figura 5-5; (a) diagrama geral; (b) diagrama de resfriamento; (c) diagrama de aquecimento

Os diagramas lógicos são típicos em automatismos. Os projetistas têm a opção de tratar as configurações dos circuitos combinacionais elétricos, hidráulicos ou pneumáticos com a Álgebra de Boole.

De acordo com o proposto no capítulo 2 outra opção de representação do comportamento do sistema de controle de temperatura da UPCH é o diagrama em SFC da Figura 5-11. Parte da notação utilizada corresponde a Tabela 5-3, a exceção é o tempo T1 que se trata do intervalo necessário para a correta circulação do fluido hidráulico no sistema de aquecimento. Os elementos que compõe o diagrama são originados dos circuitos hidráulico e elétrico da seção anterior, desta forma esta representação proporciona uma visão global e multidisciplinar do comportamento do equipamento.

A resposta cíclica representada no diagrama SFC da Figura 5-11 é função do circuito interno do controlador de temperatura. Os parâmetros livres neste componente permitem somente intervir nas saídas acionadas, que por sua vez depende da temperatura de referência ( $T_{ref}$ ) e a faixa de dispersão ( $\Delta T$ ). Este último parâmetro é fixo e esta relacionado a qualidade do equipamento na aquisição do sinal de temperatura. A confiabilidade das interações entre o sistema de medição e o modelo comportamental é medida com da análise de incerteza, este parâmetro expressa também o máximo erro possível associado à medida. Esta análise está disponível no Apêndice A.

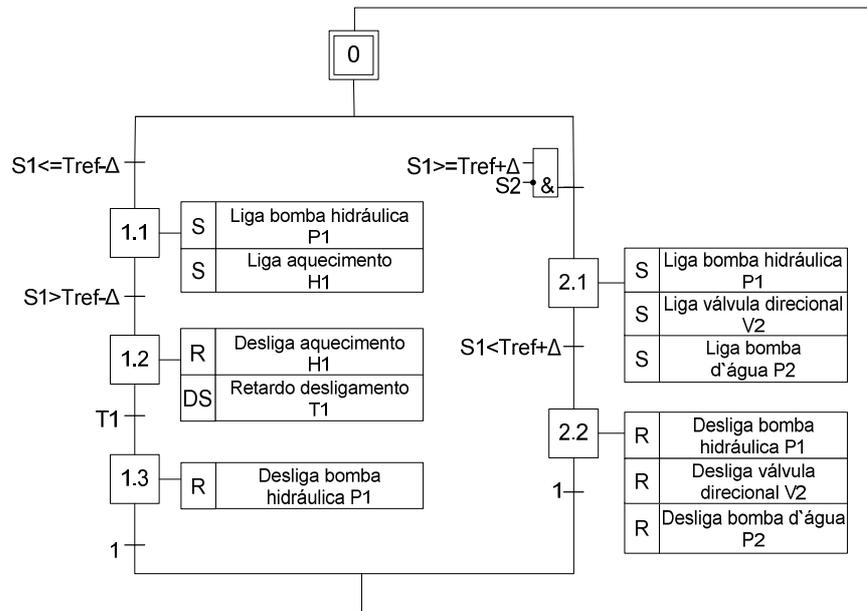


Figura 5-11 - Diagrama SFC modelo comportamental sistema de controle de temperatura da UPCH

Essencialmente o diagrama comportamental da Figura 5-11 representa a seqüência de passos para as ações de aquecimento e resfriamento do fluido hidráulico. O sistema permanece monitorando a temperatura de referência entre valores acima e abaixo de uma variação ( $\Delta$ ) especificada pelo operador. Mantido o comando de partida, o circuito testa a condição de resfriamento ou aquecimento. Na situação de aquecimento ( $S1 < Tref - \Delta$ ) a seqüência de passos promove a ligação do sistema de aquecimento e a bomba de óleo; quando o circuito hidráulico atinge a temperatura desejada ( $S1 > Tref - \Delta$ ) é desligada a resistência de aquecimento e acionado um tempo de retardo T1 para desligamento da bomba de óleo. Esta ação se faz necessária para evitar o desgaste do óleo pelo aquecimento do resistor. Para o outro caso é testado, além da condição de temperatura ( $S1 > Tref + \Delta$ ), o estado da válvula direcional V2; nesse momento são acionadas a bomba de óleo, a bomba de água e a válvula direcional. Quando a temperatura desejada é alcançada são desligados todos os elementos e o ciclo volta à condição de monitoramento do sinal de partida.

### 5.2.3. Modelagem confiabilística

De acordo com os modelos comportamentais são duas as seqüências de operação possíveis: aquecimento ou resfriamento. Para o controle da temperatura são também duas as opções: com o módulo de controle ou com o computador (Figura 5-3 e), porém a fonte de sinal correspondente a temperatura é condicionada unicamente pelo módulo controlador. A partir do modelo em rede C/A da Figura 5-3 e dos circuitos hidráulicos e elétricos (Figura 5-4, Figura 5-5, Figura 5-6, Figura 5-7) e considerando as seqüências do modelo comportamental, foram identificados os componentes responsáveis pelos modos de operação manual, automático e as funções aquecimento e resfriamento. A partir destas informações foram gerados os modelos confiabilísticos da Figura 5-12 e Figura 5-13.

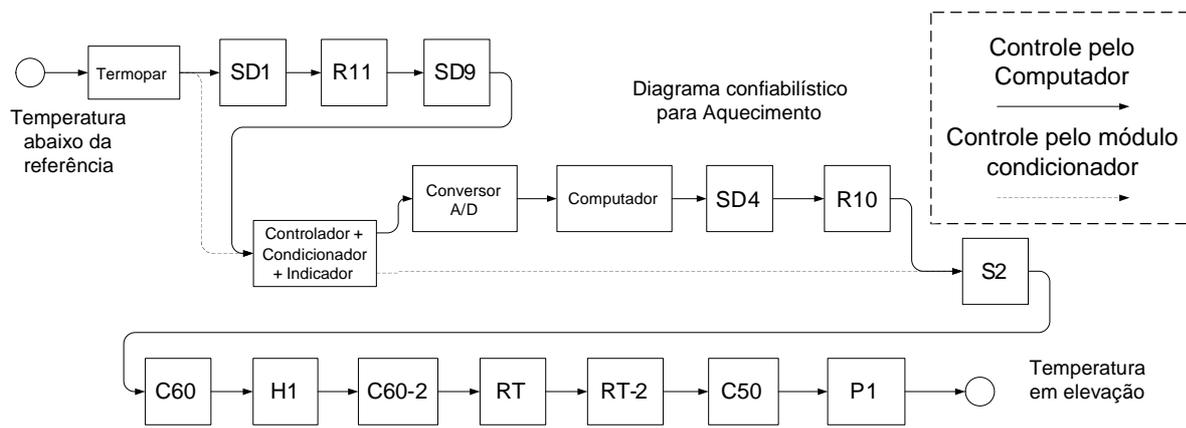


Figura 5-12 – Modelo confiabilístico para o ciclo de aquecimento do sistema de controle de temperatura da UPCH

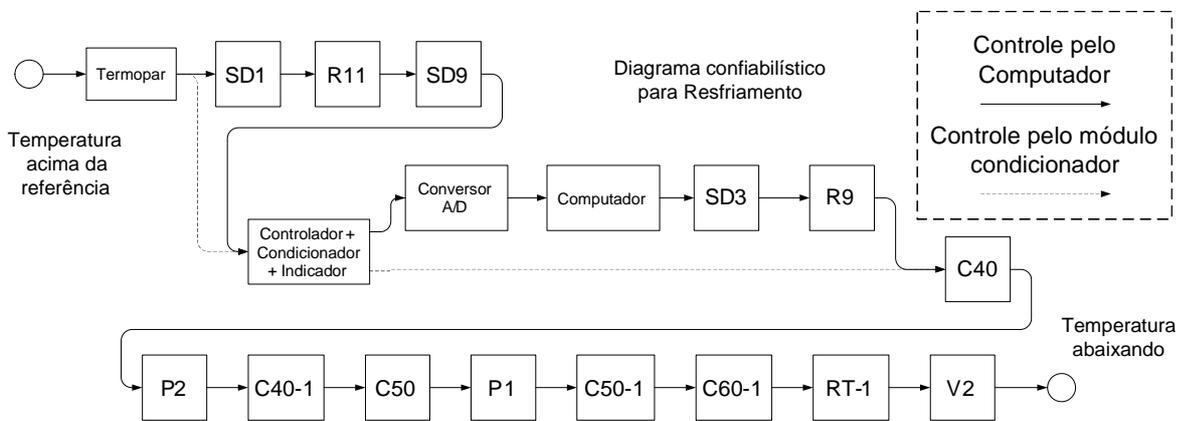


Figura 5-13 - Modelo confiabilístico para o ciclo de resfriamento do sistema de controle de temperatura da UPCH

Ambas as figuras 5-12 e 5-13 apresentam um caminho alternativo para o acionamento do respectivo circuito de comando. Isto se deve ao fato do equipamento possuir duas opções de operação. Como representado nas figuras 5-1 e 5-2 a UPCH possui dois canais de comando e visualização de sinais com o operador: um pela utilização de um computador e outro diretamente com o Rack. A Figura 5-3 detalha este relacionamento quando mostra as agências Computador e Operador nos extremos da rede C/A, ou seja, o operador tem a opção por operar mediante a interface programada no computador ou com a interface do controlador disponível no Rack.

Os modelos confiabilísticos levantados para as configurações de aquecimento e resfriamento, apresentam uma configuração série simples com um ramo paralelo a partir do módulo de controle representado a opção do controle pelo computador. O caminho alternativo pelo computador somente representaria uma opção completa de operação se houvesse a garantia de uma condição de falha parcial do módulo de controle onde o condicionamento do sinal não fosse comprometido. Para o cálculo das confiabilidades dos sistemas de aquecimento e resfriamento, é necessário aplicar os cálculos da seção 2.5.2 sobre as informações de falha dos componentes ilustrados no modelo.

Apesar da inexistência de dados não permitir calcular com precisão a confiabilidade da operação de aquecimento ou resfriamento, os modelos revelam que existe uma intersecção nos modos de operação como representada na Figura 5-14.

