

**IDÉLCIO ALEXANDRE PALHETA CARDOSO**

**Desenvolvimento de  
Método para Seleção de Políticas de Manutenção Baseado em Análise de  
Risco**

Tese apresentada à Escola Politécnica da  
Universidade de São Paulo para obtenção  
do título de Doutor em Engenharia

**CONSULTA  
FT-1987  
Ed.rev.**

São Paulo  
2004

014

**IDÉLCIO ALEXANDRE PALHETA CARDOSO**

**Desenvolvimento de  
Método para Seleção de Políticas de Manutenção Baseado em Análise de  
Risco**

Tese apresentada à Escola Politécnica da  
Universidade de São Paulo para  
obtenção do título de Doutor em  
Engenharia

Área de Concentração :  
Engenharia Mecânica

Orientador :  
Prof. Livre-Docente  
Gilberto Francisco Martha de Souza

São Paulo  
2004

Este trabalho é dedicado a todos aqueles que honrosamente fazem de suas vidas um meio de não apenas servir, mas de formar pessoas e lhes proporcionar a chance, talvez única de prosseguirem na vida com dignidade: aos bons professores que já passaram e honrosamente fazem parte da minha história.

## **AGRADECIMENTOS**

A DEUS, em primeiro lugar, por tudo, inclusive pela chance de concluir doutorado em uma área que eu mesmo escolhi num país como o Brasil;

À minha mãe, Inês, pelo apoio e por estar sempre onde precisei que estivesse, além do caráter que dela herdei;

À minha irmã, Adriana, meu cunhado, Ricardo e meus sobrinhos, Vitória e Theo, pelo carinho amizade e momentos felizes que servem de incentivo nos momentos cruciais;

Às minhas tias Iracilde e Iraci e minha avó materna, Maria de Lourdes, pelas demonstrações de carinho, fé e também por ajudarem a forjar meu caráter;

À Valéria, companheira que faz parte da minha história recente, mas compartilha momentos difíceis com a mesma galhardia com que desfruta dos regozijos e por saber muitas vezes suportar a ausência quando estou distante, em casa ou fora dela e por ser a pessoa que me permite e concede realizar sonhos;

Ao Prof. Dr. Gilberto M. Souza pela seriedade e generosidade na honrosa orientação, pelo exemplo de conduta, pelo incansável estímulo ao prosseguimento na carreira de engenheiro, seja ela numa empresa, num instituto de pesquisa ou em uma Universidade séria, mas principalmente pela amizade valiosa;

Ao Prof. Dr. Renato Vairo Belhot, amigo de longa data e pessoa que me apresentou os primeiros conceitos do que hoje vem a ser uma carreira e uma tese de doutorado, quando engenharia ainda era uma remota possibilidade;

Ao Prof. Dr. Rodolfo Molinari, uma enciclopédia de engenharia mecânica, com seu jeito generoso de compartilhar seu conhecimento;

À CAPES pela bolsa concedida;

Aos amigos Marcelo Oliveira e Eduardo Monlevade pelo suporte na redação deste trabalho,  
pelos dados de engenharia que se mostraram necessários e pela amizade;

Ao Eng. Geraldo Feitoza pelo incentivo na reta final e pelas palavras de incentivo à vida;

## LISTA DE FIGURAS

### CAPÍTULO 3

Figura 3.1 – Representação do Ciclo de Vida de um Produto.....	16
Figura 3.2 - Efeito da Dispersão nos Valores das Solicitações (S) e Resistência (R)...	44
Figura 3.2 – Visão Ampliada da Região de Superposição de Valores da Solicitação e da Resistência.....	45

### CAPÍTULO 4

Figura 4.1 - Confiabilidade do Sistema <i>versus t</i> , com e sem Manutenção Preventiva, LEWIS (1986).....	55
Figura 4.2 - Comportamento da Confiabilidade $R(t)$ em Função do Expoente $m$ , LEWIS (1986).....	56
Figura 4.3 – Gráfico de Controle de Utilização de Mão-de-Obra em Manutenção.....	75
Figura 4.4 – Diagrama de Pareto para uma Máquina-Ferramenta tipo CNC, WANG et al (1999).....	80
Figura 4.5 – Curva de Tendência para o Valor de um Parâmetro de Interesse.....	99

### CAPÍTULO 5

Figura 5.1 – Processo de Análise de Risco.....	108
--	-----

Figura 5.2 – Proposta de Estrutura de Tomada de Decisão em RCM, extraída de  
EISINGER e RAKOWSKY (2001).....115

## **CAPÍTULO 6**

Figura 6.1 – Componentes dos Custos Associados à Manutenção.....140

Figura 6.2 – Representação Gráfica dos “Custos de Ocasão”.....147

Figura 6.3 – Evolução dos Custos Indiretos Associados à Manutenção, adaptada de  
WOODHOUSE (1993).....152

Figura 6.4 - Balanço entre Custos de Propriedade do Equipamento e os Resultados de  
sua Operação Normal, adaptado de WOODHOUSE (1993).....157

Figura 6.5 – Equacionamento dos Custos de Propriedade do Equipamento em Situação  
de Falha, adaptado de WOODHOUSE (1993).....158

Figura 6.6 – Distanciamento entre Ganhos em Aplicações e Preços Deflacionados num  
Cenário Otimista, adaptada de WOODHOUSE (1993).....165

Figura 6.7 – Tipos de Retorno (Benefícios) para o Custo Projetado, adaptada de  
WOODHOUSE (1993).....169

## **CAPÍTULO 7**

Figura 7.1 – Representação do Diagrama Causa-Conseqüência, KUMAMOTO e  
HENLEY (1996).....178

Figura 7.2 – Estrutura de Análise de Decisão Proposta para Seleção de uma Política de Manutenção Baseada em Análise de Risco .....	180
Figura 7.3 – Símbologia Lógica das Árvores de Decisão.....	182
Figura 7.4 – Elaboração de Árvore de Decisão para Seleção de Política de Manutenção.....	183
Figura 7.5 - Diagrama Esquemático para a Implementação do Método Proposto.....	185
Figura 7.6 - Abrangência dos Efeitos das Falhas.....	191
Figura 7.7 - Desdobramentos de Falhas que Afetam a Segurança para Seleção da Prática de Manutenção.....	192
Figura 7.8 - Desdobramentos de Falhas Ocultas para Seleção da Prática de Manutenção.....	192
Figura 7.9 - Desdobramento das Falhas que Afetam os Aspectos Operacionais e Econômicos para Seleção da Prática de Manutenção.....	193

## **CAPÍTULO 8**

Figura 8.1 – Configuração Típica de uma Linha de Montagem de Telefones Celulares.....	196
Figura 8.2 – Detalhamento das Máquinas Componentes da Linha de Montagem de Telefones Celulares.....	197
Figura 8.3 – Seção de <i>Flash</i> (Inserção do Programa Operacional no Aparelho).....	198
Figura 8.4 – Seção de <i>Labelling</i> (Etiquetamento para Identificação do Aparelho)....	198
Figura 8.5 – Conjunto de 4 Placas de Circuito Impresso a Serem Montadas na	

Subseção SMD.....	200
Figura 8.6 – Vista do Interior de uma <i>Printer</i> para Pasta de Solda.....	200
Figura 8.7 – Forno ERSA® para Refusão da Pasta de Solda de Componentes Eletrônicos.....	201
Figura 8.8 - Imagem de Raio-X Tratada por Computador Mostrando Trinca e Vazio em Bola de Solda sob um BGA (do inglês <i>Ball Grid Array</i> , ou Circuito com Pontos – Bolas - de Solda em Disposição Matricial).....	205
Figura 8.9 - Diagrama Causa-Conseqüência para Falha de Impressão da Pasta de Solda.....	207
Figura 8.9 - Diagrama Causa-Conseqüência para Falha na Impressão da Pasta de Solda	
Figura 8.10 – Máquina Posicionadora Tipo “ <i>pick and place</i> ”, marca FUJI, modelo CP- 7.....	208
Figura 8.11 – Componente tipo BGA Incorretamente Posicionado.....	210
Figura 8.12 - Diagrama de Blocos de uma Máquina do Tipo <i>Pick-and-Place</i> , Marca FUJI®, Modelo CP-7.....	211
Figura 8.13 – Diagrama Causa Conseqüência para Falha Devido ao Desgaste em Fusos de Esferas Recirculantes.....	216
Figura 8.14 - Visualização de uma Solda Perfeita por Meio de Análise de Placa de Circuito Impresso Montada Utilizando-se Raio-X.....	217
Figura 8.15 - Diagrama Causa-Conseqüência para Falha no Reconhecimento Óptico.....	221

Figura 8.16 – Castelo ( <i>turret</i> ) onde são Montados os Eixos com os <i>Nozzles</i> nas Extremidades em Máquinas tipo <i>Pick and Place</i> , Marca FUJI, Modelo CP-7.....	224
Figura 8.17 - Diagrama Causa-Conseqüência para Falha de Vácuo em <i>Nozzle</i> de Máquina Tipo <i>Pick-and-Place</i> .....	225
Figura 8.18 - Diagrama Causa-Conseqüência para Falha de Ar Comprimido em <i>Nozzle</i> de Máquina Tipo <i>Pick-and-Place</i> .....	226
Figura 8.19 - Diagrama Causa-Conseqüência para Acúmulo de Impurezas Sobre Componentes Mecânicos ERSA® .....	232
Figura 8.20 – Diagrama Causa-Conseqüência para Falha por Acúmulo de Impureza sobre Resistências Elétricas de Aquecimento dos Fornos ERSA® .....	233
Figura 8.21 – Máquina ROUTER Analisada, do Fabricante PMJ, Modelo HiSAC 1000 BR.....	234
Figura 8.22 – Diagrama de Blocos da Máquina ROUTER HiSAC 1000 BR.....	236
Figura 8.23 – Diagrama Causa-Conseqüência para Falha em Gripper de ROUTER.....	237
Figura 8.24 – Modelo de Fresa Utilizada Nas ROUTERS.....	238
Figura 8.25 – Cabeçote para Montagem da Fresa da ROUTER HiSAC.....	238
Figura 8.26 - Diagrama Causa-Conseqüência para Falha no Repair Conveyor .....	240
Figura 8.27 – Representação Esquemática da Linha 3 em Função dos Equipamentos de SMD e <i>ROUTER</i> .....	242
Figura 8.28 – Histograma Contendo a Proporção de Ocorrência de Falhas por Quinzena para Máquina CP3A3 Modo de Falha 1.....	251
Figura 8.29 - Árvore de Decisão para Política de Manutenção a ser Adotada para Combate às Falhas de Ar Comprimido <i>nozzle</i> em Máquinas	

Posicionadoras CP3A1, CP3A2 e CP3A3, considerando-se Modo de Falha 1.....	273
Figura 8.30 - Árvore de Decisão para Política de Manutenção a ser Adotada para Combate às Falhas de Ar Comprimido <i>nozzle</i> em Máquinas Posicionadoras CP3A1, CP3A2 e CP3A3, considerando-se Modo de Falha 2.....	274
Figura 8.31 - Árvore de Decisão para Política de Manutenção a ser Adotada para Combate às Falhas de Ar Comprimido <i>nozzle</i> em Máquinas Posicionadoras CP3A1, CP3A2 e CP3A3, considerando-se Modo de Falha 3.....	275
Figura 8.32 – Árvore de Decisão para Política de Manutenção a ser Adotada para Combate às Falhas considerando-se Equipamento ERSA3A1, Ocorrência Modo de Falha 1.....	276
Figura 8.33 - Árvore de Decisão para Política de Manutenção a ser Adotada para Combate às Falhas de Acúmulo de Impurezas sobre Componentes Mecânicos, ocorrência do Modo de Falha 2.....	277
Figura 8.34 – Árvore de Decisão para Seleção da Política de Manutenção a ser Adotada para Combate às Falhas em ROUTER HiSAC1000 BR ( <i>ROUTERS</i> 13 e 23).....	278
Figura 8.35 – Árvore de Decisão para Seleção da Política de Manutenção para Combate às Falhas em REPAIR CONVEYOR.....	279

## LISTA DE TABELAS

### CAPÍTULO 3

Tabela 3.1 – Valores de $C_{reliab}$ , (NORTON, 1998).....	32
Tabela 3.2 – Fator $k_m$ para ECDR e ECDH (SHIGLEY,1989).....	36

### CAPÍTULO 4

Tabela 4.1 - Matriz para Decisão acerca da Seleção Preliminar das Práticas de Manutenção.....	53
Tabela 4.2 – Formulário Para Pesquisa de Falha/Avarias.....	65
Tabela 4.3 - Guia de Manutenção Preventiva em Máquina Laminadora de Papel.....	70
Tabela 4.4 – Pesquisa dos Custos e Conseqüências das Falhas em Máquinas.....	72
Tabela 4.5 – Relatório de Custos de Manutenção : Nível Operacional.....	73
Tabela 4.6 – Relatório de Custos de Manutenção : Nível Tático.....	73
Tabela 4.7 – Relatório de Custos de Manutenção : Nível Estratégico.....	74
Tabela 4.8 – Aplicabilidade dos Métodos Conforme o Tipo de Equipamento, NEPOMUCENO (1989).....	104

### CAPÍTULO 5

Tabela 5.1 – Métodos de Análise de Riscos e suas Particularidades.....	119
--	-----

## CAPÍTULO 6

Tabela 6.1 – Matriz de Levantamento dos Custos Diretos de Manutenção.....	149
Tabela 6.2 – Exemplo da Evolução do Valor do Dinheiro no Tempo.....	165
Tabela 6.3 – Tópicos para Decisão Baseada em Critérios Financeiros.....	168
Tabela 6.4 – Comparação entre o Custo de Reparo e Substituição de uma Chave Pneumática, extraído de WOODHOUSE (1993).....	171
Tabela 6.5 – Itens para Avaliação do Impacto Total de uma Falha, extraída de WOODHOUSE (1993).....	172

## CAPÍTULO 8

Tabela 8.1 - Cronograma de Manutenção Preventiva (Executado x Planejado).....	243
Tabela 8.2 - Forma de Arquivar Dados de Falhas na Empresa Analisada.....	244
Tabela 8.3 - Descrição dos Modos de Falha Pesquisados.....	245
Tabela 8.4 – Histórico das Falhas Ocasionalada por um Modo de Falha por Equipamento.....	246
Tabela 8.5a – Distribuição das Falhas por Modo (1) nos Períodos (Quinzenas).....	247
Tabela 8.5b – Distribuição das Falhas por Modo (2) nos Períodos (Quinzenas).....	247
Tabela 8.5c – Distribuição das Falhas por Modo (3) ao Longo dos Períodos.....	248
Tabela 8.5d – Distribuição das Falhas por Modo para <i>ROUTERS</i> e <i>CONVEYOR</i> .....	248
Tabela 8.6a – Proporção de Falhas ao Longo dos Períodos (Quinzenas).....	252
Tabela 8.6b – Proporção de Falhas ao longo dos períodos (Quinzenas), Modo de Falha 2.....	252
Tabela 8.6c – Proporção de Falhas ao longo dos períodos (Quinzenas),	

Modo de Falha 3.....	252
Tabela 8.6d – Proporção de Falhas ao longo dos períodos (Quinzenas) para Repair Conveyor e Router.....	253
Tabela 8.7a – Taxas de Ocorrência de Falha e Probabilidade de Falha Média para o Período de 15 dias, Modo de Falha 1.....	253
Tabela 8.7b – Taxas de Ocorrência de Falha e Probabilidade de Falha Média para o Período de 15 dias, Modo de Falha 2.....	253
Tabela 8.7c – Taxas de Ocorrência de Falha e Probabilidade de Falha Média para o Período de 15 dias, Modo de Falha 3.....	254
Tabela 8.7d – Taxas de Ocorrência de Falha e Probabilidade de Falha Média para o Período de 15 dias, Falhas dos Conveyors e ROUTERS.....	254
Tabela 8.8a – Políticas de Manutenção Sugeridas e Aplicadas para os Modos de Falha das Máquinas Posicionadoras tipo <i>Pick and Place</i> , marca FUJI, modelo CP-7.....	258
Tabela 8.8b – Políticas de Manutenção Sugeridas e Aplicadas para os Modos de Falha dos Fornos ERSA® .....	259
Tabela 8.8c – Políticas de Manutenção Sugeridas e Aplicadas para a Falha em REPAIR CONVEYOR JOT 2M .....	259
Tabela 8.8d – Políticas de Manutenção Sugeridas e Aplicadas para as Falhas em <i>ROUTERS</i> .....	260
Tabela 8.9 – Distribuição das Falhas nos Equipamentos Após a Implantação da Política de Manutenção.....	261
Tabela 8.10a – Distribuição das Falhas por Modo (1) nos Períodos (Quinzenas).....	262
Tabela 8.10b - Distribuição das Falhas por Modo (2) nos Períodos (Quinzenas).....	262

Tabela 8.10c – Distribuição das Falhas por Modo (3) ao Longo dos Períodos.....	262
Tabela 8.10d _ Distribuição das Falhas por Modo para ROUTERS e CONVEYOR.....	263
Tabela 8.11 – Custos Associados às Falhas e à Manutenção da Linha 3.....	268
Tabela 8.12 – Comparação dos Valores dos Riscos Médios Antes e Após a Adoção da Política de Manutenção Proposta.....	288
Tabela 8.13 - Políticas de Manutenção Seleccionadas por meio do Emprego do Método Proposto.....	288

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\sigma_a$  = valor de tensão alternada

$\sigma_m$  = valor de tensão média;

$S_{ut}$  = tensão limite de ruptura à tração.

$\eta_f$  = fator de segurança para o cálculo de eixos

$C_{load}$  = Fator de Correção para Tipo de Carregamento em Eixos

$C_{size}$  = Fator de Correção Dimensional

$C_{surf}$  = Fator de Correção para Qualidade de Acabamento Superficial

$C_{temp}$  = Fator de Correção para Temperatura de Aplicação

$C_{reliab}$  = Fator de correção para confiabilidade pretendida

$W_t$  = força tangencial atuante no dente da engrenagem;

$F$  = largura do dente da engrenagem;

$m$  = módulo da engrenagem;

$J$  = fator de geometria do dente

$k_a$  = Fator de Correção para Aplicação do Par de Engrenagens

$k_v$  = Fator de Correção para Velocidade

$k_s$  = Fator de Correção para Tamanho

$k_m$  = Fator de Correção para Qualidade de Montagem

$Q_v$  = Fator de Qualidade de Fabricação

$\sigma_c$  = Tensão de Contato

$C_p$  = coeficiente elástico, dependente do material empregado na fabricação do pinhão e da coroa;

$d$  = diâmetro primitivo do pinhão;

$I$  = fator de geometria e

$c_a$ ,  $c_v$ ,  $c_s$  e  $c_m$  têm os mesmos significados dos fatores empregados no cálculo da tensão de flexão

$E$  = módulo de elasticidade;

$\nu$  = coeficiente de POISSON

subscritos  $p$  e  $g$  referem-se, respectivamente, ao pinhão (*pinion*) e à coroa (*gear*).

$S_f$  = limite de resistência à fadiga de flexão indicado por norma;

$k_l$  = fator de correção para vida (cálculo de flexão)

$k_r$  = fator de correção para confiabilidade (cálculo de flexão)

$S_c$  = limite de resistência à fadiga de contato indicado por norma

$C_l$  = fator de correção para vida (cálculo de tensão de contato)

$C_r$  = fator de correção para confiabilidade (cálculo de tensão de contato)

$L_{10}$  = vida nominal do rolamento em milhões de revoluções

$C$  = capacidade de carga dinâmica;

$P$  = carga dinâmica equivalente atuante sobre o rolamento

$p$  = expoente, dependente do tipo de rolamento

## **CAPÍTULO 4**

$m$  = expoente da distribuição de WEIBULL

$R_m(t)$  = confiabilidade do sistema após a manutenção preventiva e

$R(t)$  = confiabilidade do sistema sem sofrer nenhuma ação de manutenção preventiva

## **CAPÍTULO 5**

$p_i$  = probabilidade de ocorrência do evento  $i$

$c_i$  = consequência da ocorrência do evento  $i$

## **CAPÍTULO 7**

$C_i$  = custo das consequências da ocorrência do evento  $i$

$p_i$  = probabilidade de ocorrência do evento  $i$  (falhar ou não falhar)

## **CAPÍTULO 8**

$P(x)$  = proporção de ocorrência de falhas em uma quinzena

$p(x)$  = probabilidade de ocorrência de falha em uma quinzena

$X$  = número de falhas em uma quinzena

$\lambda$  = taxa de ocorrência de falha

## LISTA DE SIGLAS

**AHP** – do inglês “*Analytic Hierarchy Process*”, ou Processo de Análise Hierárquica de Decisão

**BGA** – do inglês “*Ball Grid Array*” ou Componente com Distribuição Matricial de Bolas de Solda

**CCR** – Custo por Ciclo Acionando-se “*Hot Line*”

**CCU** – Custo de componentes inseridos por ciclo

**CHL** – Custo Horário da Linha

**CHO** – Custo de Acionamento de “*Hot Line*”

**CLC** – Custo da Linha por Ciclo

**CPH** – Custo de Componentes Inseridos por Hora

**CPN** – Custo de Componentes Inseridos por Placa considerado-se o Produto em Linha

**DCF** - do inglês “*Discount Cash Flow*” ou Desvalorização em Fluxo de Caixa

**DLI** – Depreciação dos Equipamentos da Linha

**DMC** – Duração Média de 1 Ciclo

**EAG** – Custos de Água e Energia Elétrica Rateados com outros Setores da Fábrica

**ETA** – do inglês “*Event Tree Analysis*” ou Análise da Árvore de Eventos

**FMEA** – do inglês “*Failure Modes and Effects Analysis*” ou Análise de Modos e Efeitos das Falhas

**FMECA** – do inglês “*Failure Modes, Effects and Criticality Analysis*” ou Análise de Modos, Efeitos e Criticidade das Falhas

**FTA** – do inglês “*Fault Tree Analysis*” ou Análise da Árvore de Falhas

**IGP-M** - Índice Geral de Preços Médio

**IPC-A** - Índice Geral de Preços ao Consumidor Amplo

**IRR** - do inglês "*Internal Rate of Return*") ou Taxa Interna de Retorno

**HAZOP** – do inglês "*HAzard and OPerabilty Study*" ou Estudo de Perigo e Operacionalidade

**H-h** – Horas-homens (para efeito do cálculo de demanda e disponibilidade de M.O.)

**M.O.** – Mão-de-Obra

**MCI** – Manutenção Corretiva Inicial

**MOD** – Custo de Mão de Obra Direta

**MOS** – Custo de Mão de Obra Indireta

**MCPCP1** – Política de Manutenção Corretiva Programada para CP7, Modo de Falha1

**MCPCP2** - Política de Manutenção Corretiva Programada para CP7, Modo de Falha2

**MCPEs1** - Política de Manutenção Corretiva Programada para Forno ERSA<sup>®</sup>, Modo de Falha1

**MCPEs2** - Política de Manutenção Corretiva Programada para forno ERSA<sup>®</sup>, Modo de Falha2

**MPCP1** - Política de Manutenção Preventiva para CP7, Modo de Falha1

**MPCP2** - Política de Manutenção Preventiva para CP7, Modo de Falha2

**MPCP3** - Política de Manutenção Preventiva para CP7, Modo de Falha3

**MPES1** - Política de Manutenção Preventiva para forno ERSA<sup>®</sup>, Modo de Falha1

**MPES2** - Política de Manutenção Preventiva para forno ERSA<sup>®</sup>, Modo de Falha2

**MPCRV** - Política de Manutenção Preventiva para REPAIR CONVEYOR JOT 2M

**MPRT** - Política de Manutenção Preventiva para *ROUTER*

**MTBF** – do inglês "*Mean Time Between Failures*" ou Tempo Médio Entre Falhas, aplicável a sistemas reparáveis

**MTTF** - do inglês "*Mean Time To Failure*" ou Tempo Médio Até a Falha, aplicável a sistemas não reparáveis

**MTTR** - do inglês "*Mean Time To Repair*" ou Tempo Médio de Reparo

**NDT** - do inglês "*Non-Destructive Tests*" ou Ensaio Não Destrutivo

**NPV** - do inglês "*Net Present Value*" ou Valor Atual Operacional

**PCM** – Planejamento e Controle da Manutenção

**PDCA** – ciclo de melhoria contínua, de suas iniciais em inglês "*Plan Do Check Action*"

**PLC** – do inglês "*Programmable Logical Controller*" – ou Controlador Lógico Programável

**PRA**- do inglês "*Probabilistic Risk Analysis*" ou Análise Quantitativa (Probabilística) de Risco

**PrHA** – do inglês "*Preliminary Hazard Analysis*" ou Análise Preliminar de Perigo

**QRA** – do inglês "*Qualitative Risk Analysis*" ou Análise de Risco Qualitativa

**RCM** – do inglês "*Reliability Centered Maintenance*" ou Manutenção Centrada em Confiabilidade

**RF** – rádio frequência

**SMD** - do inglês *Surface Mounting Devices* ou Maquinário para Montagem de Superfícies

**SPP** – Custo de Peças de Reposição e Contratos de Manutenção com Fornecedores

**TDF** – Tempo de Desenvolvimento da Falha

**TPM** – do inglês "*Total Productive Maintenance*" ou Manutenção da Produtividade Total

**TR** - Taxa Referencial de Juros

**UFM** - Unidades Fiscais do Município

## **RESUMO**

Este trabalho tem o objetivo de elaborar um procedimento de decisão que permita selecionar, dentre as alternativas para a manutenção de sistemas mecânicos, a que melhor compatibilize os aspectos técnicos e de custos, procedimento este baseado na Análise de Risco.

Desta feita, é necessário conhecer as particularidades da manutenção, estudar o fenômeno falha, o que introduz a necessidade de se recorrer ao emprego dos conceitos de confiabilidade para determinar seu comportamento estatístico, os modos de falha associados às partes de um equipamento e a progressão desta não apenas através do sistema máquina, mas de todo um contexto produtivo, o que significa determinar seu impacto sobre o sistema de produção e sobre o próprio produto manufaturado. A modelagem dos custos associados à falha deve ser estudada, pois há particularidades inerentes à atividade de manutenção, as quais são analisadas neste trabalho.

O cenário das operações deve então ser constituído, pois sobre este serão elaborados critérios de decisão (muitas vezes baseados em subjetividade) e especificadas as situações de risco, permitindo avaliar os impactos de uma falha.

Recorrendo-se à teoria da decisão, um procedimento de análise que considere as probabilidades de falha associadas a cada alternativa de manutenção, combinadas aos custos de suas conseqüências é proposto, permitindo avaliar a alternativa que represente a melhor combinação de práticas de manutenção, custos reduzidos e baixo risco.

O método desenvolvido neste estudo foi aplicado para otimizar os procedimentos de manutenção empregados em uma linha de montagem de telefones celulares, trazendo benefícios em sua adoção para a manutenção de sistemas mecânicos em termos da redução da ocorrência de falhas e dos custos associados a estas considerando as operações da organização como um todo, além da redução na ocorrência de outras conseqüências não expressas em termos de seus custos.

## **ABSTRACT**

This work aims to elaborate a decision procedure which allows to select, considering a set of maintenance practices for mechanical systems, the ones that whose technical features and costs are best equalized, based on risk analysis approach.

In this way, it's needed to determine the maintenance issues, studying the failure event – introducing reliability concepts – in order to determine its statistical behavior, failure modes related to the equipment or components and failure progress through the system, not only regarding the equipment, but taking into account the complete operational environment, meaning determine its impact. Costs modelling, relating them to the failure, must be studied, because maintenance inherent features are present and they are analysed in this work.

An operational scenery must be built, because decision criteria are elaborated with those scenery in mind – in many cases with subjective considerations only – and specifying risk situations, in order to evaluate the failure impact.

By applying Decision Theory, a decision procedure that connects failure probability (related to each maintenance alternative) to consequence costs is carried out and a best maintenance policy is proposed, combining technical features, reduced or minimum costs and low risk level into a same choice.

The methodology is applied for the optimization of the maintenance procedures in a mobile phone assembly plant, and shows improvements in the organization operational performance in a comprehensive way, such as both failure occurrences and costs related decreasing, besides consequences not usually regarded in terms of their costs.

# 1 – INTRODUÇÃO

## 1.1 – Considerações Iniciais

Classicamente, a manutenção é compreendida como a atividade cuja função é manter ou retornar os equipamentos às suas condições operacionais especificadas e tem, ao longo do tempo, experimentado grande evolução no que diz respeito às técnicas e métodos de intervenção nos equipamentos, dentre as quais pode-se citar a automatização de algumas operações consideradas perigosas, o emprego de ferramentas sofisticadas com o objetivo de evitar erros em operações que exijam certa precisão e a monitoração de parâmetros vitais à operação do equipamento. Todo este desenvolvimento está centrado no fato das práticas a serem executadas pela manutenção são basicamente três :

- manutenção preditiva, a qual consiste em monitorar a evolução dos parâmetros vitais do equipamento, sendo esta utilizada para definir o momento no qual o equipamento deverá ser submetido à ação da manutenção
- manutenção preventiva, executada a intervalos periódicos visando antecipar-se à falha e
- manutenção corretiva, executada após a falha.

Várias políticas de tratamento das falhas dos equipamentos foram desenvolvidas à partir do emprego destas três práticas fundamentais, tais como TPM (do inglês *Total Productive Maintenance* ou Manutenção da Produtividade Total) e a RCM (do inglês *Reiability Centred Maintenance* ou Manutenção Centrada em Confiabilidade), CARDOSO (2000). O emprego dos conceitos de confiabilidade se revela, no trabalho citado acima, de

grande utilidade em estabelecer qual a prática mais adequada a ser empregada a cada tipo de sistema, conforme sua natureza (elétrico, mecânico, etc.) e seus requisitos de utilização.

Atualmente, as organizações defrontam-se com duas grandes preocupações acerca de suas operações, preocupações estas impostas por um mercado cada vez mais competitivo, pelo surgimento de novas tecnologias e por imposições legais : o aspecto econômico-financeiro e o aspecto de segurança. Atender a estes dois requisitos é tarefa complexa em virtude de serem, em uma análise inicial, objetivos conflitantes, como citado em CARDOSO e BELHOT (1994) e LYONNET (1991).

Resumidamente, a uma organização interessa operar o equipamento gerando os melhores resultados (quer em qualidade de produtos/serviços, quer em termos de segurança operacional) concomitantemente a um custo total satisfatório, o que se traduz em produtividade. O primeiro problema a ser resolvido pela manutenção é, então, estabelecer ou quantificar o que seria uma operação a contento gerando bons resultados (como qualidade e nível de segurança), bem como o significado e a monta dos custos considerados como satisfatórios. Estabelecidos estes parâmetros, o passo seguinte consiste em equilibrar estes dois aspectos.

Focando a necessidade da empresa apresentar elevada produtividade associada a baixos custos, alguns aspectos importantes devem ser considerados quando da tomada de decisão sobre a manutenção de um dado equipamento, visando a obtenção do equilíbrio entre os fatores listados nos parágrafos anteriores, dentre os quais, podem ser citados :

- confiabilidade : que visa definir a probabilidade do equipamento falhar quando assistido por uma dada prática de manutenção;
- risco : que visa avaliar as conseqüências das falhas do sistema/equipamento, associadas com elementos que interagem com o sistema em análise, tais como o ambiente, operadores, qualidade do produto e população em geral e

- custos : que avaliam, em termos monetários, não só as despesas associadas com a execução da prática de manutenção, mas também os custos associados com as conseqüências da falha, as quais são definidas pela análise de risco.

A análise das políticas de manutenção recentemente desenvolvidas permite constatar que estas não contemplam o aspecto custo associado com a manutenção, estando centradas basicamente no aspecto confiabilidade do equipamento, visando a minimização das suas falhas. Portanto, estas não contemplam o fator custo no processo de tomada de decisão sobre a política de manutenção a ser adotada para um dado equipamento ou sistema.

Em face ao exposto sobre os problemas da manutenção, verifica-se que há um hiato entre a operação segura e eficaz dos equipamentos e os custos associados a esta operação, estando os aspectos econômico-financeiro e de segurança dissociados quando da tomada de decisão em manutenção.

Assim, é de grande valia a formalização de uma estrutura de tomada de decisão em manutenção baseada na consideração dos conceitos de confiabilidade, risco e custos expostos anteriormente, contemplando o estabelecimento da relação entre os fatores econômico-financeiro e a segurança, visando a obtenção de um equilíbrio entre a produtividade do equipamento e os custos associados à manutenção do mesmo.

## **1.2 – Objetivos do Trabalho**

O objetivo desta pesquisa é desenvolver um método para seleção da política de manutenção de um equipamento ou sistema, o qual é baseado na consideração dos modos de falha e confiabilidade associados ao equipamento ou sistema e nas conseqüências da falha dos mesmos quando submetidos a uma dada política de manutenção, visando a obtenção do

equilíbrio entre o custo associado à falha e à manutenção do equipamento, e a chance do equipamento ou sistema falhar, a qual afeta sua produtividade.

Portanto, além de explicitar os aspectos técnicos da manutenção, esta proposta consiste em desenvolver uma metodologia que permita a consideração dos custos, sistematizando uma estrutura para o processo de tomada de decisão em manutenção em um determinado ambiente. A tomada de decisão sobre qual a melhor política de manutenção a ser empregada deverá integrar os aspectos técnico e financeiro relacionados com as possíveis alternativas listadas como válidas para a manutenção de um dado sistema ou equipamento, definindo toda a lógica envolvida neste processo, incluindo a necessidade de avaliação das probabilidades de o sistema falhar sob assistência de uma dada política de manutenção, dos custos associados à própria ação de manutenção e dos custos associados às conseqüências da falha. Este último será analisado através da avaliação dos efeitos da falha do sistema sobre o contexto operacional do mesmo, englobando, por exemplo, a qualidade do produto/serviço e a segurança dos operadores e do ambiente de uma planta de produção industrial em geral.

Duas ferramentas se revelam de capital importância na consecução deste objetivo :

- a Teoria da Análise de Decisão e
- a Análise de Riscos.

O objetivo principal da aplicação da Teoria da Análise de Decisão é minimizar os custos decorrentes de uma determinada atividade, maximizar o lucro total esperado ou maximizar o valor de utilidade – conceito citado por MOUBRAY (1996) e WOODHOUSE (1993) – esperado para alguma operação, ao mesmo tempo em que garante a segurança destas. Assim a aplicação desta teoria atende aos objetivos propostos por este trabalho, pois consiste em uma forma de sistematizar a tomada de decisão em manutenção, tendo o custo total como critério de decisão, associado à probabilidade de ocorrência de um dado evento. As

técnicas de Análise de Risco são utilizadas para sistematizar o processo de estimação das conseqüências da falha de um equipamento ou sistema sobre o contexto operacional do mesmo. A avaliação do custo total é baseada na estimativa do custo das conseqüências da falha.

Portanto, a pesquisa envolve a elaboração de um método de tomada de decisão em manutenção, sistematizando os conceitos de Teoria da Decisão, de Análise de Risco e de Confiabilidade, verificando a lógica presente na tomada de decisão, de modo a estabelecer critérios que satisfaçam ao equilíbrio entre os aspectos de custo e segurança (ambiental, das operações dentro da empresa e da minimização da possibilidade de ocorrência de acidentes).

### **1.3 – Escopo do Trabalho**

Este trabalho está estruturado da seguinte maneira :

- no Capítulo 1, é feita a introdução do trabalho, procurando-se explicar quais seus objetivos em linhas gerais, já determinando o foco do presente trabalho;
- no Capítulo 2, a questão da manutenção industrial é abordada, explorando quais os problemas e qual a motivação para a execução deste trabalho, procurando cobrir as lacunas da situação anterior;
- no Capítulo 3 são exploradas as características operacionais e principalmente de projeto, e a fim de compreender quais modos de falhas acometem estes sistemas, já que são a ênfase técnica deste trabalho;
- no Capítulo 4 as especificidades da manutenção, seu relacionamento com a teoria da Confiabilidade, os métodos consagrados de planejamento e controle e as práticas básicas sobre as quais se apóiam tais métodos são expostos e nesta seção são exploradas as possibilidades de melhoria, as quais este trabalho tem o propósito de atender;

- no Capítulo 5 a motivação teórica que sustenta o emprego da Análise de Risco (um dos objetivos do trabalho para a consecução da seleção da Política de Manutenção adequada) é apresentada e algumas formas de abordar o conceito de risco são exploradas;
- no Capítulo 6 são mostradas as formas de se abordar a questão dos custos da manutenção e os conceitos expostos são utilizados para compor a proposta de aplicação do método proposto neste trabalho;
- no Capítulo 7, são concatenados os conceitos expostos desde o Capítulo 2, de forma a compor o método proposto, neste Capítulo, o método proposto por este trabalho é formal e detalhadamente apresentado;
- no Capítulo 8 é aplicado o método proposto, bem como são levantados os custos e riscos associados às operações das máquinas de uma planta de montagem de produtos eletrônicos portáteis, permitindo aferir quais os resultados obtidos e discutindo a forma de empregar o método proposto já que o mesmo é multidisciplinar;
- no Capítulo 9 são apresentadas as conclusões relativas ao desenvolvimento do trabalho e sobre seus resultados, procurando trazer contribuições ao desenvolvimento do conhecimento ao explorar possibilidades de prosseguimento do trabalho baseado no emprego do método proposto e
- finalmente, no Capítulo 10 são apresentadas as Referências Bibliográficas que deram suporte a este trabalho, aliás, referente a este item, pode-se perceber que não é óbvio encontrar referências de suporte ao tema e a forma de abordá-lo adotada neste trabalho, pois não se tem registros concernentes a métodos de decisão aplicáveis à manutenção que contemplem otimizar conjuntamente os aspectos de redução de riscos, custos e excelência técnica simultaneamente.

## **2 – MOTIVAÇÃO DA PESQUISA : A QUESTÃO DA MANUTENÇÃO NO AMBIENTE INDUSTRIAL**

A motivação da pesquisa do doutorado e, por conseguinte, deste trabalho, vem do fato da manutenção, em que pesem os avanços tecnológicos em termos de técnicas de intervenção nos equipamentos (reparos, diagnose e mesmo correção de alguns tipos de problemas de funcionamento), carecer de uma estrutura de seleção das políticas aplicáveis a cada caso específico (políticas estas que englobam as práticas a serem adotadas, planejamento, programação e alocação de recursos), a qual contemple o equilíbrio entre os aspectos técnicos e custos, à primeira vista, ditos conflitantes quando se trata da atividade de manutenção.

Em adição a este problema – inicialmente concernente ao interior de uma organização industrial – requisitos cada vez mais abrangentes são impostos às operações de um sistema de produção, dentre os quais se pode citar controle de variáveis ambientais (emissões, ruídos e contaminação de áreas próximas à planta industrial), requisitos de segurança associados a ambientes produtivos específicos, tais como a aviação comercial, a geração de energia, a indústria farmacêutica, a indústria alimentícia, transportes e outros, além de exigências já conhecidas há muito das empresas, tais como aquelas relacionadas à qualidade do produto final e à rentabilidade das operações do sistema.

Estas exigências, não apenas pela sua quantidade, mas também devido à amplitude das mesmas, constituem-se em incertezas quanto às conseqüências das operações da linha de produção, sobretudo em caso de **falha**, preocupação diretamente concernente à manutenção.

Desta forma, apenas a excelência técnica não garante a eficácia da manutenção em manter mínima a possibilidade de falha. A respeito disto, MOUBRAY (1997) afirma, respaldado pela constatação diária deste fato, que muito tem sido feito em termos de manutenção sem que os resultados sejam satisfatórios, quer em termos de controle de custos,

quer em termos de reduzir as probabilidades de falha (sobre as quais já se pode adiantar que, infelizmente, jamais serão nulas).

Da manutenção, para que seja classificada como eficaz, exige-se que possibilite aos ativos realizar aquilo que seus operadores desejam (em termos de desempenho e resultados operacionais e econômicos), conceito que atualmente é tomado como definição da manutenção e se revela bastante amplo, pois o operador do equipamento (não a pessoa que irá acioná-lo em si, mas entenda-se como operador a estrutura organizacional da qual um equipamento ou uma linha fazem parte) possui um leque bastante extenso de exigências a serem satisfeitas, algumas inconsistentes, é verdade, outras externas à organização, mas de forma geral, são requisitos a serem atendidos.

Assim, o problema da atividade de manutenção em manter os ativos dentro dos níveis esperados (note-se que este verbo envolve, em si, incertezas e as características esperadas devem ser especificadas, o que se pretende realizar nesta pesquisa), está em reconhecer as diversas exigências que recaem sobre as operações dos equipamentos (custos, qualidade, segurança, desempenho e outras), conhecer as variáveis e solicitações envolvidas nestas operações (o que se traduz em conhecer o *hardware*), identificar os tipos e modos de falha possíveis de ocorrerem, quais as conseqüências dos eventos relacionados à operação dos equipamentos (particularmente as falhas), caracterizando o risco associado a uma dada falha, utilizando estas informações para estabelecer a política de manutenção a ser adotada. Desta forma, a manutenção passa a necessitar do conhecimento acerca não apenas dos conceitos relacionados à falha do equipamento, mas de conceitos e métodos de **análise de risco** e de **análise de decisão**, ou seja, a manutenção é uma atividade que lida com a tomada de decisão e execução de procedimentos. A prática tem demonstrado (como tem sido possível ao autor constatar ao longo da realização desta pesquisa em visitas e conversas mantidas com profissionais de manutenção de empresas de diversos setores) e a literatura - tal como citado

por MOUBRAY (1997), BURNS e TURCOTTE (2000), BEVILACQUA e BRAGLIA (2000), entre outros - confirma que a manutenção tem como deficiência a aplicação incorreta ou muito superficial (quando há) das metodologias de análise de risco e de decisão (até mesmo a aplicação do FMEA – do inglês *Failure Modes and Effects Analysis* – ou Análise de Modos e Efeitos das Falhas, ferramenta para análise do comportamento de um sistema em caso de falhas de seus componentes, ampla e incorretamente utilizado como sinônimo de RCM – Manutenção Centrada em Confiabilidade). É freqüente associar análise de risco e de decisão a métodos específicos, sem entender o significado da metodologia de análise e, pior, tratar estas questões como meramente subjetivas (o autor reconhece o peso da subjetividade no estabelecimento de situações de risco e critérios para decisão, mas refuta a idéia de que estes conceitos não possam ser elucidados de forma científica, respaldado por publicações na área tais como as citadas acima e outras que serão introduzidas no decorrer da redação deste trabalho). Somando-se este fato ao desconhecimento das características funcionais do equipamento - o que se traduz em desconhecimento em termos de engenharia - tem-se um cenário onde as mais sofisticadas técnicas de manutenção apenas servem de suporte a atividades corretivas ou ornamentam um sistema de manutenção caro e ineficaz.

Assim, espera-se que a contribuição deste trabalho seja analisar sob o ponto de vista da Engenharia Mecânica as características funcionais dos equipamentos (o que permitirá, entre outros resultados, determinar os modos de falha, probabilidades de ocorrência destas, além de maior precisão no levantamento inicial das situações de risco), utilizando as metodologias de análise de risco e análise de decisão para, compatibilizando características técnicas com aspectos econômicos, selecionar a política de manutenção aplicável a determinadas situações, procurando explorar não apenas sistemas puramente mecânicos, mas dirigindo a análise para equipamentos automatizados, presentes em quantidades cada vez maiores nas linhas de produção de qualquer setor da atividade industrial.

A própria dificuldade em se encontrar referências bibliográficas referentes ao tema abordado neste trabalho de forma conjunta já indica um bom potencial de contribuição, pois alguns métodos consagrados para planejamento, controle e tomada de decisão em manutenção contemplam os aspectos de redução de risco, custos, excelência técnica e extensão das falhas (inclusive sobre o produto) de forma fragmentada, lacuna que este trabalho se propõe firmemente a preencher.

### **3 - FALHAS EM SISTEMAS MECÂNICOS : TIPOS MAIS FREQUENTES E RISCOS ASSOCIADOS**

#### **3.1) Considerações Iniciais**

No meio industrial, diversos tipos de máquinas e equipamentos são utilizados, estes de fundamental importância para a consecução de uma produção bem sucedida, sendo dispostos de forma a realizar, na imensa maioria das vezes, operações seqüenciadas. Isto equivale a afirmar que a produção de um único bem, por mais simples que seja este, envolve a operação de mais de um tipo de equipamento. Então, qualquer que seja a alteração negativa (redução) no desempenho de tais ativos – pelos mais variados motivos – haverá conseqüências sobre as saídas do sistema produtivo e, no que concerne à atividade de manutenção, o evento a ser controlado (quando não evitado) é a falha.

Um problema crucial é o de que a manutenção pode vir a controlar as causas das falhas e até mesmo eliminá-las ou então prover meios para que os equipamentos se tornem tolerantes a tal fenômeno, como citado por VAURIO (1997), mas em numerosas ocasiões, não é possível controlar suas conseqüências, embora a manutenção venha a ser cobrada exatamente pela extensão e gravidade destas últimas.

Falhas em instalações industriais podem ter as mais variadas conseqüências em termos de tipo de ocorrência, gravidade, extensão e impacto sobre as operações do sistema produtivo. Em alguns casos, pode haver apenas prejuízo material limitado ao custo do reparo do bem e sua reposição ao serviço, mas na maior parte dos casos, há mais fatos negativos relacionados a uma falha repentina, comprometendo não apenas a lucratividade de um empreendimento, mas até sua viabilidade e sobrevivência, tais como perdas de produção, acidentes, ferimentos,

mortes e agressões ambientais, problema aliás cada vez mais indesejável, quer pela pressão da opinião pública, quer pela legislação concernente ao assunto, cada vez mais rigorosa e detalhada, como citam AFFONSO (2000), XENOS (1998), GUEDES SOARES (2001), apenas para citar alguns autores.

É quase tácito que a manutenção puramente corretiva não mais atende às necessidades de confiabilidade e produtividade da grande maioria dos equipamentos industriais (notadamente dos sistemas mecânicos, sejam eles puros ou multidisciplinares), o que acaba se traduzindo na necessidade de se aplicar políticas que empreguem técnicas adequadas, de modo a obter redução de custo e aumento do desempenho e da segurança operacional.

Um sistema de gerenciamento de equipamentos eficaz de uma organização – não apenas as industriais, mas toda aquela que se valha da operação de máquinas para a consecução de suas atividades – deve conter elementos que permitam a otimização do resultado global da organização – como citam CARDOSO e BELHOT (1994) e AFFONSO (2000), o que compreende a seleção e especificação de projetos otimizados, especificações de compras padronizadas e tecnicamente avaliadas (já que é indiscutível o fato de que componentes do mesmo tipo oriundos de fabricantes diferentes podem apresentar desempenhos completamente desiguais), testes de recebimento (o que inclui testes de equipamentos e subconjuntos submetidos a reforma e/ou recondicionamento por terceiros, fato bastante corriqueiro em manutenção), padrões de armazenamento e instalações e procedimentos padronizados e documentados de operação e manutenção (fato que não implica –em absoluto – na adoção de qualquer forma de normatização).

Porém, deve-se fazer distinção entre implementar um sistema de gerenciamento em plantas já operantes há algum tempo e concebê-lo para novos empreendimentos, pois – ao longo da realização deste trabalho – o autor tem podido verificar que são duas situações muito díspares, quer por fatores humanos, quer por fatores puramente técnicos, como será discutido

em seção específica neste texto. AFFONSO (2000) afirma que a situação mais comum é a de lidar com instalações já existentes, as mais problemáticas no que tange à definição de padrões e acompanhamento dos resultados de ações de manutenção, mas as mais férteis para estudo das características das falhas.

Este capítulo apresenta uma discussão sobre os fatores que podem levar um equipamento a falhar, um estudo sobre os modos de falha mais comuns associados aos componentes mais utilizados em sistemas mecânicos e, sob uma visão sistêmica, discute o conceito de riscos associados às falhas em máquinas, noção essencial para compreender a metodologia de elaboração de políticas de manutenção proposta neste trabalho.

### **3.2 - Causas Fundamentais das Falhas em Máquinas**

Para compreender o que é exposto nesta seção, deve-se recorrer à definição de falha proposta por CARDOSO (2000), a qual é fruto do estudo da ciência da confiabilidade e embasada nos ditames da norma ISO-NBR 5462, como citada por BRANCO (2000). De forma resumida, esta definição preconiza que a falha é o evento que reduz o desempenho, abaixo de um mínimo desejado, ou impede a correta operação de um sistema. Ocorre que a falha é percebida como consequência sobre o sistema como um todo, como a parada inadvertida ou a redução de desempenho de uma máquina, mas em geral, a falha é originada em componentes unitários ou em subsistemas mais complexos e, por esta razão, este trabalho propõe adicionalmente, a seguinte definição para falha de um componente : evento que impede o mesmo de executar suas funções com segurança. Esta especialização na definição de falha se faz necessária em virtude de uma certa controvérsia em torno dos termos falha e defeito. Antes puramente semântica, a defesa do emprego do termo falha se dá em função da diferença de conceito que existe entre este termo e o termo defeito. Um defeito é percebido

como conseqüência de uma falha sobre um equipamento, tal como desempenho inadequado ou parada repentina sem que haja comando para tal. Já uma falha indica que se sua análise for efetuada até o nível dos componentes elementares (sejam estes de que tipo forem, mecânicos, eletrônicos, elétricos, pneumáticos, hidráulicos, entre outros), será possível encontrar **pelos menos um** que tenha falhado, ou seja, que tenha atingido o fim de sua vida útil e deixado definitivamente de operar, como cita BRANCO (2000). É certo que, quanto mais complexo for o sistema, mais difícil é determinar qual(is) o(s) componente(s) causador(es) da falha, sobretudo no caso de sistemas eletrônicos tais como processadores, controles e circuitos mais sofisticados. Ou então, pode ser impraticável substituir um componente que tenha falhado, como os mancais de rolamento de bombas de água seladas do subsistema de refrigeração de motores de combustão interna. Assim, embora a falha que determine o fim da vida útil do subsistema seja conhecida em termos do tipo de falha e componente inicial, o critério que determina a substituição do item em questão é baseado em um defeito, tal como ruído emitido quando o rotor gira ou vazamento de água.

Qualquer das definições do fenômeno falha considera que esta deve ocorrer **durante** o período denominado de vida útil do componente – como em LEWIS (1986), O’CONNOR (1985) e CARDOSO e SOUZA (1999) e, mais ainda, que a vida útil deve ser governada por modos de falha específicos, conhecidos e previstos. Como exemplo, pode-se citar as falhas por fadiga superficial, as quais são o modo de falha dominante nas pistas dos mancais de rolamento, nos fusos de esferas recirculantes e guias lineares e que determinam sua vida útil, ou o desgaste das sedes de selos mecânicos e assim por diante. Modos de falha são, então, associados à natureza do componente e às suas características operacionais e, neste capítulo, são analisados e discutidos os modos de falha de componentes mecânicos.

É o conhecimento acerca dos modos de falha que permite um estudo científico acerca do fenômeno que rege a vida de um componente, permitindo calcular sua vida útil e otimizar

a confiabilidade – e por conseguinte a segurança, lucratividade, desempenho, qualidade e outras características de grande valia ao operador - das máquinas. A ocorrência de modos de falha diferentes dos previstos em projeto deve ser vista como anomalia e cuidadosamente pesquisada, para verificar se tal ocorrência corresponde a um modo de falha “operacional” ou “normal” não considerado, ou se é um fenômeno passível de ser tratado como falha aleatória.

Há que ser considerado o fato de que desde a concepção de um equipamento, antes mesmo de se executar seu dimensionamento, as decisões tomadas – tais como critérios a serem adotados, geometria, definição do uso entre outras – repercutirão por todo o ciclo de vida do produto até o fim de sua vida útil e eventual descarte. De forma genérica, é durante a fase de projeto que se pode tomar a maior quantidade de ações para evitar falhas ou mitigá-las quando for o caso, como a adoção de sistemas redundantes em aeronaves, recurso citado por CARDOSO (2000). Durante a confecção do produto, em geral na sua manufatura, eventuais problemas oriundos da concepção e projeto – tais como especificações incorretas em termos de dimensões, material, tipo e variáveis de processo e até métodos de controle de qualidade incorretos - podem se propagar para o produto, sendo que nesta etapa já não se pode tomar a mesma quantidade de ações visando evitar as falhas, a não ser assegurar que o processo de manufatura e montagem será cumprido conforme planejado (assumindo-se que este processo esteja corretamente especificado). Durante o uso ou vida útil, a quantidade de ações cai mais ainda, restando basicamente assegurar a utilização dentro das condições especificadas – por exemplo carga a ser suportada por um equipamento de transporte – e executar a manutenção da forma mais eficaz. Em outras palavras, aumentar a confiabilidade de um produto só é possível na fase de projeto e, muitas vezes, informações oriundas de campo orientam aperfeiçoamentos nos projetos correntes ou em novos projetos a serem realizados. Isto porque, durante o projeto de um novo produto, podem não estar disponíveis todas as informações necessárias para se adotar as medidas de combate às falhas que podem acometê-

lo, seja devido a alguma lacuna deixada pelos critérios de dimensionamento, por suposições durante a concepção, processo de fabricação ou pelo uso normal (o qual pode trazer situações inicialmente imprevisas), apenas para citar alguns problemas em evitar falhas ao longo do ciclo de vida de um produto. A Figura 3.1 ilustra este ciclo de vida representando a cada fase a quantidade de ações a serem tomadas para evitar as falhas.

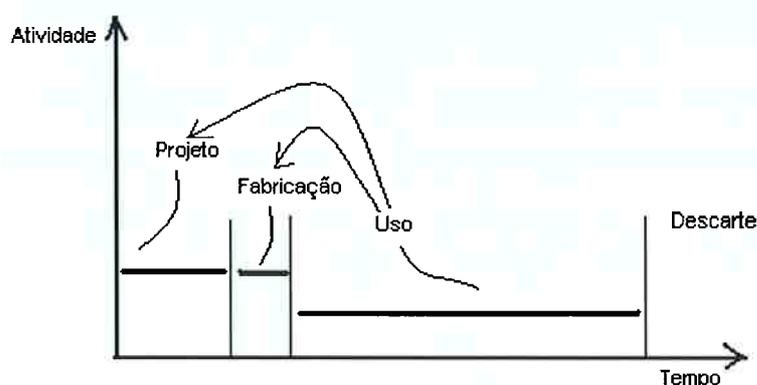


Figura 3.1 – Representação do Ciclo de Vida de um Produto

A seguir, são enumeradas e discutidas as causas básicas de falhas em componentes e sistemas mecânicos como um todo.

### 3.2.1 - Falhas de Projeto

É um tanto complexa a discussão acerca da concepção de um projeto, com vistas a classificá-la como correta ou incorreta, tal a variedade de fatores influentes, como por exemplo experiência do projetista, similaridade com soluções já existentes, alternativas disponíveis, grau de inovação do produto e outros, podendo conduzir mais a sofismas que a conclusões úteis. Desta feita, este trabalho opta por discutir problemas relacionados ao

dimensionamento de componentes de sistemas mecânicos (preferencialmente), estes são passíveis de critérios objetivos de análise, como sugerido por DHILLON (1986 e 1999).