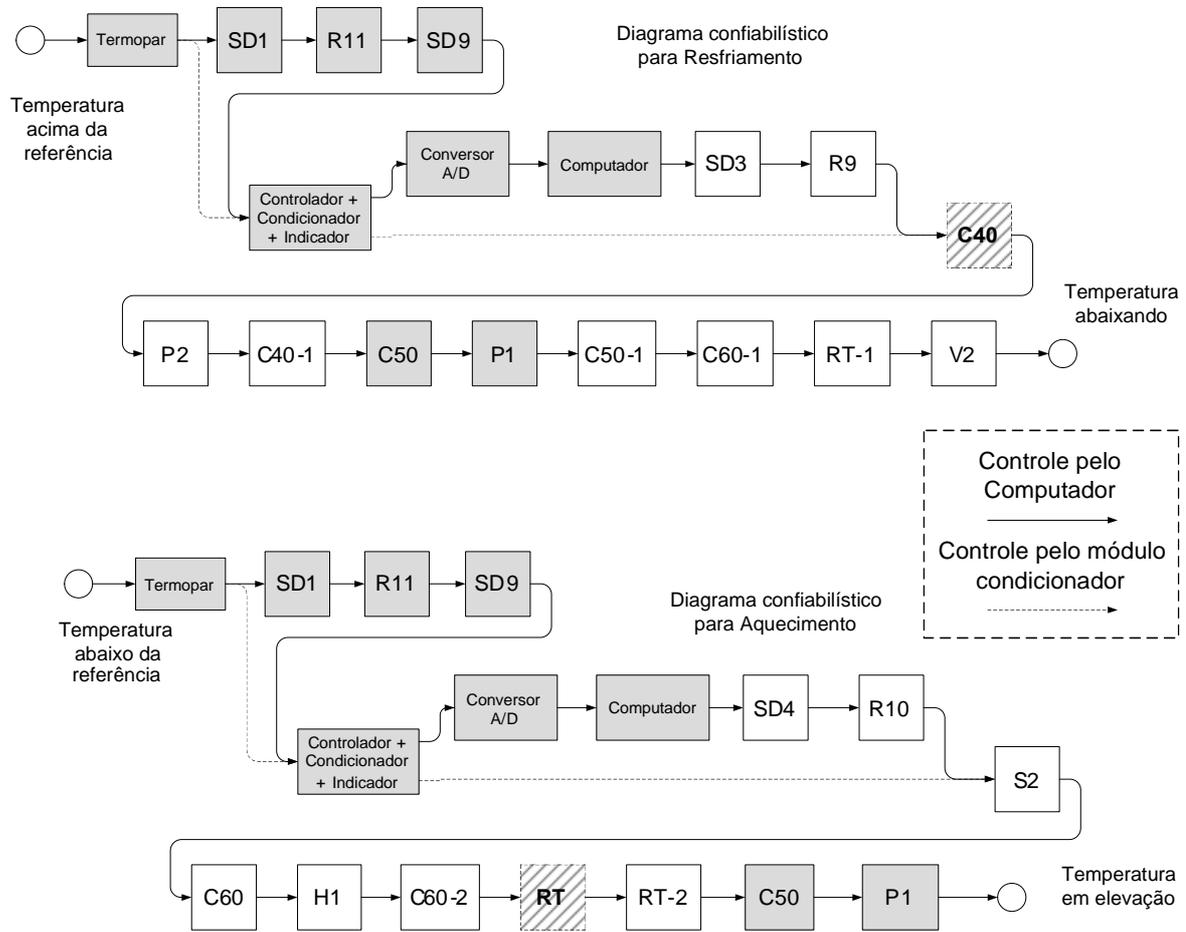


Figura 5-14 – Destaque dos componentes sob suspeita nos dois modelos

Isto significa que em termos globais estes componentes são mais solicitados que os demais. Esta constatação vem de encontro com a experiência do autor na manutenção do sistema; em todas as oportunidades que houve a intervenção para restabelecimento da operação, os problemas se situavam em uma das áreas em destaque. Os outros dois elementos em destaque, RT (Relé temporizado) e C40 (Acionamento da bomba d'água) apresentam relatos de falhas intermitentes sem causa aparente, indicando uma condição de desgaste ou velhice destes componentes.

Este breve estudo confiabilístico revela que na verdade não existe uma opção de operação paralela entre o computador e o rack, isso se deve a dependência do sinal de temperatura tratado pelo módulo condicionador. Em termos práticos, como a confiabilidade resultante de uma configuração série não ultrapassa a menor confiabilidade do sistema e, levando-se em conta o aumento de elementos na operação por computador, a operação mais confiável é a que utiliza o comando manual. Esta constatação vem de encontro com a realidade do equipamento em sua configuração atual.

#### 5.2.4. Relatório do reprojeto informacional

Constam da documentação existente o esquema elétrico de ligação, trabalhos de pesquisa relacionada à modelagem do sistema, catálogo e manual do módulo de controle de temperatura, desenhos de leiaute do reservatório de água, circuito hidráulico, circuito elétrico e catálogos de alguns componentes elétricos.

Tomando por base as orientações discutidas na seção 4.2.2, foi simulado um processo de questionamento onde se buscou a transferência da experiência dos usuários com o equipamento. A simulação se deve ao fato do número reduzido de usuários experientes e a simplicidade do sistema estudado, assim, ao invés de se aplicar um questionário optou-se por uma abordagem informal. Os relatos e levantamentos alcançados pela abordagem informal mediante o diálogo com pesquisadores que utilizam ou utilizaram as instalações da UPCH, e a experiência do autor apontam basicamente:

- Desconfiança na leitura do módulo de controle de temperatura;
- Falha intermitente do sistema de acionamento das bombas de água e óleo do sistema de resfriamento e aquecimento;
- Falhas esporádicas no sistema de controle de temperatura onde o mesmo simplesmente deixa de funcionar sem causas aparentes, sinalizando entrada na fase de descarte;
- Controle por computador é impraticável, pois os comandos e as interfaces apresentam comportamento instável com acionamentos não ordenados.

Como parte dos esforços de engenharia reversa por modelagem de sistemas automáticos (seção 4.2.2.1.1.), verificou-se por inspeção e desmontagem o desgaste e antiguidade do módulo de controle de temperatura. Apesar da aparente fragilidade no sistema de controle, na maioria das vezes a operação no modo manual se processa de forma segura e robusta com ciclos bem definidos e estáveis.

A compilação das informações coletadas resultou na tabela inicial Tabela 5-5. As agências listadas estão baseadas no diagrama em rede C/A da Figura 5-2, e compreendem os componentes onde se observaram oportunidades de reprojeto.

Tabela 5-5 – Tabela inicial de requisitos de reprojeto

<b>Agências</b>	<b>Causas técnicas</b>	<b>Causas de mercado</b>	<b>Causas de segurança</b>	<b>Causas legais</b>
Rack	Modernizar interface para sensoriamento	- Controle e visualização dos passos da seqüência de comando da máquina - Modernizar controle	Obter leitura estável de temperatura	Proteção contra choques elétricos e aterramento
Termopar			Melhorar a qualidade do sinal de temperatura	
Quadro de comando	- Modernizar acionamento - Aumentar capacidade de corrente de partida		Aumentar confiabilidade dos componentes	

Como indicado na Tabela 5-5 a maioria dos requisitos sugerem modernizar os componentes relacionados com as funções identificadas. A distribuição dos requisitos tem origem na interpretação das causas listadas na Tabela 3-1, Tabela 3-2, Tabela 3-3 e Tabela 3-4, do capítulo 3. Entende-se que a causa da necessidade de modernização dos acionamentos e do sensoriamento é o avanço tecnológico na área (causas técnicas). As atuais condições de visualização e controle ainda atendem suas funções, no entanto apresenta sinais de deterioração e obsolescência, pois existem opções mais modernas com mais recursos e preços aceitáveis, são basicamente necessidades dos clientes (causas de mercado). O desconforto no modo de operação e a desconfiança na leitura demonstram deficiência ergonômica no atual sistema (causa de segurança).

Para classificação determinou-se o nível de reprojeto necessário a cada requisito levantado (Tabela 5-6). Foram levados em consideração que os requisitos que necessitam alteração de tecnologia e novas soluções são requisitos originais. Os requisitos que podem ser satisfeitos pela adaptação de novos componentes são conhecidos como requisitos adaptativos. O requisito paramétrico identificado é devido a possibilidade do aumento da demanda de potência pelas demais alterações previstas.

Tabela 5-6 – Classificação dos requisitos do sistema de controle de temperatura da UPCH (especificações de reprojeto)

<b>Agências</b>	<b>Requisitos originais</b>	<b>Requisitos adaptativos</b>	<b>Requisitos paramétricos</b>
Rack	- Obter leitura estável de temperatura - Controle e visualização dos passos da seqüência de comando da máquina - Modernizar controle	- Modernizar interface para sensoriamento - Proteção contra choques elétricos e aterramento	
Termopar		Melhorar a qualidade do sinal de temperatura	
Quadro de comando		- Modernizar acionamento - Aumentar a confiabilidade dos componentes	Aumentar capacidade de corrente de partida

Definido o nível de reprojeto a ser aplicado aos requisitos levantados ou às especificações de reprojeto, passou-se ao estabelecimento das especificações meta para cada requisito (Tabela 5-7). O processo para o desenvolvimento dos valores meta, parte da correlação entre fator gerador do requisito de reprojeto, e o estabelecimento de um patamar necessário para atendimento do mesmo.

Tabela 5-7 – Especificações meta dos requisitos de reprojeto

<b>Requisito de Reprojeto</b>	<b>Valor meta</b>	<b>Observações</b>
Obter leitura estável de temperatura	Frequência de aquisição > 3/s	Atual é igual a 3/s (Hz)
Controle e visualização dos passos da seqüência de comando da máquina	No mínimo 6 mensagens ou sinais	Número de passos do modelo comportamental da Figura 5-11
Modernizar acionamento	Dentro do orçamento	
Modernizar interface para sensoriamento	Dentro do orçamento	
Melhorar a qualidade do sinal de temperatura	Dentro do orçamento	
Aumentar confiabilidade dos componentes		Acredita-se que substituição por um novo aparelho seja suficiente
Modernizar controle	Permita programação e comunicação padrão serial	
Proteção contra choques elétricos e aterramento	De acordo com a norma	Norma NBR 14039-2003
Aumentar capacidade de corrente de partida	300 A	Atual 150 A

### 5.3. FASE CONCEITUAL DE REPROJETO

A principal atividade desenvolvida nesta fase foi a geração das concepções para os requisitos identificados como originais. Com o preenchimento da Tabela 5-8 obteve-se a matriz morfológica relativa ao sistema de controle de temperatura da UPCH. Coincidentemente na fase anterior a etapa de classificação de requisitos concentrou todas as especificações originais na agência Rack, como consequência, para facilitar a visualização do problema, foi gerado um novo diagrama detalhando os elementos da agência AOP para o reprojeto conceitual (Figura 5-15).

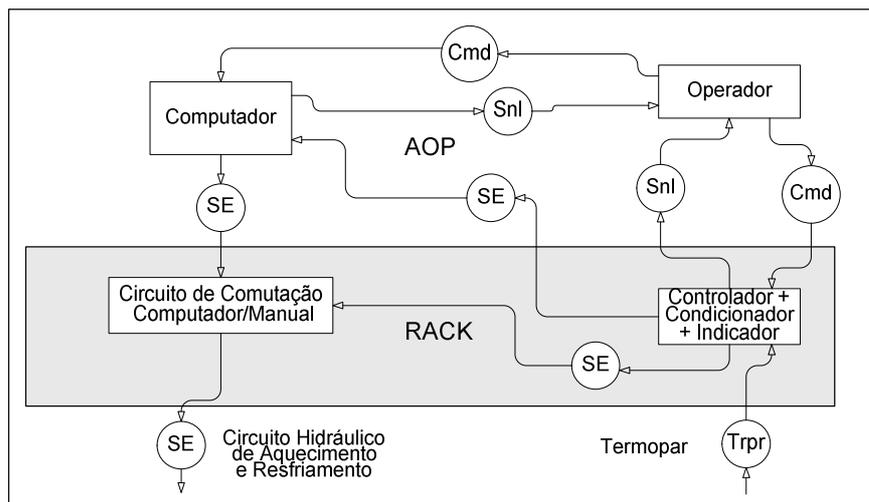


Figura 5-15 – Detalhe da agência AOP com base na Figura 5-3

Observando que os princípios de solução atuais da Tabela 5-8 devem ser os mesmos que deram origem às especificações na fase anterior, foram identificados os princípios de solução tomando como base o novo diagrama da Figura 5-15. Tendo em mente as especificações o processo resultou em quatro opções de combinações.

Tabela 5-8 - Matriz morfológica do reprojeto do sistema de controle de temperatura da UPCH

Agências	Atuais Princípios de solução	Opção 1	Opção 2	Opção 3	Opção 4
Computador	Computador	IHM	Módulo display programável	Interface com computador	Quadro de LED's
Controlador + Condicionador + Indicador	Módulo de controle com display	CLP	Microcontrolador	Módulo de controle programável	Terminal de relés programáveis

O cruzamento entre as opções gerou a seguinte série de concepções:

- Concepção 1: IHM, CLP;
- Concepção 2: Interface com computador, CLP;
- Concepção 3: Módulo display programável, Microcontrolador;
- Concepção 4: Interface com computador, Módulo de controle programável;

- Concepção 5: Quadro de LED's, Terminal de relés programáveis;

Como sugere a metodologia (seção 4.2.3.2.), caberia na seqüência a análise de sistemas e subsistemas e componentes (SSC). Este procedimento demanda um estudo do impacto das concepções sobre a atual configuração do equipamento como alteração de layout, redimensionamento de suprimento etc., verificação dos potenciais fornecedores dos componentes e seus parâmetros. Para simplificação do estudo de caso omitiu-se a análise SSC.

Em seguida as diversas concepções são confrontadas na matriz de decisão; onde a Tabela 5-9 corresponde a primeira iteração.

Tabela 5-9 – Matriz de decisão primeira iteração

<b>Critérios</b>	<b>Concepção 1 (referência)</b>	<b>Concepção 2</b>	<b>Concepção 3</b>	<b>Concepção 4</b>	<b>Concepção 5</b>
- No mínimo 6 mensagens ou sinais - Frequência de aquisição > 3/s	<b>IHM (0)</b>	Interface com computador (+)	Módulo display programável (-)	Interface com computador (+)	Quadro de LED's (-)
Permita programação e comunicação padrão serial	<b>CLP (0)</b>	CLP (0)	Microcontrolador (-)	Módulo de controle programável (-)	Terminal de relés programáveis (-)
Total +	<b>0</b>	1	0	1	0
Total -	<b>0</b>	0	2	1	2
Total Global	<b>0</b>	+1	-2	0	-2

A segunda iteração é feita com a concepção de maior pontuação na primeira iteração como referência, o resultado final está representado na Tabela 5-10.

Tabela 5-10 - Matriz de decisão segunda iteração

<b>Critérios</b>	<b>Concepção 1</b>	<b>Concepção 2 (referência)</b>	<b>Concepção 3</b>	<b>Concepção 4</b>	<b>Concepção 5</b>
- No mínimo 6 mensagens ou sinais - Frequência de aquisição > 3/s	IHM (-)	<b>Interface com computador (0)</b>	Módulo display programável (-)	Interface com computador (0)	Quadro de LED's (-)
Permita programação e comunicação padrão serial	CLP (0)	<b>CLP (0)</b>	Microcontrolador (-)	Módulo de controle programável (-)	Terminal de relés programáveis (-)
Total +	0	<b>0</b>	0	0	0
Total -	1	<b>0</b>	2	1	2
Total Global	-1	<b>0</b>	-2	-1	-2

A interpretação feita nas iterações busca uma maior confiabilidade do sistema. Os fabricantes estimam a vida típica do módulo display e IHM em 40000 horas, o quadro de LED's é o mais durável, porém com menores recursos; o computador é uma ferramenta barata e a interface é de domínio público e manutenção simples. No caso dos módulos programáveis o terminal de relés é a solução mais robusta, porém é pouco flexível na programação; o microcontrolador exige muitas horas de desenvolvimento e a confiabilidade estaria vinculada à qualidade destes serviços, além disso, a manutenção é mais complicada; já o módulo de controle seria a melhor solução não fosse o fato de ter pouca flexibilidade na expansão e possuir poucos recursos de programação; o diferencial do CLP está no fato de ser projetado para aplicações industriais o que lhe confere alto índice de confiabilidade, e os recursos de programação são também amplos.

Após todas as tabelas e iterações chega-se a concepção final que será utilizada nas fases seguintes. Com relação aos critérios estipulados a combinação CLP ligado com computador corresponde à melhor concepção.

#### **5.4. REPROJETO PRELIMINAR E DETALHADO**

Neste ponto as fases anteriores já proporcionaram um novo conceito para o controle da temperatura, e os requisitos adaptativos da Tabela 5-6 sugerem a atualização dos componentes de acionamento e o sensor de temperatura. Devido à existência de um único requisito paramétrico as duas fases seguintes foram unificadas, e os resultados apresentados nas próximas seções.

##### **5.4.1. Adaptações e atualização dos modelos**

Supondo-se que provisão orçamentária seja suficiente, como estabelecido na especificação meta (Tabela 5-7), a adaptação dos novos componentes de acionamento não gera nenhuma alteração de leiaute exceto a alteração dos respectivos códigos no projeto elétrico. Já a modernização do sistema de sensoriamento com a substituição do termopar pela sonda CI, demanda a concepção de um receptáculo para que este seja imerso no reservatório de óleo. A escolha do modelo tem por base a amplitude da faixa linear de operação e estabilidade do sinal, além disso, a necessita de um condicionador de sinais.

Na introdução do CLP será necessária uma mudança do leiaute do módulo Rack. O cabeamento utilizado na comunicação com a agência APC será mantido. É possível visualizar no diagrama em Rede C/A da Figura 5-16, comparando com o da Figura 5-3, que foi excluído o módulo controlador, e todos os outros cabos de comunicação com a agência Computador foram substituídos por um único canal correspondente ao cabo de rede serial entre o Computador e CLP. Os comandos de aquecimento e resfriamento são feitos diretamente do CLP e dos módulos de saída digitais, o sinal de temperatura é fornecido pela sonda CI diretamente ao módulo analógico. Enfim, toda a operação passa a ser centralizada pelo CLP. Do ponto de vista

de modelagem comportamental não há nenhuma alteração e a implementação do programa do CLP deverá considerar o modelo da Figura 5-11.

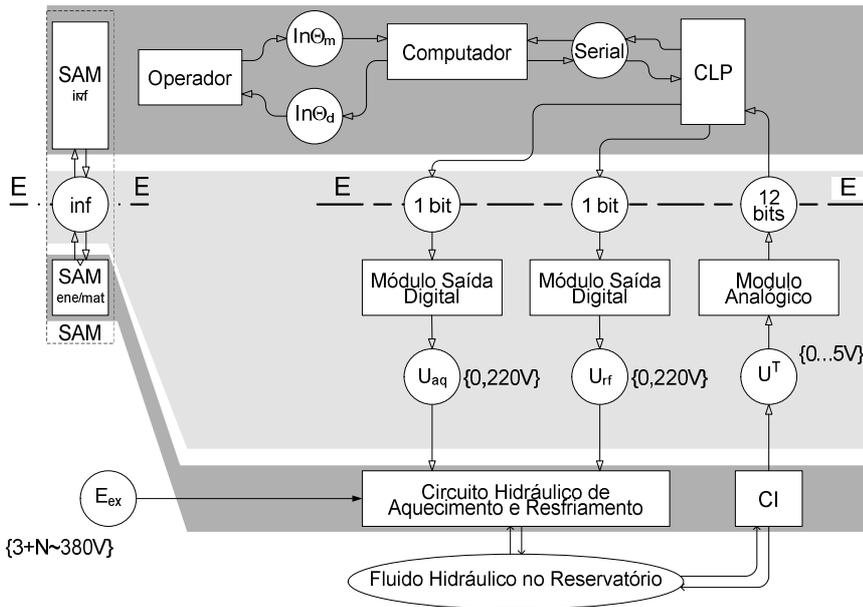


Figura 5-16 – Sistema de atuação e medição de temperatura - Modelo funcional global reprojetado

No caso dos modelos confiabilístico as alterações representadas na Figura 5-17 mostram a substituição do sensor termopar pela sonda de temperatura CI e do módulo controlador e o computador pelo CLP.