Em geral, tais falhas surgem já na fase de concepção e desenho do componente de acordo com THOMPSON (1999), tais como :

- entalhes : raios e variações de forma e dimensões são concentradores de tensões, especialmente danosos no caso da aplicação de tensões cíclicas – como afirmado por SHIGLEY (1989) e todos os autores da área de elementos de máquinas – que podem perfeitamente ser otimizados, a fim de reduzir a magnitude desta concentração de tensões. Raios excessivamente pequenos, relações de dimensões (freqüentemente diâmetros) severas e cantos vivos devem ser cuidadosamente revistos;
- modificações de projeto : seja no caso de novos produtos ou do aperfeiçoamento de máquinas já existentes, estas podem ser efetuadas sem o devido estudo – em geral por pressão do mercado, desconhecimento das operações a serem realizadas ou incapacidade técnica do projetista (não necessariamente incompetência, mas desconhecimento sobre equipamentos especializados) – fazendo com que algo que operava bem passe a não fazê-lo a contento. Muitas vezes se pensa estar introduzindo um aperfeiçoamento, quando na verdade apenas se está montando um componente mais sofisticado em uma máquina não concebida para tal. Para exemplificar, tome-se a instalação de um selo mecânico em uma bomba projetada para operar com gaxetas, as quais fornecem apoio adicional para o eixo, aumentando a rigidez do conjunto e introduzindo amortecimento, característica que um selo mecânico – peça em geral frágil, com sede muitas vezes manufaturada em cerâmica e infelizmente dispendiosa – jamais poderá conferir. Ou então na instalação de um turbo compressor no motor de um caminhão do tipo “maçarico” (com alimentação exclusivamente aspirada), se bem que desde a década passada, não saiam mais de fábrica caminhões exclusivamente aspirados. A potência adicional extraída do motor, além de

CARDOSO (2004)

sobrecarregar os componentes deste (reduzindo sua vida útil), sobrecarrega câmbio, eixos, suspensão e, como em geral a velocidade aumenta, freios também são afetados, podendo haver ruptura de eixos ou sub operação dos freios, podendo ocasionar tragédias;

- critério de projeto inadequado : fatores não previstos, tais como ocorrência de corrosão em certos ambientes operacionais, choques ou interação indevida entre partes das máquinas podem levar um componente a falhar. Critérios de projeto, em geral, consideram fatores de segurança determinados em função da experiência acumulada durante a operação de unidades semelhantes em geometria, material e aplicação, provendo ao componente a capacidade de resistir a sobrecargas dentro de certos limites. Entretanto, a utilização de critérios de projeto inadequados não apenas impossibilita que o componente resista a sobrecargas, mas muitas vezes permite que o componente venha a falhar em operação, podendo ou não haver ruptura da peça, no caso de se tratar de componentes mecânicos. O emprego de critérios de projeto inadequados é freqüente no caso de equipamentos destinados a processos específicos, máquinas inovadoras ou de elevada precisão e complexidade. Sobretudo no caso de processos especiais, tais máquinas costumam ser únicas (ou construídas em poucos exemplares), sendo que muitas vezes, sequer há normas aplicáveis ao seu dimensionamento, além da impossibilidade de testes de protótipos em condições reais de funcionamento. Equipamentos de uso corrente apresentam menor ocorrência do uso de critérios inadequados, mas é célebre o caso do projeto de eixos de máquinas de precisão, os quais devem ser projetados sob o critério de rigidez (deformação elástica do conjunto controlada). Se o mesmo for projetado à fadiga, pode resistir a este fenômeno e não se romper durante a vida útil, mas sua deflexão pode ser tal que inviabilize seu emprego em uma máquina de precisão (onde em geral, os esforços têm menor ou a mesma magnitude das máquinas convencionais, mas as velocidades e a

precisão de deslocamento e posicionamento limitam as deformações admissíveis dos elementos).

### 3.2.2 - Falhas na Seleção de Materiais

O material a ser empregado na fabricação de componentes é selecionado na fase de projeto, entretanto, aquele item se referia apenas a problemas de desenho e dimensionamento das peças. As falhas apontadas como sendo de seleção de material são relacionadas com a incompatibilidade deste com suas características de serviço, inclusive, fatores imprevistos, como afirmam DAI e JIA (2001) .

As situações onde isto se verifica são as seguintes :

- **Materiais estruturais** : normalmente, estes são selecionados e especificados com base em sua resistência à tração. Se for utilizado um material de elevada resistência à tração (sobretudo ligas metálicas), é bem provável que este possua reduzida tenacidade, fato que pode levar à ocorrência de trincas, sobretudo em estruturas sujeitas a choques;
- **Critérios para seleção de materiais** : para cada modo de falha há critérios para a seleção do material mais adequado. Porém, é comum haver mais de um modo de falha ocorrendo em uma mesma peça. Nestes casos, deve-se partir para uma solução de compromisso entre resistência a modos de falha distintos. Um exemplo é o da seleção de materiais para operarem sob tensões cíclicas em ambientes corrosivos, sempre difícil de ser executada, haja visto a corrosão reduzir consideravelmente a resistência à fadiga dos metais.
- **Solicitações não previstas e/ou não usuais** : é quase óbvio que tais fenômenos podem levar à ocorrência de falhas desconhecidas. Um exemplo é o dos primeiros carros movidos à álcool montados no Brasil, cujos motores e componentes do sistema de alimentação foram

apenas adaptados para uso com o álcool como combustível (na maioria dos casos, apenas alterou-se a taxa de compressão dos motores). Entretanto, a maior corrosividade do álcool não foi devidamente considerada e, além dos problemas operacionais como dar a partida em dias frios, os componentes do motor e do sistema de alimentação daqueles veículos sofriam acentuada corrosão.

### **3.2.3 - Imperfeições no Material**

Este fator dá início a muitas falhas, pois defeitos internos do material reduzem a resistência mecânica das peças, na maior parte das vezes porque se constituem em caminhos preferenciais para a propagação de trincas, além de apresentarem pontos de nucleação de corrosão. Estas imperfeições são intimamente relacionadas a falhas de processo durante a fabricação da matéria-prima para a construção dos componentes, tais como :

- peças fundidas : inclusões, gotas frias, vazios e porosidade;
- peças forjadas : dobras, emendas, contração e trincas iniciadas;
- peças laminadas : dupla laminação em direções distintas, decoesão lamelar.

O projeto das peças deve considerar a possibilidade da ocorrência dos problemas característicos de cada processo de fabricação, sendo a geometria do componente determinante para definir cuidados adicionais na inspeção de fabricação, ou seja, quanto mais complexa e intrincada a geometria, mais atenção deve ser dedicada ao componente fabricado.

### **3.2.4 - Deficiências de Fabricação**

Falhas de fabricação podem ser compreendidas como falhas ocorridas no processo de obtenção da peça, ou seja, nas etapas – em qualquer uma delas – constituintes da fabricação e

nem sempre é simples distinguir entre falhas de fabricação e falhas de materiais. Mas esta diferenciação deve ser adequadamente feita para que se tenha condições de tomar as medidas corretivas ou preventivas adequadas. De forma geral, as falhas descritas como de fabricação ocorrem em processos de usinagem, conformação e soldagem. Como exemplos de falhas de fabricação, tem-se :

- conformação a frio, a qual pode produzir elevada concentração de tensões residuais, comprometendo o desempenho da peça sobretudo em condições de solicitações cíclicas;
- usinagem, que gera concentração de tensões em entalhes (a própria operação de usinagem introduz estas tensões na peça), além das marcações para identificação por indentação (puncionamento) ou eletroerosão, as quais, se feitas em regiões severamente tensionadas, são fontes potenciais de falhas;
- tratamento térmico inadequado, seja por sobreaquecimento, introdução de gradientes de temperatura muito grandes, uso de temperatura inadequada para têmpera e revenido, uso de fluido de resfriamento inadequado e inobservância do tempo de resfriamento correto em geral causam trincas iniciais e – em ligas de Fe – C, como o aço – podem causar decarbonização superficial, reduzindo a resistência à fadiga e
- soldagem, operação que pode conduzir a uma enorme variedade de tipos de falhas, seja pelo método empregado ou pelo tratamento térmico posterior, além da dificuldade técnica em se realizar certas operações de soldagem contribuir para a maior dificuldade de obtenção de equipamentos pouco confiáveis, sendo que o aumento da confiabilidade está relacionado com o aumento do custo de fabricação, associado à necessidade da qualificação dos processos de soldagem e dos próprios soldadores que os executarão.

### **3.2.5 - Erros de Montagem / Instalação**

Tais erros estão relacionados quase sempre à ocorrência de erro humano. Pode ocorrer na montagem e instalação de qualquer tipo de peça ou equipamento, sendo freqüentes os exemplos de falhas na montagem de mancais de rolamentos (impacto, impurezas e uso de ferramentas e especificações inadequadas na substituição dos rolamentos), ajuste inadequado das folgas de peças móveis, parafusos frouxos ou apertados com excesso de torque, desalinhamento na montagem de eixos e mancais, tubulações apoiadas nos bocais e conexões e inúmeras outras situações. Este tipo de erro pode ser evitado com a adoção de procedimentos documentados e padronizados, treinamento e qualificação de ajustadores, mecânicos e montadores e realização de auditorias.

### **3.2.6 - Condições de Operação / Manutenção Inadequadas**

A operação do equipamento em condições severas de velocidade, carga, temperatura e ação química aliada à ausência ou inadequação de monitoramento e manutenção contribui fortemente para a ocorrência de falhas, risco mais elevado à medida em que as condições de operação se tornam mais severas que a condição de projeto, como cita EBELING (1997).

Alguns problemas relacionados a este aspecto são :

- partida do equipamento : condição especialmente crítica, pois o mesmo fica sujeito a condições muito diferentes daquelas de sua operação normal, tais como mudanças bruscas de velocidade, gradientes severos de temperatura, variação no valor da corrente elétrica e outras condições transitórias;

- parada do equipamento, pois as variações citadas acima também podem ser verificadas, além dos problemas relacionados à conservação do bem enquanto este estiver inativo;
- manutenção inadequada : de grande interesse para este trabalho, já que a execução da manutenção de forma imperfeita amplifica os riscos já existentes e pode introduzir outras possibilidades da ocorrência de eventos indesejáveis. A manutenção deve ser planejada e executada de forma rigorosamente técnico-científica e sempre ser auditada para avaliação constante de sua contribuição às operações da organização.
- erros de operação : seja pela inexistência ou inadequação de procedimentos padronizados, falta de treinamento e/ou negligência, tais erros sempre podem acontecer, o que deve ser levado em consideração inclusive pela manutenção. Às vezes fáceis de serem constatados, tais erros são de difícil eliminação, pois a inadequação de procedimentos pode envolver a reavaliação de todos os processos da organização. Em geral, pode-se minimizá-los, mas do ponto de vista da manutenção, tais erros serão sempre uma fonte de falhas aleatórias (não a única).

### **3.3 – Falhas em Elementos de Máquinas**

A operação de máquinas envolve esforços, contato entre elementos, movimentos relativos entre eles e mais uma série de fenômenos que causam a degradação do componente, ou seja, por melhor que tenha sido seu projeto e sua fabricação, este elemento terá uma vida útil pré-definida. A preocupação deve estar em assegurar que, em operação de acordo com as variáveis previstas em projeto, o item desempenhe suas funções com segurança dentro do período conhecido como vida útil.

Assim, a degradação do elemento pode ser compreendida como o resultado da ação dos modos de falha associados a este, modos estes basicamente relacionados à sua natureza

(se mecânico, estrutural, hidráulico, pneumático e outros) e às condições de uso, sobretudo solicitações usuais.

Modos de falha são os mecanismos que levam um elemento a atingir o fim de sua vida útil. Em termos de componentes mecânicos, os modos de falha mais usuais são:

- o **desgaste** : este modo de falha está relacionado a superfícies que possuam movimento relativo entre elas, o que, em virtude da rugosidade destas, ocasiona a retirada progressiva de material das peças, alterando suas dimensões e características funcionais, sendo responsável por problemas como vazamentos, vibrações, folgas e alguns tipos de desalinhamento de eixos. Há um cuidado a ser tomado em termos de identificar o desgaste, pois este pode ser erroneamente confundido com a fadiga de contato, cujos efeitos são parecidos, mas se tratam de fenômenos diferentes. Enquanto o desgaste se processa uniforme ainda que seja sobre uma área específica do elemento, a fadiga de contato se observa em pontos localizados. Uma das causas mais frequentes de desgaste prematuro é a lubrificação deficiente e este aspecto deve ser cuidadosamente controlado na operação de um equipamento mecânico;
- **falha por escoamento** : os componentes mecânicos, durante sua utilização, estão projetados para operarem na região elástica, onde as deformações são diretamente proporcionais à tensão aplicada e reversíveis, ou seja, cessada a ação do carregamento, o componente não apresenta qualquer alteração dimensional. Entretanto, como será visto mais adiante, algumas regiões do componente podem estar sujeitas a tensões maiores que as observadas na maior parte do corpo. Eventualmente, estas tensões podem ultrapassar o limite de escoamento do material de que são manufacturados. O elemento poderá sofrer deformação permanente ou até mesmo ruptura, pois à medida em que se deforma, a secção transversal (importante característica para a avaliação da resistência do

componente) modifica seu formato e a tensão aumenta sem que os esforços se alterem, levando a um desfecho catastrófico. Componentes que operem em temperaturas altas – sobretudo os metálicos – devem ter seu projeto cercado de precauções para evitar a falha por escoamento, pois a temperatura tem efeito negativo sobre a resistência do material (não se levando em consideração possíveis efeitos de alívio de tensões residuais pelo calor);

- **fadiga** : a falha por fadiga é resultado da variação na magnitude das tensões atuantes no elemento de uma forma cíclica, de frequência constante ou não, ao longo da vida útil do componente, o que causa a nucleação de uma trinca, a qual progride até que o material não tenha seção transversal suficiente para suportar os esforços aplicados e se rompe. Tensões de magnitude variável causam um efeito de “abrir e fechar” da trinca e a cada novo ciclo de carregamento a trinca cresce um pouco mais, especialmente se os valores da tensão variarem significativamente e mantiverem tensões de tração. É o mecanismo de falha mais complexo que acomete componentes mecânicos e por esta razão é critério de projeto da maioria deles. Uma trinca de fadiga possui três fases distintas : a nucleação, o crescimento estável e a propagação instável. Há grandes controvérsias sobre qual destas fases é a predominante, pois isto depende do material, da magnitude das tensões e da geometria do componente, mas uma coisa é certa : a fase de propagação instável é rápida o suficiente para que nenhuma ação para evitar a ruptura do elemento possa ser tomada. Materiais dúteis podem ter nucleação e mesmo a propagação estável demoradas, pois a deformação plástica retarda a abertura da trinca. Porém, estes fenômenos ocorrem sob tensões de menor magnitude se comparadas a materiais que tendem a apresentar fratura frágil. Nos materiais que tendem a apresentar fratura frágil (os mais duros) a propagação é especialmente rápida. É muito difícil detectar a trinca em sua fase de nucleação pois suas dimensões são microscópicas e a taxa de crescimento é lenta. As trincas já são detectadas

na fase de crescimento estável e existe a perigosa situação de que suas dimensões possam estar perigosamente próximas do tamanho onde se observa a transição para a fase de propagação, conhecida como tamanho crítico de trinca (FUCHS e STEPHENS, 1980 e CARDOSO 2000). Uma forma interessante de fadiga é a **fadiga de contato**, como a observada em rolamentos e flancos de dentes de engrenagens. Elementos que possuam movimento de rotação relativos entre si e estejam em contato, sujeitam seu material a tensões tangenciais e normais de magnitude variável (já que em contato a tensão está atuando e, quando cessa o contato, o valor da tensão é zero). As tensões tangenciais experimentam seus valores mais elevados abaixo da superfície do material e a variação da magnitude das tensões, em razão da variação do ponto de contato durante o rolamento, causa a ruptura de pequenas porções do material abaixo da superfície. Não tendo substrato, o material é removido, com efeitos semelhantes ao desgaste. Porém, o desgaste significa a remoção constante e um tanto uniforme de material, enquanto a fadiga representa o arrancamento de material após um certo número de ciclos. Por sinal, a vida em fadiga é definida, para qualquer elemento, em número de ciclos, sendo ciclo compreendido como o intervalo no qual a tensão atuante assume seus valores extremos (máximo e mínimo). Note-se que, os valores destas tensões podem ser ambos negativos (de compressão), ambos positivos (de tração), um deles pode ser nulo, um pode ser positivo outro negativo, enfim, qualquer combinação destes valores de acordo com o serviço a que está sujeito o elemento.

- **deformações excessiva ainda no regime elástico (falhas de rigidez)** : alguns elementos têm sua vida útil e operacionalidade governada pela deformação admissível no regime elástico. Em alguns casos, elementos tais como eixos de máquinas de precisão como aquelas encontradas numa linha de montagem de telefones celulares, necessitam, além de suportarem um carregamento especificado, defletirem-se menos que certos valores, ou

seja, seu projeto deve verificar a rigidez do elemento. Assim, o mesmo pode sobreviver a fadiga ou ao escoamento, mas se vier a apresentar deflexão excessiva quando solicitado à carga de trabalho especificada em projeto, configura-se sua falha;

- **ruptura** : nenhum projetista dimensionaria seus componentes para operarem acima das tensões admissíveis, tanto de escoamento quanto de limite de resistência à tração, mas devido à concentração de tensões em alguns pontos como entalhes e reentrâncias, as tensões atuantes nestes pontos da peça podem alcançar valores perigosos, podendo ultrapassar os valores admissíveis, causando a imediata ruptura do componente. Outra situação em que a falha por ruptura deve ser prevista é a de elementos que operem sob impacto, quando os esforços podem facilmente superar os valores admissíveis, considerados no critério de projeto.

A prática tem demonstrado que grande parte das falhas de componentes mecânicos de máquinas estão associadas basicamente a eixos, mancais (sobretudo os de rolamento) e elementos de transmissão, notadamente, engrenagens.

É interessante tecer a seguinte consideração a respeito das engrenagens, as quais são elementos sempre cruciais na operação de sistemas mecânicos e a respeito dos quais este trabalho dedica atenção : SHIGLEY (1989) afirma que há mais de 30 mecanismos de falha nos dentes das engrenagens, mas, basicamente, estes se manifestam como ruptura por fadiga na raiz do dente e fadiga de contato nos flancos dos mesmos. Segundo este mesmo autor, além de WANG et al. (1999), os problemas de falhas em engrenagens, excetuando-se a deficiência na lubrificação e sobrecargas, se relacionam ao projeto inadequado das transmissões. O autor deste trabalho já teve a oportunidade de verificar a necessidade de redimensionar redutores onde as relações de transmissão dos pares eram compostas por números inteiros, condição sabidamente prejudicial à vida das engrenagens, quer em termos de fadiga de contato ou de flexão (raiz do dente). Isto porque, devido às tolerâncias de

fabricação das engrenagens, há pequenas variações no passo entre os dentes, o que causa choques durante o engrenamento. No caso de relações de transmissão inteiras, estes choques ocorrerão em períodos fixos para um mesmo par de dentes, excitando vibrações que podem atingir um dos harmônicos do dente, alcançando valores suficientes para que a falha por fadiga, principalmente, seja acelerada. A geração de ruídos muito intensos também é um subproduto de relações de transmissão mal escolhidas. Se for inevitável esta condição, o acabamento dos flancos dos dentes deve ser refinado.

### **3.3.1 – Relação entre Critérios de Projeto e Probabilidade de Falha de Componentes Mecânicos**

É notória a influência das solicitações de serviço sobre as falhas de um componente (seja ele de que natureza for) e, por extensão, sobre as falhas de um equipamento.

Por esta razão, os critérios de projeto visam lidar com a necessidade de manter tão afastadas quanto possível tais solicitações da resistência do material empregado na fabricação e/ou construção de um componente, sobretudo os componentes mecânicos e estruturais.

A idéia central é que, observando-se que a resistência mecânica de um componente tenha sempre valor maior que o valor da solicitação de serviço, seja mantida uma distância entre estes valores - de preferência observando que tais grandezas estão sujeitas a dispersões, como afirma SHIGLEY (1989) – assegurando-se que, para condições de serviço **conhecidas** e tolerando sobrecarga dentro de limites especificados e por breve período (ou seja, sobrecarga acidental e não contínua) as solicitações previstas em projeto não ocasionarão falha antes da vida útil do item pois a confiabilidade do componente é assegurada pela aplicação dos critérios de projeto, como em LEITCH (1995) e KECECIOGLOU (1991 e 1996).

Analicamente, as considerações destes critérios a respeito do confronto entre resistência e solicitações pode ser vista nas formulações para o cálculo das dimensões mínimas de determinados componentes como os diâmetros de eixos ou para seleção e verificação de mancais de rolamento e engrenagens, entre outros exemplos.

Inicialmente, estes critérios (o que inclui as normas técnicas de projeto de componentes) analisam o carregamento quanto à intensidade, direção, alternância ou variações de magnitude, tipo de serviço prestado e outros fatores, introduzindo coeficientes nas formulações acima citadas. Em se tratando de componentes mecânicos, sujeitos à movimentação, tem-se na maioria dos casos solicitações dinâmicas, ainda que não haja variações no valor do carregamento e, por conseguinte, na solicitação de serviço, tendo-se como exemplo típico um eixo submetido à flexo-torção com torque e carregamento transversal de magnitudes constantes.

Sendo os mais numerosos itens encontrados em máquinas, as formulações dos critérios de projeto são expostas a seguir para eixos, engrenagens e mancais de rolamento, sem destacar ou dar preferência a nenhum critério ou norma específica, ainda que, quando for necessário, recorra-se à formulações de determinados critérios.

### **3.3.1.1 – Formulação para o Cálculo de Eixos**

Os critérios para o dimensionamento de eixos lidam com o tipo de material, de carregamento e alguns tipos de incertezas para a determinação do diâmetro mínimo das seções do componente para que o mesmo resista às solicitações previstas, tendo como modo de falha a ser combatido a fadiga. Costuma-se, antes de qualquer cálculo, especificar o material a ser utilizado na fabricação do eixo e nem só fatores de resistência influenciam nesta escolha, mas

fatores relacionados à fabricação do eixo, tais como a possibilidade de submeter o material a tratamento térmico específico para alcançar determinada dureza, usinabilidade, possibilidade da obtenção de acabamentos superficiais diferenciados e outras, contribuem para esta escolha, o que, em parte explica a seleção do material antes de se efetuar o dimensionamento propriamente dito. Desta forma, para critérios como o da ASME (sigla de *American Society of Mechanical Engineers*), o dimensionamento torna-se um problema de definir o diâmetro mínimo da seção calculada além de detalhe da geometria dos entalhes, como os raios das concordâncias para os ressaltos (mudanças de diâmetro das seções).

Para efeitos de exemplo, a equação 3.1 mostra a formulação baseada no critério de GOODMAN para considerar o efeito da tensão média, como em NORTON (1998) e SHIGLEY (1989), para o cálculo do diâmetro de um eixo.

$$d = \left[ \frac{32\eta_f}{\pi} \left[ \frac{\sqrt{\left( K_{fm}M_a + K_{fa} \cdot d \cdot \frac{F_a}{8} \right)^2 + \frac{3}{4} (K_{ft}T_a)^2}}{S_f} + \frac{\sqrt{\left( K_{fm}M_m + K_{fa} \cdot d \cdot \frac{F_m}{8} \right)^2 + \frac{3}{4} (K_{ft}T_m)^2}}{S_{ut}} \right] \right]^{\frac{1}{3}} \quad (3.1)$$

onde :

$F_a$  – magnitude da amplitude da força axial com variação cíclica;

$F_m$  – magnitude do valor médio da força axial;

$M_a$  – magnitude da amplitude do momento fletor com variação cíclica;

$M_m$  – magnitude do valor médio do momento fletor;

$T_a$  – magnitude da amplitude do momento torsor com variação cíclica;

$T_m$  – magnitude do valor médio do momento torsor;

$K_{fm}$  – fator de concentração de tensões à flexão;

$K_{fa}$  – fator de concentração de tensões à força axial;

$K_{ft}$  – fator de concentração de tensões à torção;

$S_f$  – limite de fadiga do material do eixo;

$S_{ut}$  - limite de resistência à tração do material do eixo;

$d$ - diâmetro do eixo e

$\eta_f$  – coeficiente de segurança.

A confiabilidade exigida para o componente está embutida no cálculo do parâmetro  $S_f$ , representando a magnitude da tensão cíclica para a qual não ocorre falha por fadiga, que significa limite de resistência à fadiga determinado para um número de ciclos de carregamento específico ( $10^7$  para o caso do alumínio) para materiais que não possuam um patamar na curva S-N, como cita SHIGLEY (1989). A equação 3.2 mostra como calcular esta tensão.

$$S_f = C_{load} \cdot C_{size} \cdot C_{surf} \cdot C_{temp} \cdot C_{reliab} \cdot S_{f'} \quad (3.2)$$

O valor  $S_f$  é o limite de fadiga obtido através da execução de experimentos com corpos de prova.

O coeficiente  $C_{reliab}$  expressa a confiabilidade em serviço do eixo a ser projetado, fornecendo uma maior segurança no cálculo da tensão, pois a curva S-N apresenta uma dispersão dos valores das tensões em função do número de ciclos, o que poderia ocasionar a falha em serviço para valores de tensão abaixo da admissível para o componente. A Tabela 3.1 mostra os valores deste fator para a confiabilidade pretendida.

Tabela 3.1 – Valores de  $C_{reliab}$ , (NORTON, 1998)

Confiabilidade Pretendida (%)	$C_{reliab}$
50	1
90	0,897
99	0,814
99,9	0,753
99,99	0,702
99,999	0,659

As demais correções associadas aos parâmetros influentes no cálculo de eixos à fadiga, tais como os ligados ao acabamento superficial, dimensões, temperatura e tipo de carregamento são modeladas por meio da adoção dos respectivos coeficientes  $C_{surf}$ ,  $C_{size}$ ,  $C_{temp}$  e  $C_{load}$ . O cálculo do diâmetro do eixo também introduz um fator de segurança,  $\eta_f$ , que consiste numa forma de afastar a tensão efetiva do limite de fadiga do material, o que é uma primeira diretriz para a seleção deste ou, de outra forma, a partir de uma material fixo, dimensionar o eixo.

Também são introduzidos fatores de concentração de tensões, pois alterações na geometria ao longo do comprimento do eixo (tais como as relacionadas com escalonamentos, presença de rasgos, roscas e furos) introduzem concentração de tensões, fazendo com que possa ocorrer um valor de tensão localizado muito superior à tensão atuante no restante do corpo. Na equação 3.1, tais fatores são identificados pelo símbolo  $K$  (sendo os índices  $f$  para solicitações de flexão e  $t$  para torção, além de  $m$  para valores médios e  $a$  para valores alternados).

Uma outra característica dos critérios pode explicar a adoção de coeficientes ou fatores de segurança : muitos dos valores envolvidos são extraídos de procedimentos experimentalmente determinados e, por esta razão, sujeitos à aproximações e erros, além das dispersões associadas aos valores do carregamento e da resistência do material utilizado na fabricação do componente.

Há critérios de dimensionamento de eixos à rigidez, sobretudo no caso de máquinas de precisão, onde deformações devem ser controladas. Contudo, nos casos em que se aplica tal critério de dimensionamento, não deve ser descartada a verificação à fadiga.

### **3.3.1.2 – Formulação para o Dimensionamento de Engrenagens**

O procedimento de cálculo de engrenagens é sempre bastante laborioso, não importando o critério adotado. E como o desempenho destes componentes (sempre dimensionado aos pares) é dependente de uma série de fatores, tais como qualidade de montagem, rigidez dos eixos e mancais, velocidades tangenciais, tipo de carregamento e outras, há bastante fatores de correção a serem considerados.

Com relação à natureza das tensões que solicitam as engrenagens em serviço, as mesmas devem ser consideradas cíclicas, ou variáveis ao longo do tempo, uma vez que a força atuará no dente da engrenagem apenas quando este estiver em contato com um dente da outra engrenagem que forma o par, ou seja, ao longo de uma revolução da engrenagem, em apenas uma parte do tempo haverá força atuante em um dente específico. A existência de forças de natureza cíclica induz a ocorrência do fenômeno da fadiga do dente da engrenagem.

No caso da ação da tensão de flexão, o fenômeno de fadiga é fisicamente percebido pela presença de uma trinca na raiz (ou pé) do dente.

No caso da ação da tensão de contato, o fenômeno de fadiga é fisicamente

representado pela ruptura localizada de pontos na superfície dos flancos dos dentes da engrenagem, formando pequenas crateras, semelhantes aos pites observados no processo de corrosão.

As normas técnicas que regem o projeto de uma engrenagem, apresentam formulações destinadas ao cálculo da tensão máxima induzida pelo contato entre os dentes da engrenagem, na raiz (ou pé) e na face do dente. Estas formulações são baseadas em análises teórico/experimentais e na experiência em projetar engrenagens da própria entidade normalizadora.

O critério AGMA (da *American Gear Manufacturers Association*) indica as seguintes equações para o cálculo das tensões atuantes nos dentes das ECDR – Engrenagens Cilíndricas de Dentes Retos ou ECDH – Engrenagens Cilíndricas de Dentes Helicoidais.

- Tensão de Flexão ( $\sigma_f$ ) :

$$\sigma_f = W_t \cdot \frac{k_a}{k_v} \cdot \frac{1}{F \cdot m} \cdot \frac{k_s \cdot k_m}{J} \quad (3.3)$$

sendo

- $W_t$  = força tangencial atuante no dente da engrenagem;
- $F$  = largura do dente da engrenagem;
- $m$  = módulo da engrenagem;
- $J$  = fator de geometria do dente;
- $k_a$ ,  $k_v$ ,  $k_s$ , e  $k_m$  são fatores de correção descritos na sequência deste texto.

O fator  $k_a$ , denominado **fator de aplicação**, considera o aumento do carregamento

sobre o dente em função da possibilidade de ocorrência de vibrações ou carregamento de choque durante a operação da máquina, o que pode majorar o valor de  $W_t$  empregado no dimensionamento. Deve ser selecionado pelo projetista em função da aplicação específica da engrenagem.

O fator  $k_v$ , denominado **fator dinâmico**, tem por objetivo considerar o fato de que os dentes da engrenagem, quando do engrenamento, se tocam com algum grau de impacto, elevando o valor da carga  $W_t$  empregada no dimensionamento. Este fator é dependente da velocidade tangencial das engrenagens e da qualidade do acabamento superficial das mesmas. Tal fator, tanto para ECDR como para ECDH é definido pela relação expressa pela equação 3.4.

$$k_v = \left[ \frac{A}{A + (200 \cdot V)^{0.5}} \right]^B \quad \text{para } V \text{ em } \frac{m}{s} \quad (3.4)$$

onde  $v$  é a velocidade tangencial calculada no círculo primitivo da engrenagem, sendo  $A$  uma constante calculada conforme as seguintes relações :

$$A = 50 + [56 \cdot (1 - B)] \quad (3.5)$$

e

$$B = \frac{(12 - Q_v)^2}{4} \quad (3.6)$$

Na equação 3.6,  $Q_v$  expressa o **fator de qualidade de fabricação** das engrenagens, sendo referido por valores numéricos. Para  $Q_v$  variando entre 3 e 7, tem-se a maioria das

engrenagens encontradas comercialmente. As classes 8 a 12 são consideradas engrenagens de precisão.

O fator  $k_s$ , denominado **fator de tamanho**, está relacionado com a uniformidade da distribuição de carga ao longo de toda a largura do dente, já que no dimensionamento, esta é considerada uniforme. Este fator é usualmente **unitário**, exceto para engrenagens de largura muito pequena ou muito elevada.

Já o fator  $k_m$ , denominado **fator de distribuição de carga**, tem por objetivo expressar a variação do carregamento em função da **qualidade de montagem** do eixo no redutor, a qual é função do alinhamento, da rigidez dos mancais e das folgas de montagem. A Tabela 3.2 traz indicações para os valores de  $k_m$ .

Tabela 3.2 – Fator  $k_m$  para ECDR e ECDH (SHIGLEY,1989)

Tipo de Montagem	Largura do Dente (F) em mm			
	≤ 50	150	225	≥ 400
Montagem precisa, reduzida folga nos mancais pouca deflexão nos eixos, engrenagens de precisão	1,3 (1,2)	1,4 (1,3)	1,5 (1,4)	1,8 (1,7)
Montagem pouco rígida, engrenagens pouco precisas contato ao longo de toda a largura da face do dente	1,6 (1,5)	1,7 (1,6)	1,8 (1,7)	2,0 (2,0)
Contato não se dá ao longo de toda a largura do dente	> 2,0 (> 2,0)			

Obs. : Os números entre parênteses são indicados para ECDH

O fator de **geometria do dente** é apresentado sob a forma de gráficos, para ECDR e ECDH. As normas AGMA apresentam uma série de gráficos, em função de características

específicas da geometria do dente, gráficos estes que podem ser obtidos consultando-se NORTON (1998).

i) Tensão de Contato ( $\sigma_c$ )

$$\sigma_c = C_p \sqrt{W_t \cdot \frac{C_a}{C_v} \cdot \frac{1}{F \cdot d} \cdot \frac{C_s \cdot C_m}{I}} \quad (3.7)$$

onde

- $C_p$  = coeficiente elástico, dependente dos materiais empregados na fabricação do pinhão e da coroa;
- $d$  = diâmetro primitivo do pinhão;
- $I$  = fator de geometria e
- $C_a$ ,  $C_v$ ,  $C_s$  e  $C_m$  são os mesmos fatores de correção empregados no cálculo da tensão de flexão.

O coeficiente elástico ( $C_p$ ) é calculado em função dos materiais empregados na fabricação de um par de engrenagens, sendo expresso pela equação 3.8.

$$C_p = \sqrt{\frac{1}{\pi \cdot \left[ (1 - \nu_p^2) \cdot \frac{1}{E_p} + (1 - \nu_g^2) \cdot \frac{1}{E_g} \right]}} \quad (3.8)$$

onde

- $E$  = módulo de elasticidade;
- $\nu$  = coeficiente de POISSON
- os subscritos  $p$  e  $g$  referem-se, respectivamente, ao pinhão (*pinion*) e à coroa (*gear*).

O fator de geometria ( $I$ ), para ECDR, é calculado pela relação expressa pela equação 3.9.

$$I = \frac{\cos \alpha \cdot \sin \alpha}{2} \cdot \frac{i}{i+1} \quad (3.9)$$

sendo  $i$  a relação de redução.

Para ECDH, devem ser consultados valores tabelados nas normas AGMA.

O critério de projeto AGMA – NORTON (1998) e SHIGLEY (1989) - das engrenagens envolve a comparação das tensões de flexão e contato atuantes no dente com a resistência à fadiga do material empregado na fabricação da engrenagem, sendo que as primeiras devem ser inferiores à resistência mecânica dos materiais.

A resistência à fadiga com relação à sollicitação de flexão difere da resistência à fadiga com relação à tensão de contato, já que a dureza do material na superfície do dente é mais elevada que a dureza do material no seu núcleo, a fim de proporcionar uma elevada resistência ao desgaste.

A resistência à fadiga é expressa em **ábacos**, considerando uma vida de  $10^7$  ciclos de carregamento, correspondendo a  $10^7$  contatos do flanco do dente. A confiabilidade na determinação desta tensão é de 99%.

Tanto a resistência à fadiga de flexão como de contato podem ser corrigidas para considerar condições diferentes das acima citadas, sendo empregadas as seguintes relações :

- Tensão limite de fadiga de flexão ( $\sigma_{fall}$ )

$$\sigma_{fall} = S_f \cdot \frac{k_l}{k_r} \quad (3.12)$$

onde  $S_f$  = limite de resistência à fadiga de flexão indicado por norma;

$k_l$  = fator de correção para vida e

$k_r$  = fator de correção para confiabilidade.

Também no dimensionamento de engrenagens devem ser utilizados fatores de segurança, calculados pela relação entre a tensão admissível e a tensão atuante na engrenagem, sendo estes definidos para as falhas por fadiga de flexão ou contato. Como no caso dos eixos, estes fatores expressam incertezas com relação às formulações e aos dados empregados nas mesmas, quando do dimensionamento de um par de engrenagens.

- Tensão limite de fadiga de contato ( $\sigma_{call}$ )

$$\sigma_{call} = S_c \cdot \frac{C_l}{C_r} \quad (3.12)$$

onde  $S_c$  = limite de resistência à fadiga de contato indicado por norma;

$C_l$  = fator de correção para vida e

$C_r$  = fator de correção para confiabilidade

### 3.3.1.3 – Formulação para a Seleção de Mancais de Rolamentos

O equacionamento para seleção de mancais de rolamentos, bem como os estudos sobre a confiabilidade de tais elementos, é um procedimento que se encontra em um patamar bastante avançado, até porque, quase nenhum sistema mecânico pode prescindir deles.

Como exemplo, tem-se um motor de combustão interna, o qual pode não possuir um único mancal de rolamento, mas sua operação não seria possível sem os sistemas acessórios tais como bombas de óleo e de água, alternador e outros, os quais têm sempre mancais de rolamento suportando seus eixos e rotores.

Os mancais de rolamento, como qualquer componente mecânico submetido à ação de carregamento cíclico, apresentam falha por fadiga. O número de revoluções necessárias para a ocorrência de falha por fadiga, sob ação de uma carga radial de magnitude constante é denominado vida do rolamento.

Tendo em vista a complexidade da distribuição de tensões nos elementos do rolamento (pistas interna e externa e elemento rolante), a vida dos rolamentos é definida através de ensaios com os próprios elementos.

Nestes ensaios, um grupo de rolamentos, de mesmas características (mesmo tipo e dimensões) é submetido a um ensaio de fadiga, o qual consiste em aplicar nos rolamentos uma carga radial de magnitude constante, e estes são colocados para girar, em rotação constante, até que ocorra a falha por fadiga dos mesmos, sendo anotado o número de ciclos de operação (número de revoluções) que cada um dos elementos ensaiados suporta até a ocorrência da falha.

Este número de revoluções, ou ciclos de carregamento, define a vida individual de cada um dos elementos do grupo submetido ao ensaio. Porém é impossível definir a vida individual de cada rolamento produzido por uma empresa. Desse modo, a partir dos resultados

experimentais, os fabricantes definem a vida útil, ou simplesmente vida, para todos os rolamentos similares (de mesmo tipo e dimensões) aos rolamentos ensaiados.

Os fabricantes de rolamento, visando a obtenção de uma maior uniformidade dos dados referentes à vida de diversos grupos de rolamento, definem a vida nominal dos mesmos como sendo  $10^6$  (um milhão) de revoluções, em conformidade com os requisitos da norma ISO. A capacidade de carga dinâmica ( $C$ ) expressa a carga radial que permitirá ao rolamento atingir a vida nominal acima definida.

De forma geral, ao aplicar-se um rolamento para o valor exato da carga de projeto constante em catálogo, sujeita-se o mesmo à chamada “*rating life*” ou, como nos catálogos de fabricantes tais como a SKF,  $L_{10}$ , cujo significado é a vida sob determinada carga para a qual a probabilidade de falha é de 10%. Nos catálogos dos fabricantes de rolamentos, são apresentadas as dimensões de cada rolamento e sua capacidade de carga dinâmica. Nesta situação, pode-se afirmar que, sob ação desta carga, 90% de um grupo de rolamentos iguais, submetidos à mesma condição de ensaio, consistindo na ação de uma carga radial de magnitude igual à da carga dinâmica, alcançarão ou ultrapassarão a vida nominal de  $10^6$  revoluções. Além da carga, deve-se atentar para o fato de que os fabricantes limitam as velocidades de rotação dos rolamentos, de forma que esta característica é também uma restrição à aplicação destes elementos.

Quando os rolamentos giram a rotações muito baixas, ou apresentam movimentos lentos de oscilação ou mesmo ficam estacionários sob ação de carga durante longos períodos de tempo, estes têm a sua capacidade de carga expressa em termos da capacidade estática ( $C_0$ ). Esta capacidade estática é definida como sendo a carga estática que causa uma deformação permanente no corpo rolante e/ou nas pistas com magnitude igual a  $[(10^{-4}) \times (\text{diâmetro do corpo rolante})]$ .

No processo de seleção de um mancal de rolamento específico, deve-se verificar qual o rolamento que, quando submetido à carga prevista no projeto do dispositivo, apresente a vida nominal especificada como requisito de projeto do mesmo, a qual não necessariamente é igual a utilizada para definição da capacidade de carga dinâmica ( $C$ ), ou seja,  $10^6$  revoluções.

Dessa forma, deve-se utilizar uma formulação que relacione a vida do rolamento com a carga atuante sobre o mesmo, Esta relação é uma equação exponencial, similar a uma curva  $S-N$  empregada para representar a resistência à fadiga dos materiais, já que o processo de falha do rolamento é regido pelo fenômeno de fadiga.

A determinação da vida nominal é executada com o emprego da seguinte relação:

$$L_{10} = \left( \frac{C}{P} \right)^3 \quad (3.12)$$

onde  $L_{10}$  ... vida nominal do rolamento em milhões de revoluções;

$C$  ... capacidade de carga dinâmica;

$P$  ... carga dinâmica equivalente atuante sobre o rolamento;

$p$  ... expoente, dependente do tipo de rolamento:

$$p = \frac{10}{3}, \text{ para rolamentos de rolos}$$

$$p = 3, \text{ para rolamentos de esferas}$$

A vida nominal do rolamento também pode ser expressa em horas de operação, com o emprego da seguinte relação:

$$L_{10h} = \frac{1000000}{60n} \left( \frac{C}{P} \right)^p \quad (3.13)$$

onde  $L_{10h}$  ... vida nominal do rolamento em horas;

$n$  ... rotação do rolamento, em rpm.

O equacionamento para seleção de mancais de rolamento serve de suporte para a seleção de elementos como as guias lineares, presentes em máquinas que exijam precisão de movimentação e posicionamento, tais como posicionadores para indústria eletrônica e máquinas-ferramenta de precisão, já que o princípio de funcionamento e os modos de falha são muito similares.

Há que se notar o fato de mancais de rolamentos e guias lineares, além dos fusos de esferas recirculante, serem elementos padronizados em termos de dimensões, materiais e aplicações, ou seja, o projeto se adequa aos componentes encontrados no mercado. Desta forma, ao projetista cabe a tarefa de assegurar, nas fases de projeto (dimensionamento e seleção) e fabricação prover as condições para que a confiabilidade destes componentes em uso seja aquela especificada nos catálogos e normas, prevendo correta refrigeração e lubrificação, especificando as tolerâncias adequadas, estimando corretamente as cargas e prevendo sobrecargas condizentes com a aplicação (embora estas cargas sejam imprevistas em muitos casos) e informando como deve se dar a manutenção destes itens quando for o caso. Enfim, deve-se garantir que o projeto reúna condições para receber um tipo de mancal ou guia disponível e que seu desempenho se dê sob a confiabilidade especificada.

De modo geral, estes critérios de projeto e seleção se repetem para outros itens normatizados, tais como parafusos, uniões por rebites e soldadas e elementos de estruturas metálicas, uma vez que são baseados nos modos de falha de tais componentes, confrontando-os com as solicitações de serviço.

### 3.3.2 – Considerações Sobre os Critérios de Projeto de Elementos de Máquinas

Como já citado ao longo deste capítulo, a idéia central dos critérios de projeto de elementos de máquinas está em afastar os valores das solicitações da resistência mecânica do componente. O que torna esta tarefa mais complexa é o fato de ambos os valores estarem sujeitos à dispersão, como valores do carregamento no caso das solicitações, e variabilidade na composição química, tratamento térmico e microestrutura metalográfica [MONLEVADE (2002)], o que se traduz na variação do valor das propriedades mecânicas do material. Desta forma, não basta apenas afastar os valores médios destas grandezas, pois a dispersão em seus valores pode resultar em uma região onde os valores das solicitações ultrapassem o valor da resistência mecânica do componente, como mostrado na Figura 3.2.

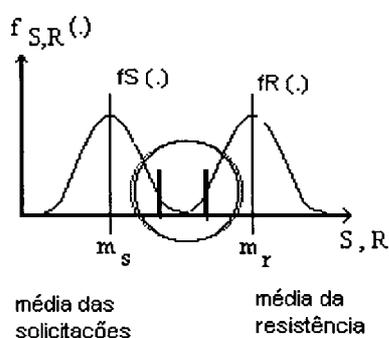


Figura 3.2 – Efeito da Dispersão nos Valores das Solicitações (S) e Resistência (R)

Nesta Figura, tanto a solicitação atuante sobre o elemento mecânico, como a resistência do mesmo são expressas em termos de funções densidade de probabilidade (f), representadas respectivamente pelos símbolos  $f_S(.)$  e  $f_R(.)$ . A representação por meio de uma função densidade de probabilidade indica que estes valores apresentam uma variação estatística, às quais são associadas um valor médio e uma variância.

Na Figura em referência, há uma região onde ocorre a sobreposição das funções densidade de probabilidade da solicitação e do carregamento, a qual indica a região onde a primeira ultrapassa a magnitude do carregamento, ou seja, onde ocorre falha do componente mecânico. Conhecendo-se os parâmetros destas distribuições, é possível calcular estas probabilidades de falha, como citado por SOUZA e AYYUB (2000).

Para melhor compreensão, a Figura 3.3 traz uma ampliação da região inscrita na circunferência, para que se possa visualizar como ocorre a superposição entre os valores das solicitações e da resistência.

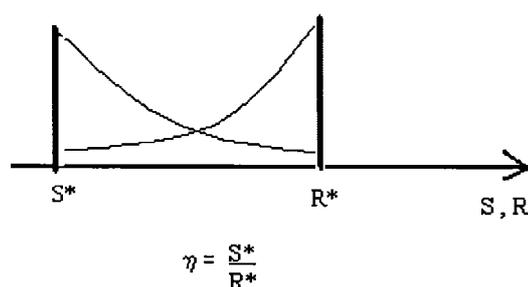


Figura 3.3 – Visão Ampliada da Região de Superposição de Valores da Solicitação e da Resistência

Como estas funções densidade de probabilidade usualmente não são conhecidas quando do dimensionamento dos elementos mecânicos, os critérios de projeto de componentes mecânicos visam lidar com a distância entre o máximo valor da solicitação e o mínimo valor da resistência, a partir do valor majorado da solicitação ( $S^*$ ) – pela adoção de fatores de serviço como aqueles vistos no cálculo de eixos e engrenagens e que majoram o carregamento médio ou de projeto - e minorado da resistência ( $R^*$ ) – adotando-se coeficientes de ajuste como os valores  $k_i$  indicados nos cálculos de eixos e engrenagens. Para executar o

afastamento entre tais valores, estes critérios de projeto adotam um fator de segurança ( $\eta$ ), o qual visa estabelecer uma distância segura entre solicitação e resistência, sem que se determine diretamente a probabilidade de falha, que é função da distribuição estatística das grandezas S e R. Desta feita, a probabilidade de falha devido ao modo considerado em projeto se torna bastante reduzida (minimizada na verdade).

## **4 - CARACTERIZAÇÃO DETALHADA DAS PRÁTICAS DE MANUTENÇÃO**

### **4.1 – Considerações Iniciais**

Este capítulo consiste no levantamento dos recursos necessários tais como, tipo de mão-de-obra, técnicas de manutenção, necessidade de estoques, tempo de intervenção, possibilidade de pré-programação, analisados para cada uma das práticas fundamentais de manutenção usualmente citadas em literatura, as quais são: a manutenção corretiva, a manutenção preventiva e a manutenção preditiva.

De modo introdutório, a manutenção corretiva se caracteriza pela intervenção após a falha e, por esta razão, há perda de capacidade do equipamento realizar suas funções e até mesmo sua paralisação total até que a falha seja reparada, o que, não raro, envolve a substituição de componentes.

A prática de manutenção preventiva, muito difundida nos meios industriais e nas demais atividades econômicas, se caracteriza por intervenções regulares a períodos fixos, executando tarefas pré-determinadas. Isto se traduz na necessidade do conhecimento dos modos de falha mais freqüentes e, principalmente, da periodicidade com que suas falhas ocorrem. Estes requisitos impõem, por sua vez, restrições aos tipos de equipamentos passíveis de serem tratados por esta prática, em que pese a sensação de segurança que a adoção desta modalidade de manutenção proporciona.

A manutenção preditiva está associada ao emprego de técnicas de monitoramento para o controle da evolução do valor de parâmetros vitais do equipamento, tais como vibrações em

mancais e rotores, temperatura e composição química de óleos e, com base nesta evolução, infere-se o momento da parada do equipamento, quando a ação a ser tomada será corretiva.

## 4.2 – Práticas Básicas de Manutenção : a Abordagem da Confiabilidade

A confiabilidade é um conceito que influencia não apenas o processo produtivo, mas que possibilita à manutenção tomar decisões técnicas e gerenciais e por isso sua utilização na definição das estratégias de manutenção tem tomado impulso, porém, às vezes de maneira incorreta. Portanto, esta seção é dedicada à definição deste conceito e à apresentação do tratamento dado ao fenômeno da **falha** (juntamente com seus conceitos associados como taxa de falhas, modos de falhas e evolução temporal da taxa de falhas), o qual é o objeto de trabalho da manutenção, e como estas falhas devem ser atacadas visando assegurar altos níveis de confiabilidade durante a vida operacional do equipamento.

### 4.2.1 – Definições Acerca da Confiabilidade

Falou-se até este ponto em confiabilidade e maneiras de atacar as falhas. É momento, então, de formalizar estes conceitos, explorar seu significado para compreender a razão do uso da confiabilidade como critério de manutenção.

Sob diferentes pontos de vista, a **confiabilidade** tem diferentes enfoques, entretanto, há coincidências em tópicos relativos à definição deste termo. Para os civis – indústria em geral, setor de transporte, construção civil e geração de energia - o aspecto segurança é um fator relevante no momento de estabelecer os requisitos de confiabilidade, como citado por LEWIS (1986) e O'CONNOR (1985). No meio militar, evidentemente há a interferência com a vida civil, mas seu primado é o da missão, ou seja, tarefas têm de ser cumpridas custe o que

custar.

Estas nuances aparecem nas definições encontradas na literatura acerca deste conceito, tais como as apresentadas abaixo :

- BRITISH STANDARDS e U.K. ARMY - “é a habilidade de um item executar sua função sob determinadas condições específicas por um período pré-determinado”, definição citada por LEITCH (1995);

- EUROPEAN ORGANIZATION FOR QUALITY CONTROL - “é a medida da habilidade de um produto operar com sucesso, quando solicitado, por um período de tempo pré-determinado e sob condições específicas. É medida como probabilidade”, também citada em LEITCH (1995);

- U.S. Military Handbook - “é a probabilidade de um item executar suas funções sob condições pré-definidas de uso e manutenção, por um período de tempo específico”, como citado por O’CONNOR (1985).

Analisando as definições apresentadas, pode-se notar a ocorrência de pontos em comum :

- desempenho específico é esperado;
- condições de uso devem ser especificadas;
- há um período de tempo para a utilização e para a definição de confiabilidade e
- a confiabilidade é uma grandeza estatística.

A confiabilidade é uma grandeza mensurável a partir da análise estatística da ocorrência do evento falha, cuja definição também merece destaque, por estar envolta em

polêmicas e imprecisões.

**Falha** é o fenômeno que compromete o desempenho ou impossibilita a operação de um item, como definido por MIRSHAWKA (1991) e pela norma ISO-NBR-5462, citada por BRANCO (2000). Sua observação e tratamento estatístico são relevantes para definir a confiabilidade pois a partir desta análise pode-se obter a probabilidade citada em algumas das definições dadas acima, o que é corroborado pela norma ISO-NBR-13533 (1995), da qual os procedimentos para coleta de dados de falhas em campo são aproveitados neste trabalho. É possível notar que considerações envolvendo confiabilidade envolvem necessariamente uma probabilidade de sobrevivência do item em um intervalo de mensuração.

Alguns pontos são merecedores de atenção na determinação da confiabilidade, tais como :

- a função do equipamento, a qual deve ser claramente definida, pois isto permite reconhecer as formas de utilização e eventuais modos de falhar;
- ambiente, sendo um aspecto complexo pois não inclui apenas o meio físico, mas as ações de operação, manutenção, instalações e usuários entre outros e
- o tempo de utilização, o qual pode expressar a severidade de uso imposta ao equipamento.

Ainda sobre as definições de confiabilidade, pode-se notar que todas fazem menção ao tempo de utilização do item. Ou seja, ainda que sob cuidados de operação e manutenção, há um período além do qual o item não pode mais ser utilizado, sua “habilidade em executar tarefas com sucesso” terá findado. O período compreendido entre entrada em operação e retirada definitiva de serviço é conhecido como vida útil, o qual constitui-se em um limite até hoje intransponível para qualquer tipo de sistema que conheçamos.

Sob o ponto de vista da confiabilidade, há três práticas básicas para as ações de manutenção a serem levadas à cabo pela manutenção : a manutenção preventiva, a manutenção corretiva e a manutenção preditiva. Isto porque há implicações relacionadas à natureza do equipamento, suas características funcionais, seus modos de falha e o comportamento temporal de sua taxa de falhas, aspectos que regem a seleção das práticas mais adequadas à manutenção de um sistema ou seus componentes, ou seja, há situações onde uma dada prática é mandatória, outras onde esta mesma prática é condenada. Além disso, cada uma destas alternativas se posiciona perante a ocorrência da falha de uma determinada maneira. Pode-se afirmar que, inicialmente, a prática de manutenção está intimamente relacionada com o **modo de falha** do componente ou sub-sistema.

Observando as máquinas – e itens definidos de acordo com a norma ISO-NBR-5462-94, como citado por BRANCO (2000) - presentes nos diversos setores das atividades econômicas, nota-se que seu funcionamento se dá até que algum evento impeça temporária ou definitivamente sua utilização, em outras palavras, uma falha ocorre.

Assim, lâmpadas e outros artefatos elétricos se queimam, pneumáticos dos automóveis furam, eixos se rompem, estruturas podem sofrer vários graus de danos decorrentes de falhas em seus elementos. Para alguns tipos de componentes, as falhas são causadas por poucos fatores, por vezes, apenas um. Outros componentes podem falhar devido a mais de uma causa. É comum em caso de acidentes aeronáuticos, haver investigações que procuram os motivos primários da queda de uma aeronave e, após estas investigações, haver recomendações de alteração em projetos e operação das aeronaves no mundo todo. Novos projetos se beneficiam do recolhimento destas informações - os modos de falhar dos componentes.

A literatura acerca da confiabilidade apresenta diversas definições para modo de falha como a de O'CONNOR (1985) - "modo de falha é o conjunto de fatores e solicitações às quais um equipamento está sujeito durante sua operação, que o levam a atingir o fim de sua

vida útil". Uma definição mais simples, estabelece que modo de falha é "o mecanismo pelo qual um item falha".

O conceito de modo de falha visa justamente esclarecer que componentes de naturezas diferentes falham por motivos diferentes.

A experiência no trato com os equipamentos possibilitou à engenharia conhecer empiricamente alguns dos modos de falhar como por exemplo a fadiga, sempre presente em componentes mecânicos sujeitos à solicitações de magnitude variável no tempo. Atualmente, a determinação dos modos de falha é feita antes mesmo do produto existir : em sua fase de projeto. Pode-se recorrer à simulação, aos testes de laboratório e de campo com protótipos e até mesmo, projetar componentes impondo seus modos de falhar.

Ainda que se trate de produtos já em operação, a análise do projeto pode revelar prováveis modos de falha. Há ferramentas desenvolvidas especialmente com esta finalidade, a serem estudadas ainda neste capítulo.

O modo de falhar dos componentes é função das solicitações que o mesmo receberá durante sua operação. Entretanto, é possível que haja alterações neste modo de falhar se valores admissíveis forem ultrapassados. Um eixo concebido para resistir à falha por fadiga, o que leva bastante tempo em geral, se mantidas as tensões de projeto, pode falhar por escoamento se for solicitado com tensões acima da tensão limite de escoamento.

Portanto, coerentemente com as definições da confiabilidade de um componente ou equipamento, apresentadas no início deste capítulo, também os modos de falha podem ser determinados com segurança dentro de condições pré-estabelecidas.

Modo da falha é uma informação essencial no estabelecimento das políticas de manutenção a serem aplicadas a um componente ou equipamento, pois juntamente com a

CARDOSO (2004)

caracterização estatística das falhas, fornece diretrizes para a tomada de decisões como a necessidade de substituições periódicas, revisões, monitoração ou mesmo revelar a impossibilidade de adotar medidas anteriores às falhas.

CARDOSO (2000) propõe a existência de quatro tipos básicos de falhas, com relação ao seu comportamento estatístico e ocorrência de sintomas que possibilitem seu diagnóstico antecipado, ou seja, a falha pode apresentar um comportamento que permita associar à mesma uma função densidade de probabilidade – quando pode ser classificada como falha não aleatória, principalmente porque, neste caso, é possível conhecer o modo de falha que a governa - permitindo o acompanhamento de seu histórico por meio de funções – deixando até imprópriamente de serem classificadas como aleatórias – e, ainda, a falha apresenta um tempo para seu desenvolvimento (TDF) ou eclode repentinamente. Assim, podemos ter :

-falhas aleatórias com TDF;

-falhas aleatórias sem TDF;

-falhas não aleatórias com TDF e

-falhas não aleatórias sem TDF.

Assim, pode-se montar a pequena matriz de decisão, como indicado na Tabela 4.1 acerca da seleção preliminar de uma prática de manutenção com base nas características destas falhas e nos conceitos associados às práticas básicas de manutenção.

Tabela 4.1 - Matriz para Decisão acerca da Seleção Preliminar das Práticas de Manutenção

TDF/Estatística	Aleatórias	Não Aleatórias
Com TDF	Preditiva	Preditiva/Preventiva
Sem TDF	Só Corretiva	Preventiva

É uma análise superficial mas, segundo CARDOSO (2000), as contribuições à manutenção e à confiabilidade do componente ou equipamento alvo desta política são incontestáveis, pois, com rapidez e precisão, é possível selecionar a prática de manutenção mais indicada a cada tipo de falha. De fato, o modo de falhar dos itens analisados pode não estar completamente determinado, mas já se conhece aspectos iniciais para proceder análises mais apuradas.

#### **4.2.2 – Características das Práticas Básicas de Manutenção sob o Enfoque da Confiabilidade**

##### **A Manutenção Preventiva**

A prática de manutenção preventiva é de interesse para a definição da confiabilidade, pois a princípio, sua função é manter a menor degradação possível da confiabilidade. Entretanto, embora seja amplamente divulgada no ambiente empresarial por ser uma prática que – quando aplicável – se antecipa à ocorrência da falha, a manutenção preventiva está envolta em uma série de equívocos. O primeiro deles, diz respeito à afirmação comum em conversas nos setores de manutenção das empresas de que a manutenção preventiva aumenta a confiabilidade do sistema.

Considere-se a seguinte situação indicada no gráfico constante da Figura 4.1, onde o sistema opera até o instante  $T$  no intervalo  $[0, T]$ . Neste instante, será feita uma intervenção preventiva. Supondo que a manutenção retorne o sistema à condição de “novo”, no próximo intervalo  $[T, 2T]$  - lembrar que a manutenção preventiva é executada a intervalos fixos - a confiabilidade neste novo intervalo será, segundo LEWIS (1986) :

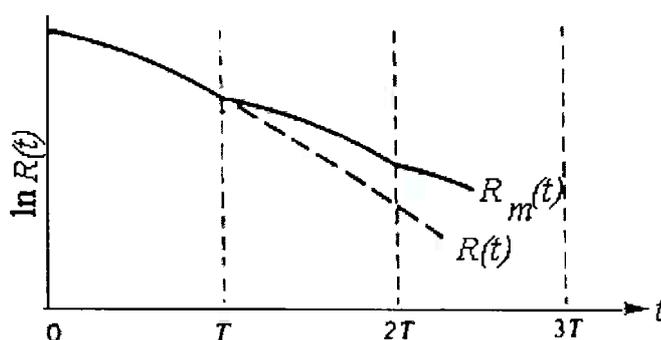
$$R_m(t) = R(t) \cdot R(t-T) \Rightarrow T \leq t \leq 2T \quad (4.1)$$

onde

$R_m(t)$ ...confiabilidade do sistema considerando-se a ação da manutenção preventiva e

$R(t)$ ...confiabilidade do sistema sem sofrer nenhuma ação de manutenção preventiva.

O gráfico da Figura 4.1 ilustra com clareza que a confiabilidade não se restaura, apenas a curva da confiabilidade, após a ação da manutenção, se torna idêntica àquela do instante inicial quando do início da vida operacional do equipamento ou sistema.



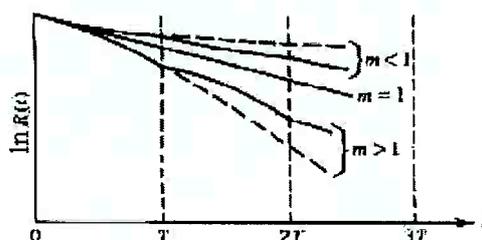
————— - sistema sob manutenção preventiva ( $R_m(t)$ )

----- - sistema sem manutenção preventiva ( $R(t)$ )

Figura 4.1 - Confiabilidade do Sistema *versus t*, com e sem Manutenção Preventiva, LEWIS (1986)

Outro equívoco diz respeito à hipótese de que a manutenção preventiva é aplicável a todo e qualquer tipo de sistema ou situação. Deve-se empregar esta prática se forem verificados benefícios em termos da confiabilidade. Estes benefícios relacionam-se não só à rentabilidade de um equipamento, mas também à sua segurança. Acompanhe-se a situação

representada pelo gráfico da Figura 4.2:



\_\_\_\_\_ - Sistema sob Manutenção Preventiva

----- - Sistema sem Manutenção Preventiva

Figura 4.2 - Comportamento da Confiabilidade  $R(t)$  em Função do Expoente  $m$ , LEWIS

(1986)

Assim, segundo LEWIS (1986),  $m$  tem os seguintes significados :

- $m < 1$  - taxa de falhas decrescente;
- $m = 1$  - taxa de falhas constante;
- $m > 1$  - taxa de falhas crescente.

O significado do parâmetro  $m$  pode ser compreendido tomando-se a distribuição de WEIBULL, muito empregada para expressar a confiabilidade de um sistema, representada na equação 4.2, cuja aplicação à falha de componentes mecânicos é respaldada não apenas pela prática, mas por autores como LEWIS (1986), O'CONNOR (1985), CARDOSO e SOUZA (1999) e outros trabalhos relacionados à confiabilidade e sua aplicabilidade à manutenção de sistemas mecânicos.

$$R(t) = \exp - \left[ \frac{(t-t_0)}{\eta} \right]^m \quad (4.2)$$

sendo :

$t_0$  a vida mínima do equipamento e

$\eta$  o parâmetro de dispersão, também chamado de parâmetro de forma.

Logo, acompanhando-se o gráfico da Figura 4.2, nota-se que ações preventivas de manutenção são indiferentes se  $m = 1$  ou seja, é inútil adotar manutenção preventiva para sistemas com taxa de falhas constante. Se  $m < 1$ , a manutenção preventiva acaba por prejudicar ainda mais o equipamento, fazendo com que o sistema seja entregue em situação pior que aquela existente antes da intervenção, isto porque, as características de projeto e o tipo de componente utilizado na construção do sistema afastam a possibilidade do uso desta prática. E se  $m > 1$ , indicando a ocorrência de taxa de falha crescente no tempo, a manutenção preventiva é indicada como prática adequada para reduzir a degradação da confiabilidade do equipamento.

Portanto, manutenção preventiva deve ser empregada quando se tem taxas de falhas crescentes, típicas de desgaste e de fadiga. Por isso mesmo, os sistemas mecânicos são afeitos a exigirem manutenção preventiva. Em termos da Tabela 4.1, a manutenção preventiva é requerida pelos componentes/sistemas que apresentem ocorrência de falhas não aleatórias, com ou sem sintomas.

### **Manutenção Corretiva**

A manutenção corretiva é executada após a ocorrência da falha, no senso comum, após

a quebra. Em geral, há a imobilização do equipamento ou na melhor das hipóteses, um sensível decréscimo em seu desempenho.

Como a falha já terá ocorrido, o equipamento ou sistema estará propenso a causar toda sorte de danos inclusive ao ambiente onde está inserido, como poluição de bacias inteiras no caso de rompimento do casco de um petroleiro, morte de grande número de pessoas em terra e a bordo no caso de acidentes aéreos, desabamento de pontes e edifícios, enfim, um sem número de efeitos maléficos toma lugar se a falha se desenvolveu a ponto de causar catástrofes.

Percorrendo as seções de muitas instalações fabris, é possível notar a aversão que os profissionais de manutenção nutrem pela corretiva, chegando a classificá-la como medida do nível de incompetência do setor em lidar com as falhas. E, realmente, é desejável que as falhas não ocorram.

A manutenção corretiva é atacada em virtude de estar associada a efeitos de falhas que causam sempre os maiores prejuízos possíveis, pois além dos efeitos das falhas, estão presentes os problemas da imobilização do equipamento e perda de produção ou utilidade em virtude da falha, espera em fila nas oficinas, custo da substituição do item avariado e o problema da diagnose, o qual pode tomar mais tempo que todos os outros fatores reunidos. Estes fatos impõem à manutenção corretiva o ônus de ser sinônimo de prejuízo certo à Qualidade Total, conclusão que carece de melhor análise, pois é precipitada e incorreta.

As formas de prevenir as falhas tiveram origem nas intervenções corretivas. Então, uma das contribuições desta prática é prover dados históricos para o acompanhamento dos sistemas e futuros subsídios para decisões. Senão vejamos, como seria possível determinar o padrão de comportamento das falhas dos sistemas onde é aplicada a manutenção preventiva sem que estas falhas tenham ocorrido?

Os sistemas também estão sujeitos a variações em suas condições operacionais, como por exemplo, uma aeronave está sujeita a diferentes tripulações cuja habilidade pode variar aleatoriamente. Estes fatores aleatórios contribuem para que algumas falhas fujam ao escopo da manutenção preditiva ou da preventiva, pois seu comportamento é aleatório (podem ocorrer a qualquer tempo sem que sintomas sejam previamente detectados), além de terem causas diversas daquelas normalmente associadas ao equipamento.

E sob o aspecto da confiabilidade, existem sistemas os quais simplesmente não aceitam intervenções preditivas ou preventivas pelas suas características (arranjo, natureza de funcionamento, inexistência ou impossibilidade de coletar medidas e outros), ou seja, suas falhas são aleatórias e não possuem TDF, por conseguinte, não apresentam sintomas, o que é bem característico de componentes eletrônicos. Vejamos o exemplo simples de uma lâmpada, a qual não avisa sobre a ocorrência de uma falha, pois em operação normal, ela simplesmente queima e pára de funcionar. Neste caso, a falha deve simplesmente ser tolerada. Entretanto, a ocorrência da falha não deve causar os espantosos efeitos comentados anteriormente. Tanto a manutenção, como os projetistas têm condições de atenuar ou eliminar efeitos das falhas, lançando mão de recursos como a redundância - instalação de sistemas capazes de cumprir a função em caso de falha do sistema principal, a alteração na disposição dos componentes do sistema e, mais recentemente, a concepção de sistemas tolerantes à falha.

Há de se ressaltar que algumas falhas podem ser toleradas até um momento conveniente para a imobilização do equipamento, dando origem ao termo corretiva programada. Deve-se tomar a precaução de não confundir esta prática com a preditiva, pois no caso da corretiva programada, a falha terá ocorrido sem que tenha sido monitorada.

Concluindo, a manutenção corretiva, embora possa ser exigida em virtude de erros operacionais, da manutenção ou até mesmo de projetos deficientes, não é um sinal de

incompetência. Seu emprego é, em algumas ocasiões, a única alternativa. Permitir ou não a ocorrência da falha é uma decisão a ser tomada após cuidadosa análise dos aspectos da confiabilidade exigida para o sistema em questão.

### **Manutenção Preditiva**

Esta prática tem sido tomada quase como sinônimo de monitoração, mas esta definição não é rigorosa. A manutenção preditiva se ocupa em estimar o estado de funcionamento do sistema, como citado por NEPOMUCENO (1989), pela medição de parâmetros vitais para sua operação, como temperatura, vibrações em eixos e mecanismos, intensidade de correntes elétricas, emissão acústica, análise da presença de partículas e verificação da composição química em óleos lubrificantes e isolantes. Diz-se que a manutenção preditiva é baseada na condição do parâmetro, como citado por NEPOMUCENO (1989) e MOTTER (1992).

Pode-se ainda dizer que a manutenção preditiva acompanha o desenvolvimento da falha, apontando o melhor momento para a intervenção. A grosso modo, isto quer dizer dilatar conscientemente a utilização dos componentes, o que se traduz em economia. Por isso, esta prática tem sido bastante adotada, porém às vezes de forma errônea.

Primeiro porque nem todos os parâmetros de funcionamento podem ser medidos, assim como não é possível realizar isto para todo e qualquer equipamento. Além disso, as falhas pesquisadas devem fornecer sintomas e esta característica restringe o uso desta prática para equipamentos eletrônicos por exemplo.

O emprego da manutenção preditiva exige interpretação dos dados coletados, o que por si só já é um fator complicador. A medição e o tratamento dos dados a tornam uma operação sofisticada e cara. Além disso, se o objetivo é apenas dilatar o prazo de utilização de

um componente, corre-se o risco de admitir a ocorrência de falhas sem que se possa ter controle sobre seus efeitos, isto porque a possibilidade de medir parâmetros irrelevantes por não conhecer os aspectos vitais do funcionamento de um sistema, tomando decisões com base em dados e interpretações errôneas, é um risco advindo da falta de critérios para a adoção da manutenção preditiva.

Por isso, adotar a manutenção preditiva sem analisar previamente os sistemas ou sem que estes tenham sido projetados com esta possibilidade pode ser uma péssima idéia que alia altos custos com baixa confiabilidade.

Algumas técnicas têm sido associadas a esta prática, tais como :

- tratamento de sinais;
- análise de emissão acústica;
- termografia;
- análise de óleos lubrificantes para medida de desgaste;
- análise da composição de óleos isolantes de transformadores.

Esta prática é bem-vinda no caso de atividades que requeiram altos índices de disponibilidade e segurança, como as centrais nucleares, refinarias de petróleo, estações de bombeamento e indústrias de processo contínuo (papéis, químicas) entre outras, como cita NEPOMUCENO (1989).

A manutenção preditiva tem ainda uma interferência com as áreas ditas produtivas da empresa, pois uma vez constatado o desenvolvimento da falha, deve-se programar a intervenção e alocar recursos para sua realização. Com a deterioração do equipamento, a

exigência por mais recursos - materiais, humanos e até tempo de paralisação - passa a ser maior e as intervenções cada vez mais difíceis de serem realizadas.

A manutenção preditiva tem o interesse da ciência da confiabilidade por permitir uma prorrogação na utilização de componentes cujas falhas possam ser aleatórias ou não, porém apresentando um tempo de desenvolvimento, como apresentado na Tabela 4.1. Mas em termos de sua caracterização matemática não apresenta novidades, pois constatada uma situação onde a falha tenha se tornado intolerável, o equipamento é paralisado e a partir de então o procedimento é semelhante ao da manutenção corretiva, com a vantagem desta prática permitir a programação da parada e, obviamente, não permitindo que o equipamento sofra os efeitos da falha consumada. Portanto, a manutenção preditiva está relacionada à confiabilidade na medida em que o modo de falhar e o comportamento estatístico da falha fornecem indicações sobre a conveniência de sua aplicação, sem no entanto contribuir para reduzir a degradação na confiabilidade do sistema. Quando utilizada unicamente como recurso para prorrogar a utilização de itens sujeitos à manutenção preventiva, pode haver inclusive aceleração no processo de degradação da confiabilidade, podendo-se analisar a Figura 4.1. Utilizar a manutenção preditiva visa assegurar que, durante a operação, o item analisado está desempenhando suas funções dentro de níveis estabelecidos de desempenho.

### **4.3 – Planejamento e Controle da Manutenção**

A atividade conhecida como PCM – iniciais de Planejamento e Controle da Manutenção, é o guia para execução e ao mesmo tempo o recurso que permite o tratamento das informações retornadas durante a operação de um sistema produtivo – deve-se reparar que não foi mencionada simplesmente a expressão execução da manutenção, pois PCM ocorre durante toda a operação de um equipamento. Assim, o PCM lida com informações gerenciais,

pois visa controlar aspectos como custo, disponibilidade e – ainda que indiretamente - a qualidade, mas também, com aspectos técnicos, tais como a elaboração das rotinas de manutenção, atribuição das práticas a serem adotadas nos diversos tipos de equipamentos operados, periodicidade, métodos de medição e coleta de dados (na manutenção preditiva) e alocação de recursos materiais e mão-de-obra. E o trabalho do PCM tem início exatamente na pesquisa das falhas, pois em geral, um plano de manutenção é elaborado para uma vigência anual, mas é constantemente refinado e realimentado.

#### **4.3.1 - A Coleta de Dados Sobre as Falhas para a Elaboração do PCM**

A determinação de quais os exatos componentes devem estar sob cuidados de práticas específicas de manutenção, mais ainda, qual a periodicidade das intervenções, se não estiverem previamente disponíveis em publicações do fabricante, são informações que dependem da elaboração de um *backlog* de falhas por máquina (unidade). Isto significa que em algum tempo a empresa terá de conviver com a manutenção estritamente corretiva para refinar o plano de manutenção até implementar uma manutenção eficaz, a qual englobe práticas corretivas, preventivas e preditivas. Para elaborar um plano de manutenção que contemple o tratamento mais eficaz aos componentes e às máquinas como um todo, a utilização da técnica da Análise dos Modos e Efeitos das Falhas (do inglês “*Failure Modes and Effects Analysis*” – FMEA) já a algum tempo tem tomado parte neste processo e é recomendada por políticas como a Manutenção Centrada em Confiabilidade (do inglês “*Reliability Centered Maintenance*” - RCM), como pode ser visto em XENOS (1998) e CARDOSO (2000), haja visto este recurso ser fruto da teoria da confiabilidade. Entretanto, para a elaboração desta análise, é necessário conhecer o equipamento em detalhes, sobretudo o seu diagrama de blocos e, dependendo da complexidade destes equipamentos e do tamanho

da planta, esta etapa pode se estender por um longo tempo e ser de difícil execução. A análise do tipo FMEA pode ser feita manualmente, ao menos a princípio, exigindo conhecimento do equipamento mais do que habilidade no trato com planilhas, mas o arquivamento de dados e seu tratamento para servirem como suporte à decisão são, em geral, informatizados para maior praticidade e, sobretudo, rapidez. Se a elaboração da análise FMEA se revelar impraticável, pode-se recorrer, ao menos como verificação preliminar, à construção de um diagrama de PARETO, contendo os tipos de falhas mais observados e suas frequências, construindo-se também outro diagrama que indique quais componentes falham em maior número e que conseqüências acarreta sua falha. Na verdade, diagramas de PARETO podem ser facilmente construídos para verificar a prioridade de qualquer parâmetro que se deseje analisar, desde que os dados tenham sido coletados ao longo do tempo de operação da máquina.

A Tabela 4.2 mostra uma proposta de formulário para a pesquisa das falhas nos equipamentos, de forma a coletar dados que possibilitem investigar suas causas, periodicidade e custos para cada máquina. É necessário padronizar a forma de preenchê-la, sobretudo o vocabulário a ser empregado para evitar interpretações distintas para um mesmo fenômeno ou confusão no momento de armazenar em computador os dados para tratamento estatístico (que é uma das principais finalidades do preenchimento deste formulário). Por isso, sugere-se que os campos sejam preenchidos conforme os tópicos abaixo. Esta pesquisa é o passo inicial para a coleta de dados a serem utilizados no Planejamento e Controle da Manutenção.

Tabela 4.2 – Formulário Para Pesquisa de Falha

MANUTENÇÃO		RELATÓRIO DE FALHA			
Data :					
Unidade :		Conjunto :			
Equipamento :					
Subconjunto :					
Natureza da Falha :					
Causa da Falha :					
1ª ocorrência deste tipo?(S/N)					
Solução :					
Peças Substituídas :					
Serviços Externos :					
<b>PARADA DE PRODUÇÃO</b>					
Hora de Parada	Hora de Retorno	Espera / Fila	Tempo Total de Parada	Mão de Obra Utilizada	Horas-homem
				Mecânicos :	
				Eletricistas :	
				Técnicos :	
Houve Descarte/Retrabalho? (S/N)					
Incluir no Plano de Preventiva? (S/N)					

Esclarecimento do preenchimento do formulário da Tabela 4.2 :

**Cabeçalho (Unidade, equipamento, conjunto, subconjunto) :** escrever nome e código .

**Natureza da Avaria :** escrever código e relatar sucintamente o que ocorreu.

**Causa da avaria :** se for possível identificar, escrever o código da causa primária da falha e relatar sucintamente. Citar se é a primeira ocorrência do tipo no equipamento.

**Sugestão :** medida corretiva a ser adotada, se possível, dentro das condições de projeto do equipamento. Submeter à aprovação da Engenharia de Manutenção.

**Peças Substituídas :** discriminar as peças trocadas (se houver).

**Serviços Externos :** discriminar tipo de serviço e fornecedor (se houver).

**Hora de Parada/Retorno :** anotar os horários, atentando para que o retorno só será efetivado após os testes.

**Espera/Fila :** anotar o tempo de espera até entrar em reparo (se houver).

**Tempo Total de Parada :** calcular a partir dos tempos de parada e retorno.

**Mão de Obra Utilizada :** anotar, para cada categoria, a quantidade de profissionais requisitada para o reparo e a utilização em horas de cada equipe.

**H-H :** calcular observando o tempo total de parada e a mão-de-obra utilizada.

**Descarte :** anotar se houve descarte devido à falha.

**Inclusão :** verificar a possibilidade de inclusão da intervenção no Plano de Manut. Preventiva.

De modo a tornar a elaboração de dados estatísticos mais fácil, deve-se procurar codificar os tipos mais comuns de sintomas, para que aos mesmos possam ser atribuídos os números de suas ocorrências num período, relacionando-se a estas informações às causas das falhas as quais originaram tais sintomas, convergindo com a norma ISO-NBR-13533 (1995), desta forma, é possível elaborar rotinas de manutenção que contenham as práticas adequadas, componentes a serem tratados e a periodicidade das intervenções, se for o caso.

A busca das informações para a elaboração destas rotinas deve ser em campo e isto não impede que sejam atingidos bons resultados, como a elaboração de procedimentos padrão para trocas de óleo, rolamentos, alinhamento de eixos, tensionamento de correntes e correias entre outros já desenvolvidos pelo autor deste trabalho quando de sua atuação na indústria. Estes procedimentos inclusive passaram a fazer parte da documentação relativa aos processos de produção e garantia da qualidade quando da certificação da empresa pelas normas ISO-9000.

Após realizada esta etapa, pode-se estabelecer uma periodicidade inicial para a manutenção preventiva de itens que tenham sido classificados como críticos durante a execução do FMEA, ou que a experiência diária tenha mostrado que mereçam maiores atenções. Aliás, sobre estes itens que mereçam maiores atenções pode-se considerar a utilização da manutenção preditiva, já que a possibilidade de observar sua operação por meio da monitoração dos parâmetros vitais do equipamento, em muito contribui para manter a confiabilidade do equipamento, contribuindo também para a excelência da manutenção não pelas técnicas, mas pela eficácia na ação. O que o FMEA deixa de indicar é sobre a viabilidade da aplicação da manutenção preditiva em alguns casos, já que implantá-la e dar continuidade pode incorrer em custos elevados, dado o instrumental e a qualificação dos profissionais requeridos para sua execução, o FMEA aponta a conveniência técnica apenas.

Definidas estas rotinas, o próximo passo consiste em alocar mão-de-obra e recursos materiais. Novamente, o tempo de operação já acumulado em certo tipo de equipamento contribui para uma efetiva alocação destes recursos, pois é difícil precisar a duração média de uma revisão. A atividade aeronáutica é o setor onde estas informações são melhor conhecidas, em virtude da extensa documentação e rigorosa regulamentação a que estão sujeitas as empresas aéreas exigirem o detalhamento dos procedimentos relativos às intervenções de manutenção – sejam elas corretivas ou preventivas. Na indústria em geral este parâmetro é de mais difícil determinação, pois o treinamento e a qualificação dos profissionais não são nivelados nem apresentam a profundidade que a encontrada em uma empresa aérea, com exceções, logicamente, como a indústria automobilística, petroquímica e de processos contínuos, como exemplos mais marcantes. Neste ponto, pode-se contar com a Pesquisa Operacional para auxiliar o dimensionamento das equipes de trabalho e sua alocação. Tem-se recorrido à simulação para verificar as diferenças entre equipes com quantidade de elementos variável, geração de filas, impacto das paradas na produção. Deve-se atentar para o fato de que algumas tarefas são precedidas por outras. Por exemplo, não se pode substituir um rolamento sem que o conjunto do qual ele faz parte tenha sido desmontado. Também não se pode balancear um eixo antes de sua montagem estar concluída, ou montar uma máquina cujos componentes estejam sendo reparados por terceiros (o que aliás é bastante comum, ocorrendo com mais frequência conforme aumenta o tamanho e especialização da máquina). Por isso, convém elaborar ao menos um gráfico de GANTT ou uma carta do tipo PERT-CPM, para verificar o encadeamento das tarefas de manutenção para cada unidade (máquina) e avaliar os custos de acelerar tarefas ou retardá-las. É improvável que esta providência seja eficaz já na primeira revisão, onde não se conhece ao certo a dimensão da intervenção (o que vai ser reparado, quanto tempo leva e quanto custa). Mas reitera-se que a evolução da manutenção preventiva é temporal. Mesmo na atividade aeronáutica, os manuais estão

sujeitos a constantes atualizações (o que se chama no jargão da área de efetividade), enviadas pelos fabricantes a **todos** os operadores de suas aeronaves. Em outras palavras, nem mesmo a aviação, tida como uma atividade de excelência tecnológica, “nasceu sabendo” tudo sobre manutenção preventiva. Além do mais, já se sabe de antemão, na aviação, que peças devem ser reparadas e em que período esta ação ocorre, o que exige providências para que o item requerido esteja disponível quando requisitado, como os motores, que quando atingem um certo período de utilização (denominado de TBO, do inglês *Time Between Overhaul*), devem ser revisados, sem que a aeronave tenha de permanecer no solo por conta desta revisão, pois há motores sobressalentes (existe a possibilidade de que um motor atinja seu TBO em época diferente da requerida para que o avião seja submetido a um “*check*”).

Com o tempo, na montagem do orçamento anual da manutenção, deve ser exigida uma programação dos reparos a serem feitos por terceiros (ou mesmo na empresa), por que esta é uma forma de gerar filas que corre o risco de ser percebida apenas quando a mesma já existe. Além disso, esta previsão elimina ou minimiza a necessidade de reservas orçamentárias para serviços externos. O mesmo não se pode dizer da reserva para manutenção corretiva, que chega a ser de 15 % do orçamento anual da manutenção, como em CARDOSO e BELHOT (1994) e XENOS (1998).

Para o controle da manutenção, TAVARES (1987), XENOS (1998) e CARVALHO (2000) afirmam que já não é possível implementar uma estrutura eficaz sem os recursos da informática, especialmente porque o tratamento depende das rotinas de manutenção de cada máquina individualmente, gerando um grande número de informações. Todos estes autores, além de WHITEHEAD (1968) e DRAPINSKI (1973) advogam que é imprescindível o acompanhamento com uma ficha de manutenção, seja ela preventiva ou corretiva. No caso de máquinas-ferramenta, por exemplo, a ficha de manutenção é simples, como a da Tabela 4.3, podendo ser emitida sob a forma de uma ordem de serviço (as conhecidas O/S) para cada

máquina. Seus dados são lançados em sistema informatizado e podem ser pesquisados por tipo de máquina, por tipo de manutenção, por tipo de falha, enfim, tudo depende de como se deseja emitir os relatórios gerenciais.

Tabela 4.3 - Guia de Manutenção Preventiva em Máquina Laminadora de Papel

**RELATÓRIO DE PROGRAMAÇÃO DO USUÁRIO CWB/FI-002-M  
ROTEIRO DE MANUTENÇÃO PREVENTIVA**

Grupo:	HLP	Data início	/	/	Data término	/	/	Horim:
		Chefia:						
Quant.	Sub-componente	Código		Serviço	Tempo	Execut.		
* COMPONENTE		SA - 5096						
(02)	Rolamento Esfera	6122		(V) - (R) - (S)	.....	.....		
(01)	Engrenagem	16137 AA		(V) - (R) - (S)	.....	.....		
* COMPONENTE		SA - 5104						
(01)	Chaveta	32112-634		(V) - (R) - (S)	.....	.....		
(01)	Chaveta	32112-642		(V) - (R) - (S)	.....	.....		
(01)	Chaveta	32112-639		(V) - (R) - (S)	.....	.....		
(01)	Bucha	23488 AA		(V) - (R) - (S)	.....	.....		
(01)	Bucha	33516-109		(V) - (R) - (S)	.....	.....		
(03)	Rolamento Esfera	23132-208		(V) - (R) - (S)	.....	.....		
(01)	Braço de Ligação	34481-306		(V) - (R) - (S)	.....	.....		
(01)	Verif - Recond - Subst	34481-306		(V) - (R) - (S)	.....	.....		
(01)	Mola	14168		(V) - (R) - (S)	.....	.....		
(01)	Elxo	Item 12		(V) - (R) - (S)	.....	.....		

A política de compra de peças de reposição deve ser cuidadosamente analisada, pois é uma tarefa que depende da quantidade de máquinas, seus vários tipos e qual a variedade de componentes. Em geral, nunca serão comprados grandes lotes de peças, sobretudo em pequenas e médias empresas, o que torna difícil negociar preços. A saída é, com base nas fichas de manutenção corretiva, preventiva, preditiva e relatórios de avaria, elaborar relatórios que indiquem quais as peças mais solicitadas em um período e negociá-las com os fornecedores, de preferência criando fidelidade para garantir descontos. Isto depende de onde

estão localizados a empresa e os fornecedores, qual a disponibilidade destas peças no mercado, quantos são seus fabricantes, se haverá ou não frete e da qualidade das peças vendidas. Novamente, com o decorrer do tempo os pedidos podem ser antecipados, sem que se tenha de estocar peças que serão utilizadas apenas em revisões preventivas. O problema ocorre com peças que, mesmo estando sujeitas à manutenção preventiva, apresentem risco de falhas aleatórias. Estas devem ser mantidas em estoque e por isso, ao menos um diagrama de PARETO sobre as peças que mais apresentam tal tipo de falha deve estar disponível.

As considerações feitas nesta seção do trabalho estão mais centradas no atendimento à função de retornar ou manter os equipamentos inerente à manutenção do que um controle de custos apurado. Mas como o custo das peças sobressalentes, mão-de-obra, planejamento e outros é muito influente na tomada de decisão, um capítulo inteiro é dedicado ao estudo de tais influências no planejamento, controle e seleção da alternativa mais adequada.

O conhecimento destas características, possibilita a confecção de um programa anual de manutenção, imperfeito logicamente, mas que pode ser refinado, conforme novos dados se tornem disponíveis. Os primeiros orçamentos serão um tanto grosseiros e exigirão grande monta de reservas para eventos imprevisíveis. Com o plano de manutenção preventiva já implementado, concluindo-se a fase do planejamento, é chegado o momento do controle (embora planejamento e controle coexistam no PCM, pois as informações coletadas durante o controle alimentam e refinam o planejamento o qual, por sua vez, fornece novos indicativos de controle que dependem da situação individual de cada empresa). E no caso da manutenção, são vitais as informações sobre a disponibilidade e sobre os custos. As considerações sobre disponibilidade são as mesmas já feitas na seção 4 deste trabalho, ou seja, quanto menor a disponibilidade, em função de paradas crônicas ou de paradas programadas muito extensas, mais o equipamento se torna candidato à substituição, sendo que a determinação do momento desta substituição é responsabilidade da manutenção.

Quanto aos custos, a literatura acerca da manutenção fornece algumas sugestões para o lançamento dos custos no sistema, possibilitando inclusive estimar os custos de parada de produção. O autor deste trabalho elaborou um formulário a ser utilizado após a ocorrência de alguma parada, cujos dados são empregados para estimar os custos associados a esta, mostrado na Tabela 4.4, já condizente com as diretrizes para o levantamento dos impactos da falha apresentados no Capítulo 8.

Tabela 4.4 – Pesquisa dos Custos e Conseqüências das Falhas em Máquinas

<b><u>Formulário para pesquisa dos custos e conseqüências das falhas em máquinas</u></b>
Código da Máquina :
Tipo de Máquina :
Seção :
Produto em Linha (código de cada empresa) :
Data da Parada :
Hora da Parada :
Data de Retorno à Operação Normal :
Descrição do Defeito :
Providências :
Chamou Terceiros p/ Reparo/Revisão? :
Custo de Reparo/Revisão :
Informante :



Tabela 4.7 – Relatório de Custos de Manutenção : Nível Estratégico, TAVARES (1987)

RELATÓRIO DE CUSTOS DE MANUTENÇÃO																	
Nível Gerencial -1 [ESTRATÉGICO]										Período de DD/MM/AA a DD/MM/AA							
Unidade de Produção	Faturamento Médio Obtido no Ano Anterior	Faturamento		Variação do Faturamento entre Períodos		Gasto de Manutenção Corretiva				Serviço de Terceiros [Direto+Indireto]				Gasto Total de Manutenção [Direto+Indireto]			
		Anterior	Atual	Valor	%	Anterior	Atual	Variação	%	Anterior	Atual	Variação	%	Anterior	Atual	Variação	%
Total do Período																	

Em uma empresa de porte pequeno ou médio, pode ser difícil determinar a diferença entre os níveis operacional, tático e estratégico, mas é importante ressaltar, como pode ser visto nas planilhas acima, que conforme se avança em direção ao nível estratégico, as informações vão se tornando cada vez mais amplas. Assim, no nível operacional são coletadas informações sobre peças, mão-de-obra e materiais utilizados nas revisões, detalhados para cada revisão. No nível gerencial ou tático, estas informações aparecem como o montante gasto no período, acrescentando-se informações sobre contratação de terceiros e outros custos indiretos, mostrando a importância destes para a composição do custo total de manutenção (última coluna à direita). E no nível estratégico, são adicionados os encargos e o custo da manutenção é comparado com o faturamento da empresa. Estes relatórios foram extraídos de TAVARES (1987) porque além de se prestarem ao PCM informatizado, mostram como são levados em consideração custos associados à manutenção os quais não são facilmente percebidos até mesmo pelos gerentes mais experientes, que ainda insistem em tomar o custo da manutenção pelo seu preço, não pelos benefícios a longo prazo que estes podem obter. Para tornar o controle ainda mais detalhado, o autor deste trabalho sugere incluir informações

sobre a depreciação do equipamento, o que permite uma análise financeira de seu desempenho que indique o momento de sua substituição.

Deve-se notar que, nos relatórios anteriores, sempre há a comparação com o período anterior, seja dos gastos, seja do faturamento. E este período é aberto, ou seja, pode ser semanal, mensal, trimestral ou qualquer outro (provavelmente, não faça sentido tomar períodos muito curtos). Além de contribuir para o controle do custo da manutenção, estes relatórios possibilitam a confecção de um orçamento anual da manutenção de boa acuracidade e sua implementação não é muito complexa, podendo ser realizada, por exemplo, por um facilitador que tenha habilidade básica em planilhas EXCEL (evidentemente, há programas – caros - de computador específicos para os fins de PCM).

Um último parâmetro de controle seria a utilização da mão-de-obra, que pode sinalizar para equipes superdimensionadas (o que é raro encontrar), ou, como é mais comum, para excessiva carga de trabalho sobre a manutenção, a qual deve ser investigada com rigor. O gráfico da Figura 4.3, extraído de DRAPINSKI (1973), mostra a utilização em um período de 11 semanas da mão-de-obra, mostrando as horas gastas em cada tipo de tarefa de manutenção.

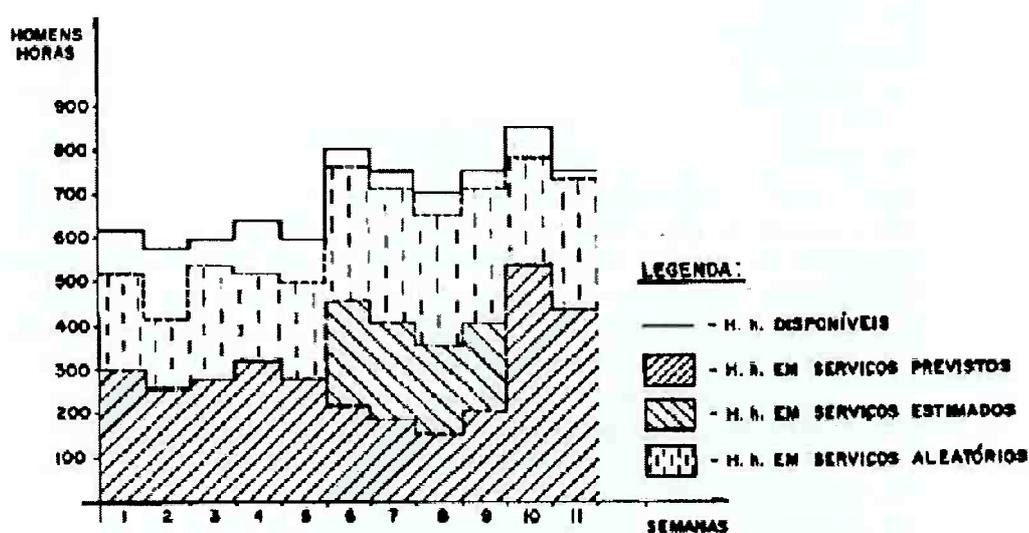


Figura 4.3 – Gráfico de Controle de Utilização de Mão-de-Obra em Manutenção,

DRAPINSKI (1973)

A terceirização da manutenção não desobriga a empresa de controlar o custo desta atividade e deve ser analisada com mais rigor, comparando-se as vantagens de não arcar com encargos, estoques de sobressalentes e dificuldades operacionais com os inconvenientes de ter estranhos no ambiente fabril e da difícil missão de controlar a qualidade e o preço da manutenção terceirizada. Mas a metodologia aqui proposta pode ser aplicada neste caso, ainda que exija adaptações para tratar com informações fornecidas por terceiros.

A proposta de metodologia de PCM elaborada neste trabalho não é única, nem tampouco pretende ser verdade absoluta. O público ligado à manutenção está ciente de que esta atividade está envolta em controvérsias e cada organização pode definir sua estratégia de planejamento e controle de manutenção conforme suas necessidades ou conveniências. A metodologia de PCM aqui proposta é uma tentativa de trazer contribuições à manutenção que sirvam para dotar esta atividade de caráter científico, equilibrando aspectos técnicos com os interesses da empresa, sobretudo no controle dos custos da manutenção, trazendo ainda ganhos nos aspectos de **qualidade** dos produtos manufaturados e na **capabilidade** dos processos produtivos da empresa.

#### **4.4 – Práticas de Manutenção e PCM : Gerando Informações para Tomada de Decisão**

Este item visa explorar como os instrumentos apresentados na seção sobre PCM deste trabalho podem contribuir para a coleta de informações necessárias ao Planejamento e Controle da Manutenção, como explicado por LEVITT (1997) tendo em vista as particularidades de cada uma das práticas básicas de manutenção já apresentadas e adotando alguns procedimentos indicados na norma ISO-NBR-13533 (1995).

#### 4.4.1 - Manutenção Corretiva

A Manutenção Corretiva se dá, obrigatoriamente, após a falha em um componente ou equipamento. Assim sendo, à primeira vista pode parecer que sistemas mantidos exclusivamente sob ação desta prática de manutenção estão submetidos à toda sorte de eventos imprevisíveis, os quais podem encobrir ocorrências bastante graves em termos de perdas de vidas ou, no mínimo, prejuízos vultosos.

É evidente que se a opção pela Manutenção Corretiva for feita sem critérios ou preocupações além do simples **preço** (não confundir com o **custo**), a degradação dos sistemas tende a se acelerar, a qualidade da prestação de serviços cai vertiginosamente e as conseqüências das falhas são imprevisíveis, até mesmo em função da ocorrência de modos de falha possivelmente desconhecidos.

Mas, devido exatamente a certos tipos de modos de falha, relacionados à própria natureza dos equipamentos e de seus componentes, a Manutenção Corretiva é a **única** alternativa possível para a intervenção.

Assim, componentes eletrônicos, em virtude de apresentarem falhas que não denotam sintomas e eclodem repentinamente, com uma periodicidade cuja dispersão é bastante grande, sujeitam os sistemas que compõem à contingência desta prática. Este fato impõe requisitos específicos quanto ao projeto deste tipo de equipamento.

Uma das formas de contornar este problema é adotar alguma forma de redundância, das quais a redundância ativa (ou componentes ligados em paralelo) é a forma mais simples. Em sistemas redundantes, as funções dos componentes são compartilhadas por mais de uma unidade e/ou há mais de uma unidade que desempenha a mesma função, podendo estar em operação e assumindo as funções de um item que tenha falhado (arranjo conhecido como “by

*pass*”) ou que entre em operação apenas após a falha da unidade principal (ou “*stand by*”), que são conceitos mais complexos de redundância. Mas para o emprego eficaz deste conceito de aumento da confiabilidade de um sistema, deve-se ter em mente que o elemento redundante deve ser diferente do elemento principal, para evitar que se tenha modos de falha comuns.

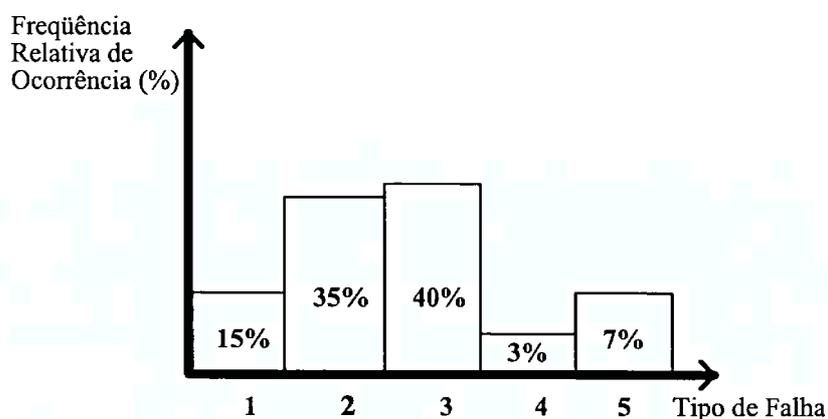
Um problema a respeito das redundâncias é que estas adicionam, invariavelmente, custos e complexidade aos equipamentos, tornando proibitiva sua adoção em determinadas aplicações como microcomputadores e eletrodomésticos. Até mesmo sofisticadas máquinas dotadas de CLP (Controle Lógico Programável) não costumam apresentar redundância de componentes eletrônicos, já que seria bastante complicado manter um processador em “*stand by*” e incluí-lo imediatamente após a falha do processador principal – não apenas porque é extremamente difícil detectar a falha de processadores, como porque há dificuldades em transferir dados da memória para realizar operações em unidades “*stand by*”.

Há, entretanto, um tipo de sistema particularmente interessante, que permite a operação do equipamento após a falha em alguns de seus sistemas, até que seja possível imobilizá-lo para a intervenção corretiva, sistemas estes denominados de Tolerantes à Falha. Estes sistemas são projetados prevendo tal possibilidade, de modo que uma falha reduza seu desempenho, mas possibilite algum grau de eficiência na operação após a falha. Após ocorrer, a falha é relatada de alguma maneira ao operador, já que estes sistemas, em geral, são controlados por computador. Então, um período de operação – denominado de tempo de franquia ou “*grace time*” – pode ser consumido até a parada, mas este tempo não é uma característica de projeto, pois conforme a causa da falha ou até mesmo a quantidade destas falhas, o tempo de franquia é maior ou menor e, portanto, probabilístico, como cita VAURIO (1997). Em geral, sistemas tolerantes à falha apresentam a possibilidade de alteração no desempenho, apenas para que o equipamento seja operado nas condições mínimas até a

possibilidade de retirada do serviço para correção. Um exemplo bastante comum é o caso dos aviões multimotores, os quais, no caso de ocorrência de falha de um deles, pode voar com segurança até uma alternativa de pouso, se bem que com velocidade e altitude reduzidas. Alguns sistemas tolerantes à falha não reduzem o desempenho do sistema, mas esta possibilidade só pode ser conseguida por meio do emprego de redundâncias. Os sistemas de navegação das modernas aeronaves comerciais conta com no mínimo duas unidades capazes de controlar a rota do aparelho. Se uma delas falhar, a outra assume, sem que seja necessário reduzir o desempenho da aeronave.

Uma particularidade da Manutenção Corretiva é que o seu controle permite o levantamento das informações necessárias à implementação de outras práticas – se possível – constituindo-se no passo inicial da implementação de uma política de manutenção, política esta que significa a estrutura de tratamento de dados que possibilita a seleção do conjunto de práticas de manutenção adequadas a determinadas situações, além de seu planejamento e controle, como citado por CARDOSO (2000). Assim sendo, uma importante contribuição do controle das intervenções corretivas é a construção do histórico de falhas, para o qual pode ser utilizada a ficha de pesquisa de falhas da Tabela 4.3, cuja principal finalidade é relacionar as falhas com suas causas e períodos de ocorrência.

De posse destas informações, é necessária a elaboração de um gráfico de PARETO – como na Figura 4.4 - para verificar, dentre as falhas diagnosticadas, quais as de maior frequência de ocorrência. Estas são as falhas que requererão maior detalhamento em termos de pesquisa, pois são as que mais reduzem a disponibilidade de um sistema de produção. Além disso, é muito provável que, se nenhuma ação de manutenção seja tomada até o momento da análise das falhas, haja modos de falha possíveis de serem incluídos no Plano de Manutenção Preventiva. E o correto preenchimento de um relatório como o da Tabela 4.4 possibilita listar as ações a serem executadas a título de manutenção preventiva.



#### Tipos de Falhas

1 – Queima de Componentes Elétricos (Exceto Motores)

2 – Falhas nas Caixas de Engrenagens

3 – Falhas nos Mancais

4 – Queima do Motor Principal

5 – Vazamento em Componentes do Sistema Hidráulico

Figura 4.4 – Diagrama de Pareto para uma Máquina-Ferramenta tipo CNC, [WANG et al (1999)]

O diagrama da Figura 4.4 ilustra uma análise de PARETO para dados recolhidos durante certo tempo de uma máquina-ferramenta tipo CNC, sendo que estas porcentagens de falhas são típicas destas máquinas, com maior ou menor variação entre elas, mas seguindo basicamente este padrão, caso nenhuma ação de manutenção esteja sendo previamente executada. Outros tipos de Diagramas de PARETO podem ser construídos, levando em conta, em vez dos tipos de falhas versus frequência de ocorrência, a gravidade das falhas versus frequência ou então tipos de falha versus frequência. Em qualquer um destes diagramas, a

coluna mais alta será a preferencial para análise, trazendo benefícios não apenas tecnicamente, mas em termos de custos, pois a disponibilidade pode ser melhorada e as falhas recorrentes passam a ser melhor compreendidas e tratadas, minimizando os efeitos ligados às suas características de imprevisibilidade.

Em geral, após a falha eclodir, o reparo imediato é necessário. Entretanto, quer porque o sistema possa ser tolerante a falha ou porque o modo de falha que o acometeu permite a operação até um determinado instante – ainda que às custas de um desempenho reduzido – a ação corretiva pode ser postergada para um período mais conveniente, embora este período deva ser, necessariamente, o mais curto possível. A duração deste período depende da experiência e das observações do comportamento do sistema após a falha, embora deva-se ressaltar que é impossível listar um período de prorrogação da utilização para cada tipo de falha, pois seus efeitos sobre o sistema podem ser desconhecidos ou então, modos de falhas distintos podem estar ocorrendo simultaneamente. De qualquer forma, a aplicação da análise tipo FMEA pode auxiliar a determinar os efeitos e até mesmo a duração do período de utilização após a falha de modos de falha ocorrendo isoladamente, dando origem à Manutenção Corretiva Programada. Este tipo de manutenção não deve ser confundido com a Manutenção Preditiva – pois em geral, nenhuma avaliação profunda de parâmetros é realizada - e muito menos com a Manutenção Preventiva. Esta prática é, como diz seu nome, corretiva e a razão de sua existência é possibilitar apenas que as operações do sistema não cessem instantânea e desavisadamente, bem como, programar a disponibilidade de recursos materiais e humanos os quais, em geral, estão indisponíveis no caso de alguns tipos de ação corretiva (devido às incertezas sobre o tipo de falha a ser enfrentado), minimizando o impacto da falha sobre a disponibilidade. Deve-se lembrar, entretanto, que a degradação do equipamento se acelera durante este período, pois suas características originais são alteradas e sua operação passa a se dar fora das faixas especificadas em projeto. Por esta razão, a Manutenção

Corretiva Programada **não** deve ser encarada como uma prática sistemática de manutenção, mas como uma possibilidade a ser utilizada em especialíssimos casos.

Ainda com relação à Manutenção Corretiva, deve-se sempre recorrer às instruções dos fabricantes dos equipamentos, pois muitas vezes, a diagnose de uma falha – à qual não se está acostumado, sobretudo no caso de não haver ações prévias de manutenção – é mais demorada que o próprio reparo, vide equipamentos eletrônicos, e, sem um método adequado, há o risco de se identificar as causas incorretas para as falhas. Por isso, os fabricantes elaboram o recurso conhecido como “*troubleshooting*”, ou debelação de falhas, que visa ser um instrumento de diagnose rápido e preciso, usado não apenas em sistemas eletrônicos, mas em sistemas mecânicos, como sistemas de controle de voo de aeronaves.

Embora sujeite os sistemas de operações às mais diversas conseqüências (incluindo as imprevisíveis, com já foi – intencionalmente - bastante citado neste trabalho), a Manutenção Corretiva pura e simples deve ser executada com a mesma preocupação de práticas mais sofisticadas, observando que os reparos devem ser efetuados utilizando-se peças sobressalentes especificadas, ferramentas adequadas, mão-de-obra treinada e procedimentos padronizados (na medida do possível), o que só se consegue após certo tempo de operação. E não se deve negligenciar sua importância no âmbito gerencial, pois esta prática possibilita recolher informações importantes e tomar decisões acerca do planejamento da manutenção.

#### 4.4.2 - Manutenção Preventiva

A Manutenção Preventiva é a prática de manutenção realizada em antecipação à falha e que consiste de inspeções, testes e substituições **periódicas** de determinados componentes. Assim, além das características já mencionadas no item 4.2.1 deste capítulo (falhas que

apresentem ou não TDF e que sejam **não aleatórias**), relacionadas aos modos de falha e portanto, à natureza dos sistemas (mecânico, hidráulico, pneumático, eletrônico, etc.), é necessário que os sistemas candidatos a este tipo de manutenção sejam **reparáveis**, sendo que este termo significa a possibilidade de que a mesma unidade que apresentou uma eventual falha ou que foi enviada para revisão, retornará ao serviço, tendo substituídos apenas alguns de seus componentes.

Uma política preventiva de manutenção deve começar pela seleção dos sistemas ou sub-sistemas a serem tratados desta maneira, contemplando também a periodicidade das intervenções e os procedimentos padronizados a serem executados por ocasião das revisões, isto no aspecto técnico. No aspecto gerencial, há a necessidade do planejamento de estoques de peças sobressalentes, utilização da mão-de-obra e outros recursos gerenciais e o preparo de um orçamento de manutenção, em geral anual, mas refinado mês a mês, o que permite controlar os custos não só desta atividade, mas o custo das operações da organização, como é o caso do transporte aéreo, onde cifras da ordem de 15% do custo de uma passagem correspondam a recursos empregados na manutenção. Note-se que mesmo onerando tanto o preço do serviço, ninguém contesta seu pagamento, pois há a ciência de que esta despesa é indispensável para assegurar a **qualidade** e principalmente, a **segurança** das operações. A questão gerencial mais importante não é gastar ou não recursos com manutenção, mas aplicá-los de modo eficaz, tornando o que seria uma despesa, um investimento em qualidade, rentabilidade e segurança.

Na verdade, a elaboração de um plano de Manutenção Preventiva começa já na seleção dos equipamentos que comporão o sistema de operações, explorando aspectos como a qualidade de seus componentes - portanto o tempo médio entre falhas do inglês "*Mean Time Between Failures*" - MTBF do equipamento), sua manutenibilidade (caracterizada pela

facilidade de acesso aos subsistemas passíveis de reparo), rede de atendimento dos fabricantes e vários outros aspectos que variam conforme o caso.

A Manutenção Preventiva, segundo alguns autores com XENOS (1998), pode ser programada com base no tempo de operação (ou número de ciclos se for mais adequado), ou na condição do item. Este trabalho faz a opção pela forma calendárica, pois do ponto de vista da confiabilidade, a expressão dos conceitos relativos à falha (confiabilidade, taxa de falhas e, mesmo que qualitativamente, o modo de falha) em função do tempo permite uma boa precisão dos diagnósticos, sobretudo no caso de sistemas passíveis de serem tratados preventivamente. A opção pela prevenção baseada na condição do parâmetro é, na opinião do autor, uma forma de introduzir um fator complicador a mais entre o planejamento e a execução das atividades de manutenção, pois o método e os recursos e serem empregados nestas inspeções são objeto de planejamento mais complexo, já que instrumental e análises mais completas são requeridas, o que, na maioria dos casos, se traduz em custos adicionais sem que benefícios adicionais sejam facilmente alcançáveis. Há também a inconveniência da confusão com a Manutenção Preditiva, pois esta última é baseada na condição dos parâmetros de interesse, não propriamente do estado físico medido diretamente de um componente Além destes fatos, as inspeções necessitam ser programadas, fazendo com que a análise da condição do item constitua-se em um passo a mais na política de manutenção. Há obviamente exceções, onde as verificações das condições dos componentes são **mandatórias**, como tubulações e linhas de pressão (sobretudo as de vapor), objeto da norma ABNT NR-13, além das inspeções estruturais a serem executadas em torres de transmissão de energia elétrica, barragens, usinas nucleares, refinarias e plataformas “*offshore*”, obras civis, sobretudo pontes e viadutos e, obviamente, estruturas de aviões, como cita CARDOSO (2000), navios, como citam SOUZA e AYYUB (2000), sujeitas a sofisticadas técnicas de inspeção não-destrutivas como ultra-

som, raios-x e ensaio de correntes parasitas e, no caso da aviação, constituírem-se em exigências regulamentares.

Iniciando pela seleção dos equipamentos que comporão um sistema de operações, abrangendo também os estudos iniciais para implementação desta prática de manutenção, o planejamento da Manutenção Preventiva deve contemplar a análise de alguns pontos básicos como os listados abaixo, os quais devem ser atendidos durante a operação dos equipamentos e, por conseguinte, exigem atenção da manutenção preventiva :

- características operacionais : baixa frequência de ocorrência de falhas e anomalias, necessidade de poucos ajustes e regulagens durante a operação normal, funcionamento estável (tolerância a variações nas condições de utilização), baixa frequência de refugos ou retrabalho, no caso de equipamentos industriais, sobretudo os controlados por computador;
- manutenibilidade : rapidez para detectar o local de ocorrência da falha ou anomalia, bem como de suas causas, acesso fácil às partes internas do equipamento, facilidade para inspeção, troca de peças e reforma do equipamento, fácil verificação dos níveis dos fluidos (óleo, fluidos hidráulicos e de refrigeração), bem como facilidade de reabastecimento, concepção modular, o que permite a troca rápida de subsistemas inteiros, bem como a adoção de redundância e é uma forte tendência nos projetos de novos equipamentos, exequibilidade de testes funcionais, sobretudo após a intervenção da manutenção, facilidade de inspeção e limpeza (a limpeza é o mais óbvio e indispensável item de manutenção preventiva!);
- facilidade de operação : operação simples resulta em menor probabilidade de erros, portanto, em menor possibilidade de ocorrência de falhas imprevistas, assim alguns aspectos a serem observados são a facilidade na troca de partes indispensáveis à operação

(ferramentas ou outros acessórios), acesso aos comandos com boas características de ergonomia, visibilidade dos comandos (cor, formato, disposição), fácil montagem e transporte, grau de automação crescente, facilidade de abastecimento de insumos (matéria-prima, combustível ou outros);

- custo operacional : baixo consumo de recursos naturais e **energia elétrica**, emprego de recursos recicláveis (no caso da manutenção, uma possibilidade muito interessante é a utilização de óleo, juntas e peças confeccionadas em material reciclável ou recondicionáveis – desde que projetadas para este fim e criteriosamente reparadas, como os pneus de aeronaves os quais, no Brasil, alcançam seis recauchutagens, economizando resinas e principalmente, borracha natural, responsável por 85% da composição de pneus de grande porte e capacidade de carga), baixo custo de operação por unidade produzida (peça produzida, passageiro transportado, potência gerada e outras possibilidades conforme a natureza do equipamento), o que obviamente, é influenciado pela manutenção e pela manutenibilidade;
- segurança : proteção contra incêndio, vazamento (sobretudo de material tóxico), contaminação do ar (o que inclui poluição excessiva), ruídos, partes móveis não expostas, ausência de partes salientes, não haver partes cortantes ou cantos vivos, fácil evacuação das instalações (exemplo : cabinas de pintura, áreas próximas a estufas, caldeiras e compressores), sistemas de alarme sonoro e visual.

Especificamente sobre a seleção de equipamentos, hoje é inconcebível adquirir **qualquer** tipo de aparelho para uso comercial ou industrial sem que o pacote de compras do mesmo inclua treinamento para operadores e técnicos da manutenção (mecânicos, eletricitas e outros colaboradores). Na verdade, até mesmo engenheiros devem ser contemplados com treinamento no caso de equipamentos muito específicos. Este é o momento em que a

manutenção se vê na posição de **cliente** de uma **prestação de serviços** e, em nome da qualidade de suas operações e do processo do qual faz parte, deve ter claras suas especificações para que estas sejam transmitidas aos fornecedores. Adquirir serviços e equipamentos de qualidade é uma atribuição primordial da manutenção e, desde que a operação destes equipamentos respeite as características de projeto dos mesmos, o investimento em qualificação do pessoal envolvido em manutenção terá retorno satisfatório não só em termos de economia em custos, mas de ganhos em segurança, produtividade, qualidade e redução de riscos.