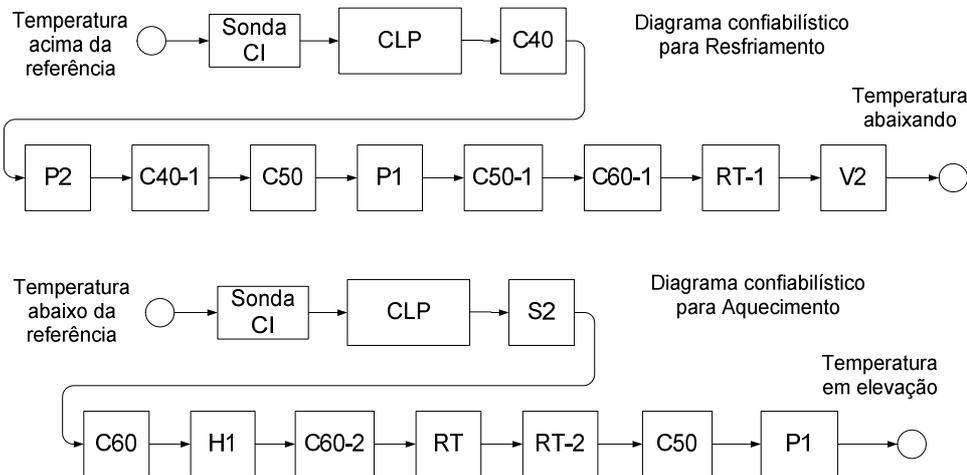


Figura 5-17 – Diagramas confiabilístico alterados correspondentes ao ciclo de aquecimento e resfriamento do fluido da UPCH

Devido o controle de aquecimento e resfriamento ter passado totalmente ao CLP, a ligação com o computador não tem influência na confiabilidade e não foi representada na Figura 5-17.

Comparando a Figura 5-17 com a Figura 5-12 e a Figura 5-13 vê-se o aumento da confiabilidade pela redução de componentes necessários às operações de aquecimento e

resfriamento. Implicitamente, a introdução do CLP possibilita estender o conceito de sensor a todo o processo, uma vez que todos os passos podem ser monitorados e transmitidos ao operador via interface com o computador.

As especificações adaptativas são atendidas pelas melhorias resultantes da atualização dos componentes dos circuitos de acionamento, e a especificação paramétrica de potência é atendida pelo redimensionamento dos circuitos de proteção.

#### **5.4.2. Relatório das alterações e expectativas**

As alterações e adaptações sugeridas são as seguintes:

- Retirada do controle automático por computador e pelo módulo de medição de temperatura;
- Introdução de um CLP e adaptação da interface com o computador existente;
- Substituição dos componentes de acionamento das bombas de água, óleo e resistência de aquecimento por equivalentes novos;
- Substituição do sensor termopar por sensor em circuito integrado com as devidas adaptações no encapsulamento;
- Transferência do atual cabeamento PC/Rack para os respectivos módulos do CLP;
- Alteração do leiaute de instalação do rack para inclusão do CLP;
- Desenvolvimento de programa no CLP para substituição das lógicas de relé do módulo de controle original e interface com computador;
- Desenvolvimento de programa no computador para interface com o CLP.

Foram estabelecidas por meio deste reprojetado, as condições necessárias para o aumento da robustez na operação automática do sistema de controle de temperatura, melhoria na segurança proporcionada pela nova interface e a manutenção e operação mais amigáveis devido ao número menor de componentes.

## 5.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE O ESTUDO DE CASO

Este Capítulo buscou trazer um exemplo prático de aplicação da metodologia proposta. Evidentemente por se tratar de uma simulação, a profundidade dos tópicos, e potenciais problemas advindos de abordagem mais específica, não contemplam todas as possíveis combinações.

Como visto, a abordagem confiabilística utilizada na fase de reprojetado informacional foi de fundamental importância nas decisões da fase conceitual. Com a aplicação de uma visão mais detalhada e o apoio de outros especialistas, provavelmente outros componentes demandariam uma atenção especial. No entanto, entende-se que é da natureza dos métodos propostos que a disposição e o destaque de uma função ou outra, está diretamente relacionada à interpretação da equipe técnica que desenvolver os modelos.

Para não se estender em procedimentos que são comuns a cada especialidade, optou-se por listar as ações necessárias para implementação dos reprojetos preliminar e detalhado. Desta forma foi omitido o balanço financeiro entre a concepção escolhida e a provisão de recursos, os desenhos do leiaute antes e depois da implementação, os estudos de leiaute do software supervisor residente no computador bem como o protótipo do software CLP de controle e comunicação.

A coerência da metodologia ficou evidenciada pelo resultado do exemplo. Com a concepção selecionada é possível resolver os problemas de confiabilidade detectados e acrescentar as funcionalidades de um equipamento novo. Assim, a forma lógica e estruturada dos procedimentos apresentados, contemplam os objetivos formulados para esta dissertação.

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 6.1. CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS

A origem desta dissertação tem inspiração na experiência do autor no mercado de fabricantes de máquinas, e o conhecimento adquirido nas disciplinas desenvolvidas no Programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia Mecânica. Como discutido no primeiro capítulo, existe uma tendência dos investidores em bens de capital, onde se inclui o mercado de máquinas industriais, de adotar medidas alternativas à simples aquisição de um produto novo. Dentre os motivos estão a necessidade de se aumentar a eficiência dos investimentos na atualização dos meios de produção, as forças do mercado, que tem pressionado este ciclo a períodos mais curtos, e mesmo as ações governamentais na regulamentação de leis ambientais.

Todas as demandas descritas acima, têm encontrado suporte em ações de reforma e melhoria de instalações existentes pela atualização de componentes, revitalização ou reativação de equipamentos parados e desatualizados, entre outras. Porém, pressionados por prazos e expectativas superestimadas, tipicamente estas ações são conduzidas de forma desordenada, e levado a resultados aquém da capacidade técnica das empresas que conduzem os trabalhos.

Por outro lado, vê-se uma base de conhecimento bem desenvolvida, onde se dispõem de métodos de projeto de produtos industriais, modelagem de sistemas automáticos, estudos de confiabilidade e mantabilidade, conforme descritos no capítulo 2. De forma complementar, existem ainda vários estudos de reprojeto de produtos para bens de consumo apresentados no capítulo 3.

Assim, tomando por base a necessidade identificada e a bibliografia pesquisada, foi proposta uma metodologia própria para o reprojeto de equipamentos mecatrônicos no Capítulo 4. Em concordância com os objetivos, a metodologia apresenta as seguintes características que diferenciam das metodologias de reprojeto estudadas:

- O alvo são equipamentos mecatrônicos em uso ou reutilizáveis;
- As informações sobre o produto são obtidas mediante método próprio de engenharia reversa, com o uso da modelagem de sistemas automáticos, modelagem comportamental e modelagem confiabilística;
- A abordagem tradicional de quatro fases de projeto de produtos industriais, foi adaptada ao reprojeto de bens de capital, seguindo os modelos de Otto e Wood (1998) e Bitencourt (2001);
- Com a representação em Rede C/A dos procedimentos a serem adotados, a metodologia se aproxima de forma mais realística à dinâmica de ações a serem tomadas no reprojeto de um equipamento mecatrônico.

Ao Capítulo 5, última parte da dissertação, ficou reservada a aplicação da metodologia em um caso prático. Ficaram evidenciadas a importância da modelagem de sistemas

automáticos e modelagem confiabilística no entendimento do equipamento mecatrônico, e o peso da confiabilidade nos processos de tomada de decisão e geração de novas concepções.

Diferentemente das metodologias de reprojeto apresentadas no capítulo 4, a metodologia proposta mostra-se bastante simplificada, isto se deve ao fato da ênfase na fase informacional. Com a busca do entendimento do equipamento original, o reprojeto leva a um melhor aproveitamento da estrutura existente.

Outro aspecto importante levantado são os benefícios advindos das modelagens propostas para engenharia reversa. As visões estrutural, funcional, comportamental e confiabilísticas, constituem uma abordagem eficiente para a compreensão do sistema técnico estudado, e sua aplicação proporciona segurança nas decisões durante as análises.

Como comprovado no estudo de caso do capítulo 5, e em concordância com os objetivos formulados no primeiro capítulo, a metodologia proposta oferece uma opção ágil e objetiva de reprojeto, pois demanda um número menor de etapas. A sistemática de modelagem para engenharia reversa, permite conhecer um equipamento mecatrônico, e ajuda sobremaneira nas tomadas de decisão durante o reprojeto. E finalmente, a estruturação inspirada nos quatro passos da escola alemã, assegura a coordenação e a correta aplicação dos esforços nas ações de reprojeto.

## 6.2. RECOMENDAÇÕES

Diversas linhas de trabalho podem partir da presente dissertação, a maior fonte provável são as próprias dificuldades encontradas na elaboração da mesma. A principal delas foi trabalhar a confiabilidade de sistemas sem base de dados. Em equipamentos mecatrônicos existem dois pontos limitantes:

- Pela definição a confiabilidade de um componente deve ser tomada nas suas condições de operação, os equipamentos mecatrônicos geralmente personalizados e com ciclo de vida longo, o que leva a um erro conceitual tomar aproximações de uso em outros equipamentos para estimação desse índice. Uma solução seria formalizar um método para estimar a confiabilidade para estes tipos de equipamentos.
- Sob longos períodos de uso a diferença da confiabilidade de componentes é amplificada, componentes elétricos tendem a ser não reparáveis, enquanto componentes mecânicos são precedidos pela perda de rendimento antes do descarte. Um estudo comparativo mais elaborado sobre este aspecto pode orientar de forma mais eficaz a concepção de soluções mais robustas.

A criação de ferramentas computacionais para a modelagem de sistemas é uma seqüência natural para estruturação de metodologias, além de servir de suporte na elaboração de projetos e reprojeto de equipamentos, serve também como base para elaboração de metodologias mais complexas onde poderiam ser explorados algoritmos de inteligência artificial ou sistemas especialistas.



**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- ALBERTAZZI, A., SOUSA, A. **FUNDAMENTOS DE METROLOGIA CIENTIFICA & INDUSTRIAL**, EMC, CERTI, UFSC, Florianópolis, 2004, 275p - Livro não publicado.
- ALBERTAZZI, A. **FUNDAMENTOS DE METROLOGIA CIENTIFICA & INDUSTRIAL (Capítulo 4 - Sistemas de Medição)**,: EMC, CERTI, UFSC, Florianópolis, 2004 ,36 Slides
- ALMEIDA, N. M. **Gramática Metódica da Língua Portuguesa**. 33ª Edição- Editora Saraiva São Paulo 1985.
- AMARAL, C. E. **Sistematização da Gestão do Conhecimento Técnico na Geração de Princípios de Solução na Fase de Reprojeto Conceitual de Produtos**. Dissertação Mestrado Engenharia de Produção, UFSC, Florianópolis 2001, 171p.
- ANDRADE, M. **Getting Younger all the Time**. Odebrecht Informa nº 122- January / February – 2006.
- ANQUETIL, N. **Engenharia Reversa**. COOPE - Universidade Federal do Rio de Janeiro - RJ, 2000.
- ASIMOW, M. **Introdução ao projeto**. São Paulo: Editora mestre Jou, 1968.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5462: Confiabilidade e manutenibilidade. Terminologia**. Rio de Janeiro, 1994. 37p.
- BARBOSA, G. E. C. **Recuperação e/ou Modernização de Maquinas: uma Abordagem Voltada a Confiabilidade**. Dissertação Mestre em Engenharia, Universidade de São Paulo, São Paulo – SP, 2005, 209 p.
- BARRINGER, H. P. **Life cycle cost tutorial**. In: FIFTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON PROCESS PLANT RELIABILITY, Houston, 1996.
- BARROS FILHO, A. **Utilização de Ferramentas de Confiabilidade em um Ambiente de Manufatura de Classe Mundial**. Dissertação Mestrado Profissional em Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, São Luis – MA, 2003. 120p.
- BETZ, F. **Strategic Technology Management**. McGraw Hill, New York, 1993.
- BILLINTON, R., ALLAN, R. **Reliability evaluation of engineering systems concepts and techniques**. Ed. Plenum Press, 1983.

BITENCOURT, A. C. P. **Desenvolvimento de uma Metodologia de Reprojetado de Produto Para o Meio Ambiente**. Dissertação Mestrado em Engenharia Mecânica, UFSC, Florianópolis, 2001, 198 p.

BLANCHARD, B. S., FABRYCKY, W. J. **System Engineering and Analysis** (Second Edition), Prentice Hall International Séries in Industrial and Systems Engineering. 1990

DE NEGRI, V. J. **Estruturação da modelagem de sistemas automáticos e sua aplicação a um banco de testes para sistemas hidráulicos**. Tese Doutorado em Engenharia Mecânica UFSC, Florianópolis, 1996, 180 p.

\_\_\_\_\_. Introdução aos Sistemas para Automação e Controle Industrial. Apostila de curso. POSMEC, UFSC, 2004. 52 p.

DE NEGRI, V. J, VIEIRA, A, D. **Integração de tecnologias para a automação industrial com sistemas hidráulicos e pneumáticos**. In: V SEMINÁRIO NACIONAL DE HIDRÁULICA E NEUMÁTICA: automação e controle industrial, 1997, Florianópolis - Brasil. Anais Florianópolis: SENAI/CTAI, 1997. p. 81-101.

DHILLON, B. S. **Reliability engineering in systems design and operation**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1983. 319p.

DIAS, A. **Metodologia para análise da confiabilidade em freios pneumáticos automotivos**. Tese de doutorado, UNICAMP, Campinas-SP, 1996.

\_\_\_\_\_. **Confiabilidade de Sistemas Técnicos**. Florianópolis, maio 2005. 151p. Notas de aula. Impresso

DIAS, A., NUNES E. L. **Manutenção Integrada em Confiabilidade e Conhecimento- MICC**. 13º CONGRESSO IBEROAMERICANO DE MANTENIMIENTO (13º CIM) Y CONFERENCIA LATINOAMERICAN DE GESTIÓN DE MANTENIMIENTO Y CONFIABILIDAD OPERACIONAL (GMC 2005) Chile – 2005

DIETER, G. E. **Engineering design: a materials and processing approach**. New York: McGraw Hill, 1983. 592p.

DOREY, A. P., BRADLEY D. A., **Essential fundamentals of mechatronics**. Fundamentals of mechatronics 5(1994) 1415-1428. United Kingdon.

DUFOUR, C. A.. **Estudo do Processo e das Ferramentas de Reprojetado de Produtos Industriais, Como Vantagem Competitiva e Estratégia de Melhoria Constante**. Dissertação de Mestrado em Engenharia, UFSC, Florianópolis, 1996.

ENGRO. **Controladores Indicadores e Supervisores Digitais de Processos – Série 7000**, Disponível em: < [http://www.engro.com.br/indicadores\\_controladores/controladores\\_7000.htm](http://www.engro.com.br/indicadores_controladores/controladores_7000.htm)> Acesso em nov. 2006.

EVBUOMWAN, N.F.O., SIVALOGANATHAN, S.; JEBB, A. **A survey of design philosophies, models, methods and systems**. Proceedings: Institution of Mechanical Engineers. v. 210, 1996, p. 301-319,.

FERREIRA, M. G. G.. **Utilização de modelos para a representação de produtos no projeto conceitual**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, UFSC, Florianópolis, 1997.

FLESCH, C. A. **METROLOGIA E ELETRÔNICA BÁSICA PARA EXPERIMENTAÇÃO (MÓDULO 1 : METROLOGIA)**. Apostila de curso - LABMETRO-EMC-UFSC, Florianópolis, junho 2003, 260p.

FONSECA, A. J. H. **Sistematização do Processo de Obtenção das Especificações de Projeto de Produtos Industriais e Sua Implementação Computacional**. Tese Doutorado em Engenharia Mecânica, UFSC, Florianópolis, 2000, 180p.

FORCELLINI, F. A. **Projeto Conceitual**, apostila de curso. POSMEC, UFSC, 2005, 161 p.

FRANCIS E. H., TAY J. G. **A methodology for evolutionary product design**, Engineering with computers (2003) 19: 160-173, Springer-Verlag London 2003.

FUNDAÇÃO VOLKSWAGEM. **Análise de Valor**. Notas do Centro de Pesquisas e Projetos de Treinamento. 1996.

GUERREIRO, E. **Fluxos real e monetário, tipos de bens, argumentos positivos versus argumentos normativos e inter-relações**. Introdução à Economia - Aula 04. Departamento de Economia, Universidade Estadual de Ponta Grossa. Disponível em: <<[http://www.uepg.br/uepg\\_departamentos/deecon/disciplinas/Ezequiel%20Guerreiro/Introducao\\_economia/IE-AULA%2004-%20Introdução%20à%20EconomiaFluxos%20reais%20e%20monetário....pdf](http://www.uepg.br/uepg_departamentos/deecon/disciplinas/Ezequiel%20Guerreiro/Introducao_economia/IE-AULA%2004-%20Introdução%20à%20EconomiaFluxos%20reais%20e%20monetário....pdf)>> Acessado em Junho 2007.

HASHIM F., JUSTER N.P., PENNINGTON A. **A Functional Approach to redesign**. Engineering with Computers 1994 10:125-139, Springer-Verlag London Limited. Department of Mechanical Engineering, University of Leeds, Leeds,UK, 1994.

HOGARTH P., TABESHFAR K. **The Influence of Design Visualization in Reducing Investment in new Product Development**. In: International Conference on Engineering Design. ICED '93. The Hague, August 17-19, 1993.

HUBKA, V., EDER, W. E. **Theory of technical systems**. Germany: Springer-Verlag, 1988. 275p.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION – IEC. IEC 848. **Preparation of function charts for control systems**. Switzerland, 1988. 100p.

\_\_\_\_\_. IEC 1131-3. **Programmable controllers Part 3: Programming languages**. Geneva - Switzerland, 1993.

INGLE, K. A. **Reverse engineering**. New York: McGraw Hill, 1994. 240p.

LINSINGEN, I. - **Fundamentos de sistemas hidráulicos**. Editora da UFSC, Florianópolis, 2001.

LUND, R. T. **Remanufacturing**. Technology Review. Cambridge: Vol. 87, Iss. 2; p. 18-29. Feb/Mar 1984.

\_\_\_\_\_. **MAKING PRODUCT LIVE LONGER** Technology Review. Cambridge: Vol. 79, Iss. 3; JAN. 1977,p. 48-55.

MODARRES, M. **What every engineer should know about reliability and risk analysis**. New York: Marcel Drekker, 1993, 350p.

MONCHY, F. **A Função Manutenção - Formação para a gerência da manutenção industrial**. São Paulo: Ebras/Durban, 1989, 424p.

MUSKER, D. C. **REVERSE ENGINEERING**, Protecting & Exploiting Intellectual Property in Electronics, IBC Conferences, 10 June 1998, disponível em: <[http://www.jenkins-ip.com/serv/serv\\_6.htm](http://www.jenkins-ip.com/serv/serv_6.htm)>. Acesso em julho 2006.

NATIONAL SEMICONDUCTORS. **LM35 - Precision Centigrade Temperature Sensors**, Datasheet - November 2000.

OGLIARI, A., PEREZ, R. L. **Elaboração de Especificações de Projeto de Produto** Apostila de curso NEDIP – EMC – UFSC. Florianópolis, 2006. 34 p.

OTTO, K.N.; WOOD K.L. **Product Evolution: A Reverse Engineering and Redesign Methodology**, Research in Engineering Design (1998)10:226–243. Springer-Verlag London Limited, 1998

\_\_\_\_\_. **Product Design: techniques in reverse engineering and new product development**, Prentice Hall, New Jersey - 2001.

PAHL G., BEITZ W. **Engineering design: a systematic approach**. Berlin: Springer – Verlag, 2nd. ed., 1996.

PALLEROSI, C.A. **Confiabilidade Conceitos Básicos e métodos de cálculo**, São Paulo, 2000, 280p.