### **Os Padrões de Manutenção Preventiva**

Visando não apenas a qualidade dos serviços de manutenção, mas a otimização de todo um processo, inclusive o gerenciamento desta atividade, impõe-se a necessidade da elaboração e execução de **padrões de manutenção**. Por execução, compreende-se todas as tarefas operacionais executadas no chão-de-fábrica ou oficinas e por gerenciamento, o conjunto de tarefas administrativas e de planejamento da manutenção, tais como administração dos estoques, mão-de-obra, custos, registros de falhas, revisões e análise de desempenho. Os benefícios da adoção de padrões, no que tange à manutenção, são :

- redução no tempo de treinamento de novas equipes, nivelando as habilidades de técnicos mais antigos e pessoal mais recente, possibilitando a execução de tarefas complexas por um número maior de equipes de manutenção;
- torna possível a transferência de tarefas simples de manutenção, tais como lubrificação, inspeções visuais, pequenos (e, na visão do autor deste trabalho, limitados) reparos e trocas de peças para os operadores da produção o que, em essência, é um dos fundamentos

da política de TPM (do inglês “*Total Productive Maintenance*” ou Manutenção da Produtividade Total);

- torna as ações corretivas e preventivas mais confiáveis, reduzindo paradas por falhas recorrentes ou provocadas por manutenção imperfeita, aliás, um dos grandes problemas da manutenção preventiva;
- permite o domínio tecnológico da manutenção pela organização, até na forma de literatura, pois o conhecimento é armazenado e pode ser mais rapidamente transferido ou multiplicado, sem que a organização dependa de equipes específicas e tenha prejuízos de grande monta com sua eventual saída;
- contribui para a melhoria do PCM ao longo do ano, reduzindo e padronizando a duração das tarefas, possibilitando um preciso controle da disponibilidade e facilitando o planejamento logístico (como alocação de mão-de-obra e recursos materiais e contratação programada de serviços externos);
- contribui para a otimização dos custos de manutenção pelo melhor aproveitamento dos recursos humanos, eliminação de desperdício de peças e materiais de consumo, além da óbvia vantagem da redução do número de horas-extras e da sobrecarga nas oficinas, o que poderia gerar filas.

Um benefício que, dependendo da organização pode ser sentido em menor ou maior escala é a percepção e compreensão das dificuldades da realização das tarefas de manutenção (operacionais e gerenciais), principalmente pela produção e por finanças, propiciando um clima favorável à cooperação entre setores da organização. A experiência mostra, entretanto, que esta cooperação é assimilada de modo mais eficaz se a decisão de colaborar com a manutenção for tomada em níveis estratégicos, portanto, em esferas superiores às

operacionais, pois além do poder, os níveis estratégicos têm a correta visão dos resultados de ações executadas nos âmbitos tático e operacional sobre toda a organização, mesmo que os detalhes do processo não lhes sejam familiares.

A necessidade da adoção de padrões encontra respaldo também na confiabilidade, já que os reparos e a operação dos equipamentos dar-se-á sempre sobre condições o mais idênticas quanto possível, tornando mais precisas as inferências necessárias para o tratamento das falhas e na filosofia de Qualidade Total, pois nesta há a necessidade de que todos tenham a mesma compreensão sobre assuntos idênticos (falar a mesma língua), possibilitando o controle dos índices que traduzem a qualidade das operações de uma organização, além do que, a proficiência adquirida com a repetição conduz a ações espontâneas, mas não intuitivas, o que se traduz na repetição das tarefas aprendidas em treinamento com qualidade e acima de tudo, segurança, como citam XENOS (1998), ISHIKAWA (1985) e CARDOSO e BELHOT (1994). Mais uma vez, a aviação, tanto no que tange aos pilotos, como aos técnicos e engenheiros envolvidos na manutenção e operação de aeronaves, são a referência mais marcante deste procedimento.

Os padrões podem ser técnicos ou gerenciais. Não se pode estabelecer uma escala de valores que classifique um ou outro como mais importante, pois padrões gerenciais garantem um bom planejamento e inclusive geram procedimentos corretos de manutenção, mas não garantem que a execução destes padrões será como planejado.

Entretanto, os padrões gerenciais são muito distintos se comparados os procedimentos adotados por diferentes organizações, em função das necessidades e preferências de cada administrador. Com relação aos padrões técnicos, a variabilidade também é acentuada, pois os mesmos são função, principalmente, da natureza dos componentes/equipamentos a serem tratados e das práticas de manutenção aplicadas.

Entretanto, pode-se estabelecer uma rotina metodológica para sua elaboração, a qual abrange grande parte da variedade de situações tecnologicamente diferentes encontrada em um sistema de produção. Assim, os padrões técnicos – que consistem num conjunto de documentos tratando das diversas tarefas operacionais da manutenção executadas no nível do chão-de-fábrica, ambiente operacional e oficinas - podem ser subdivididos em padrões de **inspeção, troca, reforma e melhoria de equipamentos e de manutenção autônoma**. A abrangência de cada um destes padrões é dada a seguir.

- Padrões de Inspeção : detalham os componentes e subsistemas a serem inspecionados, a frequência destas inspeções e, um aspecto de suma importância para o controle da manutenção e para a qualidade de seus trabalhos, os critérios de julgamento baseados no resultados destas inspeções, as quais visam identificar de modo quantitativo ou qualitativo o grau de deterioração de equipamentos e instalações por meio de métodos pré estabelecidos. Estes métodos podem ser executados, dependendo do grau de precisão e complexidade necessários, desde impressões sensoriais até medições que se utilizem de técnicas de ensaios não destrutivos, como o ultra-sônico, previsto inclusive nas normas de inspeção de dutos e vasos de pressão como a NR-13.

É oportuno salientar que a estes tipos de elementos (vasos de pressão) quase sempre estão associados a risco de graves acidentes e perdas monetárias vultosas, razão pela qual são citados neste trabalho e justificando a necessidade técnica da adoção de padrões na execução da manutenção, já que o risco somente pode ser corretamente avaliado com base em situações específicas, o que inclui a forma como se dá a intervenção da manutenção no equipamento.

De modo geral, para que sejam compreendidos e mais facilmente cumpridos, os padrões de inspeção devem conter, como informações essenciais, **as partes do equipamento a serem inspecionadas, a frequência das inspeções, os métodos, aparelhagem e instrumentos aplicáveis a cada um destes itens, as características (variáveis**

**operacionais) a serem inspecionadas, os critérios de decisão (a partir de quando uma variável passa a ser considerada anormal e que medidas tomar neste caso).**

- Padrões de Troca : constituem uma lista de todos os componentes cuja vida útil seja conhecida – como é o caso da maioria dos componentes mecânicos elementares como mancais de rolamento, juntas e vedações, pares de engrenagens, correias de transmissão e outros - sujeitos à substituições periódicas, contendo a periodicidade destas trocas e a maneira de se executá-las. As principais informações contidas nos padrões de troca são os métodos de desmontagem do equipamento para acessar o componente, métodos para remoção e instalação das peças, cuidados na execução do serviço, procedimentos de montagem do equipamento após o reparo, testes antes do retorno à operação (entrega), lista de ferramentas e material necessários para a intervenção, além dos cuidados quanto à segurança e lista de EPI's (Equipamentos de Proteção Individual).
- Padrões de Reforma e Melhoria dos Equipamentos : nem sempre é possível elaborar padrões de reforma, as quais visam restabelecer o comportamento do equipamento quanto à falha, para níveis próximos do desempenho projetado, pois muitas das características – e por conseguinte componentes - a serem restauradas só se fazem conhecidas após um longo aprendizado com a operação e manutenção de certos equipamentos, o que explica a necessidade da adoção de padrões, planejamento e controle da manutenção, pois sem os registros históricos, uma reforma pode se transformar em uma aventura. Já as melhorias nos equipamentos, embora também não sejam possíveis de serem especificadas de forma imediata, pelos mesmos motivos da reforma, podem ser obtidas de modo mais rápido se comparado às reformas, pois em geral, mesmo operando sob as condições de projeto, o rendimento de um equipamento pode não corresponder ao esperado, ou a segurança dos operadores e do ambiente esteja ameaçada, ou então pode ser que haja geração de ruídos e de calor excessivos, enfim, o equipamento incomoda mesmo durante sua operação

normal. A manutenção passou a se ocupar das tarefas de melhoria de equipamentos de modo mais marcante com o aumento na competitividade industrial a partir dos anos 70 e, mais recentemente, com o advento das normas da série ISO 14000, as quais forçaram as organizações a gerenciarem suas operações de modo a atingir o mínimo impacto ambiental possível, o que muitas vezes implica em aperfeiçoar equipamentos ou até substituí-los, sobretudo em nome do controle da poluição que gera sua operação. Assim a melhoria é uma necessidade mais facilmente sentida pelos operadores e que pode ser implementada pela manutenção. Comumente, esta tarefa é executada sob o imponente título de reprojeto, o que não deixa de ocorrer, já que muitas vezes são necessários desenhos técnicos referentes às melhorias, além do projeto de novos componentes.

Os padrões de reforma e melhoria devem então conter os procedimentos operacionais os quais descrevam todas as etapas da revisão, tarefas críticas (daí a necessidade de um cronograma baseado em cartas PERT-CPM e gráficos de GANTT), ferramental e materiais necessários (como peças, elementos consumíveis – eletrodos de solda, combustível, lubrificante e fluidos para teste, metais de adição para restauração de elementos estruturais e uma infinidade de outros exemplos – e recursos para a reinstalação do equipamento), além dos desenhos técnicos das alterações e peças novas a serem fabricadas. Além disto, é necessário especificar todo o conjunto de testes necessários à certificação da aptidão do “novo” equipamento em retornar à operação normal. Ainda com relação à reforma e melhoria, há um ponto sujeito a bastante controvérsia : a modificação de equipamentos para incrementar seu desempenho. Uma coisa é a melhoria ou reforma de equipamentos, visando aperfeiçoar suas operações, manter ou retornar os equipamentos às suas condições de uso especificadas em projeto (não por coincidência, esta é a própria definição de manutenção). Entretanto, melhorar o desempenho de equipamentos significa alterar as solicitações previstas em projeto, impondo novas condições de uso e – talvez – um período

de testes tão longo e com procedimentos tão complexos, suficientes para inviabilizar esta atividade. Além disso, desde a década de 80, muitos equipamentos são concebidos sob a filosofia de projeto de otimização do desempenho. Por isso, suas características operacionais já estão próximas ao limite. Logo, aceitar a tarefa de modificar equipamentos para ampliar seu desempenho é uma decisão a ser cuidadosamente analisada pela manutenção, embora o autor deste trabalho reconheça que é uma prática adotada com bastante frequência, nem sempre com os resultados esperados.

Os padrões de manutenção podem ainda contar com tipos inerentes a atividades específicas, como a gestão de estoques de peças sobressalentes, técnicas de armazenamento e outros. Deve-se observar que a decisão sobre quais padrões adotar para cada componente/subsistema de um equipamento passa pelo conhecimento das suas características funcionais, da elaboração de seu histórico de falhas, do tratamento destas falhas sob o ponto de vista da confiabilidade, a qual permite listar as práticas de manutenção possíveis e da preocupação não só da manutenção, mas de toda a organização com a **qualidade e segurança** de suas operações.

Finalizando as considerações sobre os padrões, deve-se ressaltar que os mesmos devem ser refinados e aperfeiçoados, pois são resultado de um registro histórico do equipamento, o qual está em constante evolução pelo fato de acumular maior quantidade de informações ao longo do tempo, conduzindo a uma base de conhecimentos cada vez mais completa para a tomada de decisões.

### **Considerações Sobre o Planejamento do Uso de Mão-de-Obra e Sobressalentes na Manutenção Preventiva.**

A adoção dos Padrões na manutenção possibilita uniformizar os tempos médios de reparo (do inglês “*Mean Time to Repair*” - MTTR) em seu valor mínimo, desde que os recursos humanos estejam treinados e tenham qualificação compatível com as funções que irão desempenhar. Assim, a disponibilidade, no que tange à parcela da Manutenção Preventiva, estará no seu nível máximo.

Do ponto de vista do PCM, uma grande contribuição do uso dos padrões é possibilitar a programação do uso de mão-de-obra e de sobressalentes, pois a cada período, é conhecida a quantidade de máquinas a ser revisada, a duração da revisão em cada um de seus sub-sistemas e a lista de peças necessária à estas revisões. Portanto, no que tange à programação da utilização de mão-de-obra, apenas é necessário comparar a quantidade de H-h (Horas-homem) consumidas em um determinado período com a disponibilidade de mão-de-obra no mesmo, elaborando-se o gráfico similar ao da Figura 4.3 (aconselha-se que seja programada semanalmente, o que permite antecipação, mas também flexibilidade suficiente para evitar sobrecargas nas oficinas decorrentes de eventos imprevisíveis, como o absenteísmo). Através do controle dos relatórios já mencionados, e do próprio histórico das falhas dos equipamentos, pode-se determinar a reserva de H-h necessária para a manutenção corretiva e/ou emergencial a cada período, somando-as à quantidade de H-h e obtendo um bom dimensionamento inicial das equipes de manutenção.

O mesmo princípio se aplica à gestão do estoque de peças sobressalentes. Na verdade, como as tarefas de manutenção preventiva são programadas, nem mesmo há a necessidade de manter estoques de tais itens, pois o fornecimento pode ser negociado, na forma de um “KANBAN”, onde há apenas um pulmão (reserva) preventivo contra a falta

temporária de algum item que seja muito consumido. Evidentemente que itens muito complexos, difíceis de serem obtidos no curto prazo, como transmissões especiais, algumas peças de injetoras sujeitas à reforma periódica e outras, devem estar presentes em um estoque. Mas as peças mais corriqueiras, reveladas pela elaboração e análise de um simples diagrama de PARETO confrontando tipos de peças com o consumo em determinado período, podem e devem ser negociadas com os fornecedores, podendo ser adquiridas em lotes (para ganhar descontos na escala), mas entregues em função da programação das revisões, eliminando o custo de seu armazenamento. E cabe ainda uma observação final : o verdadeiro peso relacionado aos estoques, não diz respeito à manutenção preventiva, como advogam os menos avisados, mas sobre a manutenção corretiva, pois a adoção pura e simples desta modalidade de manutenção, sem os cuidados já bastante citados ao longo deste trabalho, exige, como forma de conter o brutal decréscimo na disponibilidade, a presença das peças mais consumidas e de outras as quais falham menos freqüentemente, mas ocasionam tempos de parada e danos sobre os equipamentos em maior monta. Portanto, observar os aspectos que norteiam a seleção da manutenção preventiva nos casos aplicáveis é mandatório para manter mínimos os custos globais desta atividade, incrementar a condição operacional dos equipamentos e de todo o sistema produtivo, a rentabilidade do empreendimento (já que hoje até as ONG's filantrópicas controlam seu desempenho financeiro!), a qualidade de toda a operação do sistema, a segurança e os efeitos sobre o ambiente.

A correta política de gestão de sobressalentes em manutenção preventiva influi no risco associado à execução da manutenção, pois a falta ou indisponibilidade de um item quando requerido pode paralisar a linha de produção por longos períodos. O caso em estudo pelo autor já apresentou paradas de três dias (48 horas de trabalho) devido à dificuldade em se encontrar rolamentos específicos para uso em altas velocidades.

#### 4.4.3 - Manutenção Preditiva : Especificidades do Planejamento

A Manutenção Preditiva pode ser definida, de acordo com MIRSHAWKA (1991) e NEPOMUCENO (1989) como uma prática de manutenção onde a decisão de realizar a intervenção é baseada na **condição do parâmetro** de interesse. Assim, sua execução consiste na realização de medições, periódicas ou contínuas, de certas características funcionais dos equipamentos, para avaliar seu desempenho em função de tais parâmetros, determinando o momento da intervenção e, portanto, da parada. Assim, a manutenção preditiva acompanha o desenvolvimento da falha e neste ponto se interpõe a primeira restrição ao seu emprego : só são passíveis de serem tratadas sob manutenção preditiva os componentes cujas falhas, aleatórias ou não, emitam sintomas. Dificilmente um equipamento será mantido sob esta prática por inteiro, apenas subsistemas específicos são passíveis deste tratamento, quer por razões técnicas (principalmente seus modos de falha e conseqüências sobre a operação) ou por razões financeiras, pois o custo de implementação da manutenção preditiva é alto pela exigência de aparelhagem e instrumentação específicas para cada análise que se deseje realizar, programas de computador para o tratamento das informações (aqui sim o emprego deste recurso torna-se indispensável, pois análises matemáticas complexas devem ser feitas, sobretudo nos casos de análise de assinaturas – vibração e acústica), *staff* próprio para análise dos dados coletados e treinamento não só das equipes que manterão contato com o equipamento, já que a qualidade da manutenção preditiva é diretamente dependente da realização de medições corretas e confiáveis, o que implica o uso das técnicas adequadas a cada caso, de instrumentos de boa qualidade e de aferição controlada; mas principalmente, a necessidade de treinamento dos analistas e programadores. Estes fatos indicam que apenas os componentes ditos críticos são elegíveis para aplicação da manutenção preditiva.

A manutenção preditiva está associada a algumas técnicas de coletas de dados, as quais são selecionadas em função dos parâmetros que se deseja medir. Portanto, ainda que

alguns equipamentos apresentem componentes cuja falha é candidata a ser tratada de forma preditiva, é necessário que os mesmos permitam a coleta de informações de boa qualidade, chegando ao extremo, em algumas situações, da necessidade de tomadas para conexão de instrumentos destinados a analisar o estado atual do parâmetro de interesse. A implementação da manutenção preditiva em equipamentos já operantes e naqueles em que o fabricante não tenha fornecido quais os parâmetros vitais no seu funcionamento necessita ser baseada na análise das falhas, sendo de extrema valia a aplicação dos conceitos de confiabilidade, para avaliar quais os componentes do sistema são críticos para sua operação (exigindo a elaboração dos diagramas de blocos e, muitas vezes, do FMEA), os possíveis modos de falha dos componentes do sistema, baseado neste levantamento, quais os parâmetros associados a estes modos de falha, quais os valores considerados normais e a partir de que momento a parada deve ser feita, além de qual o máximo valor tolerado para o parâmetro, como coletar os dados e como será feita a análise de tendência do parâmetro, pois, sobretudo no caso da coleta de dados discretas, os valores associados ao parâmetro de interesse podem atingir valores acima dos permitidos exatamente entre as medições. Estas linhas podem ser consideradas como um passo a passo para a implementação da manutenção preditiva.

De um modo geral, a implementação de um programa de manutenção preditiva pode ser assim sistematizada :

- Verificação sobre quais componentes recai a maior responsabilidade pela operação do equipamento, selecionando o que for mais relevante (se houver), concentrando a observação e análise das falhas sobre os mesmos;
- Se possível, verificar junto aos fornecedores dos componentes/equipamentos os valores dos parâmetros de interesse já listados;

CARDOSO (2004)

- Determinação dos procedimentos de medição (método, aparelhagem e frequência), elaborando a partir daí padrões semelhantes aos da manutenção preventiva, não só para a intervenção no equipamento (como instruções para a troca de peças), mas para assegurar que a coleta de dados será feita de forma confiável;
- Fixação dos limites normal, de alerta e de perigo para os valores dos parâmetros de interesse, construindo um histórico relativo a estes parâmetros, fundamental para a realização da análise de tendência;
- Elaboração de padrões para tabelamento, análise e classificação das informações coletadas, sobretudo na análise informatizada;
- Determinação final dos intervalos de tempo entre medições, ou da necessidade de medição contínua.

É de vital importância para o planejamento desta prática a execução da análise de tendência do parâmetro, pois o estado atual do parâmetro no momento da medição é de pouca utilidade na decisão de parar ou não o equipamento, sobretudo na fase de implementação da manutenção preditiva e em medições discretas. Assim, deve-se ter em mãos o histórico dos parâmetros e recorrer-se a algum método numérico, em geral regressões exponenciais ou polinomiais, obtendo uma curva semelhante à mostrada na Figura 4.5, extraída de MIRSHAWKA (1991).

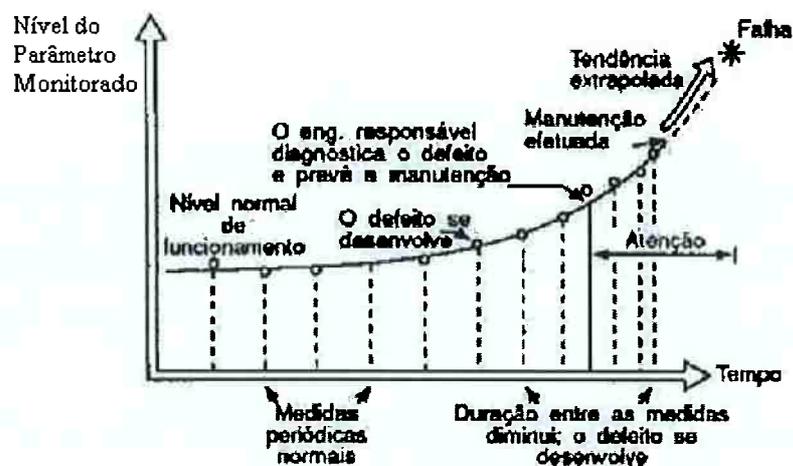


Figura 4.5 – Curva de Tendência para o Valor de um Parâmetro de Interesse, MIRSHAWKA (1991)

A curva mostrada na Figura 4.5 mostra que, enquanto não se conhece o valor de perigo (onde se dá a falha), há a necessidade de reduzir o espaço entre as medições quando se nota uma aceleração na deterioração do parâmetro. A partir destas medições, pode-se determinar o valor de alerta, definido como a magnitude do parâmetro monitorado a partir do qual se deve intervir no equipamento, como citado por MIRSHAWKA (1991). Em uma etapa mais avançada, tendo-se conhecidos os valores de alerta e o comportamento da curva, não mais é necessário acompanhar os valores absolutos do parâmetro, sendo eficaz acompanhar a tendência da curva para definir quando será procedida a intervenção. Caso nenhuma medida seja tomada, a falha se desenvolve e eclode, causando as conseqüências associadas à esta. Outra necessidade da elaboração de uma curva deste tipo é que após diagnosticada a falha, necessita-se programar a parada. Logo, entre o instante da detecção e a imobilização do equipamento, o mesmo deve operar satisfatoriamente (caso contrário, a manutenção preditiva perderia todo o seu significado) e o intervalo até a parada deve terminar em um instante onde o valor do parâmetro ainda não tenha ultrapassado, preferencialmente, um nível de alerta, o qual estará entre o valor normal e o de perigo. Com o passar do tempo, a estimativa desta

curva passa a ser bastante fidedigna, já que os históricos dos parâmetros acumularão bastante informação, permitindo traçá-la diretamente ponto a ponto até bem próximo de nível de perigo. Alguns autores advogam que, após a diagnose da falha e decidida a necessidade da intervenção, a manutenção passa a ser uma corretiva programada, outros, que esta hipótese não é verdadeira já que há uma antecipação à falha. Na verdade, não há uma antecipação à falha, já que a manutenção preditiva se aplica a componentes cujas falhas tenham TDF (como indicado na Tabela 4.1), o que ocorre, é que há uma antecipação com relação à parada inadvertida do equipamento. Aliás, outra restrição que se faz a respeito de sistemas sujeitos à manutenção preditiva, é que os mesmos apresentem algum grau de tolerância à falha e, neste caso, o tempo de franquia ou “*grace time*” é a média das diferenças entre os valores de perigo e alerta para curvas estimadas com base em sistemas idênticos falhando sempre sob o mesmo modo, como afirma VAURIO (1997).

Com relação às técnicas empregadas pela manutenção preditiva, algumas já se tornaram bastante utilizadas, o que não significa que tenham ficado conhecidas, já que sua finalidade é muitas vezes confundida com o próprio conceito de manutenção preditiva. São as seguintes :

- Medição Periódica da Espessura do Material : muito requisitada em indústrias de processo contínuo como siderúrgicas, petroquímica, papel e celulose, além das geradoras de energia e linhas e vasos de pressão, em virtude da natureza do material com os quais estes equipamentos lidam, às vezes corrosivos, tóxicos e sujeitos a altas pressões e temperaturas, do mesmo modo como é feito na manutenção preventiva. Aliás, esta medição periódica a que se refere este item é nada mais que o padrão de inspeção determinado pela NR-13, sobre o qual se adiciona um procedimento de coleta e análise de dados para possibilitar a execução da análise de tendência;

- Temperatura de Operação : esta forma de medição em geral visa determinar a condição do parâmetro preocupada com as condições de operação do equipamento para preservar a qualidade do produto final, novamente muito empregada nas indústrias química e siderúrgicas, pois pequenas variações de temperatura, provocadas pela queima ou falha nas resistências e bobinas de indução para aquecimento pode conduzir à obtenção de um produto totalmente diferente do especificado, já que está-se lidando com reações químicas. Se a variação de temperatura apresentar uma tendência de valores excessivos, deve-se proceder a uma pesquisa sobre o equipamento para verificar quais itens apresentam falha, esta pesquisa sobre o perfil de distribuição de temperaturas ao longo de um componente ou parte de uma máquina é conhecida como Termografia, ou seja, com base em informações coletadas sobre o perfil de temperaturas, executa-se uma análise de tendência da degradação do equipamento em virtude do aquecimento excessivo ou da distribuição incorreta de temperatura, podendo-se utilizar, inclusive, técnicas de medição e aquisição de imagens por infra vermelho, alimentando-se um modelo FEM (do inglês *Finite Element Model* ou Modelo de Elementos Finitos), muito mais precisas e fáceis de serem obtidas que a medição com termômetros de contato;
- Análise de Assinatura : mais conhecida dentre todas as técnicas de manutenção preditiva, genericamente, esta técnica é conhecida como análise de vibrações, mas na verdade, o parâmetro a ser investigado pode ser a assinatura acústica, deslocamentos (amplitude de vibração), velocidade, aceleração (desbalanceamento dinâmico) e diferenças de fase, sendo que para a análise de vibrações, as quatro últimas características são medidas em conjunto, filtradas e analisadas utilizando-se, sempre, um procedimento computacional. A maioria destes algoritmos é baseada nas transformadas de FOURIER, pois a informação sobre a qual será processada a análise de tendência é o espectro de frequências. Então os dados coletados são analisados sempre no domínio da frequência, mesmo que o problema

esteja com a amplitude de vibração, isto porque esta amplitude só é alimentada a partir de uma frequência característica, “plotada” com o auxílio da análise espectral via transformada de FOURIER, daí sua aplicação neste caso. O assunto análise de assinatura é bastante complexo e, obviamente, o método computacional para filtragem e análise no domínio da frequência pode depender das preferências do analista, além do que, a extensão deste assunto exige estudo específico, o que não é o objetivo deste trabalho. De qualquer forma, os principais diagnósticos possíveis de se obter com o emprego destas técnicas são o desgaste de rolamentos e mancais de deslizamento, desbalanceamento de eixos e rotores de bombas, turbinas e compressores de parafuso, erros no passo circular de engrenagens e dentes quebrados em transmissões, pois cada um destes fenômenos emite uma assinatura característica;

- **Análise da Composição Química de Fluidos :** fluidos hidráulicos, lubrificantes e fluidos isolantes de transformadores degradam-se com o tempo e algumas formas de degradação não dependem da utilização do fluido. Periodicamente uma amostra do óleo é coletada e sua composição química é analisada, preferencialmente em espectrofotômetros, equipamento que permite uma análise detalhada e rápida, mas cara, com a finalidade de prevenir corrosão, desgaste excessivo de elementos mecânicos pela perda de viscosidade e outros danos. No caso do óleo isolante, é verificada ainda a constante dielétrica do mesmo;
- **Análise da Presença de Material Particulado no Lubrificante :** o mais conhecido método de medição de material particulado é a ferrografia, pois em geral, elementos mecânicos contém aço e a presença de ferro no óleo pode ser, dependendo do teor, sinal de desgaste excessivo, decapagem, fadiga (sobretudo fadiga superficial em mancais de rolamento), contato indevido entre peças metálicas e outros danos. Outros materiais analisados são o cromo (que pode indicar perda de tratamento térmico de elementos mecânicos ou

engripamento de engrenagens), zinco, alumínio, magnésio, cobre (presente no bronze de mancais e buchas) e óxidos, os quais, pela dureza elevada, constituem ameaça a qualquer elemento mecânico quando presente no lubrificante;

- Constante Dielétrica : alguns elementos devem atuar como isolantes ou prover uma resistência elétrica elevada, características que perdem com sua degradação química, exigindo inspeções periódicas;
- Ventilação e Aeração : alguns equipamentos funcionam hermeticamente (como bombas de vácuo), outros exigem ventilação para resfriamento ou correto funcionamento. Assim, testes de estanqueidade e de vazão se fazem necessários, embora seja difícil fazer uma análise de tendência nestes casos. Assim, a inspeção apenas verifica se o parâmetro permanece dentro da faixa operacional ou se está fora dela, exigindo intervenção;
- Monitoramento de Fissuras e Deformações : grandes estruturas ou estruturas sujeitas à cargas elevadas (prédios, pontes e obras de arte civis inclusive) exigem inspeção periódica quanto à presença de fissuras, as quais podem ser oriundas de fadiga ou corrosão. A presença de fissuras acelera a fratura por fadiga de qualquer elemento estrutural ou mecânico e por isso deve ser monitorada nestes casos passíveis de provocarem falhas realmente catastróficas, como em navios, aviões, plataformas marítimas e muitas outras. Em geral, são empregados métodos e ensaios não destrutivos para a inspeção.

De forma geral, a indicação dos métodos de medição e inspeção indicados para a manutenção preditiva pode ser visualizada na Tabela 4.8, adaptada de NEPOMUCENO (1989).

Tabela 4.8 – Aplicabilidade dos Métodos Conforme o Tipo de Equipamento,  
NEPOMUCENO (1989)

Método/Equipamento	Máquinas Rotativas	Dispositivos Estáticos	Dispositivos Elétricos	Instrumentos	Estruturas
Ensaios Não-Destrutivos					
Visual					
Análise de Vibrações					
Termografia					
Emissão Acústica					
Medida de Espessura					
Análise Química					
Análise de Partículas					
Deteção de Vazamentos					
LEGENDA		Aplicável			
		Não Aplicável			

Com relação à programação de mão-de-obra, exceto pela presença das equipes de análise e de coleta de dados, as considerações são as mesmas feitas para a manutenção preventiva, pois o trabalho das equipes mencionadas é rotineiro e programado, ficando alguma dificuldade em alocar a mão-de-obra de oficina, pois apesar de poder ser programada, no início não se tem noção de qual a demanda requerida pelas intervenções decididas pela manutenção preditiva, devendo-se utilizar o tempo ocioso da manutenção preventiva (se houver), ou inicialmente, ampliando a reserva de manutenção corretiva. Nada há a acrescentar sobre a política de administração de sobressalentes, pois além de ser planejada, permitindo a aquisição programada, com o tempo o comportamento dos parâmetros assume um comportamento médio, fazendo com que – em termos de programação de mão-de-obra, peças de reposição e carga na oficina – a manutenção preditiva se torne uma manutenção preventiva tecnicamente mais sofisticada.

Finalizando, cabe ressaltar que a manutenção preditiva não deve ser tomada como sinônimo de monitoração, mas de avaliação da condição do parâmetro para determinação do

momento da intervenção. Sua aplicabilidade, inicialmente, era sobre sistemas caros e sofisticados, cuja segurança e/ou nível de operação não pudessem ser comprometidos, com a finalidade de assegurar que, associada à manutenção preventiva, a sua operação esteja tão isenta quanto possível de falhas. Posteriormente, concluiu-se que a manutenção preditiva prolonga a vida útil do equipamento (discutível, pois a vida útil estimada em projeto, sobretudo nos que tenham sido concebidos sob a ótica da otimização, não pode ser ampliada por ações tradicionais de manutenção, como já exposto neste trabalho). De qualquer forma, ainda que não prolongue a vida útil do equipamento, ela pode estender a vida do componente, pois a análise de tendência indica o momento da ruptura (parada do equipamento devido ao desenvolvimento da falha). Para equipamentos mecânicos esta possibilidade só se verifica com segurança se o mesmo estiver sob cuidados da manutenção preventiva, pois a substituição dos componentes é programada para intervalos que coincidam com seu MTTF (tempo médio até a falha), que é uma média e pode estar sujeita a dispersões. Assim, componentes que podem sobreviver além do MTTF têm sua utilização prorrogada até o momento em que sua análise de tendência indicar como oportuno para substituição. O problema é que o custo da manutenção preditiva, neste caso, se soma ao da manutenção corretiva e o acréscimo na vida do componente pode ser encoberto pelo custo da manutenção. Esta aplicação é mais apropriada no caso de equipamentos sofisticados que desempenhem funções não muito críticas no sistema produtivo ou que operem com componentes que podem ser de difícil obtenção, uma vez que entre o MTTF e o fim da vida prorrogada estimado, a degradação da confiabilidade se dá de forma mais acentuada

## 5 – CONCEITOS DE ANÁLISE DE RISCO E DE DECISÃO

### 5.1 Considerações Iniciais

Os conceitos de análise de risco foram desenvolvidos recentemente, se forem comparados a outros conceitos clássicos de física e matemática desenvolvidos para aplicação em engenharia. Os conceitos de risco são empregados para definir e quantificar as incertezas associadas a um evento, sendo estas relacionadas com a probabilidade de ocorrência de um evento indesejável que reduza o desempenho de um equipamento ou de um sistema mais complexo e com a avaliação das conseqüências da ocorrência de tal evento.

Os riscos associados com um dado sistema advém da interação do mesmo com as ações ambientais, do seu envelhecimento ou degradação decorrentes de sua própria operação e da ação humana. Conseqüentemente, o risco pode ser classificado como voluntário ou involuntário, dependendo de quanto este risco pode ser controlado pelas pessoas, inclusive por aquelas exposta ao mesmo. A sociedade, de forma geral, aceita níveis elevados de risco voluntário, porém, dificilmente aceita níveis elevados de risco involuntário.

De uma forma genérica, o risco pode ser representado por um par de informações, as quais definem a probabilidade de ocorrência de um evento indesejado e as conseqüências de sua ocorrência, ou como mostrado na equação 5.1 :

$$Risco = (p_i, c_i) \quad (5.1)$$

onde

$p_i$  .... probabilidade de ocorrência do evento  $i$

$c_i$  .... conseqüência da ocorrência do evento  $i$ .

Comumente, o risco é definido como o produto da probabilidade de ocorrência pela consequência da falha como em 5.2.

$$Risco = p_i \cdot c_i \quad (5.2)$$

Para uma máquina ou conjunto de máquinas, a ocorrência de um evento indesejável está usualmente associada a um evento inicial – ou falha inicial – que acontece em um componente específico. Em função da disposição física dos diversos subsistemas que compõem uma máquina, ocorre a denominada propagação da falha, ou seja, em função da ocorrência de uma falha inicial, outros componentes ou subsistemas da máquina também poderão falhar, culminando com a falha da máquina como um todo (não raro ocasionando sua parada). Uma dada seqüência de propagação da falha, a partir da ocorrência de um evento inicial específico, é denominada de cenário de falha. Ressalta-se que, usualmente, podem ocorrer diversos cenários de falha associados a um dado evento inicial.

Para cada cenário de falha, deve-se estimar a probabilidade de ocorrência do mesmo e as consequências a ele associadas, sendo estas relacionadas com a perda de produção, enquanto o equipamento estiver imobilizado para reparo, com o processo de reparo e com a eventual ocorrência de prejuízos à saúde do ser humano em termos de ferimentos ou mesmo de mortes.

Portanto, para uma máquina ou mesmo para uma estrutura, o risco está relacionado com a ocorrência de uma série finita de cenários de falha, todos com probabilidades de ocorrência e consequências específicas, ou como representado na equação 5.3 :

$$Risco = \{ (p_1, c_1), (p_2, c_2), \dots, (p_n, c_n) \}. \quad (5.3)$$

O processo de análise de risco pode ser subdividido em duas etapas, como indicado na Figura 5.1, envolvendo o gerenciamento do risco, o qual inclui a avaliação e o controle do risco, bem como, sua comunicação.

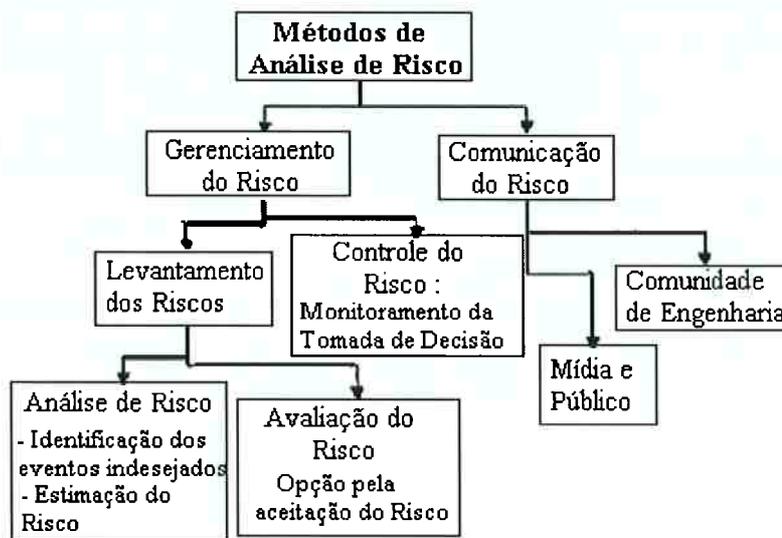


Figura 5.1 – Processo de Análise de Risco

O processo de avaliação do risco inclui a definição dos possíveis cenários de falha, incluindo a definição da probabilidade de ocorrências, bem como as conseqüências a eles associadas, como citado por MODARRES et al (1999).

Adicionalmente, deve-se definir se o risco calculado é aceitável para os padrões de risco admissível definidos na análise, verificando-se, caso necessário, possíveis alternativas que impliquem na sua minimização, como citado por ROUSH e XANG (2000). Através da aplicação de um critério de decisão, define-se qual a alternativa a ser selecionada.

A comunicação do risco envolve a apresentação dos resultados da análise de risco para o público em geral, incluindo-se a imprensa e a comunidade técnica interessada na análise.

## 5.2 – Aspectos Gerais da Percepção dos Riscos

A sensibilidade ao risco pode ser avaliada tendo-se em mente o contexto operacional de determinados equipamentos. Assim, devem ser levantados aspectos relacionados com a falha do equipamento, tais como o impacto ambiental, os efeitos sobre a população, exigências legais, as conseqüências internas à organização (perdas de produção, geração de produtos/serviços de qualidade comprometida, acidentes de trabalho).

O procedimento de análise de risco envolverá, dado um modo de falha de um componente de um equipamento, a avaliação da progressão desta falha sobre o próprio equipamento e sobre o sistema do qual este faz parte, visando a análise da degradação dos mesmos sob o aspecto operacional e a definição do impacto da falha sobre o ambiente, operador, qualidade do produto, entre outros. Para seleção do procedimento de Análise de Risco a ser aplicado, executar-se-á uma análise crítica dos aspectos favoráveis e desfavoráveis dos métodos acima citados, tendo em vista as diretrizes de Análise de Risco. A partir desta análise, será definido o método de análise de risco a ser utilizado no desenvolvimento desta pesquisa, visando a avaliação da progressão e conseqüências de uma falha de um equipamento ou sistema.

Para melhor compreender como são levantados os aspectos ditos favoráveis ou desfavoráveis, este trabalho introduz uma breve conceituação do termo **risco**. Trata-se de um conceito bastante complexo e abrangente, que pode ser de difícil compreensão, já que risco se refere a possibilidades de ocorrência de eventos futuros e, por esta razão, incertos. Outro fator complicador é que o risco aparece sempre associado à tomada de decisão, ou seja, não há decisão sem risco associado e o administrador assume eventuais riscos no momento de optar por uma alternativa de decisão, com base, muitas vezes, em critérios próprios.

O risco pode ser compreendido como a soma de três componentes : probabilidade de ocorrência de um evento indesejado, consequência deste evento (podendo haver mais de um evento ocorrendo ao mesmo tempo) e o contexto no qual está inserida a operação dos equipamentos (no caso específico deste trabalho). Por mais incertezas que estejam associadas a determinada situação, qualquer análise de risco levará em conta estas componentes.

Com relação à probabilidade de ocorrência de eventos indesejáveis, diversas áreas de estudo desenvolveram e aplicaram conceitos e definições. Tais definições dividem-se em três categorias básicas : estrutural, frequência e subjetividade. A probabilidade estrutural se refere à própria lógica ou características físicas do problema e nenhuma medição se faz necessária para abordar este tipo de situação, basta a observação para quantificar as probabilidades associadas ao problema, situação impraticável em termos de manutenção industrial onde não apenas é difícil quantificar tais probabilidades dada a complexidade da estrutura dos problemas, como também, não se sabe ao certo quais as consequências de uma falha deliberadamente provocada.

O acompanhamento da frequência de ocorrência de eventos semelhantes em termos de suas causas, condições e consequências é mais afeito a atender às necessidades deste trabalho, ao menos para eventos que ocorram com frequência elevada ou crônicos. Entretanto, a observação destes eventos para a determinação de suas probabilidades é controlada, ou seja, as condições são conhecidas e, com o passar do tempo, as consequências também o são. Um problema no caso da observação deste tipo de eventos é a ocorrência de eventos ditos extremos, ou seja, eventos extremamente raros ou de consequências gravíssimas, como mortes ou prejuízos de grande monta, os quais não podem ser confiavelmente abordados desta maneira, já que não há uma quantidade de ocorrências que garanta a relevância dos resultados obtidos, como citam APELAND e AVEN (2000).

A subjetividade se relaciona a outra componente do risco : a extensão das conseqüências das falhas. Isto porque, em termos de tomada de decisão, é necessário estabelecer uma escala de valores que classifique as falhas de acordo com sua gravidade. A extensão das falhas pode ser objetivamente verificada e até mesmo quantificada por meio de índices, mas a gravidade destas conseqüências depende da percepção que o administrador tem dos riscos, o que caracteriza subjetividade. Como esta forma de caracterizar a gravidade, em termos do procedimento de decisão se traduz em prioridades (em geral relativas) associadas a determinadas alternativas, a composição de um cenário onde devam ser analisados os riscos em muito é afetada pela percepção ao risco dos administradores. Por exemplo, como estabelecer se uma falha que cause a morte de um operador é mais grave que uma falha que cause prejuízos de oito dígitos em dólares? E como quantificar a morte de uma pessoa, lembrando-se que em alguns países, como os Estados Unidos, é proibido associar valores monetários para descrever o valor da vida humana?

Também há problemas em comparar conseqüências a curto, médio e longo prazo, mas o senso comum tem insistido em considerar mais graves as conseqüências mais iminentes, sem levar em conta sua extensão. Outro fator a influenciar na percepção do risco é a exposição da falha e de suas conseqüências. Um exemplo: acidentes de trânsito matam milhares de pessoas por ano no Brasil e são corriqueiros. Já aviões não se acidentam à toda hora, mas cada vez que isso ocorre, centenas de pessoas podem perder a vida ou, no mínimo, seus bens. É menos gente, a freqüência é baixa, mas a exposição de um acidente aéreo é muito maior (assim como as indenizações), sensibilizando o público que toma contato com esta atividade. Muitas pessoas desejam interditar o aeroporto de Congonhas em São Paulo, mas não há notícias de abaixo-assinados para desativar o Terminal Rodoviário do Tietê, na mesma cidade (de onde saem a maioria dos ônibus que trafegam em rodovias perigosas).

Em termos de engenharia mecânica, é imprescindível levantar quais as conseqüências das falhas nos equipamentos. Isto só é possível se forem conhecidos seus subsistemas, a relação entre os mesmos, seus modos de falha e suas taxas de falha. Todo este conhecimento é necessário para estabelecer a probabilidade de falha, conceito que vem sendo bastante discutido pela comunidade dos profissionais de manutenção, embora sua aplicação ainda não se tenha verificado amplamente, como cita MOUBRAY (1997). Logo, a análise de risco aplicada à manutenção tem como preocupação equilibrar aspectos de custo e técnicos, já que procura levantar com grande abrangência a extensão das conseqüências e suas probabilidades, equalizando tais fatores com os aspectos técnicos incluídos na política de manutenção à qual este está sujeito. Um instrumento possível de ser utilizado para levantar estes dados é o formulário mostrado na Tabela 4.4. Como o formulário em questão levanta dados cronológicos e técnicos sobre as paradas, a determinação das conseqüências das falhas torna-se quantificável, deixando de ser meramente subjetiva como vem sendo feito até então, embora a seleção dos aspectos a serem identificados como “vítimas” das situações de risco resultem, inicialmente, em índices qualitativos. Este trabalho optou por filtrar as informações armazenadas durante um período determinado no banco de dados do programa de computador utilizado – de forma muito incipiente - para planejamento e controle da manutenção na planta pesquisada.

### **5.3 - Levantamento de Situações de Risco na Definição de Cenários para a Tomada de Decisão**

Uma importante faceta do levantamento das situações de risco para suporte à decisão é como as informações são tratadas e – mais ainda – como tais dados chegam ao responsável pela tomada de decisão.

BIER (2000) destaca que informações técnicas têm chegado de forma confiável aos gestores, mas a percepção das situações de risco – sempre considerada subjetiva – tem deixado a desejar, seja porque sua determinação é falha, seja porque sua comunicação é deficiente em se prestar à formulação de critérios de decisão.

Os conceitos de análise de risco são oriundos das mais diversas atividades, tais como a medicina, as atividades militares e o setor financeiro. Trazer tais conceitos para o âmbito da engenharia já traz em si o risco da perda de objetividade das informações ou da dificuldade de compreensão por parte de quem está acostumado a interpretar relatórios técnicos. Muitas vezes, as diretrizes para o levantamento das situações de risco são muito genéricas, como pode ser visto na listagem apresentada a seguir, extraída de BIER (2000). Tais considerações foram estabelecidas pelo AIHC (do inglês *American Industrial Health Council* ou Conselho Americano para a Saúde Industrial) e levam em conta as informações a serem obtidas:

- O estabelecimento das situações de risco deve ser amplo e compreensível;
- A utilidade e aplicabilidade da análise de risco para políticas de tomada de decisão devem ser claramente explicadas;
- A apresentação das informações obtidas deve ter credibilidade e ser justificável, no sentido de evitar a ocorrência de eventos totalmente inesperados;
- O relatório de análise de risco deve conter um claro e breve resumo que inclua um balanceamento entre os aspectos analisados, o que permite a efetiva determinação dos riscos finais relacionados aos eventos ocorridos no sistema;
- As bases para a formulação das hipóteses relacionadas às situações de risco devem ser, tanto quanto possível, apoiadas sobre conceitos científicos e
- As conclusões devem advir da estrutura específica para o gerenciamento do risco.

Tais diretrizes evitam, no mínimo, controvérsias na compreensão dos riscos, a qual por si só já é bastante difícil.

Em comparação com as diretrizes já expostas, abaixo lista-se as considerações feitas por responsáveis pela tomada de decisão em ambientes de risco :

- Exigências legais;
- Possíveis efeitos adversos dos eventos sendo controlados;
- Opções disponíveis para a redução dos riscos;
- Abrangência das informações sobre o sistema como um todo e
- Confiabilidade das informações sobre as quais as decisões se basearão.

A Figura 5.2, adaptada de EISINGER e RAKOWSKI (2001), mostra uma tentativa de elaborar uma metodologia para decisão acerca da manutenção baseada nas situações de risco identificadas num cenário onde se pretenda aplicar a RCM (do inglês *Reliability Centred Maintenance* ou Manutenção Centrada em Confiabilidade). Nota-se que é um raciocínio bastante inicial porque implicações externas ao ambiente ou à organização não são avaliadas. Mesmo o impacto da falha (bastante explorado no Capítulo 6 deste trabalho, já que técnica e economicamente falando este impacto é o cerne da tomada de decisão) sobre o equipamento não aparece detalhado.

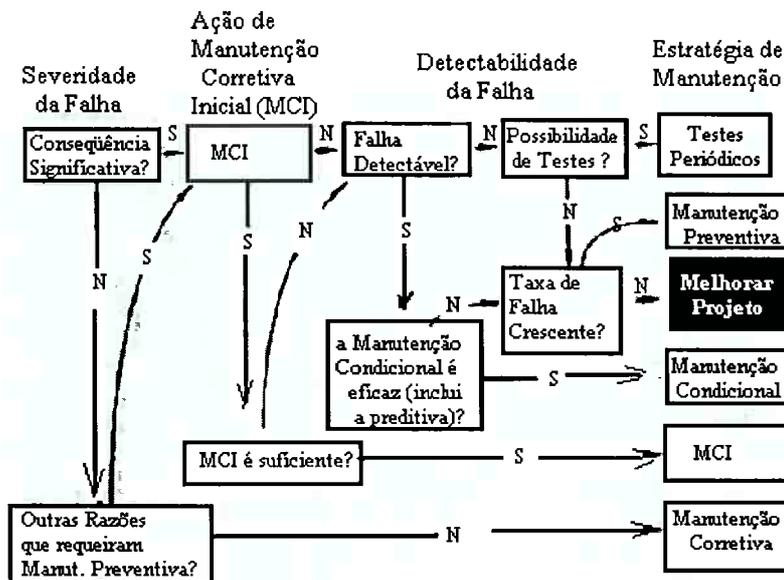


Figura 5.2 – Proposta de Estrutura de Tomada de Decisão em RCM, extraída de EISINGER e RAKOWSKY (2001)

É especialmente interessante que a classificação de situações de risco potencial, bem como a avaliação da severidade das consequências associadas a cada evento seja elaborada com a participação efetiva de especialistas, como citam RENN (2001) e BIER (2000). Isto porque se deve reduzir a incerteza acerca da estimativa do risco, já bastante influenciada pela generalidade dos critérios para a tomada de decisão baseada em análise de risco, bem como da aparente falta de objetividade na seleção das situações a serem analisadas. Uma razão bastante forte para a participação maciça de especialistas durante a fase de análise de situações de risco é que estes podem determinar – de modo bastante preciso – o percurso de eventos negativos através do sistema (sobretudo o “tracking” das falhas), os efeitos sobre os componentes deste sistema (seja ele uma máquina, uma linha de produção ou até um ambiente no qual estejam situadas as operações do sistema), além da gravidade das consequências de eventos deletérios.

Então, deve-se exigir intimidade no trato com os equipamentos, com o ambiente produtivo e com o entorno da organização, já que a classificação dos riscos envolve a

CARDOSO (2004)

percepção humana e sua opinião a respeito de certos eventos, o que norteia a tomada de decisão. Um forte exemplo desta afirmação, está na forma de encarar acidentes ocorridos no transporte aéreo e no transporte por via terrestre (tome-se um automóvel por exemplo). No Brasil, ocorrem cerca de 30000 mortes por acidentes de trânsito ao ano ([www.cet.com.br](http://www.cet.com.br) ou [mt.gov.br/estatisticas](http://mt.gov.br/estatisticas) - link **estatísticas**), mas a prevenção de acidentes não envolve programas intensivos de manutenção de veículos, qualificação de motoristas e reparo de vias. Já no transporte aéreo comercial dentro do país, o último grande acidente foi em 1996, quando a queda de um avião FOKKER 100 da empresa TAM ocasionou a morte de 101 pessoas (99 a bordo e 2 em solo) como citado por ROCHA (1997). Sabe-se que, no transporte aéreo, ações de manutenção são severas, a qualificação dos pilotos e demais profissionais é periódica e rigorosa e a manutenção de aeroportos e auxílios à navegação e comunicações criteriosa, como citado por CARDOSO (2000). Porém, este acidente até hoje atemoriza parte da opinião pública, que tem receio de viajar neste tipo de avião (por sinal envolvido em várias ocorrências de menor gravidade, todas até hoje classificadas como fortuitas) e de residir próxima a aeroportos. Conclui-se que, apesar das mortes por acidente de trânsito serem muito mais frequentes (e por vezes mais sofrida já que podem não ser instantâneas), sua ocorrência se “dilui” na memória das pessoas, enquanto que 101 mortes ocorridas de uma só vez soam mais graves ou, ao menos, mais comoventes (estas palavras estão sendo empregadas em seu sentido denotativo, não sendo intenção do autor cometer qualquer tipo de ironia ou escárnio). Claro que o potencial de causar acidentes de maiores proporções de um avião comercial (que pode chegar às 380 toneladas de massa na decolagem como um BOEING 747-400, deslocando-se a mais de 900 km/h em cruzeiro) é muito maior, vitimando no solo mais pessoas que as encontradas à bordo, além dos indiscutíveis prejuízos materiais. Mas a quantidade de mortes e danos causados de uma só vez associada a um acidente aeronáutico

influencia muito mais a opinião pública que um engavetamento de carros onde morrem “apenas” duas ou três pessoas por vez.

Mesmo para os especialistas, é difícil avaliar o peso da opinião pública na classificação de eventos negativos, já que esta envolve inclusive questões culturais e étnicas. Organizações operando para produzir bens idênticos em países diferentes encontrarão situações de risco diferentes para cada uma de suas unidades e, além do ambiente, as particularidades de cada povo são fundamentais para o acerto de uma política de manutenção baseada no risco (além das exigências legais, se bem que estas são explícitas e facilmente avaliadas pelos especialistas), como afirma RENN (2001).

Do ponto de vista da engenharia, a simples análise qualitativa pouco ajuda na tomada de decisão, até porque, o emprego de métodos de decisão mais refinados exige estimativas de probabilidades e classificação de prioridades e alternativas, de modo a permitir a avaliação da consistência do modelo proposto, como afirma SHIMIZU (2001).

O setor financeiro adiantou-se à engenharia em quantificar riscos, ou ao menos, em elaborar índices que retratem a viabilidade de investimentos e empréstimos a clientes com base na previsão de retorno ou de liquidação dos débitos.

A engenharia passou a se preocupar com esta quantificação a partir do advento da energia nuclear e das atividades espaciais (notadamente após o acidente com a nave tripulada CHALLENGER em 1986, que vitimou seus tripulantes e causou prejuízos até hoje não totalizados, mas que passaram a barreira dos US\$ 5 bilhões).

O processo de avaliação do risco envolve a busca de respostas para três questões, as quais são :

- O que pode ocorrer de errado?
- Qual a probabilidade deste fato ocorrer?
- Qual(is) a(s) consequência(s) da sua ocorrência?

Visando a execução da avaliação do risco, uma série de métodos têm sido apresentados em literatura, dentre os quais podem ser citados : Análise Preliminar do Risco (do inglês "*Preliminary Hazard Analysis*" – PrHA), Estudo do Perigo e Operacionalidade (do inglês "*Hazard and Operability Study*" – HAZOP), Análise de Modos e Efeitos das Falhas (do inglês "*Failure Modes and Effects Analysis*" – FMEA), Análise de Modos, Efeitos e Criticidade das Falhas (do inglês "*Failure Modes Effects and Criticality Analysis*" – FMECA), Análise da Árvore de Falhas (do inglês "*Fault Tree Analysis*" – FTA), Árvore de Eventos (do inglês "*Event Tree Analysis*" – ETA) e Diagrama Causa-Consequência (do inglês "*Cause Consequence Diagram*"). Cada um destes métodos é indicado para a análise do sistema em estudo em períodos específicos da sua vida, considerada desde os estágios iniciais de projeto até a fase final de sua vida operacional. As características básicas de cada um destes métodos é indicada na Tabela 5.1, sendo os mesmos detalhadamente apresentados por KUMAMOTO e HENLEY (1996).

O processo de avaliação do risco pode fornecer estimativas qualitativas ou quantitativas deste aspecto. A avaliação qualitativa emprega a opinião de especialistas para estimar a probabilidade de ocorrência de um certo cenário de falha, nem sempre de forma numérica, bem como as consequências associadas a este cenário. Já uma avaliação quantitativa baseia-se na aplicação de métodos estatísticos, com o emprego de banco de dados, os quais permitem o cálculo da probabilidade de ocorrência de um cenário de falha, sendo as consequências desta ocorrência definidas a partir da análise de dados históricos.

Os métodos de análise de risco apresentados na Tabela 5.1 podem ser subdivididos em duas categorias : a que apresenta estimativas qualitativas e a que apresenta estimativas quantitativas. Na primeira categoria pode-se citar os métodos PrHA e HAZOP, enquanto que os métodos FMEA, FMECA, FTA, ETA e Causa-Conseqüência são classificados como métodos quantitativos.

Tabela 5.1 – Métodos de Análise de Riscos e suas Particularidades

<b>Método de Análise de Risco</b>	<b>Particularidades</b>
<b>HAZOP</b>	Identifica desvios no desempenho do sistema e como estes podem levar à eventos indesejáveis, além de determinar quais as ações recomendadas para reduzir a frequência e as conseqüências dos desvios.
<b>FMEA</b>	Identifica os modos de falha dos componentes ou equipamentos e o impacto de uma eventual falha no meio circundante ao componente e ao sistema (parte de eventos iniciais)
<b>FMECA</b>	Identifica os modos de falha dos componentes ou equipamentos e o impacto de uma eventual falha no meio circundante ao componente e ao sistema, além de determinar a criticidade das falhas (parte de eventos iniciais)
<b>FTA</b>	Identifica combinações de falhas e erros humanos que podem conduzir a acidentes ou a uma conseqüência específica, partindo desta última (evento final)
<b>ETA</b>	Identifica várias seqüências de eventos, não apenas de falhas, mas de sucessos, que podem levar a um acidente
<b>PrHA</b>	Identifica e classifica (atribuindo prioridades) problemas que levam a conseqüências indesejadas já no início da vida útil do sistema, além de determinar as ações que visem reduzir a frequência e a gravidade das conseqüências dos eventos classificados
<b>CAUSA-CONSEQÜÊNCIA</b>	Analisa conseqüências a partir do desenvolvimento dos cenários que levam a elas

A seleção do emprego de métodos qualitativos ou quantitativos é dependente da disponibilidade de informações a respeito de falhas do sistema, que permitam a utilização de um método quantitativo (em geral de maior complexidade).

Uma vez finalizada a etapa de avaliação do risco, deve-se executar a etapa de gerenciamento de risco, na qual os operadores do sistema tomam decisões a respeito da aceitabilidade do risco associado com sua operação. Esta etapa envolve o uso de informações geradas na etapa anterior para tomar decisões a respeito da segurança operacional do sistema

em função dos padrões exigidos para o mesmo, buscando as possíveis alternativas, incluindo diferentes configurações deste sistema, que impliquem na redução do risco associado à sua operação.

Para a tomada de decisão à respeito da necessidade de redução do risco associado à operação de um sistema, o analista de risco deve ter um padrão de comparação, o qual é usualmente denominado de risco aceitável. Este risco dito aceitável é dependente da operação executada pelo sistema, sob o ponto de vista da exposição do ser humano e do próprio ambiente à situações de risco não voluntário. Para alguns sistemas específicos, como plantas de processos químicos e usinas de geração de energia elétrica, originárias por sua vez, da geração de energia nuclear, tendo-se em vista as devastadoras conseqüências para o ambiente e para o ser humano localizados em áreas próximas à planta, em caso de falha desta última são obrigados a seguir padrões específicos de risco aceitável, determinados por agências reguladoras governamentais. Outros sistemas não apresentam legislação específica sobre o risco aceitável, cabendo ao analista de risco determinar quais os padrões a serem utilizados na análise.

Uma vez definida a alternativa de projeto ou estratégia de operação que minimize o risco associado ao sistema, os resultados da análise de risco devem ser comunicados aos grupos associados com a operação do sistema, tal como os operadores, os proprietários do sistema (ou ativos) e o próprio público que habita as vizinhanças deste sistema. Muitas vezes a própria comunicação do risco já causa uma redução da harmonia entre os grupos interessados na análise, em função da existência de interesses conflitantes.

#### 5.4 – Metodologia Simplificada para a Execução da Análise Quantitativa de Risco

Da mesma forma que a avaliação preliminar de risco deve seguir certas diretrizes, o procedimento de análise quantitativa de risco pode ser apresentado como uma sucessão de tópicos, os quais são listados abaixo. A ordem de entrada desta lista não necessariamente deve ser seguida – é possível, por exemplo, que os objetivos só sejam precisamente estabelecidos após a compreensão profunda do problema - mas deve ser notado que o procedimento é recorrente, ou seja, deve-se realimentar a análise, pois a mesma constitui-se num processo de aprendizagem, o que caracteriza sua adoção como um procedimento iterativo e de melhoria contínua.

- 1 – Estabelecer o(s) objetivo(s);
- 2 – Entender o problema;
- 3 – Decidir a escala ou extensão da análise;
- 4 – Desenvolver modelos de risco
- 5 – Obter os dados;
- 6 – Realizar a avaliação do risco e
- 7 – Comunicar os resultados.
- 8 – Relação das Medidas para Evitar a Situação, Mitigar ou aceitar o risco.

A seguir, serão detalhadas e discutidas as etapas supra-citadas.

**1 – Estabelecer o(s) objetivo(s) :** a primeira etapa deve ser o estabelecimento do(s) objetivo(s) de um projeto, embora estes possam não se tornarem precisamente disponíveis sem uma compreensão dos detalhes do problema que motivou a análise. De qualquer forma, a compreensão clara dos objetivos orienta o projeto em todas as suas etapas. Necessidades

diferentes podem conduzir distintos níveis de qualidade nos resultados, modelos diferentes ou diferentes formas de quantificar os resultados. Nestes casos, as prioridades devem ser obtidas com o solicitante da análise. O perigo óbvio aqui, são necessidades conflitantes entre diversos níveis interessados na análise, ou o estabelecimento de objetivos um tanto vagos, que conduzem a resultados também vagos, os quais não satisfazem plenamente nenhuma das necessidades.

**2 – Entender o problema :** Uma das principais tarefas em qualquer análise de risco é entender o problema. Em parte, é requerido que o analista conheça o processo ou produto que está sendo analisado – e não apenas ser uma pessoa cuja única função é aplicar metodologias – e se pode citar, para exemplificar o que foi dito, a operação detalhada de uma planta fabril, as formas pelas quais uma estrutura pode falhar ou as particularidades de uma rede de transporte ferroviário. Também é necessário, em complemento ao que foi citado, entender o contexto do problema – até pela própria interação deste com o ambiente – e suas restrições.

Algumas pessoas mostram-se capazes de compreender um complexo problema de engenharia de forma rápida e confiável e de distinguir sua essência em um período de tempo relativamente curto. Outros consideram esta tarefa difícil. Tendo-se estas considerações em mente, pode-se assumir que existe uma habilidade específica envolvida no processo de análise e que, por si só, é passível de ser aprendida. Sem esta habilidade específica, uma vez que pode-se estar defrontando com um assunto muito amplo e multidisciplinar, há algumas sugestões que podem ajudar na análise, tais como perguntar as questões-chave corretas, utilizar uma estrutura gramatical consistente para as descrições ou acompanhar totalmente um processo ou a operação de um dado equipamento para acompanhar os resultados e a forma como estes são alterados em função de variações no processo ou operação.

A primeira tarefa no aprendizado do sistema é determinar a natureza do problema, inicialmente em termos gerais, mas procurando chegar à essência dos fatos, do que o problema representa no contexto analisado. Isto deve ser considerado com um certo nível de profundidade e, embora esta pareça uma constatação óbvia, é aqui citada porque muitas pessoas consideram a aparência final de um problema ou suas características superficiais (como sintomas de uma falha em um equipamento, as quais, embora norteando ações para sua correção, podem não denotar precisamente sua causa-raiz) como suficientes para caracterizá-lo por completo.

A tarefa seguinte consiste em identificar o tipo de problema, já que problemas de risco admitem várias classificações. Uma classificação útil os divide em problemas de capacidade/demanda e de sistema. Na primeira, separa-se as demandas aplicadas ao sistema de sua capacidade para atendê-las. Os problemas estruturais e relacionados a esforços mecânicos em sistemas de baixa complexidade apresentam esta característica. Para exemplificar, velocidade dos ventos, ação da gravidade e carregamento representam as demandas a serem suportadas e a estrutura possui certa capacidade de resistir a elas. As duas características são independentes, embora cada uma possa ser composta de muitas partes, como os componentes de uma estrutura, os quais podem estar presentes em número elevado – como componentes de uma treliça – e interagir de forma complexa.

Em outro ponto, os problemas de risco do sistema associam-se a sistemas com grande número de componentes, cada um destes possuindo confiabilidades individuais as quais podem ser estimadas e que influem na confiabilidade do sistema como um todo dependendo da forma como os componentes estão dispostos e interrelacionados – como citado por CARDOSO (2000) – o que remete à noção de como é a aparência de seu diagrama de blocos.

Outro tipo de classificação dos problemas de risco é concernente às análises qualitativas ou quantitativas (ou ainda probabilísticas), sendo estas denominadas

respectivamente de QRA's (do inglês "*Qualitative Risk Analysis*") e PRA's (do inglês "*Probabilistic Risk Analysis*"). Em que pese a análise de risco ser normalmente considerada em termos quantitativos, estudos qualitativos, onde os itens têm seus riscos classificados ao invés de quantificados, podem ser valiosos e, em caso de informações escassas, são mais apropriados que os estudos qualitativos – caso dos problemas ambientais. Entretanto, esta abordagem se utiliza da mesma lógica e do mesmo rigor de raciocínio que uma análise quantitativa.

Uma avaliação de risco freqüentemente requer modelos de análise, os quais dizem respeito à modelagem da realidade dos sistemas avaliados. Por exemplo, para estimar o risco enfrentado pela estrutura de um edifício, este último deve ser idealizado. Poderia ser suficiente uma idealização simples, para a qual o risco de falha é estimado por uma simples viga ou coluna. Mas em muitas situações, esta não é a regra, sendo necessário um modelo que contemple a análise de muitos modos de falha e o comportamento do prédio como um todo deve ser analisado – isto depende, como já dito, da interação entre os componentes do sistema analisado. A escolha dos modelos de análise depende então do propósito da própria análise e do que é requerido desta.

Um importante aspecto de um modelo de análise é que este deve estar associado a uma definição de evento de falha para emprego em análise de risco. Recorrendo-se novamente ao risco estrutural como exemplo, deve ser definido um evento falha no qual um estado limite é ultrapassado. Algumas vezes isto é óbvio, como no caso da ocorrência de uma fratura, porém, é mais freqüente a existência de uma aspecto arbitrário na escolha de um evento de falha, de forma que esta deve ser definida com algum cuidado em termos das variáveis que a governam e mesmo dos seus efeitos : neste exemplo o colapso de uma estrutura em um terremoto deve ser definido tendo como estado limite uma certa deflexão.

**3 – Decidir a escala ou extensão da análise** : uma avaliação de risco abrangente (“*comprehensive*” em inglês) é dispendiosa e demorada, exigindo responsabilidade em sua execução. Não seria exagero estabelecer uma regra a qual determinasse que nenhuma análise deve ser executada antes de ter sido executado um estudo de alcance e da realização de um estudo piloto (algo como um ensaio). Até porque, em algumas situações, estes estudos podem proporcionar informações suficiente para a execução da análise. Nestes casos, a análise do problema em escala natural não é necessária.

A razão fundamental para executar-se um estudo de alcance ou um estudo piloto é determinar a natureza do problema. O estudo de alcance possui importante papel na determinação da natureza e qualidade dos dados disponíveis e na descoberta da extensão do problema global. Um estudo piloto é útil para verificar a consistência de sua metodologia, a adequação dos dados e a confiabilidade dos resultados, esta última, função dos dois aspectos anteriores. É essencial compreender a diferença entre os dois tipos de estudo : um estudo de alcance é, basicamente, uma análise superficial das características de um problema global, enquanto um estudo piloto é uma investigação aprofundada de uma pequena parte de um problema.

Em qualquer nível de estudo que seja realizado, uma vez definida a escala, o restante da análise deve ser consistente com a mesma. Uma escala apropriada deve ser consistente com :

- i – os objetivos da análise;
- ii – a disponibilidade dos dados;
- iii – a qualidade dos modelos quantitativos utilizados (se for o caso) e
- iv – restrições como tempo ou dinheiro (e outros recursos) disponíveis.

**4 – Desenvolver modelos de risco** : por desenvolvimento de um modelo de risco entende-se a tarefa de definir os cenários a serem analisados e as conseqüências a ele associadas. A definição de um cenário de falha parte da determinação de um evento inicial, normalmente associado com a falha de um componente ou subsistema. Com o emprego da análise da Árvore de Eventos ou mesmo do FMEA, avalia-se a propagação desta falha sob o aspecto da degradação da operacionalidade, da influência desta sobre outros componentes e subsistemas, progredindo até obter-se a definição do estado operacional do sistema como um todo (mais especificamente, o grau de deterioração deste). Verifica-se que, a partir de um evento inicial, pode-se obter diversos cenários de falha, considerando-se diversas formas pelas quais as falhas podem se propagar.

A cada cenário de falha, o analista deve avaliar um conjunto de conseqüências, as quais representam o efeito da falha sobre alguns grupos específicos, como os operadores do sistema, o ambiente e a própria integridade do sistema, sob o ponto de vista da perda total ou parcial do mesmo (considerando-se danos materiais).

Este contexto de geração de cenários e conseqüências denomina-se de Análise Qualitativa de Risco e estabelece o modelo geral de análise de risco do sistema, sendo que pode também servir de suporte à análise quantitativa.

Em algumas situações deseja-se quantificar o risco, sendo necessária a definição da probabilidade de ocorrência de um dado cenário, quantificando-se as conseqüências associadas ao mesmo.

Para quantificar o risco, deve-se definir a probabilidade de ocorrência do evento inicial. Conhecido o evento final e o caminho percorrido pela falha através do sistema, o emprego da Árvore de Falhas (FTA) é útil para se obter este valor, como citado por CARDOSO (2000). A análise da Árvore de Falhas é uma forma de estabelecer uma estrutura lógica baseada no diagrama de blocos do sistema a qual, partindo do evento topo (final)

permite avaliar, de modo reverso, o “caminho” percorrido pela falha e, a cada estágio, determinar a probabilidade de ocorrência do evento que lhe é concernente.

De posse das probabilidades de ocorrência dos cenários e dos valores monetários de suas conseqüências, pode-se tomar decisões a respeito da aceitabilidade do risco ou, como é o objetivo deste trabalho, a respeito da política de manutenção que contemple minimizar a função composta pelos custos e pelas probabilidades de ocorrência.

**5 – Obter os dados :** os dados necessários para a análise devem ser revisados em um estágio inicial da definição do projeto, pois se os mesmos não estiverem disponíveis ou se houver demora em obtê-los, o modelo proposto e seu grau de detalhamento devem ser revisados, até porque, dependendo da extensão do problema, o contexto global das operações do sistema pode ser profundamente alterado – via de regra, quanto mais abrangente o modelo, mais rápido o cenário global se modifica, deslocando o ponto de decisão, como citado por SHIMIZU (2001) – e conseqüências que antes se revelavam pouco graves, podem tornar-se críticas. Como exemplo, uma falha em uma turbina geradora de energia elétrica que atenda a região Sudeste do país, a dez anos passados seria bem menos grave que atualmente quando, segundo especialistas do setor, o colapso na geração de energia - sobretudo para a região mais industrializada e urbanizada do Brasil - é iminente. É uma questão complexa, pois os dados podem ser obtidos de diferentes formas e com diferentes graus de qualidade. Tais dados devem ser confirmados sempre que possível, sobretudo se parecerem duvidosos, já que o modelo e o cenário são aproximações e deles depende uma tomada de decisão eficaz. Questões de possível dependência probabilística entre eventos devem ser consideradas e solucionadas na medida do possível. Em algumas situações, a informação de probabilidade somente pode ser obtida utilizando-se uma análise separada.

Obter uma quantidade maximizada de dados, sobretudo na análise inicial de um problema de engenharia é um grande desafio, pois em campo, os dados são escassos ou de baixa qualidade – caso da manutenção em alguns setores da indústria. Nestas situações, um bom modelo de sistema mostra-se útil, pois a análise isolada dos dados de uma parte do sistema não constitui um meio eficaz de se estimar seu comportamento global. É interessante verificar qual a mudança de comportamento do sistema em função de variações no comportamento de seus componentes.

**6 – Realizar a avaliação do risco :** esta etapa pode parecer pouco importante se uma análise quantitativa estiver abastecida com dados abundantes, e mesmo com pouca quantidade destes, se os mesmos estiverem adquiridos e posicionados. Mas, como o modelo é uma aproximação, é conveniente testar sua funcionalidade e adequação, ou seja, sua validade. Sendo o modelo de análise iterativo, o mesmo cresce e desenvolve-se desde seu início.

A verificação do comportamento dos dados é imperiosa, sobretudo da influência entre os mesmos (lembrando-se que a análise é executada sobre um sistema).

Isto se traduz na execução de uma análise de sensibilidade, até para confirmar quais são os parâmetros mais influentes no sistema (quer em termos de valores, quer em termos de extensão das conseqüências de um evento, sobretudo os iniciais). Para modelos complexos e de grande porte, isto é essencialmente uma simulação de MONTECARLO. O mais importante é que, com o passar do tempo, melhore a qualidade do modelo, uma vez que é aprendido mais sobre o sistema, sendo este um critério inicial de validação do mesmo.

**7 – Comunicar os resultados :** a tarefa final em análise de risco é comunicar os resultados e isto lhe adiciona uma notável dificuldade, já que para alguns grupos, é o primeiro contato com uma situação que até então lhe pareceria insuspeita (sobretudo quando uma população inteira

estiver entre estes grupos, pois leigos impressionam-se mais facilmente que qualquer outro público em qualquer área do conhecimento). Logo, os dados podem ser interpretados erroneamente (o que inclui a intencionalidade).

Todos os grupos envolvidos devem ser levados em consideração desde o início da análise de risco. Isso pode exigir a comunicação de maneira diferente para grupos diferentes, sem nunca omitir ou deturpar a verdade. Até para realimentar o modelo e facilitar o controle por parte do analista e do operador do sistema (seja este operador quem for), é conveniente pensar em efetuar a comunicação durante a realização de um projeto, pois se a comunicação for deixada para o final do mesmo, a interpretação errônea passa a ser um evento indesejável a exigir o cálculo de sua probabilidade, estimação de suas conseqüências (quase impossível porque incontrolável quando atinge o público externo) e isto mais empobrece que soma ao modelo.

### **5.5 Metodologia para Tomada de Decisão**

A decisão a ser tomada, que no caso deste trabalho consiste em selecionar uma política de manutenção que minimize a função composta pelos custos e pela probabilidade de ocorrência de falhas, pode - como em qualquer outra aplicação - resultar do emprego de diversos métodos já consagrados de análise de decisão.

Inicialmente, deve ser determinado qual destes métodos contempla a consideração simultânea destes aspectos, tendo em vista a quantidade e a qualidade de informações disponíveis. Nota-se que o objetivo a ser alcançado pode parecer um tanto vago para algumas pessoas, pois não basta minimizar isoladamente os custos nem as probabilidades de falha associadas a uma dada política de manutenção, já que são aspectos, inicialmente conflitantes

e, mesmo para aqueles que compreendem esta dificuldade, há uma certa dependência entre custos decorrentes de uma falha e sua probabilidade de ocorrência.

### 5.5.1 Seleção do Procedimento de Decisão

Como afirma SHIMIZU (2001), qualquer algoritmo de análise de decisão é poderoso e eficaz o bastante quando corretamente aplicado. Isto significa que a sofisticação de um método não garante sua eficácia.

Um bom método de decisão deve ser consistente com os dados disponíveis e contemplar os critérios de seleção da melhor alternativa com as informações disponíveis.

É importante lembrar que é impossível elaborar um procedimento de análise de risco sem que o procedimento de decisão seja levado em consideração. Isto porque, no próprio levantamento dos aspectos a serem considerados como situações de risco, já há decisões a serem tomadas, tanto na seleção destes aspectos, como na determinação da importância relativa de cada um.

O primeiro método de decisão a ser considerado é o chamado Método da Utilidade, SHIMIZU (2001). Este método consiste numa composição entre a magnitude associada a uma alternativa e decisão e um índice que expresse sua preferência ou prioridade em relação a outras alternativas. Este índice consiste na atribuição de uma nota cuja escala (range) é arbitrária, atribuindo-se índices mais altos àquelas alternativas que melhor atendam a determinado aspecto relacionado a uma dada alternativa. Assim, devem ser determinados diversos aspectos comuns que permitam a comparação entre as diversas (se houver) alternativas. Porém, este método é melhor aplicável a decisões baseadas em um único critério, o que não é o caso deste trabalho, onde se exige minimizar risco e custo ao mesmo tempo, sem contar as situações onde há aceitabilidade do risco. Uma variante mais sofisticada deste

método é estabelecer importâncias relativas a cada aspecto (pois há fatores mais influentes em uma decisão final se comparados a outros, como por exemplo, no caso da manutenção, é mais influente na probabilidade de falha futura o estado do equipamento no seu retorno às operações que a eventual demora em se obter peças de reposição – não considerando jamais a hipótese de se adaptar uma solução, a famosa “gambiarra”). Atribuídas estas ponderações, a decisão se processa como no Método da Utilidade simples. Desta forma, a decisão se torna mais polarizada, mas eficaz. Porém, para afirmar qual dos aspectos é mais influente no comportamento do sistema e, conseqüentemente na decisão, é necessário bastante conhecimento daquele.

Outro método de decisão bastante consagrado é o AHP (do inglês “*Analytic Hierarchy Process*”) ou Processo de Análise Hierárquica. Embora consistindo de operações matemáticas elementares, o método é bastante laborioso e sua dificuldade aumenta proporcionalmente ao número de critérios de decisão.

Segundo BRAGLIA e BEVILACQUA (2000) e SHIMIZU (2001), o método de decisão AHP é bastante poderoso quando se deseja analisar as implicações da tomada de decisão a respeito de alternativas julgadas com base em vários critérios, constituindo um cenário complexo onde aspectos quantitativos e qualitativos devem ser considerados, especialmente se informações precisas estiverem disponíveis para caracterizar a relação das alternativas apresentadas com os critérios relevantes. Neste caso, embora o cenário seja complexo, algumas simplificações podem ser introduzidas, segundo CAGNO et al. (2000) desde que não causem inconsistência no modelo, (observação um tanto difícil de ser comprovada). Algumas das informações, e mesmo os valores das prioridades atribuídas aos critérios apresentados são resultado das impressões e experiências anteriores da administração da organização ou do operador do sistema analisado, eliminando a utilização de métodos como a Teoria da Utilidade, que exigem conhecimento mais profundo sobre os critérios.

No método AHP, os graus não são atribuídos isoladamente a cada um dos critérios, ao invés disto, é considerada a comparação paritária entre a importância de cada critério com relação aos demais, ou seja, é construída a Matriz de Comparação Paritária, o que possibilita o julgamento das alternativas apresentadas sob um grande número de critérios, sem dúvida um dos maiores benefícios da aplicação deste método. As prioridades atribuídas aos critérios variam de 1 a 9 variando de 1 em 1, sendo graus mais baixos atribuídos aos critérios fracamente preferíveis e graus maiores aos critérios mais fortemente preferíveis, logo, a prioridade de um critério em relação a ele mesmo é 1. Esta escala de valores é também válida no momento da comparação entre as alternativas, atribuindo graus baixos às alternativas que pior atendam a determinado critério e graus altos às alternativas que melhor a atendam.

O algoritmo associado ao método AHP é um tanto extenso, mas pode e deve ser computacionalmente aplicado. A seguir, são expostos os passos para a execução de uma análise de decisão baseada em AHP.

i - Construção da Matriz de Comparação Paritária

ii - Matriz de Prioridades Relativas

O passo seguinte consiste na determinação das prioridades relativas de cada critério, onde cada elemento da matriz de comparação paritária é dividido pela soma dos elementos da coluna à qual pertence. Efetuada esta operação, a prioridade relativa de cada critério (PRCi) é a média aritmética de cada linha.

iii - Determinação do Vetor dos Pesos

Este passo consiste na determinação do vetor dos pesos relativos para cada critério, através da Eq. 5.4

$$VP = PRC1.[coluna 1 da matriz de comparação paritária] + \dots + PRCi.[coluna i da matriz de comparação paritária] \quad (5.4)$$

#### iv - Determinação do Vetor de Consistência (VC)

Esta fase é de crucial importância na checagem da consistência das prioridades atribuídas aos critérios, o que resultará em resultados significativos e livres de incoerências, como atribuir prioridades muito diferentes para critérios ou comparações equivocadas. O vetor de consistência (VC) é obtido dividindo-se cada elemento de VP pela respectiva prioridade relativa.

#### v - Determinação do Índice de Consistência (CI)

Para determinar o índice de consistência é necessário determinar antes o autovalor máximo do vetor de consistência ( $\lambda_{max}$ ), o qual, por possuir uma só dimensão, consiste na média aritmética entre os elementos de VC.

$$CI = (\lambda_{max} - n) / (n - 1) \quad (5.5)$$

onde  $n = n^\circ$  de critérios. Para verificar se a decisão pode ser considerada consistente, ou seja, não há combinações entre as prioridades levantadas que levem a prioridades mais altas que as consideradas, o que se traduz em inconsistência da decisão e de suas hipóteses, deve-se calcular a taxa de consistência:

#### vi - Determinação da Taxa de Consistência (CR)

Para a execução do cálculo de CR, de acordo com a equação 5.6, é necessário recorrer à literatura acerca da Teoria da Decisão, pois deve-se obter o índice de consistência (ACI),

que expressa a consistência em um grande número de comparações paritárias em função do número de critérios de decisão. De acordo com SHIMIZU (2001), para 3 critérios o valor ACI deve ser tomado como 0.58 (valor tabelado). O valor de CR, para que as suposições acerca do cenário sejam consideradas consistentes, não deve ser superior a 0.10. Caso contrário, as prioridades atribuídas aos critérios considerados na análise devem ser revistas, pois em geral, no momento da comparação entre um determinado critério e os demais, um erro de avaliação foi cometido. Isto garante a robustez do método AHP em indicar a decisão mais favorável em um ambiente complexo, num contexto de decisão multicriterial. Então :

$$CR = CI/ACI \quad (5.6)$$

#### vii - Comparação Entre as Alternativas sob a Influência de Cada um dos Critérios

Neste passo é necessário estabelecer, quantitativamente, o quanto cada uma das alternativas atende aos requisitos de cada critério. Para tanto, é necessário que esteja bem compreendido o significado de tais critérios para evitar que erros de interpretação causem inconsistência na decisão. Cabe uma observação a respeito da quantidade de alternativas a serem comparadas : SHIMIZU (2001) afirma que, embora não haja restrições quanto ao número de critérios a serem comparados, deve-se comparar ao redor de três critérios entre si, o que permite controlar a confiabilidade dos resultados obtidos com relação à consistência das prioridades atribuídas aos critérios (não confundir alternativas com critérios), eliminando os vícios presentes na comparação dois a dois e evitando a enorme dificuldade de se comparar mais critérios, dado o número de combinações possíveis. Felizmente, a manutenção, sob o ponto de vista técnico, não exige tamanha complexidade em seus modelos de análise, pois – sobretudo se utilizados conceitos de confiabilidade e ferramentas como o FMEA – são sugeridas

quantidades restritas de práticas de manutenção possíveis de serem aplicadas a cenários específicos. Esta observação perde a validade no caso de serem considerados aspectos financeiros, pois a combinação entre aspectos técnicos e possibilidades de investimentos ou despesas gera um universo bastante amplo de alternativas, com grande quantidade de objetivos.

#### viii - Determinação das Prioridades Compostas

O passo final na aplicação do método AHP consiste na determinação das prioridades compostas de cada alternativa para a seleção da decisão mais favorável a qual, em geral, consiste na alternativa que apresentar a maior prioridade. Para alcançar este objetivo, deve-se multiplicar a matriz que contém as prioridades agregadas pelo vetor coluna que contém as prioridades relativas calculadas no passo ii.

Evidentemente, esta análise, embora tenha aplicação prática reconhecida, pode ser muito enriquecida conforme se tenha melhores níveis de informação sobre o sistema. A eficácia na utilização do método de decisão depende das informações fornecidas, do conhecimento que se tem sobre o sistema de operações da organização, do conhecimento do funcionamento do próprio equipamento e, sempre que possível, de um refinamento na atribuição de prioridades relativas aos critérios e alternativas.

#### ix – Análise de Sensibilidade

De modo a avaliar a correção na aplicação do método AHP, torna-se necessária uma análise de sensibilidade, procurando avaliar qual o efeito sobre o resultado de alterações realizadas na atribuição das prioridades.

No caso deste trabalho, as informações iniciais não são precisas nem estão em quantidade suficiente para permitir a correta utilização do método AHP, pois sem muitas informações, o risco de se cometer inconsistências é elevado. Também a quantidade de critérios pode permitir a utilização de um método mais simples de decisão, mas à medida em que o cenário se torne melhor conhecido, a utilização deste método não está descartada.

Ainda que não se tenha informações (registros prévios de falha) em quantidade desejável, também não se está considerando um cenário nebuloso (ou em inglês “*fuzzy*”), onde só se conhece as entrada e as saídas, pouco se podendo afirmar sobre o comportamento do sistema. Então, não há a necessidade de se partir para a aplicação de métodos sofisticados como os Sistemas Especialistas.

Uma forma interessante de se analisar a decisão é utilizar-se das árvores de decisão, as quais facilitam inclusive calcular os índices que determinam a solução ótima. Utilizando-se um método como o da Utilidade Ponderada, pode-se construir uma estrutura simples e bem abrangente empregando-se as Árvores de Decisão na forma de Árvores de Eventos, onde a eficácia da decisão depende mais da definição confiável de um cenário que da sofisticação ou precisão de um algoritmo, tal como apresentado no Capítulo 7. É certo que ainda falta considerar muitos outros métodos de decisão, alguns nem mesmo aplicáveis ao cenário em estudo. A ênfase nestes métodos aqui expostos justifica-se pelo seu emprego em decisões concernentes à manutenção, como pode ser constatado pela consulta a artigos publicados na área, como BRAGLIA et al (2000) e CARDOSO et al (2002).

## **6 – ELABORAÇÃO DE PROCEDIMENTO PARA AVALIAÇÃO DE CUSTOS DE MANUTENÇÃO E DAS CONSEQÜÊNCIAS DAS FALHAS**

### **6.1 – Considerações Iniciais**

Nesta etapa do trabalho, serão definidas quais classes de custos devem ser associados à atividade de manutenção. Nesta pesquisa considera-se como custos de manutenção não só os relacionados diretamente a esta atividade, tais como o custo da intervenção, mão-de-obra e peças sobressalentes, mas também os custos associados aos efeitos da falha do equipamento sobre o resultado de sua operação, ou seja, a degradação da qualidade dos produtos e serviços.

Para a definição dos custos relacionados diretamente à atividade de manutenção, procurar-se-á associar os mesmos ao ambiente de operação (local de instalação, qualificação do operador e regime de trabalho entre outros) e às práticas de manutenção que podem ser empregadas para o equipamento (preventiva, preditiva e corretiva).

Já para a definição dos custos associados aos efeitos da falha do equipamento, associar-se-á estes à extensão da falha sobre a degradação da qualidade do item produzido, incluindo a eventual degradação da segurança do usuário deste produto ou serviço e também a redução da segurança do operador.

Nesta fase será proposto o procedimento para sistematização do levantamento destes custos, incluindo a metodologia para avaliar o custo das conseqüências das falhas.

Novamente, o início desta fase é auxiliado pelo preenchimento do formulário da Tabela 4.4. evidentemente, nem sempre as informações corretas sobre os custos relativos à falha das máquinas estão disponíveis. Porém, o acompanhamento das perdas de produção

devidas à falha e o custo dos reparos, além da duração das paradas, permite uma razoável precisão na determinação destas informações. MARTINS (1986) e DRAPINSKI (1973) esclarecem que, em ambientes onde todos os custos são rateados, atividades como a manutenção podem ser tomadas como custos proporcionais à receita e, por conseguinte, às vendas e à produção, sendo por esta razão, abordados como custos diretos e, a menos do salário dos mecânicos e eletricitas, variáveis.

Se o modelo de composição dos custos dos produtos não for confiável, nenhum método de levantamento de custos de manutenção será preciso o suficiente, conforme explicam WEUSTINK et al (2000). Ao menos inicialmente, os custos das falhas são encarados como riscos e bastaria ter uma idéia da ordem de grandeza dos valores envolvidos para a seleção da melhor política de manutenção aplicável a cada caso e eventuais imperfeições na modelagem destes custos não prejudicam a pesquisa. Mas se o objetivo for otimizar a manutenção em termos de seus custos, haverá complicações que exigirão uma auditoria para estabelecer quais as eventuais incorreções no custeio adotado pela empresa, o que foge ao escopo desta pesquisa.

## **6.2 As Componentes dos Custos Industriais**

A determinação das probabilidades de ocorrência de eventos indesejáveis tais como a falha não resulta completa se o objetivo for prover subsídios para a tomada de decisão. A própria definição de risco apresentada neste trabalho (vide capítulo 5) já deixa patente a variedade de critérios a serem adotados de forma a classificar as situações de risco e suas conseqüências e uma destas formas consiste em avaliar as implicações econômicas da ocorrência de uma falha, necessidade citada por BAIR (1999).

Qualquer empreendedor tomará decisões visando obter rendimento positivo de seu empreendimento e este rendimento é manifestado na maioria das vezes como lucro. Portanto, uma análise de risco será mais útil, do ponto de vista organizacional, se acompanhada da determinação ou ao menos, das estimativas dos custos associados à operação, à manutenção e às falhas dos equipamentos. Reconhece-se, no entanto, que alguns empreendimentos não são voltados exclusivamente ao lucro, mas mesmo assim, sua viabilidade passa pelas implicações econômico-financeiras.

Tendo-se em mente esta necessidade, esta seção do trabalho apresenta as maneiras de se quantificar e classificar os custos associados à manutenção, como mostra a Figura 6.1 e, como algumas decisões baseiam-se na probabilidade da ocorrência de eventos futuros e, por que não dizer, longínquos, a questão do valor do dinheiro no tempo é abordada, até porque em determinado momento da vida útil de um equipamento terá de ser tomada a decisão de reformá-lo, mantê-lo em operação ou descartá-lo (substituí-lo seria um termo um tanto genérico demais, pois inovações tecnológicas concernentes ao projeto dos equipamentos, processos de produção e requisitos dos produtos e serviços abreviam a utilidade e aplicabilidade – não confundir com a vida útil – dos equipamentos.

Estes passos são necessários à consecução deste trabalho em virtude do procedimento de decisão e mesmo o procedimento de análise de risco, baseado nos diagramas causa-conseqüência e nas árvores de decisão, exigirem a quantificação dos riscos associados para indicar a solução mais adequada.

## Componentes dos Custos Associados à Manutenção

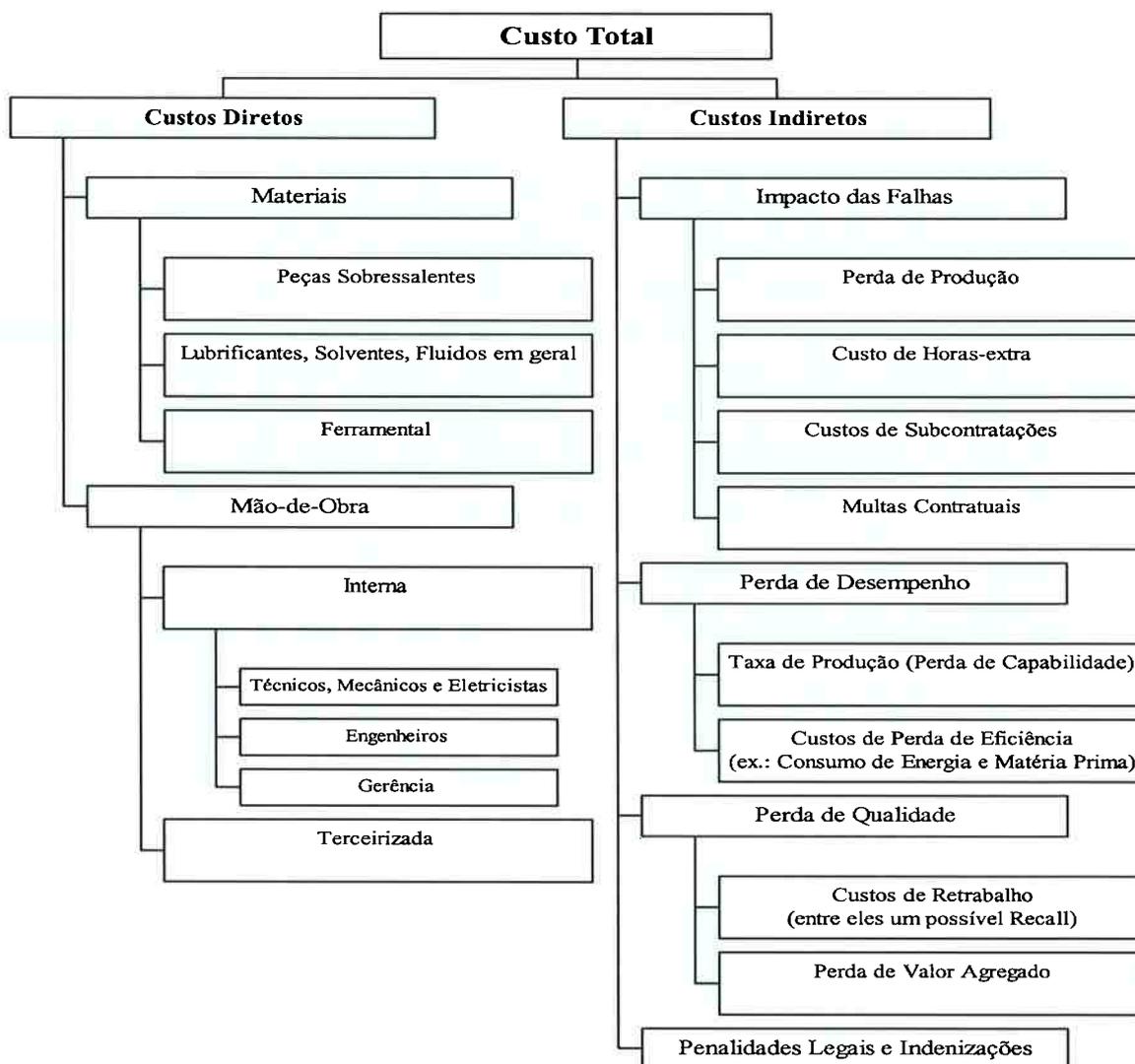


Figura 6.1 – Componentes dos Custos Associados à Manutenção

**6.3 – Custos Diretos****6.3.1 – Custos de Mão-de-Obra**

Devido à complexidade na determinação dos custos de realização de uma dada tarefa ou de debelação de uma falha de um equipamento, este item é geralmente tratado de modo muito superficial, segundo DRAPINSKI (1973).

Dentre as razões para tal complexidade estão, como cita NAKAGAWA (1994):

- natureza técnica dos trabalhos, que podem envolver a participação de profissionais de diversas especialidades;
- duração das tarefas, pois é impossível quantificar o dispêndio com M.O. (mão-de-obra) para tarefas muito curtas (como uma simples troca de fusível em um painel de controle) ou muito longas, pois estas envolvem em geral grande número de profissionais e, como agravante, tem-se a necessidade da contratação de terceiros e nem sempre é possível, como já pôde constatar o autor deste trabalho, estabelecer um limite definido para as atuações das equipes interna e terceirizada;
- tarefas gerenciais, pois a quantidade de horas consumidas em planejamento e controle de manutenção é difícil de ser supervisionada e, ainda, em muitas organizações os profissionais encarregados destas tarefas participam de outras tarefas de manutenção, sobretudo os engenheiros, que tomam parte em atribuições como orientar a execução de revisões e reparos, elaboração e interpretação de relatórios, elaboração de especificações de compras e contratos, compras, testes e inúmeras outras e
- dificuldade em determinar as implicações das tarefas não previstas, em geral associadas à manutenção corretiva e, por isso mesmo, à falha. Comumente, é necessário observar a ocorrência da falha para só depois estabelecer padrões de ação e, por conseguinte, determinar os custos associados à M.O.

Uma saída necessária para facilitar a determinação destes custos, bem como para controlar a qualidade e eficácia dos trabalhos de manutenção é a adoção dos padrões de manutenção, como citam XENOS (1998), MOTTER (1992), CARDOSO e BELHOT (1994). Desta forma, a estimativa dos custos de M.O. (dependente do tempo de duração do reparo) se torna mais fiel à realidade, traduzida em tempo médio de reparo (MTTR do inglês “*Mean*

*Time to Repair*, como citado em LEWIS (1986) e CARDOSO (2000)). Não apenas o cálculo dos custos de M.O. se torna mais preciso, como também o controle da disponibilidade se torna possível, pois esta é uma relação entre o tempo operante e o tempo paralisado à guisa de manutenção – vide CARDOSO (2000) – sendo indiscutível a contribuição deste último na estimativa da utilização da M.O.

Como tal estimativa envolve valores médios e, portanto, pesquisados sobre um período de tempo, conclui-se que a obtenção de um histórico confiável de manutenção e mesmo de falhas é imprescindível para a precisão dos cálculos. Assim, os custos com M.O. devem ser constantemente refinados, pois um tempo maior de pesquisa resulta quase sempre em estimativas mais confiáveis para tarefas previsíveis e mesmo para tarefas imprevistas as quais, com o tempo, podem ser executadas de forma padronizada. Tal procedimento é bastante laborioso no caso de políticas de manutenção a serem implementadas sem que nenhum histórico esteja disponível, sejam os equipamentos novos ou não, seja a planta nova ou não. Mas como as condições de degradação dos equipamentos podem ser controladas desde o início, além da facilidade de implantação de uma cultura em plantas (unidades fabris) novas, a prática tem mostrado que é mais fácil implementar políticas de manutenção em plantas novas dotadas de equipamentos novos.

As componentes do cálculo dos custos de mão-de-obra são principalmente :

- H-h (Homens-horas, unidade tradicionalmente utilizada para avaliar a carga de trabalho exigida para o cumprimento de uma tarefa) para cada tarefa a ser realizada;
- Horas-extra e eventuais premiações e
- Custos de subcontratação.

O autor ressalta que, haja vista a necessidade da adoção de padrões de manutenção,

*CARDOSO (2004)*

esta atividade deve ser orientada a assumir um comportamento científico, pois para a elaboração destes procedimentos, é necessário conhecer conceitos como modos de falhas, comportamento estatístico da falha, detalhes de projeto dos equipamentos, exigências legais e muitos outros aspectos. Sugere-se então que seja seguida uma metodologia para a elaboração dos procedimentos de manutenção, que contemple o atendimento aos seguintes estágios, como propõem XENOS (1998) e DRAPINSKI (1973) – alguns destes estágios, dependendo do tipo de equipamento e atividade desenvolvida pela organização podem não ocorrer ou se apresentarem de forma diferente, sobretudo no que diz respeito ao procedimento para aquisição de materiais e testes:

- identificação do problema e diagnose;
- planejamento da solução e da utilização de recursos;
- elaboração do procedimento para aquisição de materiais;
- isolamento e acesso ao equipamento e/ou subsistema;
- implementação da solução
- reparo e/ou revisão do equipamento;
- limpeza e conclusão dos trabalho em oficina;
- testes
- entrega formal à operação.

Os custos com M.O. são dependentes de muitas decisões tomadas em manutenção, o que se constitui em mais um fator de complexidade na sua determinação. O prazo de um ano é

freqüentemente um bom horizonte para a estabilização destes dados, como citam DRAPINSKI (1973), MOTTER (1992), e XENOS (1998).

### 6.3.2 – Custos de Materiais

A segunda componente dos custos diretos é de certa forma fácil de ser quantificada, dizendo respeito, basicamente, aos sobressalentes utilizados em manutenção. Se forem identificáveis as peças (componentes) a serem substituídos além dos materiais adicionais (como lubrificantes), seu custo pode ser obtido diretamente por meio da consulta às planilhas de preços dos fornecedores, como cita NAKAGAWA (1994).

Entretanto, este não é o caso da totalidade das peças de reposição. Um fator complicador pode ser a indisponibilidade destas junto aos fornecedores e fabricantes, o que exige espera para a entrega. Da mesma forma, se os tempos de obtenção das peças, notadamente aquelas manufaturadas sob encomenda, forem excessivamente longos em virtude da dificuldade de fabricação, dimensões e/ou geometria das peças ou complexidade do processo de produção, os preços cotados podem diferir do preço final.

Cuidado adicional deve ser tomado no caso da estimativa dos custos de itens cuja obsolescência é rápida, como é o especialíssimo caso dos sistemas eletrônicos e microprocessados. Isto porque tais componentes podem deixar de ser fabricados em curto espaço de tempo e a estimativa de seu custo é feita tomando-se por base componentes equivalentes (desde o tempo dos transistores esta prática é adotada, como já pôde constatar o autor deste trabalho). Além do problema do próprio levantamento do custo destes componentes (muitas vezes unidades de controle inteiras), há uma maior dificuldade na determinação dos custos das conseqüências das falhas, já que o equipamento – na hipótese da substituição de um componente original por outro equivalente (não adaptado, mas também não idêntico ao componente de projeto) – é diferente ou pelo menos, opera segundo

parâmetros diferentes daqueles concebidos na fase de projeto (esta constatação também é verdade para a análise dos custos de manutenção de equipamentos reformados e/ou alterados).

A montagem das estimativas dos custos totais de materiais deve conter todos os estágios dos eventos relevantes a serem considerados (a exemplo dos estágios envolvidos na determinação dos custos de M.O.), já que nem só de itens consumíveis se compõem tais custos. Pode haver a contribuição de capital (em geral na forma de uma dotação orçamentária para a manutenção que inclua uma reserva para a manutenção corretiva, a qual sempre estará presente mesmo em um apurado programa de manutenção preventiva, pois causas completamente imprevisíveis ou até mesmo incontroláveis podem ocasionar a falha em um equipamento ou subsistema sujeito à manutenção preventiva e/ou preditiva), ferramentas e instalações (oficinas e instrumentação além de bancadas de testes) específicas. Em alguns casos, custos de atividades cumpridas por terceiros, tais como limpeza e tratamento de materiais incluindo tratamento térmico de peças usinadas feitas sob encomenda, soldagem especializada, recuperação metalográfica, além dos custos com o descarte de resíduos e peças substituídas (tais como baterias, metais pesados, resíduos tóxicos, etc.) dentre outros exemplos.

Mostra a prática que o detalhamento destes custos deve ser tão abrangente quanto possível, mas não obsessivamente acurado, pois componentes individuais podem ser cotados detalhadamente, mas levando, quando se compõe toda a política de manutenção, tempo demais na pesquisa de itens “potenciais” de custos e levando à perda do objetivo maior, que é a elaboração de um procedimento de decisão que permita elaborar uma política de manutenção técnica e economicamente eficaz e não uma análise contábil sofisticada. Mesmo os autores do tema análise de decisão, como SHIMIZU (2001) e, em menor grau CHURCHMAN (1971), alegam que a precisão dos valores dos parâmetros é importante até o ponto em que a ordem de grandeza esteja corretamente determinada – como afirmam

GARBATOV e SOARES (2001) e FREUDENBURG (2001) - sendo mais difícil obter consistência entre as prioridades relativas atribuídas aos critérios parciais de decisão, como atestam SHIMIZU (2001) e CARDOSO et al. (2002). Resumindo, é preferível trabalhar com um modelo **bem** aproximado que funcione do que um modelo muito acurado, mas jamais implementado.

### 6.3.3 – Custos Variantes no Tempo

Os custos de M.O. e de materiais podem ser variáveis em função do tempo e isto é de suma importância na tomada de decisão em manutenção, já que algumas tarefas podem se prolongar multiplicando os custos por números positivos maiores que 2. Mais do que simplesmente estimar o tamanho e duração das tarefas, deve-se raciocinar sobre quão grande e dispendioso ficará o trabalho no caso de atrasos (a simples necessidade da realização de tarefas adicionais às planejadas, mais frequente à medida em que as dimensões e/ou complexidade dos equipamentos aumenta).

Nestas circunstâncias, os trabalhos assumem um comportamento condicional e as tarefas (tais como inspeção, desmontagem, diagnose, reparo ou correção, testes e retorno) dependem das condições dos componentes e subsistemas do equipamento por ocasião da intervenção da manutenção, em relação à condição usada para estimativas iniciais do custo. São duas as componentes dos custos a serem introduzidas no caso de tarefas adicionais e/ou não previstas :

- o custo da isolação (ou paralisação) do equipamento, desmontagem, inspeção, diagnose, montagem, ajustes e entrega (o que envolve todas as componentes dos custos de mão-de-obra citados até agora) e

- o custo dos trabalhos para reparo, já que nestas circunstâncias é necessário corrigir falhas ou mesmo adicionar tarefas acessórias à manutenção propriamente dita, como por exemplo no caso de revisões periódicas nos equipamentos da indústria sucro-alcooleira, onde o estado dos equipamentos ao final de uma safra não é precisamente conhecido e a fabricação de engrenagens, eixos e reforma de redutores inteiros pode ser necessária, sendo constatada apenas durante a revisão.

Para descrever tais custos e seus efeitos em uma decisão qualquer, deve-se analisar a situação graficamente. No gráfico da Figura 6.2, o eixo  $x$  representa a escala de tempo, com o cuidado de se estabelecer qual a condição de referência (estado de novo, revisado, inspecionado ou outras). O gráfico tem duas componentes de custo (os fixos e os variáveis) e sua aparência é semelhante à Figura 6.2.



Figura 6.2 – Representação Gráfica dos “Custos de Ocasião”

- O formato da curva dos gráficos dos custos que se aceleram com o tempo é – em geral – difícil de ser totalmente plotado segundo um padrão, sendo que em muitas ocasiões, não há

patamares nem trechos lineares.

A seguir, este trabalho apresenta duas das principais componentes de acréscimo nos custos ao longo do tempo.

- Falhas implícitas ou não reveladas : algumas tarefas devem ser programadas para determinar quais são as falhas não aparentes quando de sua ocorrência. Se a taxa de falhas relacionada a estes eventos for aleatória (o que se traduz em probabilidade de falha constante, segundo LEWIS (1986), num padrão idêntico à evolução temporal da taxa de falhas), a necessidade de recursos para diagnose e reparo aumenta linearmente, ou seja, qualquer semana de atraso acarreta o mesmo montante de custos adicionais por período. A melhor estratégia de inspeção deve equilibrar os custos de detecção e de correção (este último nem sempre conhecido) com os riscos de ineficácia do método de detecção, levando a falha a permanecer oculta, como pode ser observado na aplicação de alguns métodos de NDT (do inglês *Non Destructive Tests* ou ensaios não destrutivos), tais como inspeção por ultrassom, partículas magnéticas, correntes parasitas e líquido penetrante, entre outros.
- Limpeza e/ou descontaminação : a acumulação de depósitos e sedimentos, combinada com o endurecimento ou cozimento dos resíduos é crescente e ainda se acelera com o tempo. Apenas ocasionalmente estes custos decaem (quando a taxa de deposição for reduzida, por exemplo, em virtude de redução na vazão ou na pressão de uma linha. Um problema com estas tarefas de limpeza é que, em geral, não se sabe de antemão qual a quantidade de impurezas e incrustações será encontrada e, com isso, qual a duração do trabalho de limpeza. Pode-se propor uma matriz, no caso das análise gráfica dos custos totais se revelar muito complexa, para detalhar os itens que necessitam ser cotados, já retratando alguma parcela dos custos das conseqüências de uma falha (custos das

penalidades), como mostrado na Tabela 6.1. No caso dos custos de reparos das falhas imprevistas, não apenas a probabilidade de ocorrência do evento muda com o tempo (já que nenhuma política de controle da degradação está sendo aplicada, deixando o equipamento aos cuidados exclusivos da manutenção corretiva), mas a severidade das conseqüências tende a aumentar, o que deve ser cuidadosamente considerado pelo procedimento de análise de risco.

Tabela 6.1 – Matriz de Levantamento dos Custos Diretos de Manutenção

Tipo de Tarefa	Custos Diretos	Custos Indiretos (Penalidades)
Planejadas (resultam na escolha da condição de referência após a revisão)		
Corretivas de restauração (tarefas não planejadas, pode voltar à condição de referência)		
Corretivas ocasionais (tarefas não planejadas que não afetam riscos subsequentes)		

#### 6.4 Custos Indiretos

Duas das fontes mais comuns de erros na quantificação de problemas na indústria são, segundo DRAPINSKI (1973), determinar o padrão dos riscos e as conseqüências dos eventos (sobretudo das falhas). O custo da indisponibilidade dos equipamentos é fonte para conflitos de opiniões e, na elaboração deste trabalho, o autor pôde visualizar esta afirmação na prática. É possível, no entanto, estudar a possível elaboração de uma estrutura para a determinação destes custos.

Qualquer impacto que possa ser facilmente quantificado ou – mais popularmente falando – possa ser de alguma forma ressarcido totalmente por meio monetário, é passível de classificação como custo direto de manutenção (a definição de custos diretos e indiretos relativos à atividades econômicas como um todo difere quando se considera obras sobre microeconomia, tais como MARTINS (1990) e WONNACOTT e WONNACOTT (1982), para quem custos diretos são aqueles diretamente relacionados à cadência de produção, sendo

que seu incremento força uma variação positiva do volume produzido ou comercializado e, por esta razão, são variáveis). Efeitos indiretos, por seu turno, ferem a imagem da organização, seja pela perda de oportunidades de negócios, seja por redução na produtividade ou outros prejuízos nem sempre quantificáveis, sobretudo quando se trata de manutenção. De forma geral, trata-se de impactos negativos : perda de resultados mais do que despesas.

Os custos indiretos associados à manutenção relacionam-se a quebras de equipamentos, acidentes e outros eventos classificados como de conseqüências severas e estão associados fortemente à manutenção corretiva oriunda de falhas imprevistas, as quais ocasionam paradas cuja duração pode ser desconhecida. No caso da manutenção preventiva e da preditiva também, a indisponibilidade é conhecida pois as tarefas são pré programadas, mas custos indiretos tomam corpo na ocorrência de atrasos na execução destas programações. Sua magnitude é difícil de ser estimada após a ocorrência do evento e, mais ainda, de ser prevista antes destas ocorrências, como afirmam MOUBRAY (1997) e XENOS (1998). Questões como “qual o montante de vendas perdido em conseqüência de uma falha em particular ?” ou “quanto valor agregado perde um processo específico ?” ou, mais ainda, “quanto de confiança pública é perdida ?” ficam sem uma resposta precisa, já que mesmo a percepção de que aspectos foram afetados por determinado evento envolve subjetividade e a consideração de fatores intangíveis. Então, é necessário introduzir simplificações na modelagem do contexto operacional de um equipamento (o que inclui simplificar até mesmo seu *lay out*).

O passo inicial é separar o que é custo indireto das considerações intangíveis. Estas diferenças somente existem na dificuldade de avaliação das segundas, mas custos indiretos afetam o resultado das organizações por um caminho que se pode rastrear : perda de vendas, qualidade deficiente, baixo valor agregado. Já os fatores intangíveis se relacionam à efeitos que envolvam a percepção humana e suas opiniões (aspectos sabidamente incontroláveis), tais

como moral, ética, imagem e consciência pública, qualidade ambiental e outras. Alguma superposição na classificação destes fatores pode ser percebida, já que perda de vendas pode ser resultado de uma piora na avaliação da empresa pelo público, mas esta divisão didática é imprescindível para se estimar os custos indiretos, até porque, a tendência é que estes estejam associados a situações de maior risco haja vista sua imprevisibilidade (em alguns casos) ou falta de controle sobre a degradação do equipamento (em outros casos).

#### **6.4.1 Perda de Produção**

Em algumas situações, as conseqüências de uma quebra podem ser quantificadas em termos de produção. A redução nas taxas de produção (aplicável a processos contínuos) ou na quantidade de itens produzidos pode fornecer um valor financeiro baseado na perda de margem de lucro. Isto só é viável se duas condições forem observadas :

- o equipamento tem responsabilidade direta no volume e qualidade da produção (sua parada causa uma perda mensurável no processo) e
- a produção perdida seria certamente absorvida pelo mercado (caso em que as perdas geram custos, como na geração de energia elétrica).

O impacto nas vendas é, em alguns casos, uma simples questão de se multiplicar o volume pelo valor individual dos itens. O impacto da parada pode ser facilmente medido, nestes casos, pela perda do lucro com as vendas esperadas, desde que se possa evitar custos operacionais e de matéria prima durante o período de paralisação. Se, de outra forma, a parada resulta em danos aos itens produzidos (perda de produção efetiva), então o valor perdido é o valor de venda dos bens se tivessem sido corretamente fabricados.

O impacto de paradas imprevistas (quebras) ou de atrasos na execução de tarefas programadas freqüentemente aumenta com o tempo de paralisação. Curtos períodos podem ser absorvidos e rateados se a linha tiver flexibilidade e puder assumir a carga de trabalho do equipamento parado. Períodos um pouco mais longos acabam por exigir medidas de contratação de serviços externos para obter os bens normalmente fabricados *in company*. Períodos muito extensos envolvem penalidades por perda de vendas de produtos cujo fornecimento tenha sido contratado.

Independentemente da atividade fim da organização (que produtos ou serviços ela fornece), deve-se proceder a uma análise da evolução destes custos para estimar o impacto de uma falha, como apresentado na Figura 6.3. Desta forma, uma estratégia de manutenção pode ser formulada, apenas observando que sua ação deva acarretar custos menores que os observados durante o período de paralisação, quando este puder ser determinado a priori.