\_\_\_\_\_. **Redundâncias; por que, quando e como aplica-las?** Simpósio Internacional de Confiabilidade, Rio de Janeiro- 2005- 46 p.

PINHEIRO, U. O. **Estudo para Reprojeto da U-36 da RLAM para Aumento da Disponibilidade Operacional: Fase Informacional**, Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, UFSC, Florianópolis, 2006.

PIO, F. **A Explosão do Retrofitting**. Revista Lumière, edição 65- Setembro 2003.

RELIASOFT. **Introdução aos Conceitos da Confiabilidade**. Disponível em: <<http://www.reliasoft.com.br/Painel/index.htm>> Acesso em fev. 2006.

RIIS, J. O., LUXHOJ, J. T., THORSTEINSSON, U. **A Situational Maintenance Model**. International Journal of Quality & Reliability Management. Vol. 14 No. 4, 1997, p. 349-366.

RIGHETTI, S. **Tecnologias de Informação Trazem Mudanças nos Postos de Trabalho**. SBPC/Labjor. Disponível em: <<http://www.comciencia.br/200405/reportagens/02.shtml>>. Acesso em 10 junho de 2006.

SAKURADA, E. Y. **As Técnicas de Análise dos Modos de Falhas e seus Efeitos e Análise de Árvore de Falhas no Desenvolvimento e na Avaliação de Produtos**. Dissertação Mestrado em Engenharia Mecânica, UFSC, Florianópolis, 2001. 143 p.

SANTOS, C. M. P. **Um modelo para o aumento de produtividade do conjunto turbina – gerador em instalações hidrelétricas**. Tese Doutorado em Engenharia Elétrica, UFSC, Florianópolis, 1999.

SANTOS, E. A. P. **Contribuições ao projeto conceitual de sistemas de manipulação e montagem automatizados**. Tese Doutorado em Engenharia Elétrica, UFSC, Florianópolis, 2003, 194 p.

SOUTO, R. B. **Projeto de Sistemas Automáticos com Modelagem e Controle da Comunicação Com o Ambiente Externo**. Dissertação Mestrado em Engenharia Mecânica, UFSC, Florianópolis, 2005, 188 p.

SPUZIC S., O'BRIEN J., STEVENS C. **Basics of Manufacture - Part II – 9.4.3-Introduction to Maintenance Engineering**, e-textbook disponível em <<http://www.geocities.com/alpha22md/425/425.htm>>, Acesso em maio, 2006

UNIVERSIDAD DE GUADALAJARA. **Instrumentacion 1, Medición de Temperatura**. Disponível em: < <http://proton.ucting.udg.mx/dpto/maestros/mateos/clase/teoria/temperatura/ Temperatura.html>> Acesso em nov. 2006.

US ARMY. **REVERSE ENGINEERING HANDBOOK (GUIDELINES AND PROCEDURES)**, MIL-HDBK-115A (ARMY) - Department Of Defense Handbook US ARMY, 01 june 2006.

VINADÉ, C.A.C. **Sistematização do Processo de Projeto para Confiabilidade e Manutenibilidade Aplicado a Sistemas Hidráulicos e Implementação de Um Sistema Especialista**. Tese Doutorado em Engenharia Mecânica, UFSC, Florianópolis, 2003, 233 p.

**BIBLIOGRAFIA**

ARIZA, C. F. **Sistema de Administração para Manutenção Industrial**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1978.

BLANCHARD, B. S., VERNA, D., PETERSON, E. **Maintainability a Key to Effective Serviceability and Maintenance Management**. Ed. Wiley Interscience, 1995.

BOLLMANN, A. **Fundamentos da automação industrial pneumática**. Ed. ABPH (Associação Brasileira de Hidráulica e Pneumática), 1996.

Buur, J. **A theoretical approach to mechatronics design**. Denmark: Institute for Engineering Design, 1990, 126 p.

CASTRO, H. F. **Otimização da Confiabilidade e Disponibilidade em Sistemas Redundantes**. Dissertação Mestrado em Engenharia Mecânica, UNICAMP, Campinas – SP, 2003. 165p.

FRANCIS E. H., TAY J. G. **A methodology for evolutionary product design**, Engineering with computers(2003) 19: 160-173, Springer-Verlag London 2003.

KELLY, A. **Maintenance Planning and Control**. London: Butterworth & Co Ltd, 1984

KUO, W., PRASAD, V.R., HA, C.. Chapter13 - Optimization and Design for System Reliability. In: **Manufacturing Engineering Handbook**. 2004, Downloaded from Digital Engineering Library - McGraw-Hill <[www.digitalengineeringlibrary.com](http://www.digitalengineeringlibrary.com)>.

US ARMY. **MIL-HDBK-472: MAINTAINABILITY PREDICTION**, Military Standardization Handbook Department of Defense, Washington-DC, 24 may 1966.

PAES, F. H. S., DE NEGRI, V. J. **Modelagem para Automação de Pequenas Centrais Hidrelétricas**. LASHIP – EMC – UFSC. Florianópolis, 2002. 30 p. Disponível em: <[http://www.laship.ufsc.br/PDF/ApostilaPDF/ModAutCHE\\_Completo.pdf](http://www.laship.ufsc.br/PDF/ApostilaPDF/ModAutCHE_Completo.pdf)>. Acesso em: 02 de Fevereiro de 2005.

POPOVIC, D., VLACIC, L. **Mechatronics in engineering design and product development**. 1 ed. Marcel Dekker: EUA, 1999.

PORCIÚNCULA, G. S., DE NEGRI, V. J, ACIRES, D. **Reliability of Electro-Hydraulic: Systematization and Analysis**. In: Proceedings of COBEM 2005: 18th International Congress of Mechanical Engineering, November 6-11, Ouro Preto, MG, 2005,.

SMITH, A. M. **Reliability-Centered Maintenance**. Ed. McGraw-Hill, 1993.

WERNECK, M. M. **TRANSDUTORES E INTERFACES**.LCT Livros Técnicos e Científicos Editora. Rio de Janeiro RJ, 1996.

PAULO, R. S., WINDERSON, E. S. **Automação e Controle Discreto**. Terceira edição - Editora Érica Ltda. São Paulo, 1998.

## APÊNDICE A

### Análise da incerteza de medição

Dentre os componentes identificados no sistema de controle de temperatura o único que se enquadra na análise de incerteza de medição é a medição de temperatura, os demais são interações binárias onde é verificado o estado ligado ou desligado (bombas, motores e válvula) e fim de curso (registro de válvulas manuais) (Figura A-1).

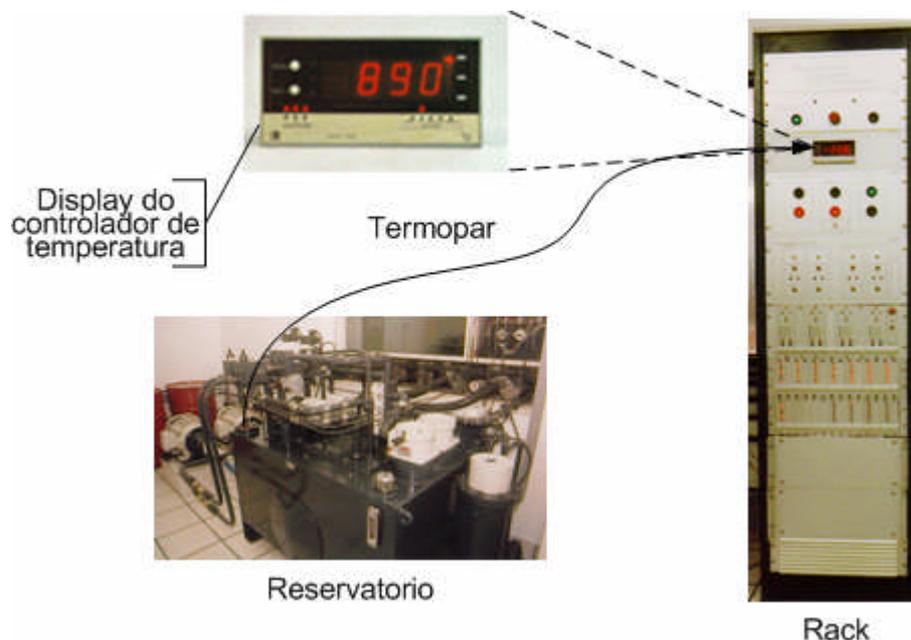


Figura A-1 - Layout da ligação entre o reservatório e Rack da UPCH / LASHIP

O princípio de medição de temperatura utilizado consta de um par metálico ligado a uma unidade de condicionamento e controle. Conforme a Figura A-1 a unidade de condicionamento e controle se encontra no módulo rack, e é usada também como interface onde o operador configura os patamares de temperatura para o acionamento e desligamento dos sistemas de aquecimento e resfriamento.

A utilização dos termopares para medição de temperatura é amplamente difundida no meio industrial. Eles têm como principal vantagem uma faixa bastante extensa de temperatura que vai de  $-200$  a  $2300^{\circ}\text{C}$  aproximadamente, além disso o custo baixo é bastante razoável se comparado com outros tipos de sensores de temperatura. O princípio de medição se apóia no Efeito Seebeck (Figura A-2), e este se produz pelo fato de que a densidade de elétrons livres num metal, difere de um condutor para outro e depende da temperatura  $T_1$ . Quando este circuito é interrompido, a tensão do circuito aberto (Tensão de Seebeck) torna-se uma função das temperaturas das junções e da composição dos dois metais A e B.

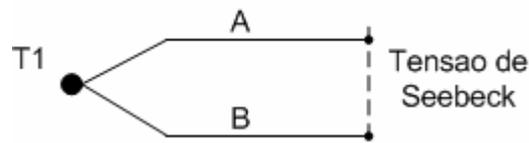


Figura A-2 – Ligação de termopar para um sistema medidor de temperatura

Para o circuito da UPCH / LASHIP o par metálico utilizado é do tipo J cujas especificações são as seguintes (Universidad de Guadalajara 2006):

- Sensibilidade: 5,6 mV / 100°C;
- Faixa de medição: -210 a +760°C;
- Temperatura máxima no ar: +600°C;
- Limite de erro até 200°C: +/- 2,2°C.

As especificações fornecidas pelo fabricante do controlador são as seguintes (ENGRO, 2006):

- Especificações técnicas gerais
  - Ambiente da operação: 0 a 50°C e 10-85% de umidade relativa não condensante.
  - Alimentação: 110 e/ou 220VCA +/- 10% (CC com inversor externo).
  - Sobrecarga do sinal de entrada: 100% para sinais CC até 500V e para sinais CA até 250V.
  - Tempo de estabilização térmica: 30min.
- Indicador
  - Resolução da leitura: 0,05% (1:2000)
  - Sensibilidade: 100 µV na faixa de 100mV
  - Tempo de resposta: menor que 1 segundo
  - Razão de amostragem: 3 por segundo
  - Número de dígitos: 3 1/2 dígitos
  - Zero automático
  - Coeficiente de Temperatura: 100ppm/°C
- Controlador
  - Ajuste do Controle: analógico de 5 a 100% do alcance e com resolução de 1°C na temperatura de calibração
  - Repetibilidade: 0,2% da faixa

- Estabilidade em temperatura:  $1 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$
- Banda proporcional: 0-10% (ajuste frontal)

Devido a integração do sistema de condicionamento, controle e apresentação o modelo do sistema de medição fica simplificado a Figura A-3.

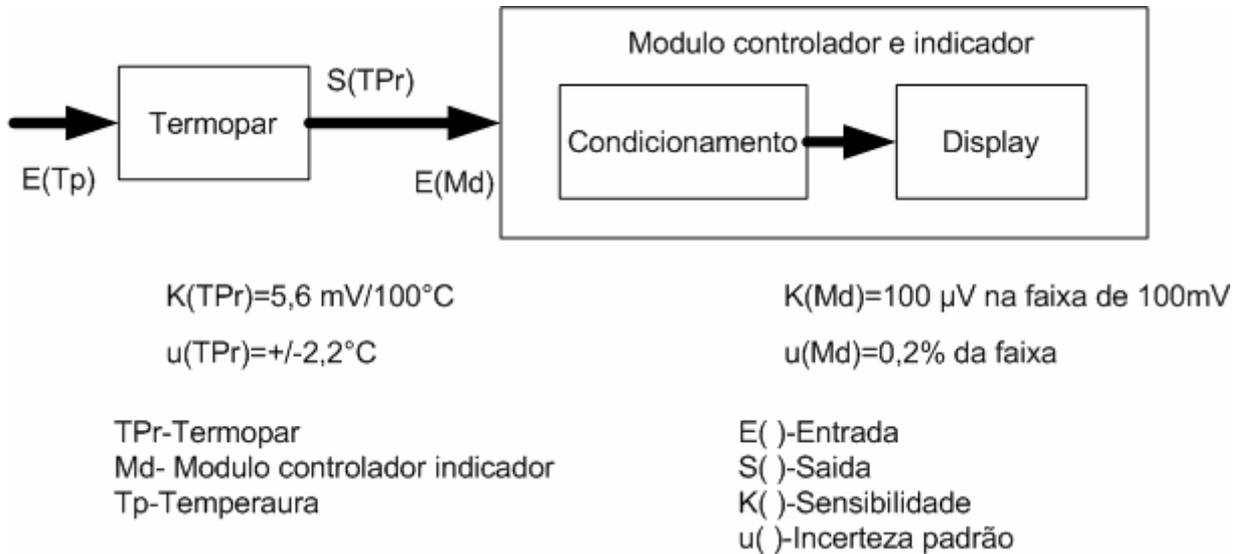


Figura A-3 – Modelo do sistema de medição e controle de temperatura UPCH / LASHIP

Para concepção deste modelo metrológico foram consideradas as hipóteses simplificativas de Flesch (2003), nele são desconsideradas todas as incertezas exceto a tendência e a repetitividade. A seqüência a seguir ilustra o cálculo da incerteza padrão equivalente do sistema:

- Incerteza relativa equivalente do termopar

Dados:

Sensibilidade do termopar:  $5,6 \text{ mV} / 100^\circ\text{C} \rightarrow 0,0056 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ ;

Limite de erro até  $200^\circ\text{C}$ :  $\pm 2,2^\circ\text{C} \rightarrow \pm 0,012 \text{ mV}$ ;

Valor máximo de temperatura especificado:  $80^\circ\text{C}$ ;

Da tabela de conversão do termopar tipo J:  $80^\circ\text{C} \rightarrow 4,187 \text{ mV}$ .

$$u_R(TPr) = \frac{0,012}{4,187} = 0,003$$

- Incerteza relativa equivalente ao módulo controlador

Dados:

Sensibilidade:  $100 \mu\text{V}$  na faixa de 100 mV  $\rightarrow 1 \text{ mV}/\text{V}$ ;

Repetibilidade: 0,2% da faixa  $\rightarrow 0,2\% * 50 = 0,1^\circ\text{C}$ ;

Leitura do módulo controlador:  $80^\circ\text{C}$ .

$$u_R(Md) = \frac{0,1}{80} = 0,0013$$

- Incerteza padrão relativa equivalente do sistema de medição

$$u_R(SM) = \sqrt{0,0013^2 + 0,003^2} = 0,0033$$

Em termos fiduciais a incerteza da composição termopar e módulo controlador indicador corresponde a uma incerteza de 0,33 % da leitura na faixa. Apesar da especificação do aparelho suportar compensação automática de leituras de até 50 °C o cálculo considerou o pior caso onde o termopar estaria sobre a carga de 80 °C. O aumento da incerteza do conjunto de 0,2% para 0,33 % não compromete o controle uma vez que a especificação do controlador já trabalha com uma resolução de 1 °C.

## ANEXO A

**Aplicação da Distribuição Weibull, obtido em <http://www.geocities.com/CapeCanaveral/lab/1418/info2.html> por Dias, 2005.**

Problema – Uma centena de bombas está operando continuamente até a falha. Tem sido anotado os tempos para cada uma das falhas, distribuídas segundo a tabela A-1.

Tabela A-1 - Tempo de falha e frequência de falha das bombas

Tempo até a falha (h)	Frequência observada
$1000 \leq t < 1100$	2
$1100 \leq t < 1200$	6
$1200 \leq t < 1300$	16
$1300 \leq t < 1400$	14
$1400 \leq t < 1500$	26
$1500 \leq t < 1600$	22
$1600 \leq t < 1700$	7
$1700 \leq t < 1800$	6
$1800 \leq t < 1900$	1
Total	100

Calcular:

1. O tempo de vida mínimo ou a confiabilidade intrínseca ( $t_0$  – tempo livre de falha).
2. Parâmetro de forma ( $\beta$ ) e a falha característica.
3. A vida característica ou parâmetro de escala ( $\alpha$ ).
4. Coeficiente de correlação ( $r$ ).
5. A probabilidade de falha para um intervalo de operação de 1350h.
6. A confiabilidade para um intervalo operacional de 1400h.
7. O MTTF da bomba.
8. O desvio padrão ( $\sigma$ ).
9. O coeficiente de variação ( $\sigma/\mu$ ).

Solução:

Tabela A-2 – Tempo de falha e frequência relativa e acumulada das falhas

Tempo até a falha (h)	Freq. Obs.	Freq. Relativa simples (ti/100)	Freq. Relativa acumulada (Σti/100)
1000≤t<1100	2	0,02	0,02
1100≤t<1200	6	0,06	0,08
1200≤t<1300	16	0,16	0,24
1300≤t<1400	14	0,14	0,38
1400≤t<1500	26	0,26	0,64
1500≤t<1600	22	0,22	0,86
1600≤t<1700	7	0,07	0,93
1700≤t<1800	6	0,06	0,99
1800≤t<1900	1	0,01	1
Total	100	1,00	----

1- O tempo de vida mínimo ou a confiabilidade intrínseca (t<sub>0</sub>-tempo livre de falha).

a – Por tentativa: Selecionar valores médios arbitrários de t<sub>0</sub>. O valor que der o melhor coeficiente de correlação, viria ser o mais adequado.

b- Utilizando o método gráfico, por exemplo o Papel Probabilístico de Weibull- PPW, e usar a fórmula para obter t<sub>0</sub>. (Aqui pode ser utilizado a norma NBR 9321/86 para fadiga, distribuição tripamétrica)

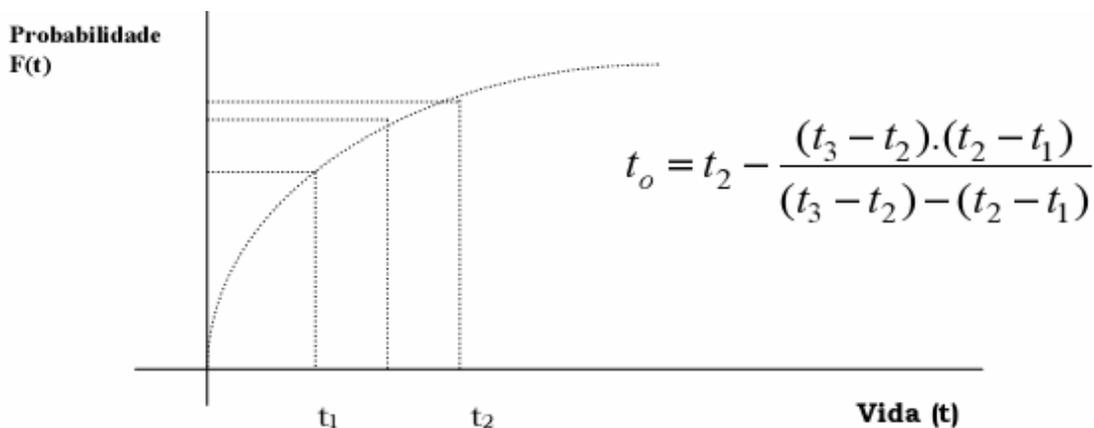


Figura A-1 - Função probabilidade acumulada de falha versus o tempo

Observação: Os tempos  $t_1$  e  $t_3$  definem os pontos  $F_1$  e  $F_3$ . A partir deles encontra-se o ponto médio  $t_2$  ou  $t_m$ .

c- Programa computacional: fazendo tentativas, procurar obter um valor médio de  $t_0$  fazer a análise para obter o melhor coeficiente de correlação. Neste problema a melhor correlação vai ocorrer quando  $t_0=900$ .