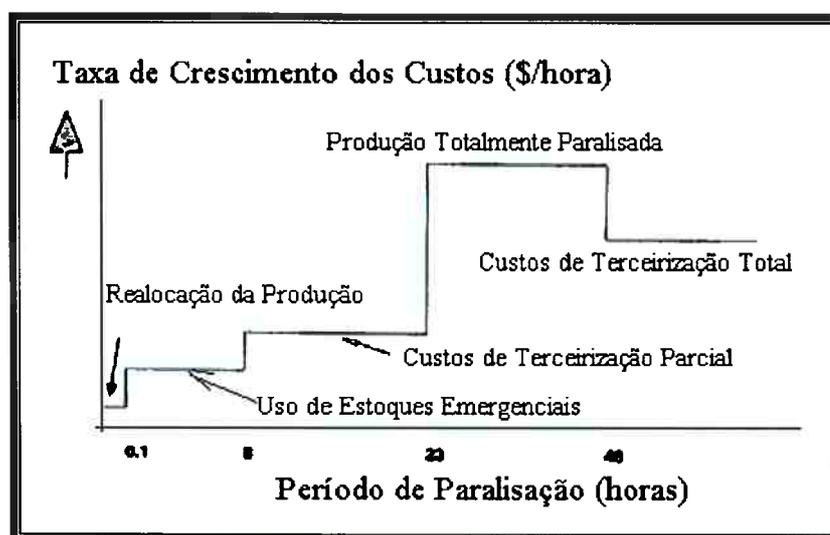


Figura 6.3 – Evolução dos Custos Indiretos Associados à Manutenção, adaptada de WOODHOUSE (1993)

Há casos em que o impacto sobre a produção não é evidente. Nestas situações, deve-se considerar tal impacto como um risco adicional, considerando-se alguma dificuldade no discernimento dos chamados efeitos cumulativos ou “cascata”, cuja severidade pode ser avaliada pelo risco da ocorrência dos demais eventos associados a esta possível falha.

PARK et al (2000) afirmam que para um estudo mais detalhado das condições de segurança e avaliação de projetos, é necessário elaborar a árvore de eventos, como mostrado por PAPAZOUGLOU (1998). Por sinal, a formulação da árvore de eventos é um poderoso suporte à elaboração dos diagramas causa consequência, indispensáveis na caracterização e análise de situações de risco.

É muito importante dedicar atenção mesmo a eventos que pareçam banais por serem básicos ou raiz (do inglês “*root causes*”), especialmente se a segurança estiver em jogo, pois torna-se necessário controlar a propagação de uma falha por todos os seus estágios. Um exemplo a ser citado é o vazamento de gás, o qual pode conduzir a grandes explosões. O vazamento de gás em si é um evento de pequenas proporções e à primeira vista causa pouco impacto (em geral a perda da substância mais o custo do reparo – que freqüentemente é fácil de ser realizado mesmo em instalações de grande porte – e possível descontaminação do ambiente). Mas, dependendo do cenário – de suma importância como citado na seção deste trabalho dedicada à conceituação da análise de risco – a possibilidade de ignição ou calor excessivo pode resultar em explosões com consequências incomensuráveis ou ao menos imprevisíveis (como ocorreu no ano de 2001 com uma plataforma de exploração de petróleo da empresa PETROBRÁS – Petróleo Brasileiro S. A. – onde um acúmulo indevido de gás seguido por deficiente controle e reparo da situação conduziram a uma explosão que vitimou fatalmente mais de dez pessoas e, só em implicações relacionadas exclusivamente à plataforma, contabilizou mais de US\$ 500 milhões em prejuízos), mostrando que o impacto pode ser inúmeras vezes mais severo que o imaginado em uma análise mal conduzida.

Para ilustrar como esta situação de risco pode ser convertida em bases financeiras, considera-se que o vazamento de gás deve ter como uma de suas possíveis conseqüências prováveis a ocorrência de grandes explosões (isto depende do ambiente e até mesmo da abordagem adotada na formulação das hipóteses de risco, como a que considera os “*worst cases*” – vide BOUTALEB (1999) ou situações extremamente catastróficas). Para uma avaliação preliminar da extensão de cuja explosão deste tipo, deve-se multiplicar a probabilidade de vazamento de gás (medida um tanto difícil de ser obtida e às vezes só possível com a análise do histórico das falhas) pelas conseqüências em termos financeiros (ou seja, indenizações e cobertura em caso de ocorrência do evento), como mostrado na equação 6.1, caracterizando um índice atuarial, por sinal, empregado pelas companhias de resseguros para o cálculo dos prêmios, como afirmam RENN (2001) e BIER (2000). Se a parcela dos riscos de explosão for significativa em comparação com o impacto total de falhas na planta industrial (ou seja, a soma dos impactos de todos os outros eventos), então deve-se considerar que se está exposto ao risco de explosões muito sérias. Como, em geral, os custos alcançam valores da ordem de milhões de unidades monetárias (leia-se dólares), a redução do risco destas situações deve ser centrada na redução drástica da possibilidade de vazamento de gás, ignição (geração de faíscas) e calor excessivo, estas duas últimas nem sempre possíveis de serem obtidas. Um refinamento nesta análise seria – com um conhecimento melhor do ambiente interno e até externo da organização – considerar, na composição da chamada conseqüência do vazamento de gás ( $P_{vg}$  na equação 6.1) a probabilidade de ocorrência de ferimentos graves (mutilações e/ou contaminações que levem à perda da capacidade de trabalho, por exemplo) e mortes, especialmente quando a opinião pública for muito suscetível à qualquer anormalidade ocorrida com as operação da empresa, caso de refinarias de petróleo, indústrias químicas, transportes aéreo, ferroviário e marítimo, geração de energia – principalmente a nuclear, como citado por BIER (2000) – entre outros numerosos exemplos,

como mostrado na equação 6.2.

$$\text{Impacto do Evento} = p_{vg} \cdot P_{vg} \quad (6.1)$$

$$P_{vg} = P_{ig} \cdot P_{mf} \cdot c_{mf} \quad (6.2)$$

Nas equações acima, tem-se :

- $p_{vg}$  = probabilidade de vazamento de gás;
- $P_{vg}$  = conseqüências prováveis do vazamento de gás;
- $p_{ig}$  = probabilidade de ignição do gás;
- $p_{mf}$  = probabilidade de causar mortes e ferimentos graves e
- $c_{mf}$  = conseqüências financeiras (indenizações) das mortes e ferimentos.

Esta abordagem é, inclusive, bastante apropriada para o emprego com a metodologia de seleção das práticas de manutenção proposta neste trabalho.

Uma análise sistemática destes eventos pode também ser feita empregando-se diagramas lógicos com portões do tipo **E**, **OU** e **SE**. Combinando-se probabilidades e conseqüências finais de cada evento, pode-se estabelecer um índice ponderado, segundo WOODHOUSE (1993) para determinar a severidade do evento final, em uma abordagem bastante semelhante à construção de um diagrama causa-conseqüência como em SOUZA e AYYUB (2000). É surpreendente constatar que apenas dois ou três níveis (acima) de

repercussão de um evento inicial já podem ser suficientes para se determinar a gravidade de uma falha, por mais simples que esta possa parecer.

Nos casos em que determinar os impactos sobre uma linha de produção seja demasiadamente complexo ou em que os equipamentos estejam sendo usados em prestação de serviços - CARDOSO e BELHOT (1994) - situação em que a quantidade de fatores intangíveis inviabiliza uma análise precisa, técnicas específicas devem ser utilizadas para se estimar o custo de um evento como a falha. A premissa básica é a de que, segundo DRAPISNKI (1973), o resultado da operação de um equipamento deve, ao menos, cobrir seu custo operacional.

Desta forma, prever as conseqüências de uma parada por falha imprevista torna-se uma questão de balanceamento entre os custos da propriedade do equipamento (conceito que envolve custos operacionais, preço de aquisição e outros) e os resultados da operação normal. Se uma resolução tão fina a ponto de considerar os impactos das falhas em componentes não for requerida, o balanceamento entre os fatores citados acima assume formato similar ao da Figura 6.4. Para melhor compreensão desta figura, definem-se os parâmetros a seguir :

- Custos de Capital : este custo é a amortização do valor inicial de aquisição e instalação dos equipamentos e de uma linha de produção como um todo. Encargos financeiros (juros e correções monetárias, por exemplo), taxas (impostos) e depreciação têm influência direta nesta amortização;
- Parcelas Materiais : é uma parte do capital investida no suporte às instalações e operação dos bens. Peças de reposição instaladas, geradores, iluminação, aquecimento e outras podem ser incluídas nesta parcela;
- Suporte e Planejamento : tais custos cobrem os encargos com empregados, tais como

técnicos e engenheiros de manutenção, a provisão de peças de reposição para manutenção programada mais uma eventual reserva para a corretiva - vide CARDOSO e SOUZA (2002) – e custos de manutenção planejada;

- Custos Operacionais : estes custos cobrem somente aqueles itens consumidos enquanto o equipamento está operando, tais como matéria prima, energia e/ou combustíveis, além da possibilidade da inclusão de manutenção rotineira, sobretudo se estiver sendo empregada a abordagem de TPM e eventuais contratos com prestadores de serviço externos, desde que estes contratos estejam condicionados somente ao atendimento da demanda e
- Lucro Operacional : este é compreendido como qualquer produção, serviço ou processo que resulte da operação adequada do equipamento. Pode ser compreendido como valor agregado ou como um serviço que capacite alguma outra atividade, como a operação de uma caldeira para a geração de vapor, onde não se pode obter o valor agregado, mas pode-se conhecer o impacto sobre a produção. É, em geral, a parcela menos conhecida referente às operações de um dado equipamento.

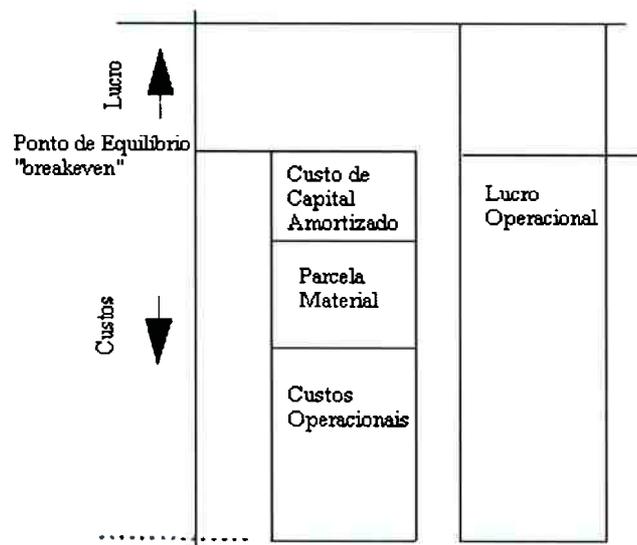


Figura 6.4 - Balanço entre Custos de Propriedade do Equipamento e os Resultados de sua

## Operação Normal, adaptado de WOODHOUSE (1993)

No caso de falha do equipamento, a figura que ilustra o equilíbrio entre os custos já citados se altera, pois o lucro operacional cessa (em português, a perda da receita gerada pela operação do equipamento é denominada de lucro cessante, como afirma MARTINS (1990) e os custos operacionais deixam de ocorrer, além da possibilidade de que, se a duração da parada for longa o bastante, os custos com suporte e planejamento podem ser remanejados, já que o *staff* pode ser empregado para realizar outras tarefas. A nova equação resulta em uma perda em rede ou perda relacionada à linha de produção, já que uma verba foi atribuída e continua a ser gasta sem resultados positivos, devido a outras parcelas dos custos). Esta situação pode ser visualizada na Figura 6.5.

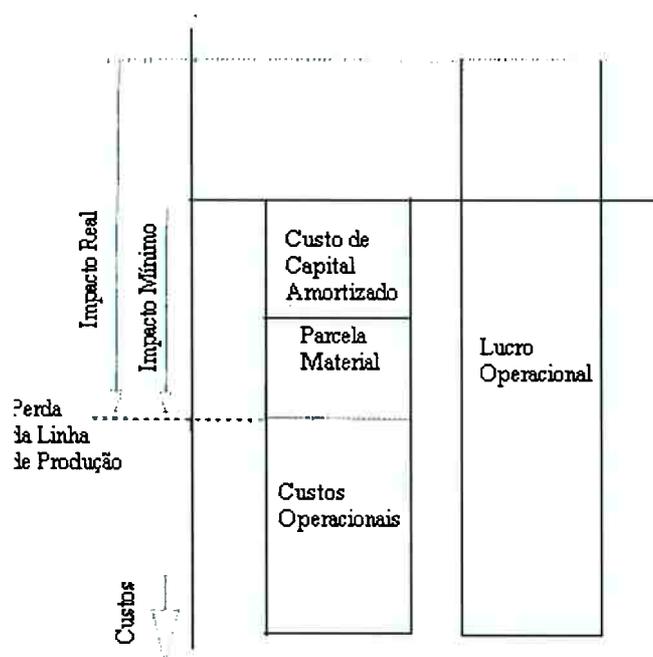


Figura 6.5 – Equacionamento dos Custos de Propriedade do Equipamento em Situação de Falha, adaptado de WOODHOUSE (1993)

A diferença nas representações do balanceamento dos custos em situação operacional

e de falha revela o impacto de falhas (e tarefas) imprevistas. No caso de tarefas programadas como a manutenção preventiva e a preditiva, um diagrama semelhante pode ser desenhado, com diferenças na parcela de custos materiais e de planejamento (em geral mais intensamente exigidas) e na duração das paradas - a manutenção eficaz, atualmente, deve ser orientada sob padrões de execução e o tempo médio de reparo ou MTTR (do inglês *Mean Time to Repair*) das tarefas programadas deve ser conhecido, como afirmam MOTTER (1992), XENOS (1998) e CARDOSO e SOUZA (2001). O impacto em rede ou na linha de produção é sempre comparada com o diagrama de operação normal.

Ainda que os valores individuais de cada uma das parcelas dos custos não esteja disponível, pode-se elaborar os diagramas apresentados nas Figuras 6.4 e 6.5 com os custos totais – situação que este trabalho enfrenta em sua elaboração porque muitos dos custos relacionados à operação dos equipamentos sequer são conhecidos pela empresa (sem contar omissões intencionais) e não podem ser corretamente fornecidos – combinados (planejamento, materiais e operacionais). Dado que alguns destes custos podem ser evitados em caso de paralisação do ativo, os custos de uma falha imprevista podem ainda exceder a soma do valor do capital empregado e suporte em forma de materiais, mas ao menos se sabe a ordem de grandeza deste custo.

Esta técnica se presta a obtenção desta ordem de grandeza – no caso de informações pouco detalhadas - e à estimativa do valor mínimo do custo de uma parada imprevista, já que, justamente por ser imprevista, outros fatores impossíveis de serem levados em consideração previamente podem vir à tona.

#### **6.4.2 – Custos de Contratação de Serviços Externos (Terceirização Emergencial Total)**

A próxima técnica para estimação de custos de paradas imprevistas é indireta e se apóia na capacidade imaginativa de engenheiros, operadores e gerentes de imaginar a amplitude de possíveis problemas, o que conduz a uma ampla variedade de alternativas de soluções. Mas, de modo geral, o objetivo de todas estas alternativas é reduzir o prêmio pago em seguros, evitar ou reduzir as conseqüências de uma falha em termos apenas da produção, ou seja, as saídas do sistema produtivo devem continuar a ser geradas, mesmo que para este fim, seja necessário contratar recursos (maquinário) externo à organização, como afirma WOODHOUSE (1993). Como exemplo, pode-se citar subcontratação de operações (como na indústria de produtos plásticos injetados onde fornecendo-se o molde, basta selecionar uma empresa que possua equipamento com capacidade para injetar o volume de material pretendido) até o aluguel de equipamentos e planejamento de horas-extra e turnos adicionais por longos períodos (em alguns casos, uma semana já é um período longo o bastante). Em qualquer um destes casos, duas questões devem ser respondidas :

- como podem ser superados ou ao menos mitigados os efeitos da parada do equipamento (continuando a realização da mesma função ou de funções similares àquelas desempenhadas pelo equipamento faltante)? e
- qual o custo adicional desta solução?

A escolha pelo uso de meios próprios para continuar a produção possibilita a disponibilidade continuada, embora haja a necessidade de folga na carga de trabalho ou existência de unidades sobressalentes (em geral em *stand by*). O impacto da falha do equipamento não deve exceder os custos extraordinários acarretados por tal evento, pois nesta situação, o emprego de serviços externos é fortemente preferível. Alguns exemplos de situações onde se incorre nestes custos são :

- em mineração, companhias de gás ou óleos onde a produção a uma cadência fixa é

conhecida e a esta perda se adicionam custos de penalidades, embora em alguns casos, a perda de produção possa ser diluída futuramente;

- siderúrgicas podem evitar maiores problemas com perda de pressão hidráulica por meio de contratos de transporte e subcontratação de compressores e unidades hidráulicas de emergência, pagando prêmios para atendimento preferencial, pois seria quase impraticável delegar a produção de produtos de aço a terceiros em tempo hábil, a menos que uma linha de produção externa à empresa esteja operante e possa assumir a produção que foi interrompida na unidade principal;
- a qualidade deficiente que resulta de acabamento pobre por problemas em máquinas-ferramenta pode ser quantificada em termos do custo de retrabalho ou, em alguns casos, pela perda de valor no rebaixamento da categoria das peças produzidas, comparando-se então com os custos incorridos na subcontratação.
- 

### 6.5 – Valor do Dinheiro no Tempo

Se a compra de peças e/ou equipamentos muito caros for protelada, pode-se esperar dois efeitos. Primeiramente, o preço de aquisição será alterado (na grande maioria dos casos aumentará) e, em segundo lugar, o dinheiro imobilizado poderia ser utilizado em outra aplicação neste meio tempo, auferindo resultados. Estas duas considerações norteiam todas as formas de cálculo de valores futuros, tais como desconto ou desvalorização em fluxo de caixa (DCF do inglês “*discount cash flow*”), valor presente líquido (NPV do inglês “*net present value*”), taxa interna de retorno (IRR do inglês “*internal rate of return*”) e outras formas de projeção.

Muito trabalho intelectual tem sido despendido para elaborar previsões e algoritmos de

cálculo de projeções, contendo sofisticações tais como a inclusão da evolução dos preços dos combustíveis, taxas de juros, custo de vida e outros índices (no Brasil, ainda se incluem índices oficiais e os de praxe do mercado, tais como o IPC-A ou Índice Geral de Preços ao Consumidor Amplo, o IGP-M ou Índice Geral de Preços Médio, a TR ou Taxa Referencial de Juros, a Taxa SELLIC – para considerações de ordem tributária – e várias formas de equivalência como as UFM ou Unidades Fiscais do Município, diferentes, como o nome suscita, para cada cidade). São modelos particularmente úteis para comparação entre diferentes políticas de pagamento em um determinado (e finito) horizonte temporal. WOODHOUSE (1993) afirma que qualquer livro de economia ou contabilidade cita a maioria destes modelos.

Entretanto, o impacto do atraso ou mesmo da duração excessiva na consecução de um empreendimento é, basicamente, a diferença entre a inflação esperada e as taxas relacionadas ao empreendimento projetadas (ganhos). Isto depende muito dos objetivos da organização. Se os preços de peças e equipamentos aumentam e o dinheiro não é investido, a quantidade disponível diminuirá com o tempo. Se nenhuma aquisição é feita e o dinheiro é aplicado em bancos idôneos (esta observação tem cada vez mais importância mesmo em nível internacional), pode-se ganhar financeiramente num primeiro momento, mas a linha de produção e, mais ainda, a manutenção dos equipamentos certamente estará desguarnecida.

Na prática, o balanceamento entre estas oportunidades opostas é geralmente a favor do atraso – e isto é reforçado se há restrições orçamentárias e de planejamento para ações no curto prazo, como pode ser o caso da manutenção preventiva, onde a periodicidade das intervenções desconhece a taxa de retorno do capital.

As taxas do empreendimento (muitas vezes compostas por metas de ganhos) são mais altas que a inflação projetada – para atrair investidores – e desta maneira é possível ganhos

em cadeia. Mas este ganho depende de como o dinheiro é empregado.

No caso da manutenção, a questão do valor do dinheiro no tempo é de suma importância para avaliar a conveniência da continuidade da política de manutenção de equipamentos já idosos, opção pela reforma ou substituição, além da comparação entre riscos associados à degradação dos ativos (e por isso mesmo futuros, quando o equipamento estiver gerando cada vez mais gastos com manutenção) e investimentos na prevenção ou mitigação dos riscos em data e valores atuais, como percebe MOUBRAY (1997). É certo que, se nenhuma decisão de investimento é tomada a respeito do dinheiro (investimento, compras, aplicações financeiras, por exemplo), cada unidade disponível terá menor poder de compra no futuro (e no caso de moedas “fracas”, esta constatação ainda é reforçada pela correção cambial).

A Figura 6.6 mostra como a distância entre os ganhos em capital aplicado financeiramente e preços inflacionados retraídos (cenário de deflação – extremamente improvável na atual conjuntura) é a favor da protelação dos investimentos (por isso é feita a distinção entre investimento e aplicação, a qual está longe de ser apenas semântica) em aquisição de quaisquer bens, mas além deste cenário ser otimista em excesso, há inconveniência que vão além da questão dos ganhos de capital, relacionadas à disponibilidade dos equipamentos, qualidade e capacidade dos processos da organização, possibilidade de ocorrência de acidentes e, bastante difícil de ser modelada mas considerada em taxas constantes, a depreciação financeira e degradação técnica do equipamento. Neste ponto, a literatura sobre manutenção cessa suas considerações, pois até o momento, não são conhecidos estudos completos que comparem a evolução dos preços com a depreciação do equipamento e seu conseqüente impacto na produção, comparação difícil de ser explicada textualmente e, como já foi possível observar na modelagem dos custos, trabalhosa. Mas a tomada de decisão sobre a política de manutenção a ser adotada ao longo de toda a vida útil

do equipamento, sobretudo no caso de ser aplicada a abordagem de análise de riscos, onde implicações financeiras e técnicas são combinadas para compor índices que orientem a decisão, é imprescindível que se tome tais fatores em consideração.

A metodologia proposta no Capítulo 5 deste trabalho (vista na Figura 5.3), exigindo a determinação das probabilidades de ocorrência de eventos (falhas) – aliada ao fato de que estas probabilidades variam no tempo e se compõem com os custos para orientar a decisão – exigem deste trabalho uma postura mais cuidadosa na questão do valor do dinheiro no tempo que a até então percebida, mesmo em trabalhos como o de GARBATOV e SOARES (2001), no qual a estratégia de manutenção é baseada apenas no valor atual dos custos e preços, considerando apenas a evolução da confiabilidade. Neste trabalho citado, conforme a confiabilidade decresce os custos de uma eventual falha aumentam, mas baseados no valor presente, ou seja, tecnicamente, se reconhece que os custos aumentam em certos estágios da vida útil. Como tais sistemas são projetados para possuírem vida útil longa, é de se esperar que haja variações inclusive nos custos da falha, não apenas nos investimentos, pois indenizações podem se tornar muito mais altas à medida em que probabilidades de falha cresçam, em proporções mais severas que aumento de preços de peças, mão de obra e métodos de inspeção, por exemplo. Em resumo, é um trabalho que determina tecnicamente as implicações das falhas, mas esbarra na simplificação de não considerar a questão do valor do dinheiro no tempo.

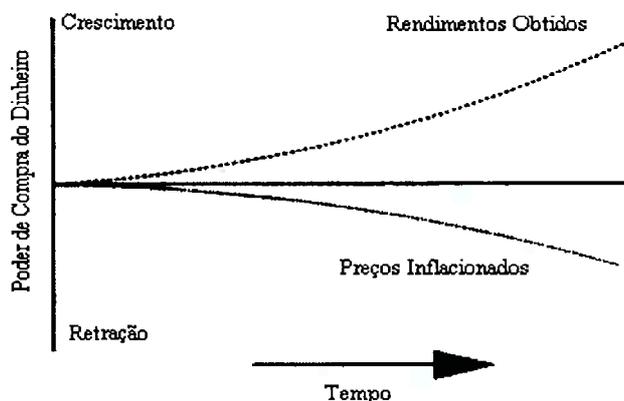


Figura 6.6 – Distanciamento entre Ganhos em Aplicações e Preços Deflacionados num Cenário Otimista, adaptada de WOODHOUSE (1993)

Para melhorar a compreensão de como se dá o efeito do tempo sobre o valor do dinheiro, pode-se acompanhar o exemplo apresentado na Tabela 6.2, adaptado de WOODHOUSE (1993).

Tabela 6.2 – Exemplo da Evolução do Valor do Dinheiro no Tempo.

Parâmetro	Valor
Ganho Anual Esperado em Aplicações Financeiras	8% ao ano
Taxa de Inflação Prevista	(5%) ao ano
Ganho Anual Projetado	3% ao ano
Montante Disponível	US\$ 20000
Período	5 anos
Valor após 5 Anos	$1,03^5 * US\$ 20000,00 = US\$ 23185,48$
<b>Ganho Total (projeção com base nos valores de hoje)</b>	<b>US\$ 3185,40</b>

Este cálculo é uma aproximação, pois assume que os ganhos são alcançados em um ano inteiro por meio da aplicação de juros simples para remuneração – para efeitos didáticos apenas - ou de taxas constantes de inflação, ambas sendo tomadas em bases anuais, além dos impostos com alíquota fixa, não considerando fatores sazonais e extemporâneos, como

eleições próximas, efeitos de crises internacionais e outros.

Para o caso de análises a curto e médio prazo, num horizonte de um a três anos (o que em planejamento pode ser considerado médio prazo), se não houver sinais de mudança de tendência, pode-se adotar a média das taxas obtidas nos exercícios anteriores (nota do autor : até algum tempo, havia fundos de renda fixa com taxa pré-fixada, o que era segurança para o aplicador, mas que condicionava a remuneração à permanência do dinheiro pelo menos pelo prazo de carência da aplicação. Como esta opção deixou de ser atrativa para os investidores, pois as taxas de retorno eram excessivamente baixas e nem para as instituições, pois nos anos de 1997 a 1999 os fundos de ações, de onde as instituições obtinham parte dos recursos para a remuneração das aplicações, se revelaram contaminados pela crise asiática e depois pela maxi-desvalorização de nossa moeda - à época o Real - e conduziram a taxas negativas de remuneração, tal modalidade de aplicação foi extinta). Assim, a projeção das taxas futuras não é necessariamente uma função das taxas passadas em função dos crescentes fatores de risco na economia. Por sinal, há mais especialistas em análise de risco no mercado financeiro que na engenharia, como citado por RENN (2002), BIER (2000) e WOODHOUSE (1993).

Se o horizonte de planejamento for mais longo, o valor médio destas taxas passa a ser de menor aplicabilidade, pois diferenças em taxas futuras (anos mais distantes da data de planejamento) se revelam mais influentes que as taxas dos períodos iniciais, já que se trata de operação de juros compostos, onde eventuais erros se acumulam, como citado por MARTINS (1990).

WOODHOUSE (1993) cita que, a despeito da quantidade de especialistas em prever taxas futuras e profundidade das técnicas de análise, os efeitos do tempo no valor do dinheiro são pouco influentes nas decisões gerenciais acerca da manutenção. Talvez pela data de sua publicação, o trabalho de WOODHOUSE (1993) desconheça que o planejamento estratégico

tem sido feito de maneira cada vez mais refinada, tanto é que MOUBRAY (1997) e GARBATOV e SOARES (2001) discordam da pouca influência do tempo nas decisões gerenciais, até porque o custo do dinheiro tem aumentado grandemente no mercado internacional, como citado por MEIER (2002).

De qualquer forma, WOODHOUSE (1993) cita e MEIER (2002) e CELIS e SCHÄFER (2002) superficialmente constatam, é muito improvável que razões ligadas a fluxo de caixa revertam decisões de engenharia num horizonte de planejamento inferior a dez anos. Situação diferente é a de grandes e longos empreendimentos, como usinas hidrelétricas, onde o horizonte de planejamento por vezes é a vida útil da usina, estimada em algumas décadas.

#### **6.6 – Decisões Baseadas em Critérios Financeiros**

Uma vez conhecidos os componentes dos custos e benefícios de uma alternativa de decisão, o impacto total deve ser “montado”, o que se traduz em compor aspectos técnicos e financeiros (com considerações até mesmo de alguns fatores intangíveis). Em muitas ocasiões, esta é uma questão de aritmética que visa identificar qual das parcelas é maior : o custo ou o benefício. Mas dependendo da análise, nem sempre é fácil ou até mesmo possível identificar os montantes destes parâmetros, sobretudo o dos benefícios. Para uma soma global de custos comparada a uma soma global de benefícios, estar-se-á comparando quantidades discretas relacionadas aos custos com montante absoluto de benefícios os quais nem sempre se traduzem em dinheiro. A este tipo de comparação de chama de análise custo-benefício, um tipo de raciocínio que, muitas vezes, dependendo da experiência que se tem em lidar com certos tipos de situações, se exerce intuitivamente no cotidiano (por exemplo : é mais compensador, na troca de óleo, utilizar um óleo mineral que custa R\$ 4,00 o litro e dure 5000 km ou um óleo sintético que custe R\$ 7,00 e dure 10000 km? Neste caso a resposta parece

óbvia a favor do óleo sintético, mas será que o custo de aquisição não seria proibitivo e, para alguma pessoa levaria a optar pelo óleo mineral?, como em AYYUB et al (1997)).

Outros tipos de análise custo-benefício (como as expostas na Figura 6.7) cobrem situações mais complexas, mas o problema aritmético exige mais sofisticação, a começar pelos questionamentos sobre os critérios a serem ponderados na análise como os mostrados na Tabela 6.3.

Tabela 6.3 – Tópicos para Decisão Baseada em Critérios Financeiros

Nível	Tipo de Questionamento
Decisões baseadas em soma global	O montante de benefícios supera o montante de custos?
Níveis dos Benefícios	A taxa de benefício (retorno) é rápida o suficiente que justifique o custo inicial?
Padrões de Deterioração	Em que ponto o custo se torna admissível ou Qual a frequência ótima para esta tarefa?
Interações Complexas	Qual a composição ótima entre o tamanho da tarefa, sua programação e o prazo e montante de benefícios gerados?
Oportunidades e Tarefas Associadas	Que combinação de tarefas e recursos aliada ao momento da intervenção pode ser adotada?

Há muitos níveis possíveis de complexidade, correspondendo a diferentes maneiras de se compor o impacto total e, até mesmo, à preferências das organizações ou do tomador de decisões. Isto prova que duas pessoas executando análise de risco sobre a mesma situação (e mesmo uma simples análise contábil) poderão caracterizar cenários diferentes (como exposto no capítulo sobre análise de risco deste trabalho) e mesmo suas conclusões poderão ser distintas, o que não significa nem inconsistência nem erros de análise – não que estas situações não possam ocorrer – mas apenas que a análise se baseia em cenários diferentes, como citado por SHIMIZU (2001), FREUDENBURG (2001) e RENN (2001).

Composto o cenário, ou seja, estabelecidos os critérios de decisão, a resposta (decisão) se torna evidente – tome-se como exemplo a questão sobre o óleo lubrificante no momento da troca – e basta responder se o custo é justificado pelo montante de benefícios (incluindo fatores incomensuráveis) ou não.

A Figura 6.7, adaptada de WOODHOUSE (1993) mostra que, conforme se torna mais complexa composição dos benefícios (já que a dos custos, como é possível avaliar ao longo deste capítulo, envolve quase que exclusivamente somas e multiplicações), mais dependente de matemática e recursos de informática – afirmação apoiada por SHIMIZU (2001) – se torna a análise de decisão, pois é bastante difícil determinar o ponto de equilíbrio (quando custos se tornam equivalentes aos benefícios, isto se a parcela intangível dos benefícios não for preponderante, o que depende quase que exclusivamente da percepção de quem construiu o cenário). É quase óbvia a constatação de que, à medida que cresce a complexidade do modelo, o julgamento humano se torna menos preciso e às vezes errôneo, o que exige a execução de uma análise de sensibilidade para validação do modelo e confirmação da decisão, como citado por CARDOSO et al (2002), SHIMIZU (2001) e, a bem da verdade, consideração a ser feita por qualquer autor que tenha compromisso com a verdade.

Custo Projetado	Benefício Projetado	Resultado
$\pounds$ 	$\pounds$ 	Sim/Não
$\pounds$ 		Período de Retorno
$\pounds$ 		Programação Ótima
		Extensão e Programação Ótimas das Tarefas

Figura 6.7 – Tipos de Retorno (Benefícios) para o Custo Projetado, adaptada de WOODHOUSE (1993)

A avaliação da soma global ou totais gerais é - segundo WOODHOUSE (1993) – caracterizada pela identificação dos custos e benefícios com base em seus “contornos”, ou seja, é uma forma de rateio. A principal limitação deste tipo de análise é que os dados não têm acuracidade e, como já dito, avaliações a longo prazo resultam muito distorcidas, além do que, na hipótese da influência de fatores intangíveis (que não se traduzam em dinheiro), a subjetividade no julgamento humano torna-se um inconveniente, que se estenderá à atribuição dos pesos relativos e prioridades quando da aplicação do procedimento de decisão baseado em análise de risco (sobretudo se o método for uma análise multicriterial como o método AHP (do inglês *Analytic Hierarchy Process* ou Processo de Análise Hierárquica). A análise por soma global se aplica bem aos casos em que a comparação entre custo e benefício seja direta, ou seja, quantidades finitas de dinheiro.

Um bom exemplo desta aplicação é a decisão de se substituir ou reparar um componente ou equipamento de sistemas com algum grau de redundância – onde se espera que o impacto seja o menor possível - que tenha falhado. Neste caso, a escolha entre restaurar o componente (seja nas próprias instalações ou terceirizando-se a tarefa) e substituí-lo é uma análise baseada na comparação de duas quantidades discretas de dinheiro, desde que as duas soluções tenham como resultado técnico o fornecimento de um equipamento nas mesmas condições - preferencialmente, para evitar impactos e complicações futuras em estado de novo ou em inglês “*as new*”, como citado por WOODHOUSE (1993), XENOS (1998), BRANCO (2000) e MOUBRAY (1997). Assim, a decisão é selecionar a alternativa mais barata, como mostra a Tabela 6.4, extraída de WOODHOUSE (1993) para escolher a decisão de reparar ou substituir uma chave pneumática.

Tabela 6.4 – Comparação entre o Custo de Reparo e Substituição de uma Chave Pneumática, extraído de WOODHOUSE (1993)

Opção	Detalhamento do Cálculo dos Custos	Custos por Unidade
Reparo	Testes Diagnósticos :	
	1 H-h a US\$ 20/h	20
	Reparo de aprox. 80%	
	2 H-h a US\$ 20/h = 2 x 20 x 0,8	32
	Custo do Material a US\$ 10/unidade x 0,8	8
	5% de Retrabalho a US\$20 = 0,05 x 20 x 0,8	0,80
20 % necessitam ser Descartados :		
	Custo de Reposição a US\$ 110/unidade = 0,2 x 110	22
	CUSTO TOTAL por unidade de reparo =	82,80
Substituição	Substituição Pura e Simples	US\$110,00
Diferença	US\$ 22,20 / unidade a 400 unidades/ano	US\$8880,00

A inspeção da tabela acima revela que o reparo é cerca de 20% mais barato que a substituição e, em valores absolutos parece pouco (a substituição é US\$ 38,00 mais cara que o reparo). Mas, considerando-se que as duas alternativas fornecem um componente em estado de novo e que se tratam de 400 unidades apresentando falha por ano, o reparo é preferível à substituição com uma economia de US\$ 15200,00.

Na prática, situações como a exposta no exemplo anterior são raras, embora, do ponto de vista da manutenção, métodos de avaliação mais profunda e sofisticada não sejam plenamente justificáveis, até porque nem sempre os fatores dizem respeito a grandezas quantificáveis. Uma inspeção nos aspectos citados na Tabela 6.5 (extraída e adaptada de WOODHOUSE [1993]) é de grande valia e cobre a maioria das situações onde seja necessário manipular dados referentes ao impacto total de uma falha.

Tabela 6.5 – Itens para Avaliação do Impacto Total de uma Falha, extraída de  
WOODHOUSE (1993)

Avaliação por Tarefas	unidades
<b>Custos das Tarefas</b>	
Desenvolvimento (projetos/administração)	horas x taxa
Desenvolvimento (implementação)	horas x taxa
Aquisição de Materiais	\$
Transportes e Instalações	\$
Impacto das Paradas	horas x taxa
Outras Penalidades (ex. : multas)	\$
Custo Total	\$
<b>Ganhos</b>	
1. Tipos de Eventos Evitados - ex.: acidentes, falhas	
Custo por Evento	
Laboratórios	horas x taxa
Aquisição de Materiais	\$
Transportes e Instalações	\$
Impacto das Paradas	horas x taxa
Outras Penalidades (ex. : multas)	\$
Custo Total por Evento (A)	\$
Probabilidade ou Quantidade de Eventos Evitados (B)	adimensional
Ganhos na Exposição ao Risco : $C = [(A \times B)]$	\$
2. Tipo de Melhoria - ex.: aumento na produção, economia de insumos	
Quantidade	unidades
Valor	\$ / unidade
Ganhos em Eficiência (D)	\$
Valor Total dos Ganhos (C+D)	\$
Ganhos são maiores que os custos?	sim/não

A maioria das decisões de engenharia, operações ou manutenção é tomada em um ambiente que justifique um contexto mais complexo que a análise de soma global. Os prazos envolvidos podem ser longos e o tempo passa a ser uma variável na decisão pelas razões já explicadas ao longo deste texto. Mesmo paralisações e tarefas que tenham duração da ordem de horas ou dias são influenciadas pelo tempo, afirmação que se torna cada vez mais forte à medida que se caminha para produção contínua, grandes lotes e ampla abrangência pública (grande quantidade de pessoas atendidas pelas operações da organização, tais como companhias telefônicas, transporte público, geração e distribuição de energia, entre outras). Nestes casos, o tipo de benefício que se espera alcançar com a manutenção é dependente do

cenário construído e a decisão não é uma simples questão de sim ou não, nem de comparar alternativas simples como escolher entre A ou B. Esta é a situação enfrentada na execução deste trabalho, onde as falhas têm implicações das mais diversas ordens e as conseqüências têm pesos diferentes conforme a época do ano em que ocorrem os eventos.

As considerações expostas neste capítulo visam fornecer as diretrizes para levantamento dos custos associados à manutenção, os custos de eventuais conseqüências (que ao menos no cenário pesquisado podem ser determinadas facilmente – algumas qualitativamente, é verdade) e as projeções para valores futuros. As fichas correspondentes aos formulários para pesquisa de falhas, bem como os formulários específicos para levantamento de custos conforme o nível de atribuição (operacional, tático e estratégico) foram elaboradas ou adaptadas de modo a contemplar o atendimento aos conceitos e procedimentos aqui citados, de modo a comporem a análise de risco e o procedimento de decisão para a formulação da política de manutenção, principal finalidade desta pesquisa.

## **7 – O DESENVOLVIMENTO DO MÉTODO PROPOSTO PARA SELEÇÃO DE POLÍTICAS DE MANUTENÇÃO BASEADO EM ANÁLISE DE RISCO**

### **7.1 - Introdução**

Os conceitos de Análise de Risco e de Decisão apresentados neste trabalho podem ser perfeitamente aplicados à manutenção, pois pode-se definir probabilidades associadas a um evento, neste caso uma falha, a qual pode ser considerada uma consequência da opção por uma alternativa de prática de manutenção ou mesmo da ocorrência de um evento não programado (leia-se falha, ainda que aleatória).

Adicionalmente pode-se analisar a consequência da ocorrência de uma falha de um componente ou subsistema de um equipamento sobre o desempenho deste último como um todo, estendendo esta análise das consequências de uma falha sobre o desempenho da linha de produção, célula de manufatura e portanto, da própria planta industrial da qual o equipamento é parte. Esta análise de consequências de uma falha, cuja probabilidade de ocorrência está associada a uma dada prática de manutenção, fornece subsídios para que, com o emprego de uma dado método de tomada de decisão, seja selecionada a prática de manutenção que minimize o risco associado com a ocorrência da falha, este último definido como o produto entre a probabilidade de ocorrência da falha a suas consequências.

Uma vez selecionada a prática de manutenção mais adequada para reduzir o risco associado a uma falha específica, o processo de planejamento e execução da manutenção, incluindo o planejamento de tarefas e alocação de mão-de-obra entre outros, pode ser realizado com o emprego de métodos tradicionalmente utilizados para este fim, tais como o PERT-CPM e análise de Gantt.

A percepção dos riscos em manutenção sempre esteve muito ligada apenas aos fatores técnicos, como por exemplo, a consequência de uma falha apenas sobre um dado equipamento. Apesar de nunca ter sido ignorado o fato de que as implicações de uma falha afetam vários aspectos numa organização, o que tem sido visto na experiência do autor no trato com o assunto, a manutenção, sempre muito envolvida com suas próprias questões técnicas e mesmo de planejamento e controle, não tem enxergado a extensão de falhas aparentemente simples, mas de consequências amplas.

Por outro lado, a manutenção tem sido cobrada – e isto vale para todo o curso da era industrializada – pelos resultados negativos sobre as operações de uma organização e é comum os Gerentes se questionarem sobre o porquê desta cobrança, se muitas vezes a melhor tecnologia disponível é empregada em inspeções e outras formas de intervenções, além das mais variadas “ferramentas de planejamento” automatizadas, as quais, em muitos casos, apenas documentam registros, os quais estes mesmos gerentes devem conceber tendo em mente as implicações de uma falha e, por conseguinte, do desempenho da manutenção como uma atividade empresarial.

Sob o ponto de vista dos conceitos associados com a Qualidade Total, a manutenção dos equipamentos de uma linha de produção afeta a organização como um todo, pois uma falha na produção pode alterar as características de um produto, afetando a percepção que o cliente tem sobre a qualidade do mesmo, fato que afeta a imagem da empresa. Dessa forma, as atividades de manutenção, assim como outras atividades da empresa, devem buscar uma excelência operacional, a fim de evitar a redução da qualidade do produto.

Há uma certa dicotomia, para aqueles não afeitos aos conceitos de análise de risco, em considerar as consequências de uma falha em termos monetários ou em termos da extensão dos efeitos propriamente dita. Os chamados eventos extremos, aqueles cuja probabilidade de ocorrência é baixa e a extensão dos efeitos considerados grave, exigem a consideração

daqueles dois aspectos citados anteriormente (custos e efeitos). Mesmo na ausência de tais eventos, planejar a manutenção sem considerar tais aspectos simultaneamente resultaria uma abordagem incompleta.

Dessa forma, a aplicação da Análise de Risco pode auxiliar a seleção de práticas de manutenção de equipamentos que minimizem as suas chances destes falharem e portanto, a redução da possibilidade de ocorrência de eventos de graves conseqüências para a organização.

## **7.2 - Explicação da Metodologia Proposta**

Utilizar o conceito de risco para definir ou solucionar um problema envolve, como já citado, considerar aspectos de impacto de um evento e a probabilidade de sua ocorrência. Assim sendo, sua aplicação à manutenção, melhor dizendo, à definição de políticas de manutenção, deve contemplar esta característica.

Cada decisão tomada em termos de selecionar alternativas de práticas de manutenção, sua periodicidade, recursos a serem alocados e mais uma série de outras considerações envolve a necessidade de avaliar seus efeitos sobre a probabilidade de falha de um equipamento e sobre os impactos causados pela falha do mesmo, VO e BALKEY (1995).

Assim, foi composta a metodologia proposta nesta tese, cuja particularidade é envolver em uma mesma estrutura de decisão, implicações técnicas e econômicas, baseando-se para isto, na utilização dos conceitos de análise de risco.

Selecionar e mesmo elaborar uma política de manutenção envolve a tomada de decisão ponderando os diversos aspectos já citados na introdução deste capítulo. O que se pretende é tomar esta decisão entre diversas alternativas utilizando a análise de risco para avaliar os cenários e estabelecer prioridades (ou avaliar gravidade, severidade, extensão,

custos, impacto, percepção), estabelecendo quais serão as conseqüências se determinada decisão for tomada em um cenário específico.

Como para a manutenção de determinado equipamento podem ser elencadas diversas alternativas, deve-se, para cada uma delas, verificar qual o cenário de falha resultante e sobre ele efetuar as análises pertinentes.

Dessa forma propõe-se que, a partir da análise de modos de falha de um dado equipamento, sejam definidas possíveis alternativas de políticas de manutenção dos mesmos. Estas alternativas devem ser totalmente definidas, incluindo informações sobre a periodicidade das intervenções, dos recursos materiais e de mão-de-obra necessários para a sua execução, a fim de definir os custos associados com a execução destas alternativas das mesmas.

Considerando a aplicação de cada uma destas alternativas de manutenção, deve-se avaliar qual a probabilidade de haver falha no equipamento, bem como os modos de falha esperados do mesmo. Estes últimos podem apresentar diferenças em relação aos considerados quando da definição das alternativas de manutenção, pois a execução das mesmas pode inibir a ocorrência de alguns modos de falha. A partir da definição destes modos de falha, deve-se executar a análise das conseqüências de sua ocorrência sobre o desempenho da planta industrial da qual este equipamento faz parte, incluindo a avaliação sobre a eventual redução da qualidade do produto manufaturado, com a possibilidade da produção de componentes fora da especificação do projeto.

Para este fim, sugere-se a execução do Diagrama Causa-Conseqüência, que é uma forma lógica de representar a progressão da falha de um equipamento ao longo de uma linha de produção. Tal como indicado na Figura 7.1, o diagrama representa o encadeamento de eventos que podem ocorrer a partir da ocorrência do evento “falha”, representando o cenário associado com a ocorrência de uma falha. Cada bloco deste diagrama indica a probabilidade

de ocorrência de um evento condicionada a uma ocorrência indicada no bloco anterior, denotando que a propagação da falha está condicionada à ocorrência ou não de uma série de eventos e os diversos “caminhos” apontados no Diagrama Causa-Conseqüência representam os cenários de falha. O final de cada cenário do Diagrama Causa-Conseqüência indica a conseqüência final da falha sobre a linha de produção e sobre o produto propriamente dito.

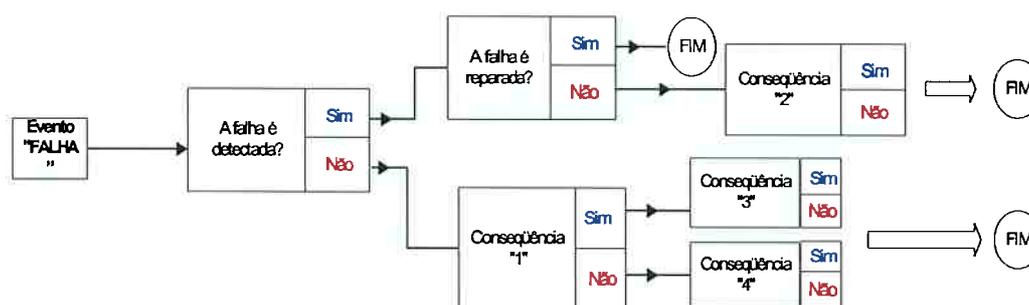


Figura 7.1 – Representação do Diagrama Causa-Conseqüência, KUMAMOTO e HENLEY (1996)

A probabilidade de ocorrência de cada cenário é obtida pela composição das probabilidades de ocorrência de cada evento que o compõe, consideradas as leis de cálculo de probabilidades condicionadas.

Para o cálculo das probabilidades de ocorrência de um evento ligado a uma falha, aplica-se o tratamento probabilístico das falhas como descrito por diversos autores em literatura relacionada com a confiabilidade, tais como LEWIS (1986) e O'CONNOR (1985), são conceitos e aplicações já há muito conhecidos e aplicados, porém de forma isolada dos aspectos considerados neste trabalho.

Determinar os cenários das falhas pode ser resultado da aplicação da análise tipo FMEA. Já para cálculo da probabilidade de ocorrência de cada evento que compõe o cenário,

pode ser empregada a Árvore de Falhas, ou mesmo algum histórico da operação dos equipamentos que compõem a planta.

Uma vez definidas as conseqüências de cada cenário de falha, deve-se aplicar algum critério para determinar o valor monetário associado às mesmas, tal como discutido no Capítulo 5.

A somatória dos custos das conseqüências da falha de cada cenário de falha (correspondendo à sua propagação) é então o valor utilizado para caracterizar este valor monetário, somando-se a estes os custos próprios da manutenção, conforme a prática adotada para combatê-la, como mostrado no Capítulo 4.

Dessa forma, para cada alternativa de política de manutenção, tem-se a probabilidade de ocorrência das falhas, as probabilidades de ocorrência de cada cenário de falha (correspondendo à propagação da falha) e os custos associados a cada cenário. A composição da probabilidade de ocorrência de um cenário de falha com os custos das conseqüências, por meio da multiplicação dos mesmos, compõe um índice que possibilita a tomada de decisão a respeito de qual política de manutenção adotar, política esta completamente definida em termos de práticas adotadas, recursos alocados, controles, entre outros. Quanto menor este produto, mais adequada está a política de manutenção.

A Figura 7.2 sumariza a estrutura de análise proposta.

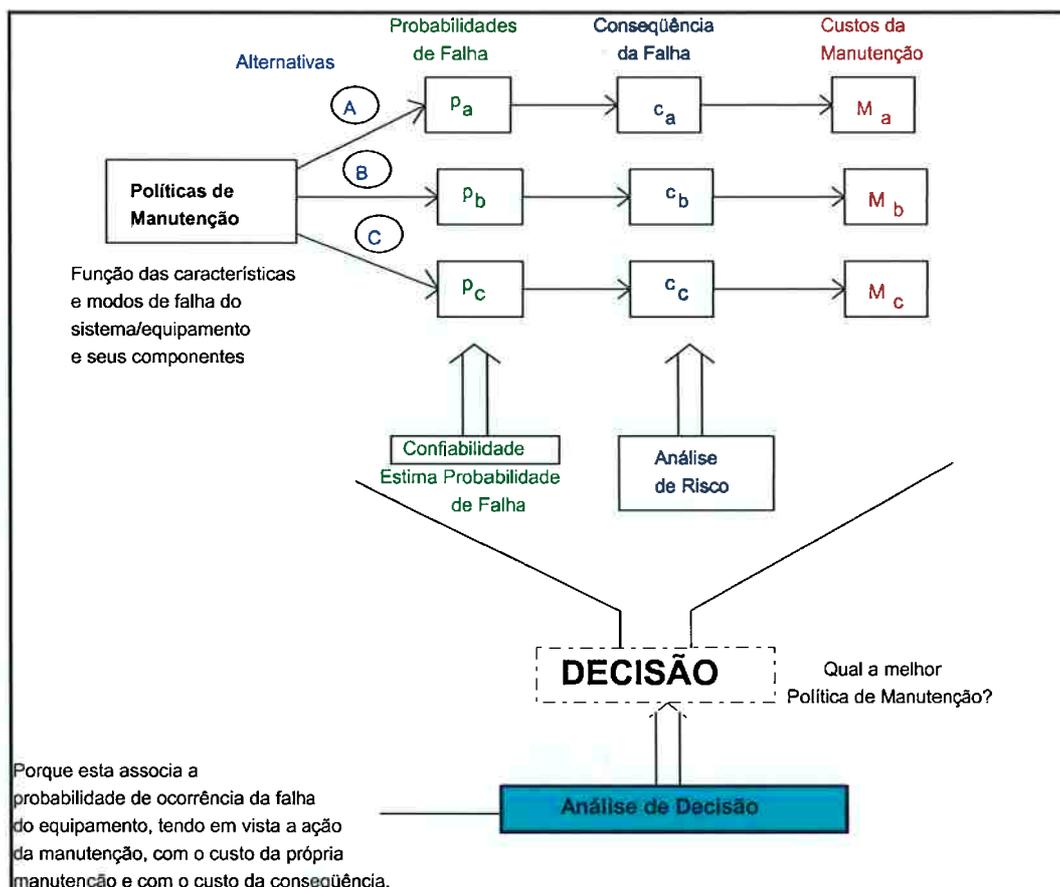


Figura 7.2 – Estrutura de Análise de Decisão Proposta para Seleção de uma Política de Manutenção Baseada em Análise de Risco

Na Figura 7.2, considera-se as probabilidades de ocorrência de um dado modo de falha e os custos associados a esta falha, sendo ambos dependentes da prática de manutenção selecionada para o equipamento. Note-se que a estrutura da Figura 7.2 é muito semelhante a um diagrama Causa-Conseqüência indicado na Figura 7.1, vista anteriormente.

A partir da seleção do método de análise de decisão, pode-se sistematizar a metodologia de análise de decisão em manutenção, considerando as informações levantadas junto à planta pesquisada. A confiabilidade fornece as probabilidades de falha relacionadas às ações de manutenção, além de permitir listar as alternativas de políticas de manutenção, levando-se em conta os modos de falha e as características do equipamento. A Análise de

Risco permite avaliar quais as implicações das falhas e, por conseguinte, os custos das suas conseqüências. Desta forma, ficam claras as variáveis a serem consideradas na tomada de decisão para seleção da política de manutenção: as probabilidades de ocorrência dos eventos relacionados à adoção de uma alternativa de política de manutenção e os custos dos desdobramentos de tais eventos, possibilitando o cálculo do risco médio, parâmetro que orienta a decisão, a qual recai sobre o menor valor obtido. Por fim, a Teoria de Decisão sistematiza o processo de seleção da melhor política de manutenção levando-se em conta, simultaneamente, custos e segurança, tal como citado por SOUZA e AYYUB (2000).

A preocupação deste trabalho é construir um cenário confiável, produto de informações criteriosamente obtidas, para que não haja dependência da decisão com o método selecionado. Segundo SHIMIZU (2001), esta é a principal fase da tomada de decisão, pois o resultado de um método de decisão nada mais é que a saída (*outcome*) de um sistema de informações. Portanto, não é a sofisticação do método que importa, mas a qualidade do cenário proposto.

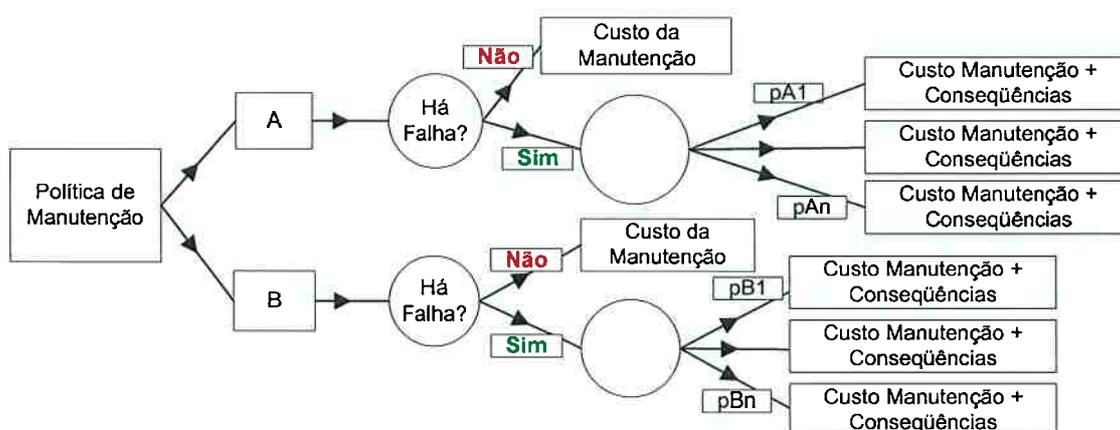
### 7.3 - Processo de Tomada de Decisão

Para compreender como as conseqüências se relacionam com as falhas, propõe-se, primeiramente, elaborar diagramas Causa-Conseqüência, os quais permitem identificá-las, SOUZA e AYYUB (2000), bem como permitem relacionar as conseqüências às alternativas para a tomada de decisões, como propõe o método exposto na Figura 7.2.