$t_0 = \gamma$ : sabe-se que esta falha é do tipo aleatória ou de uso. As falhas ocorridas em torno deste tempo são caracterizadas como falhas de juventude, oriundas de problemas ocorridos no processo de fabricação ou de projeto, principalmente, para produtos novos.

$$t_0 = t_2 - \frac{(t_3 - t_2) \cdot (t_2 - t_1)}{(t_3 - t_2) - (t_2 - t_1)}$$

Nomenclatura da norma NBR 9321/86

$$\gamma = \hat{a} = t_m - \frac{(t_h - t_m) \cdot (t_{m2} - t_1)}{(t_h - t_m) - (t_m - t_1)}$$

Solução 1:  $t_1 = 1000h$   $t_h=1800h$  resulta que  $t_m=t_2=1210h$  substituindo na formula obtém-se que:  $\gamma=\hat{a}=t_0=844h$ .

Solução 2:  $t_1 = 1100h$   $t_h=1900h$  resulta que  $t_m=t_2=1310h$  substituindo na formula obtém-se que:  $\gamma=\hat{a}=t_0=933h$ .

Solução 3: Fazendo a media entre os valores do tempo inicial da solução 1 e 2, obtém-se que:  $\gamma=\hat{a}=t_0=888h \approx 900h$ .

Observação: É preciso esclarecer que o  $t_0$  deverá ser sempre menor do que o valor do tempo de falha da primeira amostra a falhar, ou seja,  $t_0 < t_1$ .

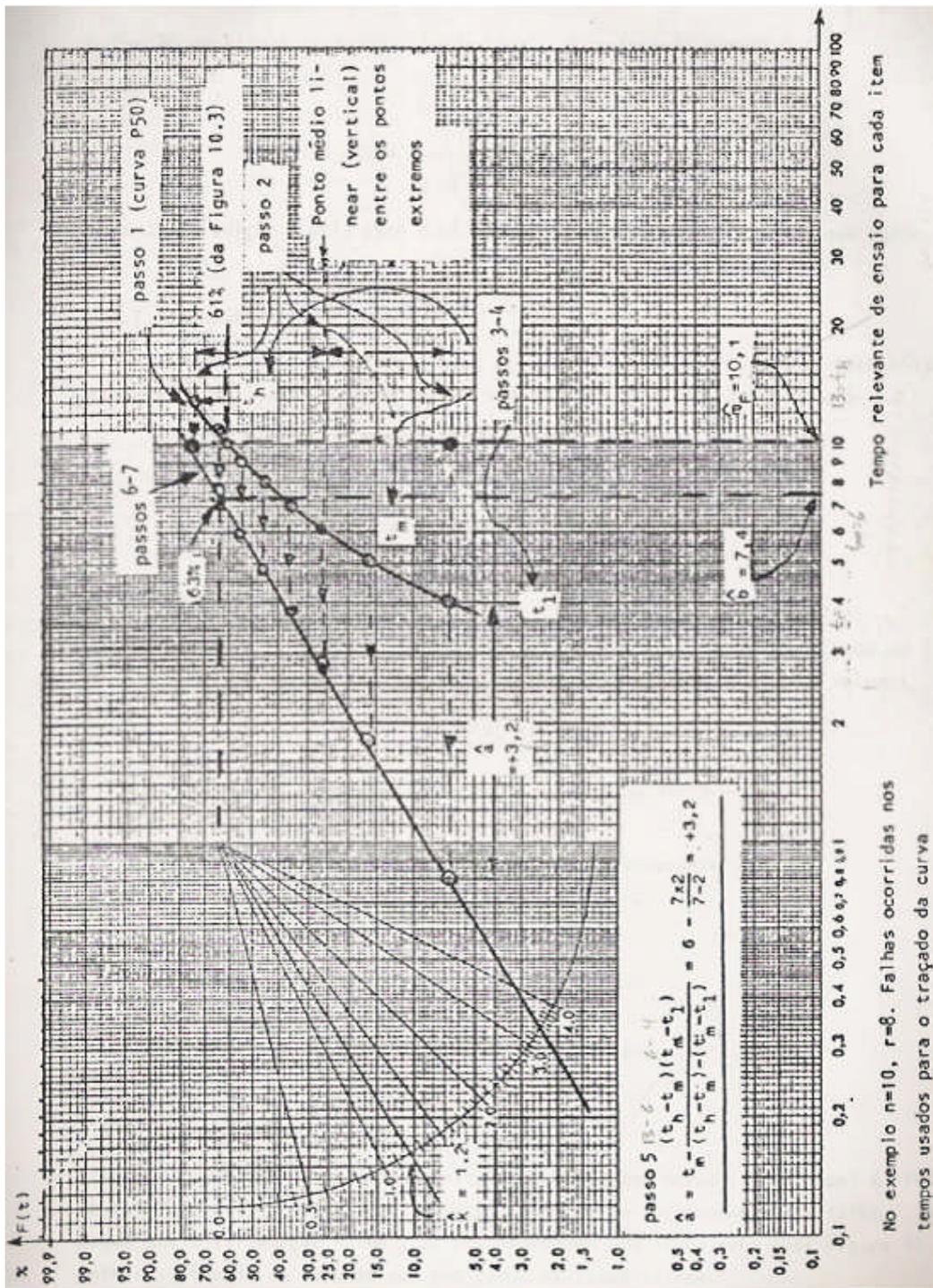


Figura A-2 - Determinação de  $t_0 = \gamma$  pela norma NBR 9321/86.3 - Determinação do parâmetro de forma ( $\beta$ )

Uma vez conhecida a frequência de falha acumulativa para distribuição de Weibull, procede-se da seguinte forma:

$$F(t) = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{t - t_0}{\alpha} \right)^\beta \right]$$

Linearizando a equação, vem:

$$\ln(-\ln(1 - F(t))) = \beta \ln(t - t_0) - \beta \ln(\alpha)$$

$$y = ax + b$$

Pelo método da categoria mediana, sabe-se que  $F(t)$  é a probabilidade acumulada de falha.

Tabela A-3 – Probabilidade acumulada de falha

Tempo até a falha (h)	F(t)	$Y_i = \ln(-\ln(1 - F(t)))$	$X_i = \ln(t - t_0)$ $t_0=900h$
1100	0,02	-3,9010	5,2983
1200	0,08	-2,4843	5,7038
1300	0,24	-1,2930	5,9915
1400	0,38	-0,7381	6,2146
1500	0,64	0,0214	6,3969
1600	0,86	0,6761	6,5511
1700	0,93	0,9780	6,6846
1800	0,99	1,5272	6,8024
1900	1,00	---	---

O cálculo do parâmetro de forma é feito com o método de regressão linear mínima quadrática:

$$\beta = \frac{n \sum_{i=1}^n X_i Y_i - \sum_{i=1}^n X_i \sum_{i=1}^n Y_i}{n \sum_{i=1}^n X_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n X_i \right)^2}$$

Calculando os valores da equação do parâmetro de forma como indica a Tabela A-4

Tabela A-4 – Parâmetro da equação de  $\beta$ 

Numero de ordem	$y_i$	$x_i$	$Y_i^2$	$X_i^2$	$y_i x_i$
1	-3,9010	5,2983	15,2251	28,0722	-20,6737
2	-2,4843	5,7038			
3	-1,2930	5,9915			
4	-0,7381	6,2146			
5	0,0214	6,3969			
6	0,6761	6,5511			
7	0,9780	6,6846			
8	1,5272	6,8024			
$\Sigma$	-5,2146	49,6432	27,3601	309,9183	-25,6855

Resulta num parâmetro de forma  $\beta=3,5831$ .

3- A vida característica ou parâmetro de escala ( $\alpha$ )

$$b = -\beta \ln(\alpha) = y - ax$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i}{n} - a \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} = -22,8865$$

Então

$$b = -\beta \ln(\alpha)$$

$$\ln(\alpha) = \frac{22,8865}{3,5831} = 6,3873$$

Logo, a vida característica ou parâmetro de escala é

$$\alpha = e^{6,3873} = 594,28h$$

4- O coeficiente de correlação ( $r$ ).

$$r = \frac{n \sum_{i=1}^n X_i Y_i - \sum_{i=1}^n X_i \sum_{i=1}^n Y_i}{\sqrt{\left[ n \sum_{i=1}^n X_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n X_i \right)^2 \right] \left[ n \sum_{i=1}^n Y_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n Y_i \right)^2 \right]}} = 0,9990$$

5- A probabilidade de falha para 1350h de operação ou não confiabilidade.

$$F(t) = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{t - t_0}{\alpha} \right)^\beta \right] = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{1350 - 900}{594,28} \right)^{3,58} \right]$$

$$F(t) = 1 - 0,6911 = 0,3089$$

6- A confiabilidade das bombas para 1400h de operação.

$$F(t) = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{1400 - 900}{594,28} \right)^{3,58} \right] = 0,5835$$

7-O MTTF das bombas.

A esperança matemática, segundo Billinton e Allan (1983), p158 é:

$$E(t) = \alpha \Gamma(1 - \beta^{-1})$$

Onde função Gamma ( $\Gamma$ ) é definida como:

$$\Gamma(\gamma) = \int_0^{\infty} t^{\gamma-1} e^{-t} dt$$

Sendo que o valor inteiro de ( $\gamma$ ) se reduz a  $\Gamma(\gamma) = (\gamma - 1)!$  assim:

$$MTTF = t_o + \alpha \Gamma(1 + \beta^{-1})$$

A obtenção do valor e ( $\Gamma$ ) é feito  $\Gamma(1 + \beta^{-1}) = \Gamma(1 + 3,58^{-1}) = \Gamma(1,28) = 0,90072$

Obtido da tabela função gama. Assim o  $MTTF = 900 + 594,28 \cdot 0,9008 = 1435,35h$

8-O desvio padrão ( $\sigma$ ).

$$\sigma = \alpha \sqrt{\left[ \Gamma(1 + 2\beta^{-1}) - \Gamma^2(1 + \beta^{-1}) \right]}$$

$$\sigma = 165,97h$$

9-O coeficiente de variação ( $\sigma / \mu$ ).

$$CV = \frac{\sigma}{MTTF - t_0} = \frac{165,97}{1435 - 900} = 0,31$$