Para tomada de decisão da seleção da política de manutenção mais adequada para minimizar o risco associado com a falha de um equipamento, propõe-se a utilização da Árvore de Decisão, que é um diagrama lógico destinado a relacionar a escolha de uma certa



cenários de falha associados a um grupo de conseqüências, a somatória das multiplicações das probabilidades de cada ramo pela sua conseqüência representaria o custo associado a cada política de manutenção e o critério de seleção da política de manutenção seria o do mínimo custo médio. Este custo médio representa a associação entre o custo da manutenção e o da conseqüência da falha, portanto, o risco médio associado à política de manutenção. Este processo de elaboração da árvore de decisão é indicado na Figura 7.4.



$$\text{Risco Médio A} = p_{\text{não falhar}} \cdot C_{\text{Man}} + p_{\text{falhar}} (p_{A1} \cdot C_{A1} + p_{A2} \cdot C_{A2} + \dots + p_{An} \cdot C_{An})$$

$$\text{Risco Médio B} = p_{\text{não falhar}} \cdot C_{\text{Man}} + p_{\text{falhar}} (p_{B1} \cdot C_{B1} + p_{B2} \cdot C_{B2} + \dots + p_{Bn} \cdot C_{Bn})$$

Figura 7.4 – Elaboração de Árvore de Decisão para Seleção de Política de Manutenção

Em qualquer análise de situações de risco, há o problema da ocorrência de eventos extremos, que em termos de atividades industriais se traduzem em falhas raras e/ou gravíssimas. Em geral, falhas gravíssimas, que causem prejuízos vultosos ou perda de vidas humanas, são raras em termos de freqüência de ocorrência, isto se for considerado apenas um

subsistema ou componente específico da máquina. Porém, como as indústrias e os próprios equipamentos são constituídos por sistemas complexos, o estudo das situações de risco reais deve contemplar estas possibilidades. No caso das falhas raras, estas costumam ser, segundo MOUBRAY (1997) e HAIMES (1998), associadas a problemas de projeto, de qualidade das peças das máquinas ou aos erros humanos na operação e manutenção dos equipamentos, o que significa um elevado nível de incerteza. Um inconveniente sem dúvida, pois não se pode esperar que tais eventos aconteçam para analisar seu comportamento estatístico, como está sendo feito para as falhas ditas “normais”, acompanhadas pelo formulário da Tabela 4.4 exposta neste trabalho.

#### **7.4 – Roteiro de Implementação do Método Proposto**

A aplicação dos conceitos e ferramentas constantes do método proposto deve seguir uma ordenação lógica para sua aplicação colher êxito, pois o emprego de tais recursos de análise e de decisão deve ser alimentado com dados obtidos de acordo com uma seqüência pré-definda. Em outras palavras : algumas etapas só são passíveis de serem implementadas se estiverem disponíveis informações necessárias à construção das árvores de decisão.

Assim sendo, o método proposto deve cumprir as etapas mostradas na Figura 7.5 e listadas a seguir:

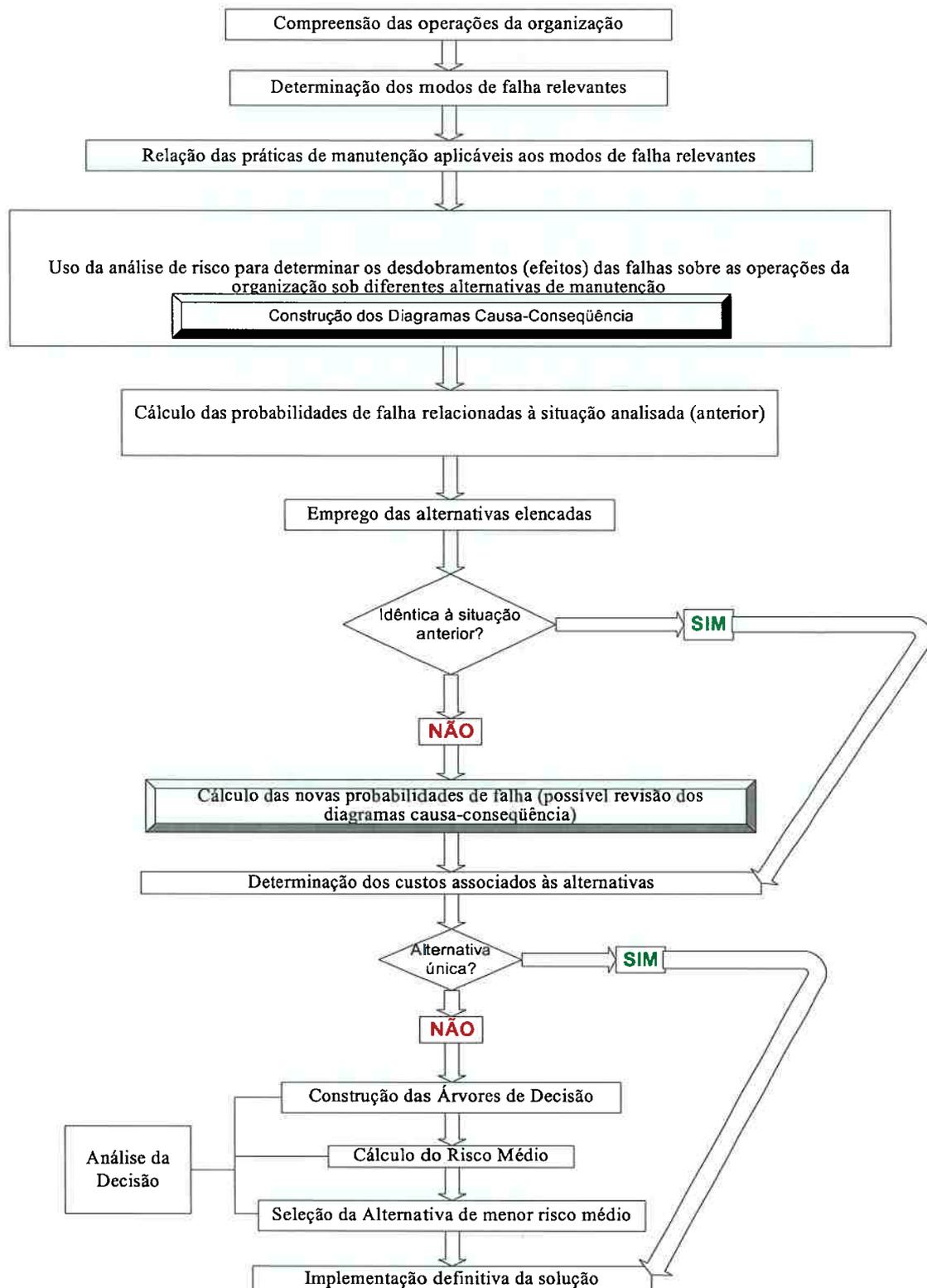


Figura 7.5 – Diagrama Esquemático para a Implementação do Método Proposto

- a) Compreensão das operações da organização: possibilita levantar as inter-relações entre as operações dos equipamentos e do ambiente das operações globais da organização, permitindo identificar de forma abrangente não só os desdobramentos de eventos iniciais (falhas), mas também os fatores de influência empregados para pautar a tomada de decisão, atendendo ao questionamento levantado no Capítulo 2 - o tratamento incompleto da manutenção, contemplando de forma dissociada os aspectos técnicos, de custos e de segurança;
- b) Determinação dos modos de falha relevantes: utilizando-se dos conceitos apresentados no Capítulo 3 – relativos a causas de falhas em componentes e sistemas mecânicos - a utilização dos conceitos e ferramentas de análise de confiabilidade permite identificar os aspectos técnicos que influem na falha dos componentes e dos equipamentos como um todo, baseado no contexto das operações já conhecidas e na natureza de tais componentes, sujeitos a características de projeto e utilização que conduzem à recomendação de práticas de manutenção dedicadas a uma situação específica;
- c) Relação das práticas de manutenção aplicáveis aos modos de falha relevantes: composição de alternativas de políticas de manutenção, utilizando-se dos tópicos apresentados no Capítulo 4, compreendendo periodicidade, recursos envolvidos, procedimentos de intervenção, além de informações complementares específicas de cada caso;
- d) Uso da análise de risco para determinar os desdobramentos (efeitos) destas falhas sobre as operações da organização sob diferentes alternativas de manutenção: esta etapa utiliza conceitos mostrados no Capítulo 5, especialmente no que concerne à percepção do risco e à definição de cenários para a tomada de decisão, com o emprego dos Diagramas Causa-Consequência. Há que se ressaltar o fato de, a partir deste

ponto, a aplicação do método exigir que sejam utilizados conceitos e ferramentas introduzidos ou desenvolvidos nos Capítulos 4, 5, 6 e até mesmo no Capítulo 7, às vezes aplicados simultaneamente;

- e) Cálculo das probabilidades de falha relacionadas à situação analisada (anterior) para comparação com as probabilidades de falha geradas pelo emprego das outras alternativas de manutenção;
- f) Emprego das alternativas elencadas para avaliação das reais conseqüências associadas, caso se tratar de uma alternativa idêntica à política anteriormente adotada, não é necessário calcular novamente as probabilidades de falha, nem reavaliar o diagrama causa-conseqüência, já que a situação é também idêntica à anterior, podendo-se proceder diretamente o cálculo dos custos;
- g) Cálculo das novas probabilidades de falha (possível revisão dos diagramas causa-conseqüência): após observar o desempenho dos equipamentos sob a intervenção de cada uma das alternativas por um tempo definido e coletar dados sob as falhas ocorridas sob ação das alternativas, torna-se necessário calcular as probabilidades de falha associadas às alternativas de manutenção, bem como avaliar se os desdobramentos previstos nos diagramas causa-conseqüência correspondem à situação real, reformulando os diagramas causa-conseqüência se necessário;
- h) Determinação dos custos associados às alternativas: consistindo na aplicação dos procedimentos de levantamento dos custos desenvolvido no Capítulo 6, após se ter conhecimento dos desdobramentos das falhas associadas a todas as alternativas elencadas torna-se possível calcular os custos das conseqüências pertinentes àquelas alternativas para compor o método de decisão;
- i) Análise da Decisão: esta etapa não seria necessária se apenas uma alternativa estivesse listada, entretanto, deve-se lembrar que não se trata apenas de listar práticas diferentes,

mas compor diferentes políticas, ainda que esteja sendo considerada uma prática (por diversas razões, especialmente as razões de ordem técnica que recomendam determinada prática a ser adotada). Para o cumprimento desta etapa, desenvolvida e detalhada neste capítulo do trabalho, devem ser executadas as seguintes fases:

I. Construção das Árvores de Decisão: etapa onde o Risco Médio será efetivamente calculado, já que as árvores de decisão serão abastecidas com as alternativas de manutenção, as probabilidades de falha associadas a cada uma e os custos de suas conseqüências (de uma forma abrangente, que contemple as operações da organização como um todo);

II. Cálculo do Risco Médio

III. Seleção da alternativa de menor risco médio

j) Implementação definitiva da solução.

### **7.5 – Comparação do Método Proposto com a Manutenção da Produtividade Total e com o Método da Manutenção Centrada em Confiabilidade**

Uma conhecida abordagem para a administração e execução da manutenção consiste na Manutenção da Produtividade Total, conhecida pela sigla TPM, conforme CARDOSO (2000). Esta forma de abordar a manutenção – a qual experimentou significativa quantidade de casos de implementação nas décadas de 80 e principalmente 90 no Brasil - consiste em distribuir a responsabilidade sobre esta atividade por todos os setores da empresa, sobretudo aqueles que têm contato com os equipamentos diretamente, como o setor de produção ou manufatura.

Desta forma, atividades menos complexas e rotineiras, tais como limpeza e observação visual das condições das máquinas para detectar anomalias que denotam falhas; são confiadas aos próprios operadores, fazendo esta rotina ser programada como parte de sua jornada.

Tarefas mais sofisticadas devem seguir padrões elaborados de forma detalhada, como comentado no Capítulo 4, a ponto de intervenções programadas ou mesmo algumas corretivas poderem ser executadas de forma autônoma, como citam XENOS (1998) e LYONNET (1991). Esta autonomia é justificada pelo fato de as intervenções não dependerem da abertura de ordens de serviço ou de prévia análise, já que serão seguidos padrões e o tempo da intervenção e as ações são assumidos como conhecidos, facilitando o registro e controle das intervenções.

Entretanto, nota-se uma ênfase na manutenção preventiva em virtude da antecipação à falha denotar menos paradas do equipamento – o que é verdadeiro desde que esta seja a prática recomendada em função da natureza dos equipamentos e dos modos de falhas dos seus componentes, como explicado no Capítulo 4 – e na aplicação das técnicas de manutenção preditiva, já que na década de 90, entendia-se que esta era uma forma eficaz de maximizar o tempo em operação do equipamento, como citam MIRSHAWKA (1991) e LYONNET (1991).

Constata-se então que, além de uma elevada preocupação com a excelência técnica da execução das tarefas de manutenção, há uma lacuna em termos de como selecionar quais práticas devem ser adotadas, em parte porque, nas décadas de 80 e início da década de 90, os equipamentos eram menos sofisticados que os seus congêneres atuais, sobretudo em virtude dos dispositivos automatizados, controladores e acionamento com motores de passo ou servomotores não serem amplamente utilizados. Portanto, como os sistemas mecânicos eram predominantes em muitas máquinas, estas práticas (preventiva e preditiva) se revelavam

eficazes em muitos casos. Porém, como cita XENOS (1998), a TPM era considerada como uma abordagem de alto custo, já que apenas aspectos técnicos eram considerados.

À medida em que os equipamentos se tornaram mais sofisticados, a abordagem da TPM passou a se revelar insuficiente para assegurar o desempenho, de certa forma, a Manutenção Centrada em Confiabilidade foi considerada como sua sucessora, como citam MOUBRAY (1997) e XENOS (1998), por responder aos questionamentos sobre como selecionar a(s) prática(s) adequada(s) a cada caso conforme o tipo de equipamento ou de seus componentes.

A Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC) proposta por MOUBRAY (1997) é, atualmente, a forma de seleção de política de manutenção mais utilizada por empresas que têm por objetivo minimizar as conseqüências associadas com a falha de um equipamento. Este método é baseado na filosofia empregada pelo método MSG-3, utilizado pela indústria aeronáutica. O mesmo tem por base a utilização de uma análise do tipo FMEA, para avaliar os possíveis modos de falha que podem ser apresentados por componentes de um dado equipamento e sobre o sistema do qual este é parte. Em função das conseqüências da falha, estes modos de falha são classificados com relação à forma pela qual o desempenho esperado do equipamento é afetado, ou seja, se há conseqüências de segurança, econômicas, operacionais ou mesmo se o modo de falha ocorre de forma oculta. O modo de falha afeta a segurança quando as conseqüências da falha podem causar ameaça à vida humana ou à sua integridade física. O modo de falha afeta o desempenho econômico quando este causa a parada do equipamento ou da linha, impedindo a continuidade do processo de produção.

Considerando-se o modo de falha operacional quando há uma redução no desempenho esperado do equipamento, sem haver a parada de uma linha de produção. Finalmente, o modo de falha é considerado oculto quando há falha em algum subsistema do equipamento, a qual se revela apenas quando o mesmo executa operações específicas.

A partir da classificação dos modos de falha, o método MCC propõe a utilização de diagramas de decisões, apresentados nas Figuras 7.6 a 7.9, respectivamente para modos de falha de segurança, operacional, econômico e oculto, que a partir de respostas de tipo “SIM” ou “NÃO” permite ao usuário a seleção de prática de manutenção mais adequada para minimizar a ocorrência de um dado modo de falha.

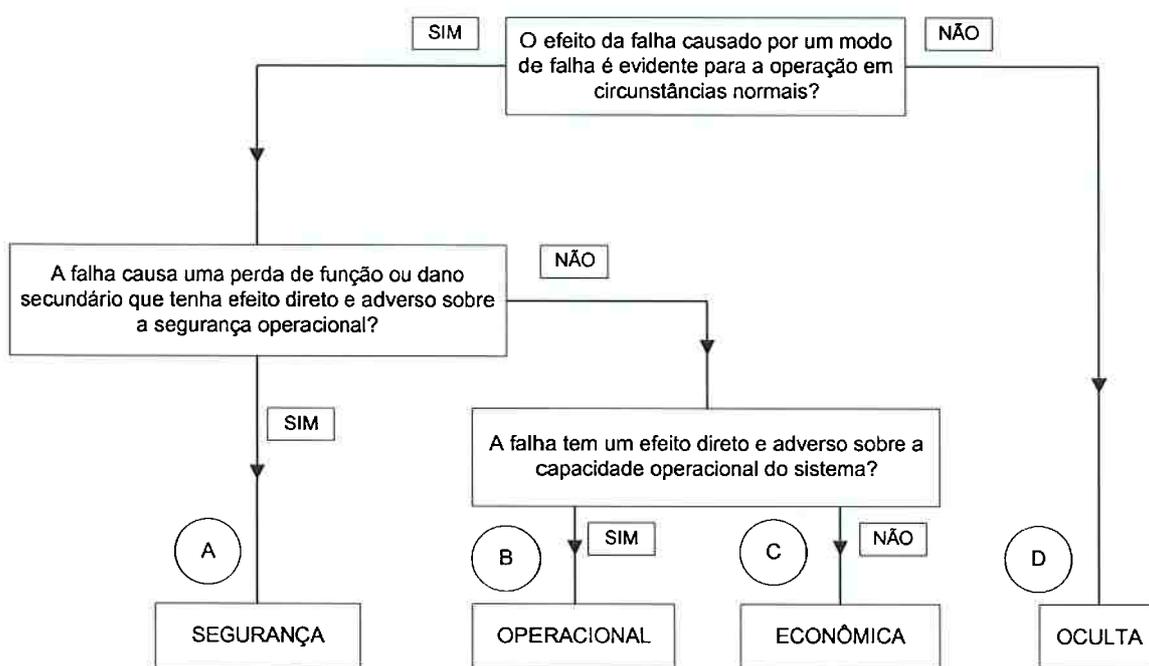


Figura 7.6 – Abrangência dos Efeitos das Falhas

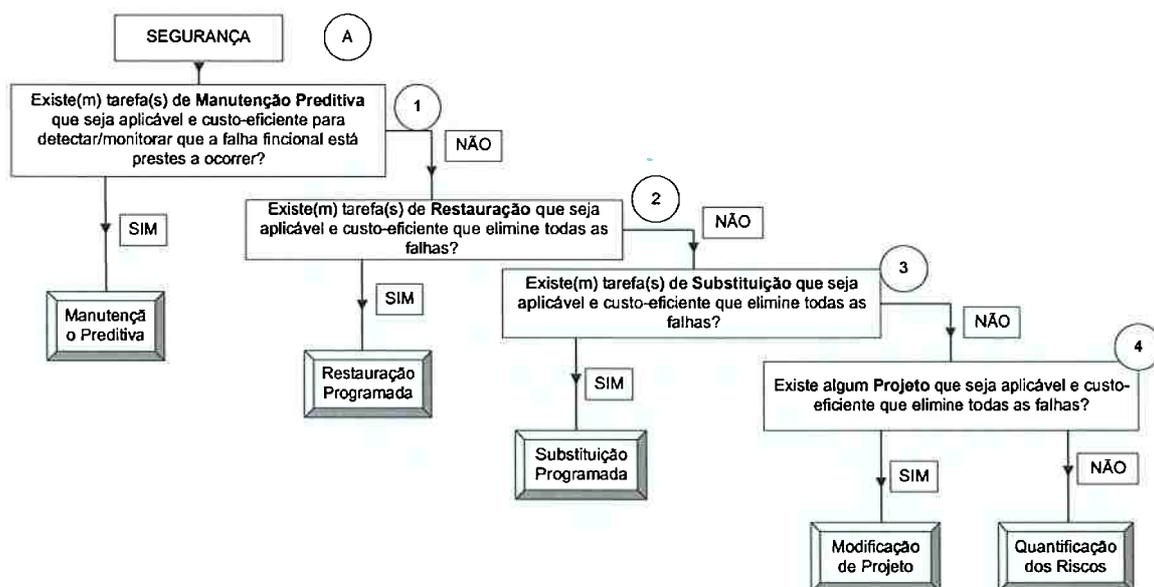


Figura 7.7 – Desdobramentos de Falhas que Afetam a Segurança para Seleção da Prática de Manutenção

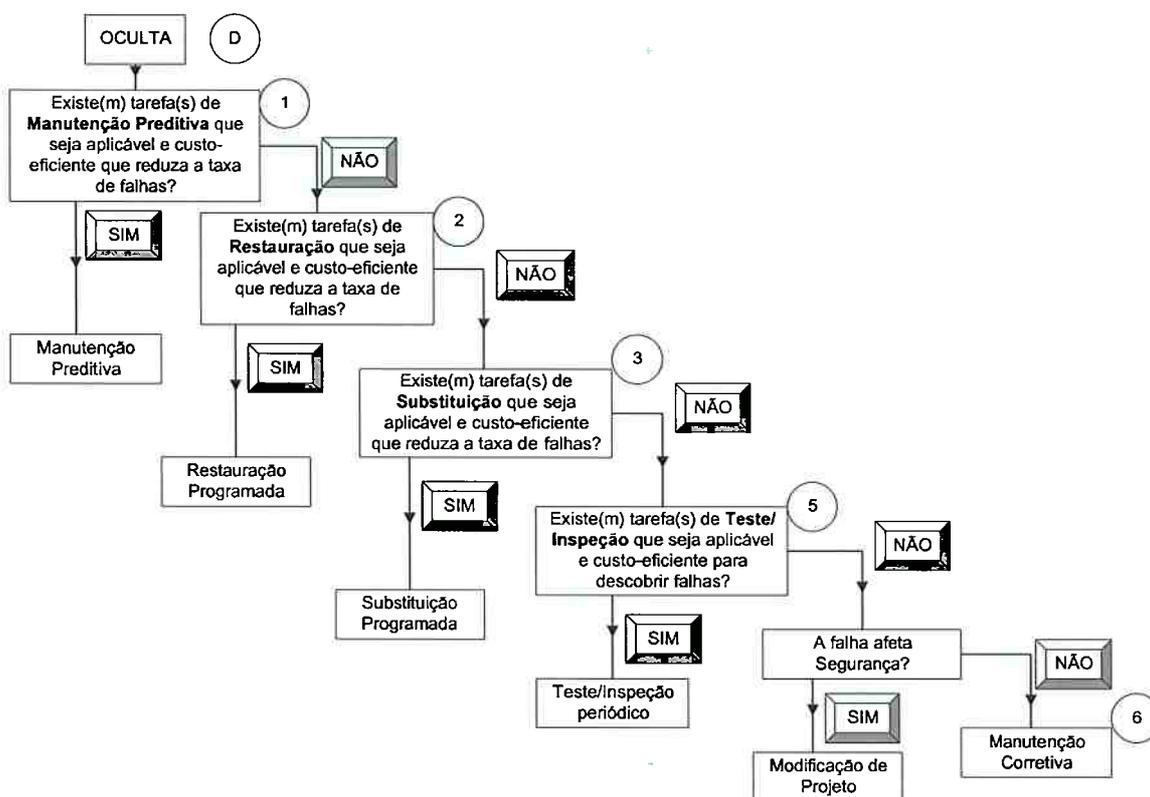


Figura 7.8 – Desdobramentos de Falhas Ocultas para Seleção da Prática de Manutenção

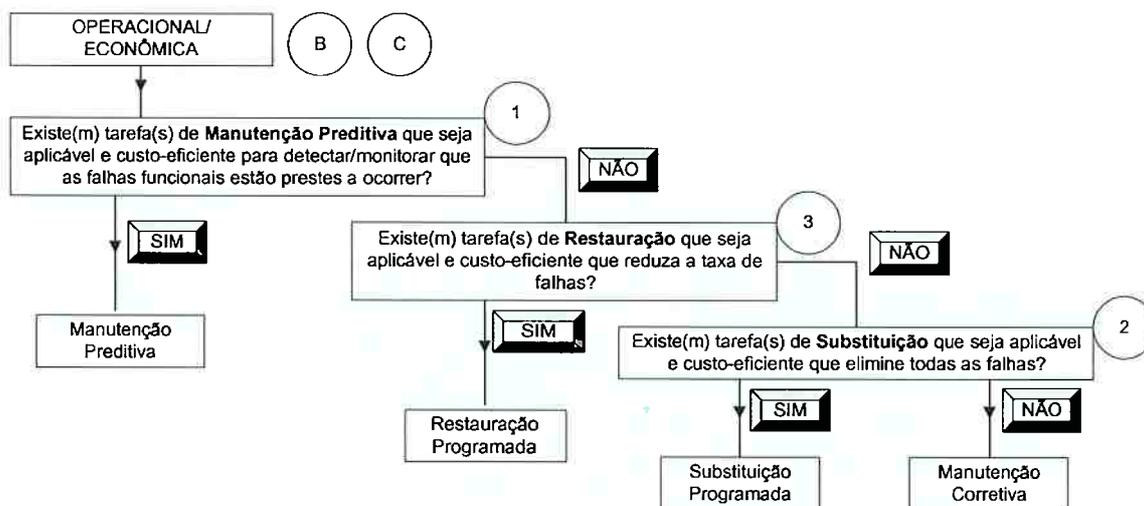


Figura 7.9 – Desdobramento das Falhas que Afetam os Aspectos Operacionais e Econômicos para Seleção da Prática de Manutenção

Este método, embora considere de forma qualitativa os efeitos da ocorrência de uma falha, não permite a quantificação, em termos monetários ou em qualquer outra base de comparação da consequência da falha, que pode ser empregada na classificação da importância relativa, para um certo contexto operacional, de dois modos de falha de um mesmo equipamento. Note-se que a lógica para seleção das práticas de manutenção aplicáveis é baseada nas respostas a 6 perguntas, numeradas de 1 a 6 nas Figuras 7.6 a 7.9, todas respondidas qualitativamente com SIM ou NÃO. Especialmente quando se acumulam respostas do tipo NÃO, ou quando é necessário determinar o que significa “custo-eficiente”, o método exposto (derivado da RCM) não indica como obter os valores ou critérios de aceitação.

O método proposto pretende explorar, além dos aspectos técnicos - aspectos estes atendidos pelo emprego dos conceitos de confiabilidade - indispensáveis à qualidade da manutenção de sistemas mecânicos, podendo se estender para máquinas e sistemas em geral, os custos e efeitos das consequências de uma falha sobre as operações do sistema afetado, da

linha ou conjunto do qual este faz parte, sobre as operações da empresa e mesmo sobre o desempenho do produto manufaturado quando em campo. Além disso, são considerados os custos próprios da manutenção, tais como contratos, mão-de-obra e peças de reposição. Logo, o método proposto visa ser uma solução de compromisso conciliando os aspectos expostos, estendendo-se para além de contribuições de autores como HAIMES (1998), CLEMEN (1996), BLOCH e GEITNER (1997), AUGUST (1999), BAIR (1999), MA et al (1999), GERTMAN e BLACKMAN (1994) e MOTA et al (2004), cada um deles abordando separadamente os aspectos tratados em conjunto neste trabalho.

Comparado à RCM, como visto nas Figuras 7.6 a 7.9, o método proposto neste trabalho permite avaliar e determinar quantitativamente a viabilidade técnica e econômica requerida pela RCM, a qual não esclarece como executar a análise de tais viabilidades.

## 8 – APLICAÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO

### 8.1 – Considerações Iniciais

A aplicação da estrutura proposta na Figura 7.2 – a qual é detalhada na Figura 7.5 - exige a determinação das probabilidades de ocorrência das falhas associadas a um item submetido a uma determinada política de manutenção.

Sem dúvida é uma fase laboriosa, ainda mais quando se pretende considerar uma linha de produção integralmente, onde se deve avaliar :

- para um mesmo item, os efeitos da adoção de diferentes políticas de manutenção;
- itens diferentes sujeitos a diferentes políticas de manutenção;
- evolução histórica (temporal) das falhas e
- sensibilidade do método.

A análise efetuada neste trabalho ambientou-se em uma fábrica de produtos de telecomunicações, cuja cadência de produção é bastante alta (mais de dez mil unidades fabricadas por dia).

Com dados obtidos dia a dia ao longo de 4 meses de operações, foi possível observar, para uma determinada linha de produção (portanto comprometida com uma única família de produtos, como reza o conceito da empresa pesquisada), que há diversos tipos de falhas, as quais exigem tratamento diferenciado, o que não vinha acontecendo. Isto ocasionava *downtimes*, ou paradas inadvertidas freqüentes e algumas vezes longas. Além disso, os custos associados à manutenção estavam sendo precariamente geridos, o que mascarava os riscos e conseqüências das falhas. Este Capítulo explica como foram levantados estes problemas e

como se modelou a situação de forma a compor os cenários necessários à aplicação da estrutura de análise proposta.

## 8.2 - Estudo de Caso : Planta sobre a qual foi aplicado o Método Proposto

Este item corresponde ao primeiro passo no emprego do método proposto.

**Compreensão das operações da organização:** O caso estudado baseou-se em uma linha localizada em uma planta de produção de telefones celulares na cidade de Manaus-AM. A configuração desta linha, por sinal muito comum na indústria de produtos eletrônicos de pequeno porte, pode ser visualizada na Figura 8.1, a qual descreve as subseções em que ela é dividida, divisão esta efetuada conforme a natureza das funções executadas. As Figuras 8.2 a 8.4 mostram como cada uma destas subseções está equipada.

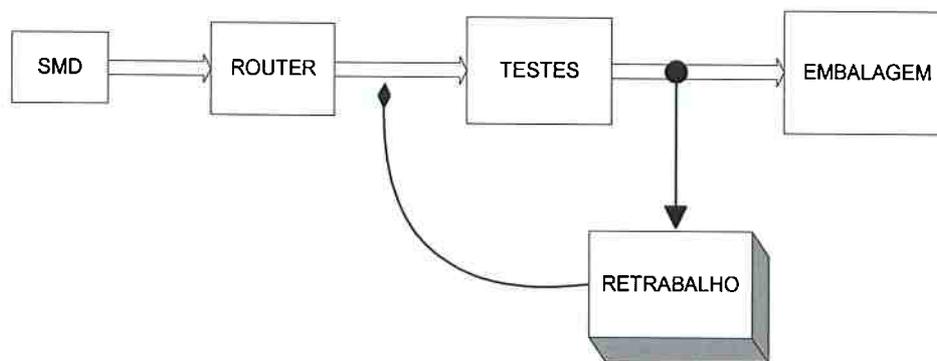


Figura 8.1 – Configuração Típica de uma Linha de Montagem de Telefones Celulares

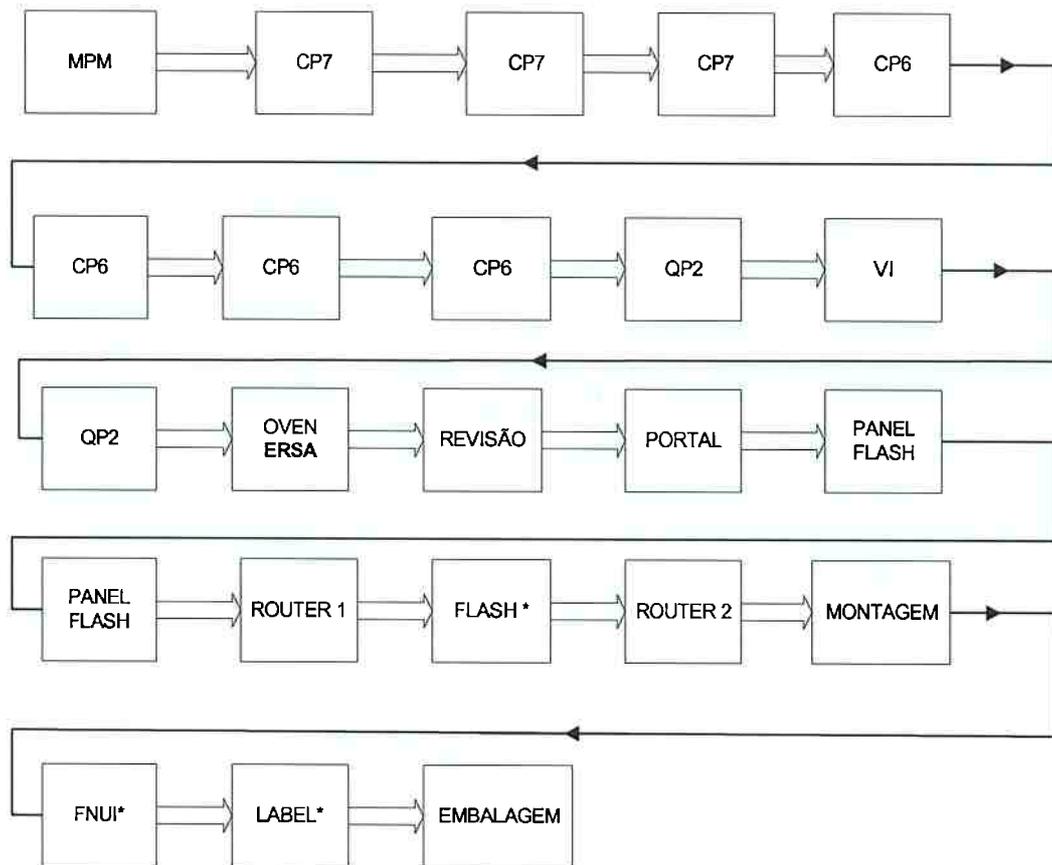


Figura 8.2 – Detalhamento das Máquinas Componentes de uma Linha de Montagem de Telefones Celulares

Deve-se ressaltar que as seções da empresa analisadas neste trabalho, foram escolhidas entre aquelas onde componentes mecânicos das máquinas determinam os eventos iniciais (falhas) e por este motivo a ênfase recai sobre SMD e *ROUTER*.

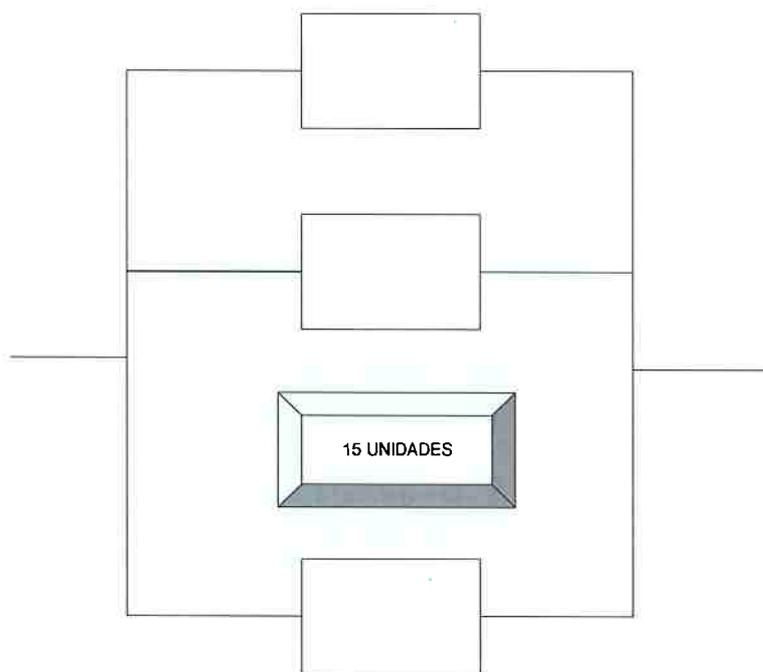


Figura 8.3 – Seção de *Flash* (Inserção do Programa Operacional no Aparelho)

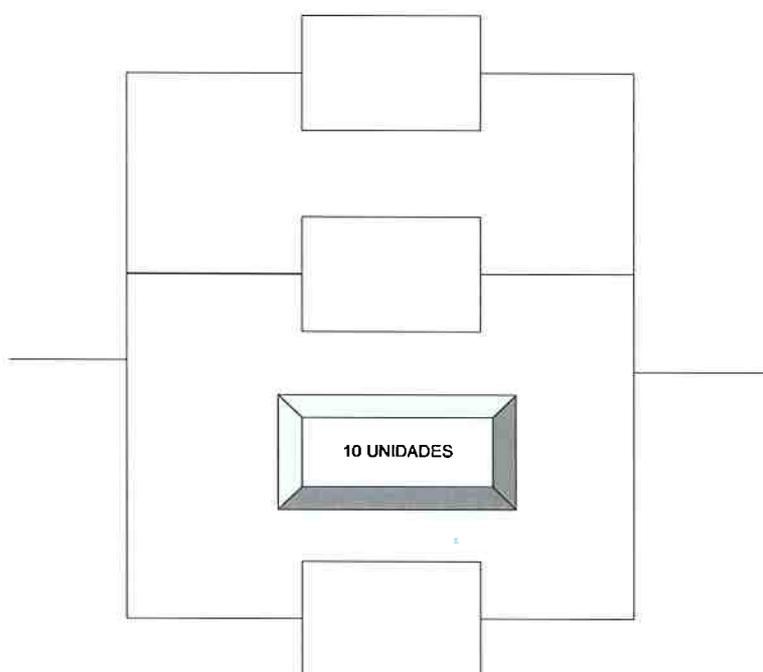


Figura 8.4 – Seção de *Labelling* (Etiquetamento para Identificação do Aparelho)

Na Figura 8.1, tem-se os seguintes significados para os termos constantes na mesma :

- SMD : do inglês *Surface Mounting Devices* ou Maquinário para Montagem de Superfícies, cuja função é dispor os componentes (visores, circuitos, elementos, blindagem, etc.) sobre as placas de circuito impresso e fixá-los por meio de solda. As placas entram na linha de produção em conjuntos de 4 unidades, portanto, são montadas nos SMD 4 placas por vez, como pode ser visualizado na Figura 8.5. Tais máquinas são principalmente as posicionadoras (*pick and place* dos modelos CP6, CP7 e QP2), indicadas na Figura 8.2, as impressoras de pasta de solda (Figura 8.6) e os fornos (Figura 8.7). As linhas começam com as impressoras, onde a pasta de solda é disposta sobre a placa vazia (*blank*) utilizando-se técnica similar ao *silk screen*, sendo o estêncil fabricado em aço inoxidável. Após esta fase, a placa segue para as posicionadoras, onde os componentes são dispostos. Dependendo da quantidade de componentes, portanto, dependendo do produto, a placa pode passar por mais de uma posicionadora. A próxima etapa são os fornos para solidificação da solda. Como cita MONLEVADE (2002), algumas vezes, a placa passa por dois conjuntos de posicionadoras e fornos, pois a maioria dos produtos (telefones celulares) aproveita os dois lados da placa de circuito impresso. Após a conclusão das soldagens, as placas serão separadas e terão seus contornos definidos por fresamento;

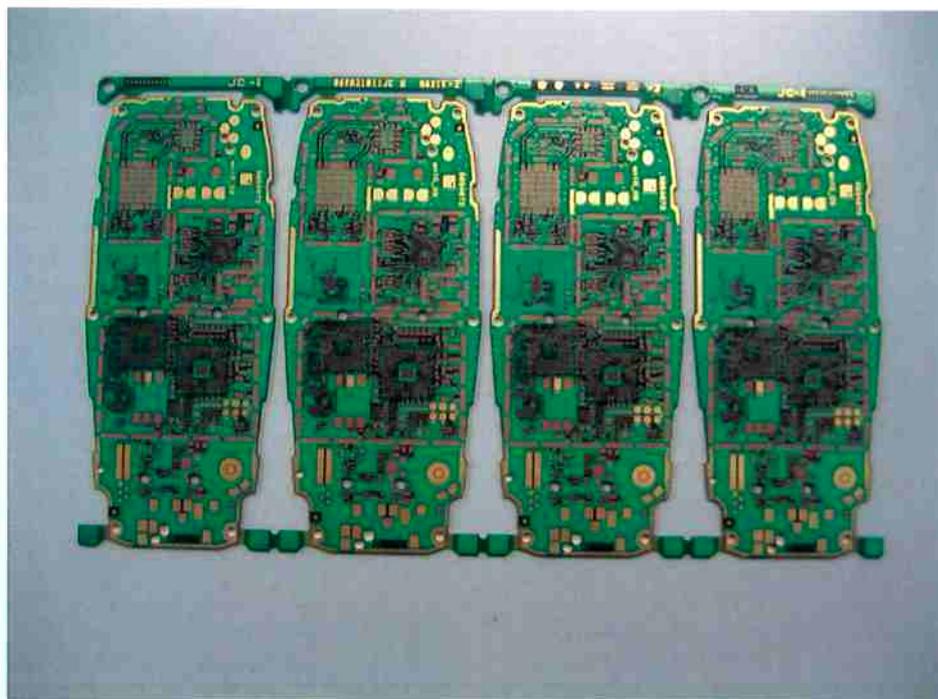


Figura 8.5 – Conjunto de 4 Placas de Circuito Impresso a Serem Montadas na Subseção SMD

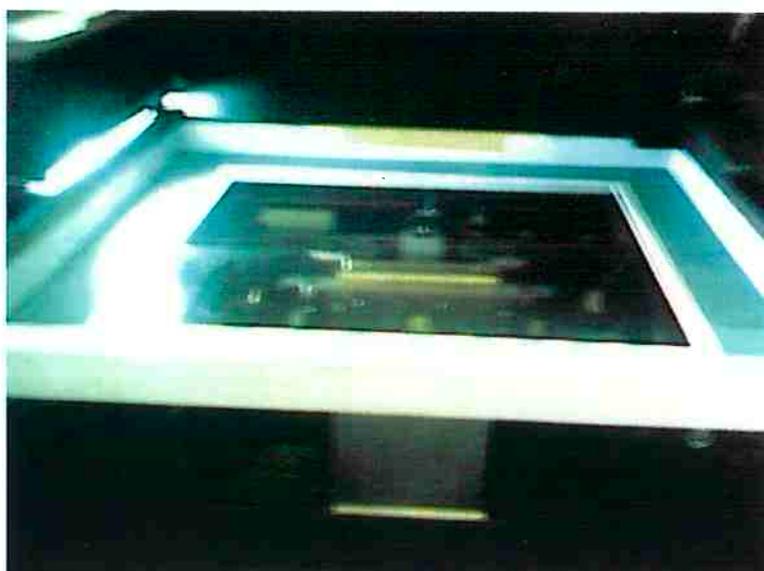


Figura 8.6 – Vista do Interior de uma *Printer* para Pasta de Solda



Figura 8.7 – Forno ERSA<sup>®</sup> para Refusão da Pasta de Solda de Componentes Eletrônicos

- *ROUTERS* : esta seção faz a separação das placas e alguma usinagem complementar, utilizando-se de máquinas chamadas de *ROUTERS* (conforme apresentado na Figura 8.2). Antecipadamente, já se pode dizer que esta é a seção onde mais problemas relativos à falha são percebidos na planta pesquisada, não apenas em razão das conseqüências, mas em razão da freqüência - observação que é melhor explorada neste mesmo capítulo, mais adiante
- Testes : seção onde são executadas algumas rotinas de testes com o produto parcialmente montado, verificando a operação de todas as funções do aparelho e testando algumas características paramétricas, tais como nível de sinal, variação na freqüência e intensidade sonora. Caso ocorra algum problema, a seção de testes procede a um diagnóstico, encaminhando o aparelho para a seção de retrabalho;
- Retrabalho : a seção de retrabalho, baseada no diagnóstico da seção de testes, mapeia (identifica) o componente problemático, ou o módulo, pois algumas falhas como as de

teclado, exigem a substituição de toda uma placa, cujo custo pode chegar a US\$150,00 por unidade. O componente – se este for o caso – é retirado e um novo é reinstalado, utilizando-se um equipamento denominado *reballing*, o qual procura reproduzir o processo SMD. O aparelho é retestado e se apresentar nova falha é descartado, caso contrário, prossegue para a seção de embalagem.

Em termos da construção do produto, a embalagem encerra estas etapas, embora haja outras atividades associadas com o despacho final do aparelho tais como expedição, conferência e embarque. Não há estoques, os telefones são manufaturados contra pedido por parte dos clientes (operadoras) nacionais e estrangeiros.

Considerando a linha em referência, as seções de SMD e ROUTER apresentam bastante componentes mecânicos, cujas falhas podem paralisar a linha, exigindo a ação da manutenção. Neste trabalho, analisa-se com profundidade as políticas de manutenção visando o combate a tais falhas.

Estando este trabalho centrado em analisar e propor políticas de manutenção para sistemas predominantemente mecânicos, a seção de ROUTERS é a última a ser analisada e sobre a qual se aplicará o método proposto. Mesmo porque, a seção de testes já possui uma política própria de manutenção de seus equipamentos, os quais exigem basicamente calibração e cujas conseqüências de uma falha são apenas relacionadas à paralisação de uma bancada de testes, já que o programa que controla estas unidades, sobretudo os analisadores de sinais paramétricos, bloqueia a execução do teste se alguma discrepância entre sinal e resposta for encontrada, informação extraída do manual do fabricante (AGILENT). Um telefone que deva ser reprovado, levando-se em conta o desempenho das funções a serem testadas, sempre o será. O fato de telefones defeituosos chegarem ao mercado não se deve aos equipamentos de testes e sim ao fato de que o método de diagnose é concebido para aprovar o

produto se as funções requeridas respondem corretamente no momento do teste. A seção de montagem final também não gera grandes inconvenientes, embora falhas nas parafusadeiras pneumáticas sejam freqüentes (verificar na Tabela apropriada).

### 8.3 - Pesquisa das Falhas no Ambiente de Manufatura

A seção anterior expôs de maneira separada cada uma das etapas que compõem o processo de montagem dos telefones celulares. Nesta seção, expõe-se como estas etapas se relacionam entre si, especialmente no que diz respeito às conseqüências das falhas, em termos qualitativos. Esta parte da aplicação corresponde às fases de **Determinação dos modos de falha relevantes, Relação das práticas de manutenção aplicáveis aos modos de falha relevantes e Uso da análise de risco para determinar os desdobramentos (efeitos) destas falhas sobre as operações da organização sob diferentes alternativas de manutenção**, etapas executadas para cada uma das seções da linha de produção.

Uma primeira consideração a ser feita é que, como a maior parte da linha é em série, falhas no início do ciclo, ou seja, falhas nos equipamentos SMD, têm maior repercussão sobre a linha de produção, sobre o produto final e sobre o desempenho da empresa como um todo.

Algumas vezes, falhas no posicionamento de componentes impactarão sobre as *ROUTERS*, máquinas nem tão robustas e cuja potência de usinagem (1000 W) é descarregada sobre uma pequena fresa de altíssima velocidade, cujo diâmetro é de 3,175 mm. As falhas destas máquinas são analisadas em detalhes na seqüência deste texto.

#### 8.3.1 Falhas na Seção SMD

Em termos de SMD, as não conformidades mais comumente observadas nos produtos, mapeadas entre março e julho de 2003, por tipo de equipamentos são :

**Para Estêncil (seção de impressão de pasta de solda) e *Pick and Place***

- deslocamento da pasta de solda;
- falha no posicionamento de componentes;
- ausência de componentes;
- interrupção do ciclo por falha na identificação dos componentes

**para Fornos**

- solda imperfeita devido à falha no perfil de temperatura.

Na verdade, estes eventos correspondem a sintomas, cuja causa advém de uma ou mais falhas, as quais são relatadas a seguir.

**8.3.1.1 - Impressoras de Pasta de Solda**

Na operação de impressão da pasta de solda, o sintoma DESLOCAMENTO pode ser resultado de falhas nos componentes mecânicos da máquina (com uma frequência muito baixa de ocorrência e cujos problemas apresentam evolução paulatina, muito mais lenta do que a evolução de falhas em componentes mecânicos de máquinas de outras seções), sensores óticos ou do *estêncil* metálico. Neste último caso, nada pode ser feito pela manutenção, pois os problemas encontrados referem-se à usinagem da peça (*estêncil*) ou mesmo ao projeto da ferramenta. Entretanto, cabe à manutenção proceder à diagnose e isolamento desta causa. Este problema é menos freqüente do que aqueles encontrados nos componentes mecânicos, sobretudo nos fusos de esferas recirculantes, dispositivos de fixação (*grippers*) e na *squeeze*

*tool* (espécie de espátula que pressiona a pasta contra o *estêncil*, fazendo com que esta flua pelos orifícios e se deposite nas placas de circuito impresso). Deslocamento da pasta de solda e perfil incorreto de temperatura dos fornos conduzem sempre à formação de vazios (*voids*) e propiciam a formação de trincas, como mostra a Figura 8.8. Temperaturas muito elevadas nos fornos ou rampas incorretas, fazem com que haja ebulição em pontos restritos da pasta de solda, o que deforma a bola e ocasiona tensões residuais – agravadas pelo deslocamento da pasta - e vazios.

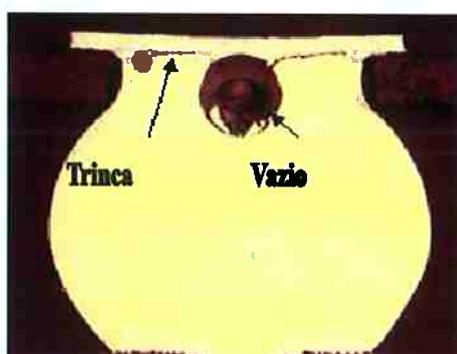


Figura 8.8 - Imagem de Raio-X Tratada por Computador Mostrando Trinca e Vazio em Bola de Solda sob um BGA (do inglês *Ball Grid Array*, ou Circuito com Pontos – Bolas - de Solda em Disposição Matricial)

Um problema relacionado à manutenção desta planta e que teve de ser tratado é a pouca fidelidade entre planejamento das revisões preventivas e sua execução. Cadência de produção é, como se verifica em TODAS as fábricas, uma razão inaceitável para que se deixe de executar revisões e intervenções preventivas e no caso da fábrica em questão, revisões semanais eram “puladas” até 8 semanas consecutivas. Com isto, peças desgastadas tendiam a impor toda sorte de não conformidades ao produto. Sendo os fusos de esferas recirculantes os responsáveis pela qualidade do posicionamento da placa em relação ao *estêncil*, qualquer folga resulta em deslocamento. A acuracidade destes é de 0,1mm em torno da dimensão alvo

e somando-se erros da máquina, de construção do *estêncil* e da própria placa, é bastante fácil ultrapassar-se a tolerância de montagem do produto. No período observado, no entanto, nenhuma falha deste tipo (devida ao desgaste ou fadiga dos fusos de esferas) foi observada, razão pela qual não se concentrou esforços em sua debelação. Some-se a isto o fato de que para falhas de *estêncil* não cabe à manutenção agir como tal (apenas aciona-se o fornecedor e este substitui ou repara o componente) e que falhas de sensores situam-se fora do escopo deste trabalho, que é abordar políticas de manutenção associadas a falhas de componentes mecânicos. A norma MIL-HDBK-217, como citado por CARDOSO (2000), estabelece que a taxa de falhas para sensores pode ser assumida como constante, o que significa que é um fenômeno associado à distribuição exponencial, caracterizando modo de falha aleatório, restando à manutenção apenas (o que exige certo esforço também) controlar sua logística de mão-de-obra e peças de reposição. A Figura 8.9 mostra o Diagrama Causa-Conseqüência para a falha em questão.

Note-se que, para falha de posicionamento de impressão da pasta de solda (possivelmente causada por falha de componentes mecânicos tais como fusos de esferas), além de ser um evento cujo impacto não ultrapassa a seção SMD (já que a quantidade de componentes faltantes é grande no caso desta falha e a placa não tem como ser aceita em outras seções da fábrica), nenhuma ocorrência foi observada nas dez quinzenas em que se pesquisou a linha, por isso, esta informação – contida no Diagrama Causa-Conseqüência - não gerou nenhuma proposta de ação da manutenção.

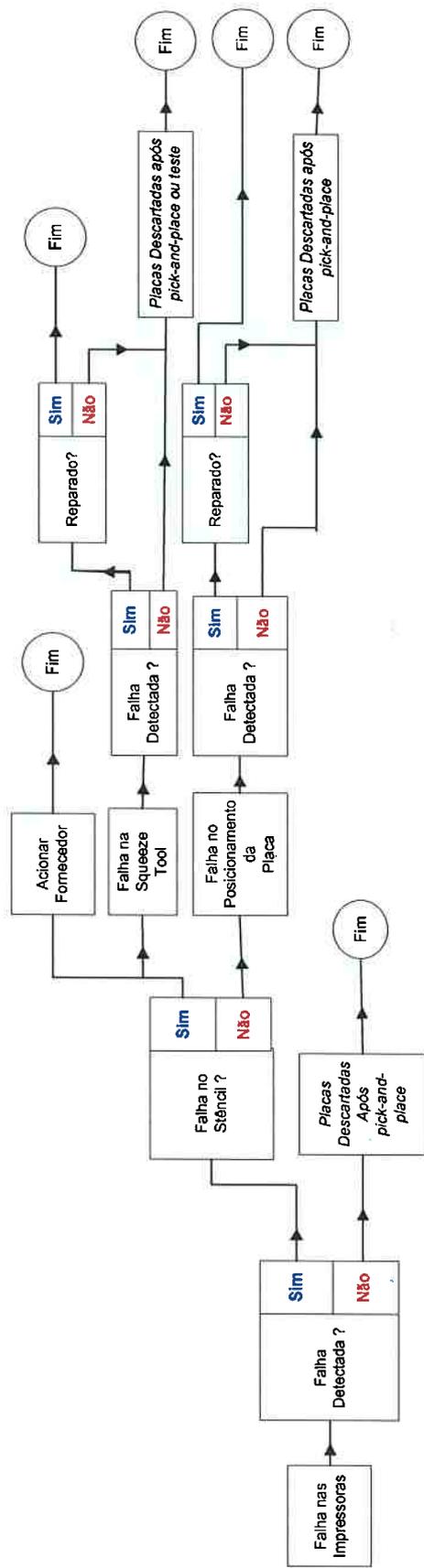


Figura 8.9 – Diagrama Causa-Consequência para Falha de Impressão da Pasta de Solda

### 8.3.1.2 - Máquinas “*pick-and-place*”

Falhas mais complexas são percebidas nas máquinas tipo *pick-and-place*, pela própria complexidade construtiva e pela quantidade de funções executadas. Há basicamente dois modelos de máquinas : as CP e as QP. As primeiras, como mostrado na Figura 8.10, podem inserir um número bastante elevado de componentes, tantos quantos sejam os alimentadores (*feeders*) possíveis de serem carregados.



Figura 8.10 – Máquina Posicionadora Tipo “*pick and place*”, marca FUJI, modelo CP-7

O princípio de funcionamento destas máquinas é o seguinte : um castelo onde se encontram 32 ou 36 eixos para captura e inserção dos componentes é acionado para retirar componentes dos alimentadores e conduzi-los até as placas. Estes eixos podem, a cada ciclo de programa, pegar um número de diferentes componentes e, por esta razão, se a máquina possui castelos de 32 ou 36 posições, na verdade pode-se montar muito mais

*CARDOSO (2004)*

componentes que isso. Se em uma passagem do eixo pela estação de alimentação falhar, ou seja, não for retirado o componente da bobina para ser inserido na placa, há mais 2 tentativas (os outros eixos capturam o componente a ser inserido e aquele que apresentou a falha, em uma próxima volta do conjunto, tenta efetuar a captura). Após estas tentativas, o programa deve paralisar a máquina para que seja investigado o problema. As placas com componentes faltantes devem ser, obviamente, descartadas, mas é comum que, devido a erros de sensores, uma quantidade de placas defeituosas seja encaminhado às ROUTERS. As máquinas QP operam da mesma maneira, mas têm capacidade limitada de quantidade de componentes a serem inseridos e podem ser montadas em série, pois são modulares, o que aumenta muito a flexibilidade da linha e reduz os riscos de se introduzir defeitos em placas devido a erros oriundos da máquina, mas são mais lentas para inserirem um mesmo número de componentes se comparadas às máquinas do modelo CP.

Um sintoma muito comum de falha nestas máquinas é a inserção de componentes mal posicionados, como mostra a Figura 8.11.

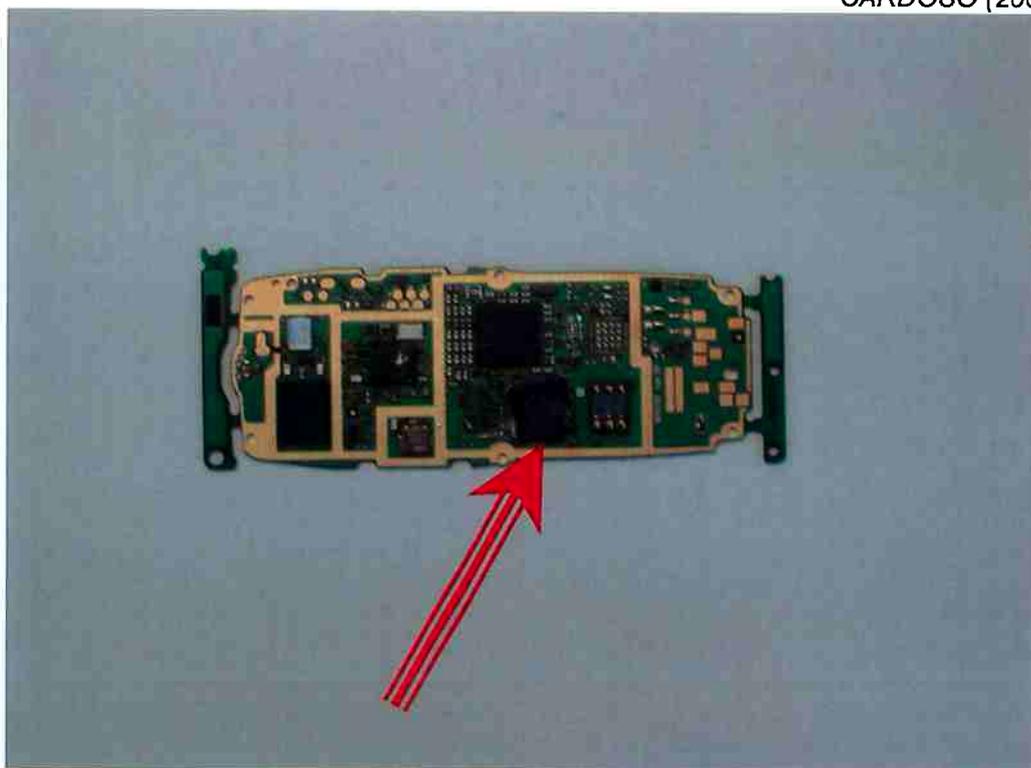


Figura 8.11 - Componente do Tipo BGA Incorretamente Posicionado

Este problema (sintoma) é fruto de falhas nas máquinas *pick-and-place* e pode ocasionar falhas nas *routers* e nos testadores. Tais efeitos serão explorados em mais detalhes na parte deste trabalho concernentes a estas seções da fábrica. Em termos das *pick-and-place*, nos interessa identificar as causas destes sintomas, estas sim, as verdadeiras falhas as quais devem ser tratadas por uma política de manutenção que se pretenda eficaz. Para facilitar este intento, deve-se examinar o diagrama de blocos de uma máquina deste tipo. Escolheu-se uma CP-7, fabricada pela FUJI<sup>®</sup>, por ser um modelo cujo diagrama de blocos, mediante pequenas adaptações, pode representar tanto máquinas da família CP quanto as da Família QP. Tal diagrama pode ser visualizado na Figura 8.12.

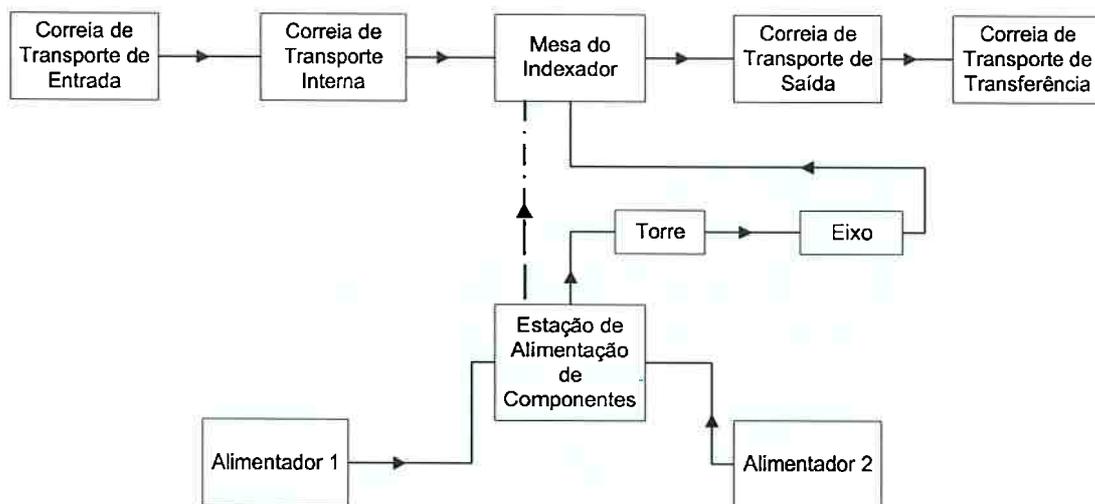


Figura 8.12 - Diagrama de Blocos de uma Máquina do Tipo *Pick-and-Place*,  
 Marca FUJI<sup>®</sup>, Modelo CP-7

O mau posicionamento de componentes do tipo BGA, como os da Figura 8.11, pode ser devido a problemas no *nozzle* (um dos 36 bicos localizados na torre do diagrama mostrado na Figura 8.12, que extrai o componente do carretel e o conduz até a posição adequada, depositando-o sobre a placa em processo), por problemas de leitura ótica, folga nos fusos de esferas recirculantes que movimentam a mesa X-Y ou ainda devido à ausência de cola (*underfill*) que auxilia na fixação dos BGA, ficando para a solda a função de prover os contatos elétricos.

Os componentes são extraídos de um carretel, fixado à parte traseira da máquina, por meio de vácuo. Este diferencial de pressão é aplicado pelos eixos (peças alongadas de metal acionadas por cames e por dentro das quais produz-se vácuo, sendo que em sua

extremidade livre (a que tem contato com os componentes) encontram-se dispositivos de rotação, denominados de *holders*, cada um deles contendo seis *nozzles*. Uma eletroválvula é acionada para extrair o componente – à vácuo - e fica aberta até que a posição de *placement* (deposição do componente na placa) seja alcançada. Após extrair o componente, o mesmo é filmado e é feito reconhecimento de sua imagem, sendo que se o componente não for o especificado para aquela etapa da operação (*step*), a montagem é abortada. Pode-se fazer 3 tentativas para cada ciclo em *pick-and-place* (ciclo de *pick-and-place* é definido , para cada máquina, como conjunto de operações que resulta na montagem completa dos componentes que devem ser inseridos pela máquina em um conjunto de 4 placas, conforme programação), o que aumenta em muito o tempo de cada ciclo – o qual é composto pela inserção de componentes em 4 placas – sem reduzir significativamente o descarte. Aprovado o componente, o castelo que contém os eixos gira de forma sincronizada com o movimento da mesa X-Y onde está fixo o conjunto de 4 placas a serem montadas. O giro é intermitente, haja visto cada eixo depositar um componente sobre a placa. Ao alcançar a posição de *placement*, o vácuo é desativado e o componente é expulso por meio de ar comprimido o mais próximo possível da placa. Conforme o programa e a quantidade de componentes na placa, o eixo realiza esta operação mais de uma vez por ciclo, trabalhando com componentes diferentes.

A leitura, ou melhor, o reconhecimento ótico, pode apresentar falhas devido à presença de sujeira na lente da câmera, problemas de programação e de linguagem do equipamento ou pela falha da câmera em si, a qual é um item não reparável e nem um pouco sujeito à ação da manutenção preventiva. Entretanto, isto não significa que a manutenção não deva dispensar cuidados quanto a este item, pois se o mesmo não estiver

disponível para substituição, uma vez que seu tempo de entrega é longo, este item impossibilita o funcionamento da máquina e a ausência de uma máquina destas compromete o desempenho da empresa como um todo.

Das falhas em máquinas *pick-and-place* apontadas, uma bastante impactante é o desgaste nos fusos de esferas recirculantes. Responsáveis por converter em translação e transmitir o movimento dos motores de passo às mesas X-Y das máquinas (sejam elas as do modelo CP ou as QP), estes fusos acabam sendo severamente solicitados (devido às altíssimas acelerações em ambos os sentidos) em regiões relativamente curtas se comparadas ao seu comprimento efetivo, vindo a sofrer acelerado processo de desgaste e principalmente fadiga (vide Capítulo 3 deste trabalho). Um dos principais problemas para a manutenção destes componentes é que a equipe da manutenção nesta empresa não possui habilidades destacadas em mecânica e o contrato ora em voga com o fabricante das máquinas não prevê rotinas tão detalhadas como a verificação do estado dos fusos. Nem mesmo uma contagem de horas era efetuada e, com isso, conhecer a vida útil destes componentes de nada adiantava, já que não se sabia ao certo quão próximo deste limite poderia estar o fuso.

Problemas na colagem não são responsabilidade destas máquinas e, por esta razão, não serão analisados aqui.

Do que foi exposto, pode-se então partir para a construção dos diagramas Causa-Conseqüência para as máquinas *pick-and-place* da seção SMD, indicados nas Figuras 8.13 a 8.17 (excetuando-se a Figura 8.14).

Inspecionando-se o diagrama da Figura 8.13, nota-se em uma análise menos acurada que a extensão destas falhas não são tão amplas, pois o alcance destas

CARDOSO (2004)

dificilmente ultrapassa a seção de SMD. Porém, há um caso em que a placa pode seguir até a montagem e o telefone ser reprovado nos testes, o que reflete custos bem mais elevados e difíceis de serem levantados. Além disso, mesmo quando se descarta as placas após o SMD, os custos incorridos são elevados, pois além do tempo de operação das máquinas, tem-se mão-de-obra envolvida, custo dos componentes inseridos e que não são reaproveitados e eventuais multas contratuais, já que a fábrica só produz contra ordem (pedido das operadoras) e os prazos são exíguos. O custo de uma linha composta por 5 CP7, um forno ERSA uma *printer* DEMATIC e uma ROUTER HiSAC 1000 BR é de aproximadamente US\$ 1,3 milhões, a ser depreciado em 5 anos (critério utilizado pela empresa analisada). Isto resulta em um custo horário de depreciação de US\$ 30,00/h, tomando por base um ano de aproximadamente 300 dias, com três turnos diários. Em contratos de manutenção e peças de reposição, são gastos, para a linha pesquisada, cerca de US\$ 30000,00/mês (para 13 linhas). US\$ 45000,00/mês ficam com mão-de-obra (incluindo a equipe de manutenção e encargos de manutenção e os encargos). Não se tem dados sobre o consumo de energia, a empresa, inclusive, está iniciando agora um programa de levantamento dos custos para racionalização do consumo de energia e água. US\$ 50,00/h é uma estimativa plausível, mas não se pode afirmar, por exemplo, que esta seja precisa, já que é costume ratear as despesas da área administrativa (com aproximadamente 300 pessoas) com a área produtiva – uma comodidade condenável e que gera muitos problemas de inconsistência ao se gerir a empresa utilizando-se de uma ferramenta como o programa SAP. E, como já vivenciou o autor nesta empresa e em muitas outras situações, se uma despesa não tem como ser justificada, ela será imputada à manutenção. O ciclo em SMD para o produto estudado é de cerca de 20 minutos. Por

CARDOSO (2004)

produto, são inseridos cerca de US\$ 50,00 em componentes, e para 4 placas (1 ciclo) são US\$200,00. Cada ciclo pode consumir até de US\$275,82, de acordo com os cálculos efetuados e mostrados mais adiante neste capítulo. Estes são os custos diretos e o mínimo realizável, já que a falha pode levar algum tempo para se revelar e esta estimativa considera apenas as placas descartadas após SMD devido a problemas na impressão da pasta de solda. A composição dos custos é discutida neste capítulo mais adiante em seção específica (vide seção 8.6).

Com relação à política de manutenção anteriormente adotada, ainda que houvesse preventivas (MP), as mesmas eram sistematicamente “puladas”, como já dito anteriormente. Logo, pode-se dizer que predominantemente as intervenções corretivas eram realizadas e mesmo a MP não estava corretamente dimensionada, fato fácil de ser comprovado no caso das máquinas do tipo *pick-and-place* e ROUTER, o que será descrito em mais detalhes adiante.

Para a aplicação do método proposto a esta primeira etapa da Linha 3 resultar completa, resta a determinação das probabilidades de falha associadas às falhas aqui expostas o que é apresentado na seção 8.4 deste capítulo.

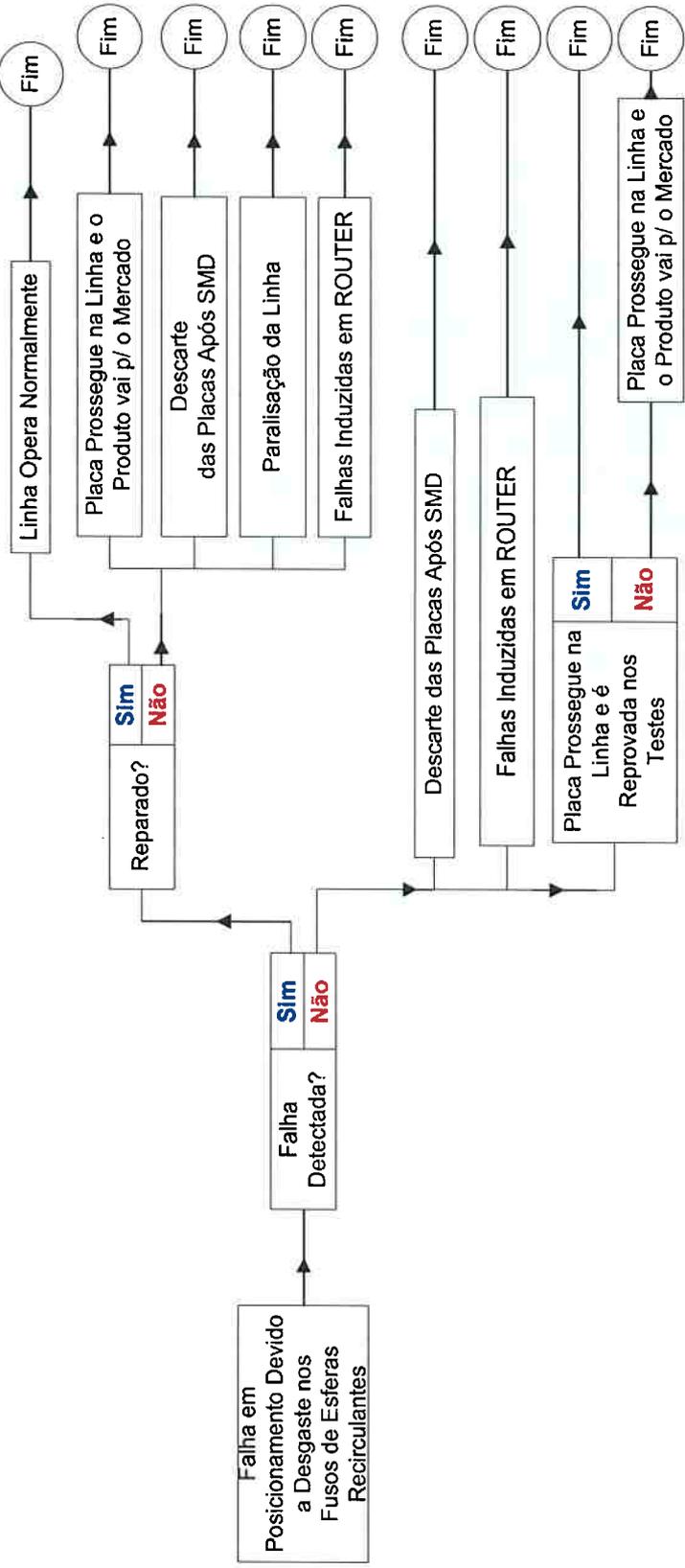


Figura 8.13 – Diagrama Causa-Consequência para Falha Devido ao Desgaste em Fusos de Esferas Recirculantes de Máquina Pick-and-Place Modelo CP7

O Diagrama Causa-Conseqüência da Figura 8.13 exige maiores explicações pois o mesmo aparenta ilustrar uma situação simples, mas que na verdade possui desdobramentos preocupantes. É certo que, após um certo nível de deterioração dos fusos, todas as placas podem apresentar posicionamento incorreto dos componentes. A acuracidade de posicionamento -  $\pm 0,05$  mm – é, como já comentado, facilmente ultrapassada em virtude da superposição de vários erros, e não é notada visualmente. Quando a pasta de solda já vem deslocada e há erros de posicionamento nas máquinas tipo *pick-and-place*, a interconexão entre o componente e a placa fica prejudicada.

A Figura 8.14 mostra uma imagem obtida por meio de Raio-X em que uma destas montagens de BGA's está perfeita, ou seja, todas as bolas de solda estão sobre os pontos designados na placa. Caso houvesse deslocamento ou posicionamento incorreto, deformações nas bolas de solda ou pontos sem solda dentro do “quadrado” formado pelas posições de solda de cada BGA seriam perfeitamente visíveis.

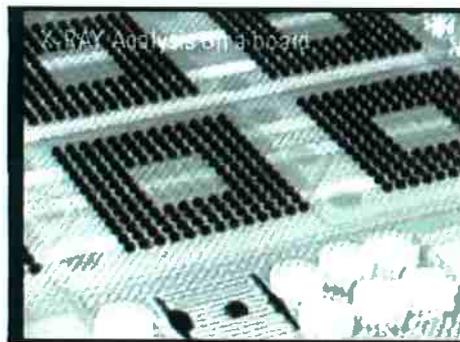


Figura 8.14 - Visualização de uma Solda Perfeita por Meio de Análise Oblíqua de Placa de Circuito Impresso Montada Utilizando-se Raio-X

Observando-se o diagrama da Figura 8.13, nota-se que a situação em que a falha não é detectada ocasiona desde impactos mais leves, como o simples descarte após o SMD (acarretando custos da ordem de US\$275.82 por ciclo, custos estes

CARDOSO (2004)

detalhados em seção específica adiante neste capítulo), até a situação em que produtos defeituosos vão parar no mercado. Embora não haja dados detalhados para todos os produtos da empresa analisada, no ano de 2002 foram consumidos, no Brasil, segundo fontes internas da empresa, cerca de US\$ 20 milhões apenas com reparos em garantia e substituição de aparelhos defeituosos por outros nem sempre idênticos, sem contar algumas inevitáveis ações judiciais. Esta falha (devida à deterioração dos fusos de esferas recirculantes) não afeta outros subsistemas da máquina *pick-and-place*, mas pode ocasionar falhas nas *ROUTERS*, especialmente no caso de produtos cujo contorno da placa é definido por fresamento efetuado nas *ROUTERS*, isto porque estas máquinas despejam cerca de 1000W sobre uma pequena fresa projetada para recortar o material das placas, as quais têm, em média, 1,5mm de espessura. Como o projeto das placas já é bastante otimizado, ou seja, espaços vazios existem apenas onde é necessário melhorar a dissipação do calor ou reforçar a blindagem eletromagnética, componentes como os BGA's sempre estão muito próximos entre si ou das bordas da placa; no caso de problemas de posicionamento (que se forem devidos à deterioração dos fusos ultrapassam em muito a tolerância de  $\pm 0.05$  mm), os componentes eletrônicos serão atingidos pela fresa e como são bem mais espessos e duros que as placas e mais duros também, o resultado é a quebra da fresa, com conseqüentes danos às *ROUTERS*, tais como o travamento do *grripper* (dispositivo onde se prende as placas para o recorte), travamento do cabeçote que serve de suporte à fresa (seja nos mancais do cabeçote, seja no acionamento da movimentação X-Y). e em muitos destes casos, incorre-se no desarme de disjuntores e relés de proteção, já que o pico de corrente alcançado é bastante elevado. Se o efeito for a simples quebra da fresa, a troca consome 30 segundos e o custo se resume basicamente ao preço da

fresa (cerca de US\$ 30,00) e ao tempo de paralisação da linha em fila. Mas se a máquina desarmar automaticamente ou se houver travamento de cabeçote ou de *gripper*, o tempo de paralisação e o custo dos reparos passam a ser significativos. A Tabela 8.2 mostra os registros concernentes a esta falha, utilizados para o cálculo da probabilidade associada à mesma.

A próxima falha a ser considerada é a que resulta em falta (*fault*) no reconhecimento ótico, em geral devida à sujeira na lente da câmera ou por defeito na própria câmera (relembrando-se que se trata de um item não reparável) ou falha – em geral *bugs* – no programa de reconhecimento ótico. Nada pode ser feito pela manutenção no caso de falha de programa, primeiro porque é necessário acionar o representante do fabricante para reconfigurar a máquina (desinstalar o programa defeituoso, instalar um novo e calibrar controles e acionamentos). Depois porque tais falhas são imprevisíveis em termos de frequência de ocorrência e efeitos. Já o acúmulo de sujeira na lente da câmera, apesar de ser um evento muito simples de ser corrigido e mesmo evitado, ocorre em uma frequência bastante elevada e é motivo de paradas curtas, mas crônicas. Este problema é resultado de descuidos e também sintoma de problemas mais graves, pois frequentemente, encontram-se óleo ou graxa depositados sobre a lente. Isto se deve ao fato de que a graxa utilizada na lubrificação de alguns acionamentos já teve sua viscosidade reduzida e deve ser substituída ou pode refletir vazamentos sobre as correias, que fazem respingar o material sobre a lente. Observa-se que, seguindo-se à falha de reconhecimento, há falhas de sincronismo ou deterioração das correias pelo ataque dos fluidos sobre o elastômero. Uma análise pouco criteriosa pode intuir errônea e absurdamente que a falha no reconhecimento ótico causa falha de sincronismo e erros de posicionamento de

CARDOSO (2004)

componentes, o que poderia fazer sentido. Porém, o programa compara a forma do componente extraído num determinado *step* com a forma do componente esperado e se não for coincidente, o programa aborta o ciclo – deve ser lembrado que a máquina aceita até 3 tentativas de extração do componente correto, recurso que a empresa utiliza em algumas máquinas da linha analisada (onde há 5 máquinas idênticas em série). Se o problema for devido à própria câmera, nenhum sinal será enviado para o controlador e a operação será abortada imediatamente, sendo que não será possível reiniciar a máquina. Isto significa que a linha será paralisada. Esta falha apenas admite ação corretiva, portanto, não há como propor uma otimização em termos de prática de manutenção, embora, mais uma vez, seja salutar otimizar a política de execução das intervenções corretivas já que isto envolve o emprego de peças de reposição um tanto demoradas de serem obtidas. Note-se que, se houver fila, o tempo de paralisação da linha será a soma da fila, do reparo e dos testes. No caso desta falha, somar-se-ão :

- custo da peça (câmera e suporte) e acessórios (cerca de US\$ 200,00);
- custo do acionamento da *hot-line* do fabricante (R\$ 150,00/hora ou ~US\$ 30,00);
- custo da parada distribuída por toda a Linha (US\$ 227,44/hora já perdidos + valor do lucro cessante no período da parada);
- perda de material (US\$ 200,00), pois as placas já contendo os componentes inseridos serão descartadas sem nenhum aproveitamento;
- eventuais multas por atraso (depende de cada contrato, cada cliente negocia uma base de cálculo).

A Figura 8.15 mostra o Diagrama Causa-Conseqüência para a Falha em Questão.

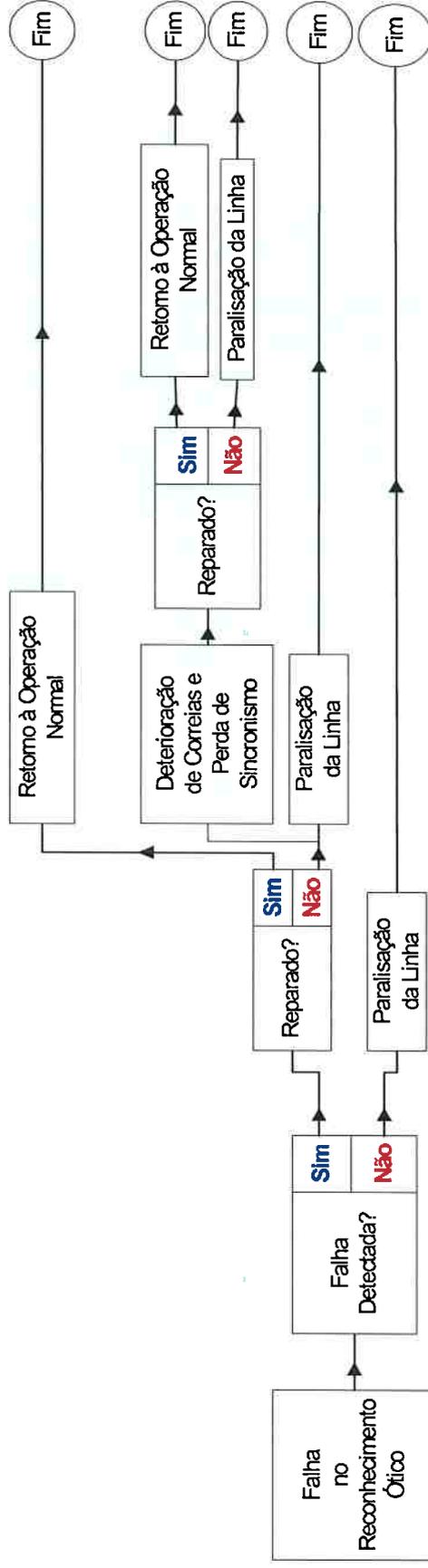


Figura 8.15 - Diagrama Causa-Consequência para Falha no Reconhecimento Óptico

em Máquina *Pick-and-Place*, Modelo CP7

As últimas falhas de interesse para *pick-and-place* – considerando-se o escopo deste trabalho - dizem respeito ao vácuo e ao ar comprimido. É mais efetivo dividir-se este problema relacionando-o respectivamente ao vácuo e ao ar comprimido, pois apesar de serem falhas muito semelhantes em suas causas-raízes e efeitos, não guardam uma relação de causa e efeito entre si (são independentes).

Já foi explicada qual a ação do vácuo e do ar comprimido anteriormente nesta mesma seção do trabalho. Pesquisar-se-á quais as causas-raízes destes problemas.

Basicamente, as eletroválvulas, as quais liberam vácuo ou ar comprimido para os *nozzles*, são acionadas por meio de um sinal proveniente do controlador. Não havendo falha na alimentação elétrica, de sensores nem de programa e linguagem (*bug*), duas são as causas de falha na operação das eletroválvulas :

- engripamento do carretel da válvula e
- mau contato.

A causa-raiz do engripamento do carretel pode ser o próprio desgaste da válvula ou problemas com a qualidade do ar comprimido. Em Manaus, os elementos adsorvedores (secadores de ar) se extingüem rapidamente, pois estão sujeitos a uma temperatura alta (45~55 °C) próximo ao compressor para uma umidade relativa de 95%, ou seja, é uma quantidade apreciável de vapor d'água. Mas se a manutenção mostra deficiências no trato com os equipamentos em si, com os acessórios então o problema se torna mais grave ainda. Esta água, ao se condensar, concentra-se em pontos como os carretéis das válvulas, favorecendo o rápido aparecimento de pontos de corrosão, o que explica o engripamento principalmente das válvulas de ar

CARDOSO (2004)

comprimido. Para vácuo, como o ar extraído é o de um ambiente controlado, com temperatura entre 23~25 °C e umidade relativa próxima a 50% (RH, do inglês *Relative Umidity*), o engripamento se refere mais ao desgaste das válvulas. Falhas nas bombas de vácuo e deformação das ventosas que têm contato com os componentes completam a lista de causas-raízes das falhas relativas ao vácuo. Tais falhas podem conduzir ao mau posicionamento de componentes, no caso de pressão insuficientemente baixa, ou ao abortamento do ciclo se o diferencial de pressão for nulo ou insuficiente para extrair o componente. Note-se que, dependendo da quantidade componentes já inseridos antes do abortamento do ciclo, o custo da extensão desta falha varia, mas não é tão extenso e pode-se considerar os US\$275,82, desde que tenha havido falha em apenas 1 ciclo. Já no caso de mau posicionamento, dependendo de onde o problema vai ser percebido (podendo, como já exposto, ser percebido apenas pelo usuário final já no mercado), o custo pode ser desde menos de US\$275,82 por ciclo (pois dentre as 4 placas pode haver unidades aproveitáveis e a linha pode não ser instantaneamente paralisada, ensejando uma intervenção corretiva programada) até valores indeterminados que totalizam os já aludidos US\$ 20 milhões/ano.

Com relação ao ar comprimido, existe a probabilidade de que o componente seja mal posicionado, na verdade, o ar comprimido acelera a expulsão do componente, sem assegurar que o posicionamento será mantido. A responsabilidade por posicionar corretamente o componente no *nozzle* e daí para a placa é do vácuo. O componente é expulso da posição mais baixa do *shaft*, porém, a distância entre o componente e a placa depende da espessura da peça a ser inserida, pois o comprimento do *shaft* é constante. Quanto menor a distância entre peça e componente, mais facilmente se

CARDOSO (2004)

assegura a correta inserção. O ar comprimido acelera o componente e assegura que o mesmo seja expulso do *shaft*, em caso de falha, o componente acaba sendo arrastado pelo *shaft* e ou deixa de ser expulso, sendo o ciclo abortado ou, situação mais desfavorável, o componente é expulso tardiamente e ao invés de ser posicionado sobre a placa, o mesmo é solto de uma posição qualquer apenas cai. Daí em diante, os efeitos da falha já são conhecidos. A Figura 8.16 mostra o aspecto destes *shafts* montados na torre da máquina, já a Figura 8.17 mostra o Diagrama Causa-Conseqüência para a falha dos *nozzles* devido ao vácuo e a Figura 8.18 mostra o Diagrama Causa-Conseqüência para a falha nos *nozzles* devidas ao ar comprimido.

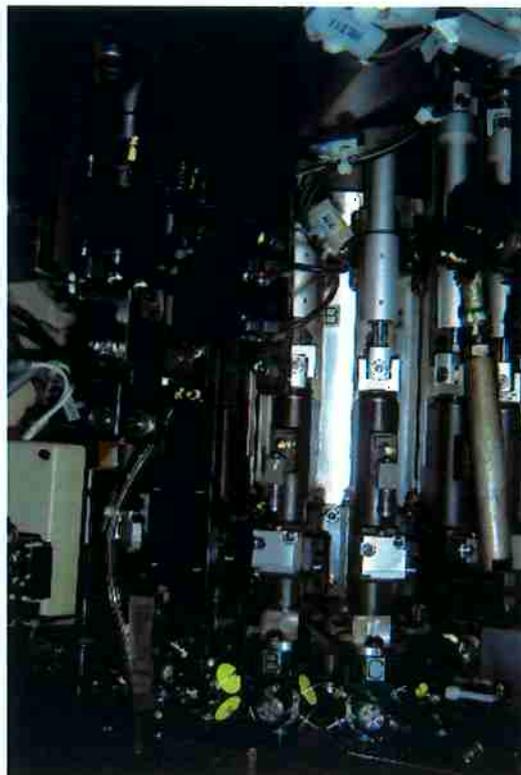


Figura 8.16 – Castelo (*turret*) onde são Montados os Eixos com os *Nozzles* nas Extremidades em Máquinas tipo *Pick and Place*, Marca FUJI, Modelo CP-7.



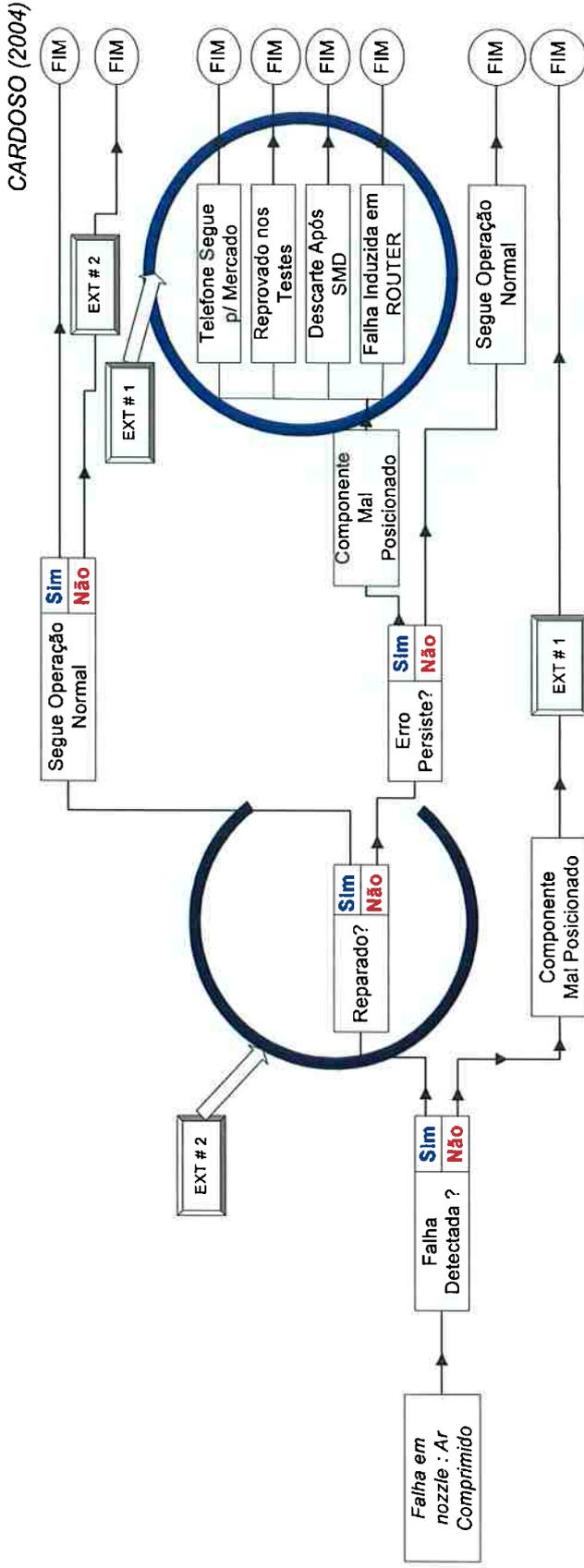


Figura 8.18 - Diagrama Causa-Consequência para Falha de Ar Comprimido em Nozzle de Máquina Pick-and-Place

Note-se que se houver falha no vácuo, há a possibilidade de que a operação seja abortada e uma ação corretiva se faz mandatória, porque o próprio programa, ao reconhecer que as  $n$  tentativas especificadas (sendo que na situação anterior  $n=3$ ), paralisa a máquina e há a chance de não se enviar a seções posteriores placas montadas com defeito de posicionamento ou ausência de componentes. Já no caso do ar comprimido, se houver falha e o componente for mal posicionado, a possibilidade de que as placas prossigam na linha e se convertam em produtos não conformes é muito grande. Embora mais simples de ser solucionada, ao menos tecnicamente falando, já que os componentes de máquinas que lidam com ar comprimido são mais simples que aqueles que operam com vácuo, esta falha suscita conseqüências mais graves.

#### **8.3.1.3 - Fornos de SMD**

Ainda dentro da seção SMD, tem-se os fornos, responsáveis por falhas em produtos e por paradas na linha de produção devidas a razões simples, como, por exemplo, problemas de limpeza que se transformam em travamento e até mesmo em ruptura de eixos.

Em termos de deficiências nas práticas e execução de manutenção, os fornos se constituem em exemplos bastante contundentes, pois são sempre críticos para a linha, têm funcionamento mais simples se comparados a outras máquinas seja em SMD ou em ROUTERS e os reparos demandam tempo e recursos, além de

freqüentemente intervirem com obras civis em virtude da presença dos exaustores, os quais também podem vir a falhar pelos mesmos motivos que acometem os fornos.

Para se analisar os problemas que ocorrem com estes equipamentos e seus desdobramentos, deve-se inicialmente observar sua operação. Tais aparelhos, fornecidos por 2 fabricantes mas muito semelhantes em termos construtivos e desempenho, destinam-se à fusão da pasta de solda e depois à sua cura. Uma esteira conduz as placas provenientes das *pick-and-place* por dentro do túnel do forno. Dependendo do comprimento do forno, há mais de uma esteira, sendo estas montadas em série. Tais esteiras são movidas por motores DC, que acionam roletes. Atente-se para o fato de que tanto os motores quanto os roletes estão instalados em regiões quentes e a temperatura de um forno destes situa-se entre 150 °C e 210 °C, suficiente para deteriorar lubrificantes, principalmente graxas.

Para a consecução de uma boa soldagem, sem vazios, deformações ou trincas, a chamada rampa de temperatura deve ser cuidadosamente programada (responsabilidade da Engenharia de Produto) e mantida (responsabilidade da Manutenção). Os fornos em questão possuem 3 zonas de aquecimento e qual será a de maior temperatura depende do tipo de solda (dificuldade maior para se determinar esta rampa se observa no caso das soldas sem chumbo – *lead free* – as quais passam a ser obrigatórias em muitos países, sobretudo os da Comunidade Européia, no correr de 2004), em geral, a zona de entrada é a mais quente, pois a solda ainda está em pasta e deve fundir-se rapidamente, havendo a interferência do ar externo.

Durante o processo de soldagem, há a liberação de vapores metálicos e de outras substâncias, na forma de resíduos líquidos ou que se condensam após resfriarem-se no interior do duto de exaustão e retornam, devendo ser coletados e

*CARDOSO (2004)*

periodicamente removidos. Este fenômeno é a causa-raiz de grande parte dos problemas observados nos fornos, porque nem todo o vapor é removido pela exaustão e se acumula sobre motores, eixos, mancais (cuja blindagem acaba atacada pelas substâncias), ventiladores e resistências elétricas de aquecimento. Ao se condensar, certas substâncias se tornam viscosas e pegajosas, chegando e travar eixos, motores e mancais, sobretudo os roletes das esteiras. Uma vez condensados, estes resíduos não se tornam gasosos com a elevação da temperatura, portanto, além de sobrecarregarem os elementos mecânicos, há a contribuição do efeito do superaquecimento dos componentes. O autor já observou casos em que alguns roletes travam, deixam de girar e acabam sendo destruídos porque os motores DC não param de girar, danificando inclusive seus suportes, bem como os alojamentos dos motores, esteira e tudo o mais que estiver adiante da falha.

Algumas linhas operam 6 dias por semana em regime de 3 turnos, e é comum em alguns meses como Janeiro, Agosto, Outubro, Novembro e Dezembro, a linha operar 7 dias por semana em 3 turnos. Para limpar (e para executar qualquer intervenção de manutenção), deve-se aguardar o forno esfriar (o mesmo tem cerca de 5 metros de extensão), o que leva mais de 3 horas. A limpeza é demorada, envolve solventes e às vezes é necessário remover exaustores e seus dutos, pois são os primeiros a sofrerem a ação dos vapores e resíduos e terem seu desempenho reduzido. Já houve casos de serem “puladas” 10 semanas de manutenção preventiva, sendo que a dos fornos tem escopo semanal, ficando para as mensais a inspeção e limpeza de dutos e acessórios.

Além dos problemas em componentes mecânicos, sempre bastante graves, tem-se ainda efeitos negativos do acúmulo de resíduos sobre as resistências de

CARDOSO (2004)

aquecimento. Estando cobertas por impurezas, as resistências necessitam cada vez mais corrente para manterem a temperatura programada e próximo aos 210 °C, torna-se quase impossível manter este valor. Além do mais, sempre há o risco de incêndio, que não se propaga, mas destrói as resistências, fiação, sensores e suportes. Operando sob correntes acima do especificado, as resistências se degradam muito mais rapidamente, como citam CARDOSO (2000) e CARDOSO et al (2002) referindo-se a testes acelerados, exigindo intervenções mais freqüentes da manutenção. Outro problema é que, ao ser atingido um valor máximo, o controlador do forno (do tipo PLC – do inglês *Programmable Logical Controller* – ou Controlador Lógico Programável) cessa o fornecimento de corrente para aquela resistência e emite uma mensagem de erro. Após certa quantidade de mensagens, o controlador pára a operação do forno, o que é salutar para evitar que placas defeituosas prossigam na linha de montagem.

Os efeitos da temperatura sobre as placas podem ser :

- ausência de fusão da pasta de solda e conseqüente soltura de alguns componentes se a temperatura estiver muito baixa ou a esteira estiver avançando rápido demais, como citado por HWANG et al (2003);
- ebulição da pasta e formação de vazios se a temperatura estiver muito acima do programado ou se houver fogo no interior do forno;
- solda quebradiça, favorecendo o surgimento de trincas na interface BGA/Placa, sobretudo quando o telefone vier a sofrer flexão, torção e principalmente quedas.

Portanto, as falhas nos fornos podem refletir diretamente nos produtos, pois não são realizados testes mecânicos devido à sua complexidade e os testadores não avaliam a qualidade da solda. Se algum ponto deixar de ser soldado e fizer com que a função a ser testada falhe, a placa é descartada. Se a função não falhar, o produto vai para o mercado e terá vida útil reduzida, já que a solda apresentará baixa resistência mecânica e romper-se-á com facilidade, alimentando os US\$20 milhões anuais que a empresa despende à guisa de garantia.

A Figura 8.19 mostra o Diagrama Causa-Conseqüência para falha nos componentes mecânicos do forno. A Figura 8.20 mostra o Diagrama para falha das resistências.

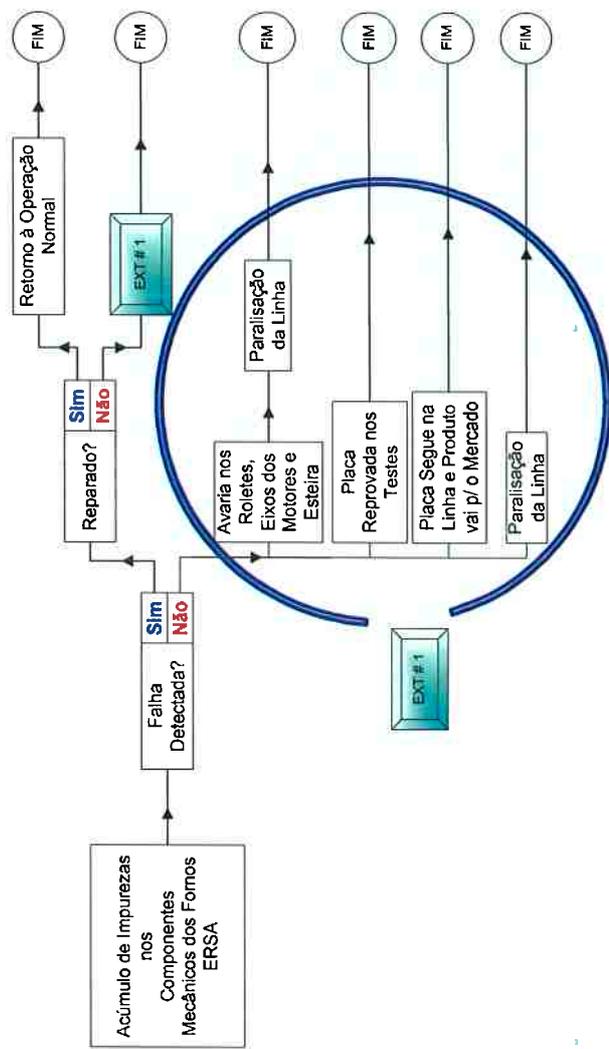


Figura 8.19 - Diagrama Causa-Consequência para Acúmulo de Impurezas Sobre Componentes Mecânicos dos Fornos ERSAs®

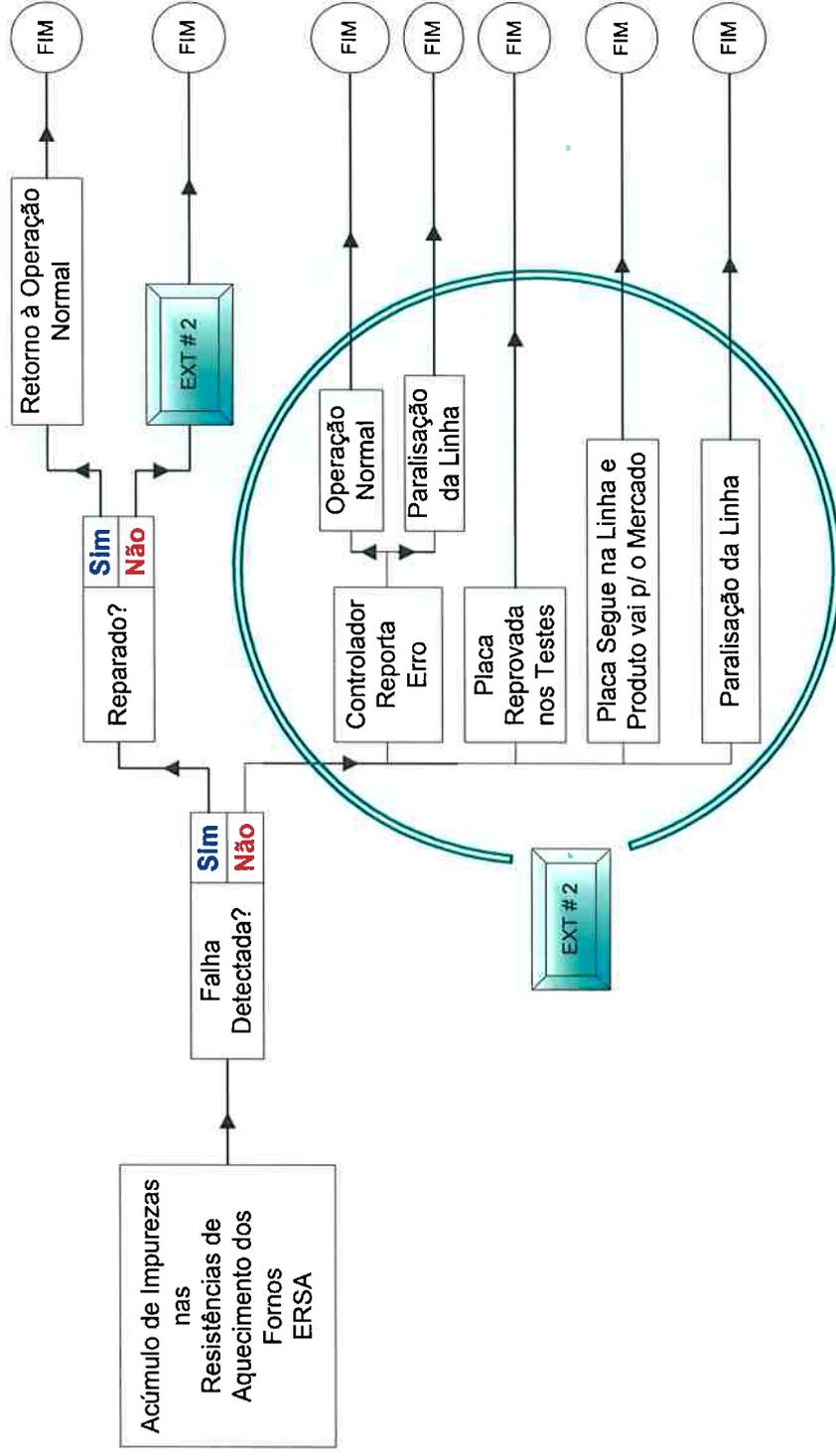


Figura 8.20 – Diagrama Causa-Consequência para Falha por Acúmulo de Impureza sobre Resistências Elétricas de Aquecimento dos

Fornos ERSAs®

### 8.3.2 - Falhas na Seção *ROUTERS*

A próxima seção a ser analisada, dentro da Linha 3, e sobre a qual se aplicará o método proposto por este trabalho é a denominada *ROUTER*, assim chamada em virtude da utilização das fresadoras ultra-rápidas cujos fabricantes adotam este nome, em virtude da operação de separação das placas ser, em inglês, designada por *route*. A Figura 8.21 mostra uma máquina deste tipo.



Figura 8.21 – Máquina *ROUTER* Analisada, do Fabricante PMJ, Modelo HiSAC 1000

Embora sejam máquinas muito mais simples que as *pick-and-place*, as falhas em *routers* são as mais frequentes, crônicas e algumas vezes, as que demandam mais tempo para serem solucionadas.

Em termos de extensão dos danos relacionados às causas-raízes, as *routers* se revelam as mais suscetíveis de sofrerem avarias severas devido a falhas e, o que é pior, a faltas (*faults*) relacionadas ao programa de controle.

A Figura 8.22 mostra o diagrama de blocos de uma máquina deste tipo, fabricada pela empresa PMJ. O Diagrama Causa-Conseqüência, apresentado na Figura 8.23, leva em conta falhas iniciadas nas próprias *ROUTERS* e também falhas oriundas de SMD.

As falhas nas *ROUTERS* não produzem efeitos de propagação na Linha em termos de danos a outros equipamentos, nem em termos de remeter placas defeituosas às seções finais. Entretanto paralisam a linha e há ainda um outro ponto a ser considerado : algumas falhas das *ROUTERS* são resultado de falhas de equipamentos de SMD, não diretamente, mas porque, como já explicado, esta seção (SMD) pode remeter às *ROUTERS* placas defeituosas que provoquem desde quebra da fresa, mostrada na Figura 8.24, até o travamento de cabeçotes e fixadores, mostrados na Figura 8.25, podendo culminar na destruição de subsistemas inteiros.

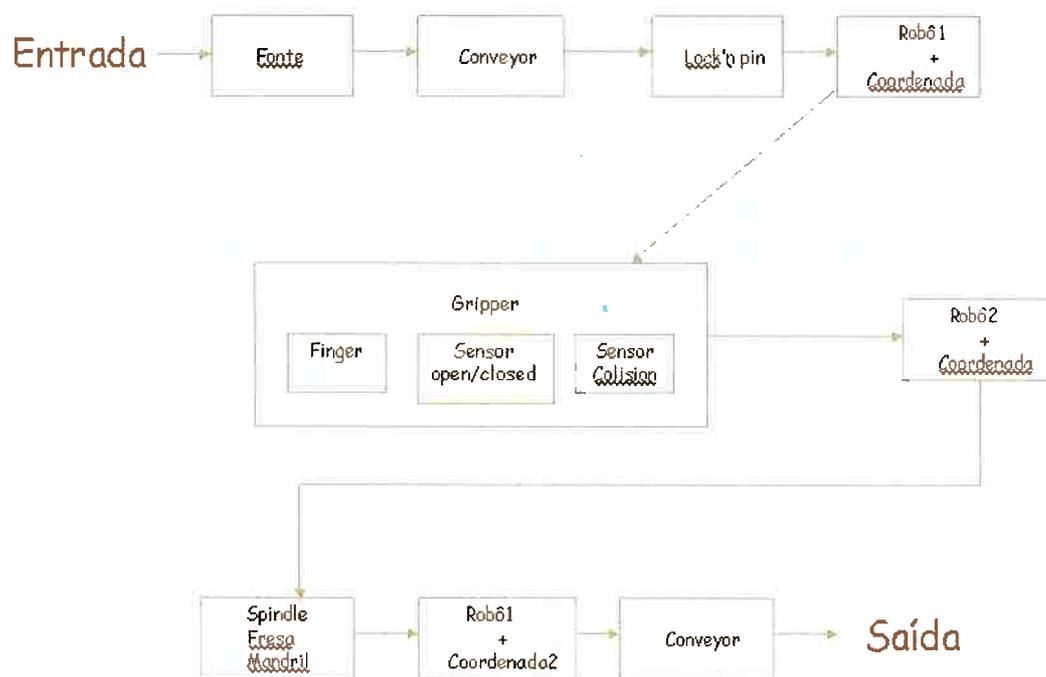


Figura 8.22 – Diagrama de Blocos da Máquina *ROUTER* HiSAC 1000 BR

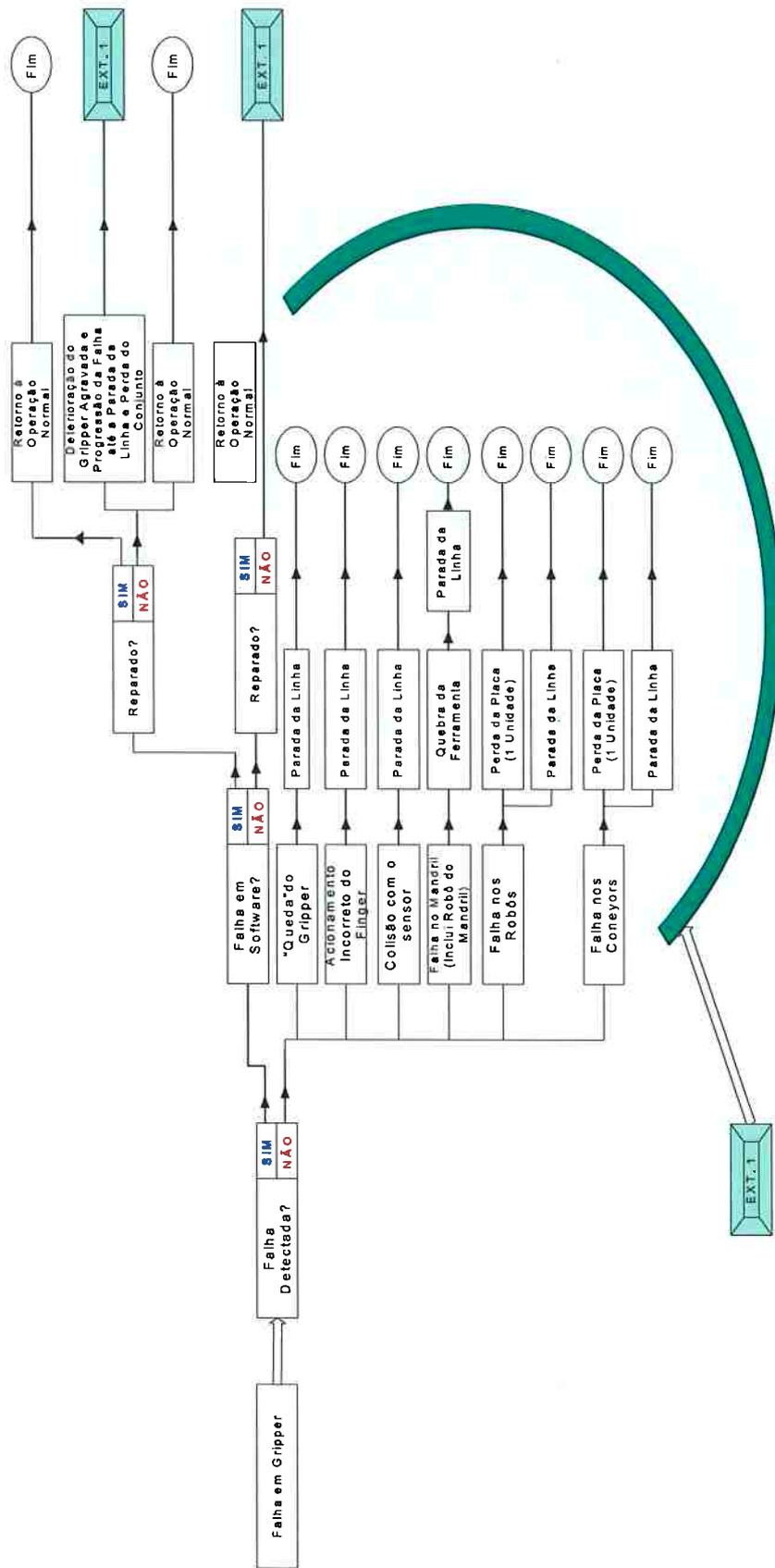


Figura 8.23 – Diagrama Causa-Conseqüência para Falhas da Máquina ROUTER MiSAC 1000 BR

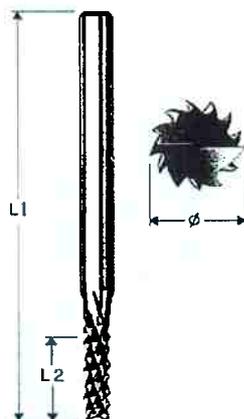


Figura 8.24 – Modelo de Fresa Utilizada Nas *ROUTERS*

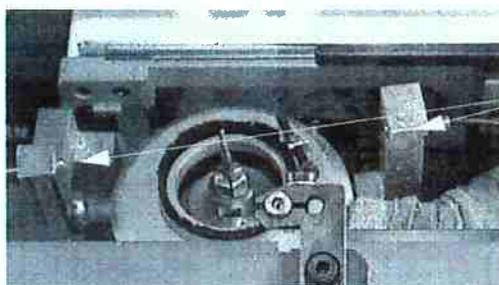


Figura 8.25 – Cabeçote para Montagem da Fresa da *ROUTER* HiSAC

### 8.3.3 - Falhas em Transportadores da Seção de Reparo (Repair Conveyor JOT)

Ao final da seção *ROUTER*, encontram-se – em algumas linhas – transportadores (*conveyors*) que dirigem as placas adiante na própria linha para montagem final e testes, ou para eventual reparo.

Estas unidades manipulam placas já separadas e cortadas pelas *ROUTERS*, acopladas a um sistema de reconhecimento semelhante ao reconhecimento óptico das *pick-and-place*. Na eventualidade de serem constatados erros no corte/separação das placas ou que componentes tenham sido acidentalmente removidos,

o *conveyor* é acionado para enviar a placa adiante ou encaminhar para a seção de testes. Novamente, falhas de programa ou de reconhecimento óptico não serão abordadas por este trabalho, em virtude das razões já expostas, entretanto, as falhas por desgaste ou fadiga de componentes mecânicos são impactantes em sua operação e desempenho. A Figura 8.26 mostra o diagrama causa-conseqüência relativo a tais falhas.

Embora não introduza falhas nas placas e por conseguinte nos produtos, há uma situação em especial onde se deve descartá-los : o empilhamento ou remonte acidental devido a problemas de sincronismo. Avarias nas correias dentadas ou nos motores de passo, além de problemas oriundos dos programas, podem causar erros na execução dos passos do programa do controlador, fazendo com que a placa que está na saída lá permaneça, enquanto placas analisadas e reconhecidas são roteadas. Em condições normais e operando integrados às *ROUTERS*, este fato não ocorre, mas se as correias patinarem ou se os motores de passo e encoders responderem incorretamente, é possível que este evento ocorra.

Se isto vier a acontecer, não se pode assegurar que a placa continua íntegra, sendo mais seguro descartá-las. A cadência de produção permite que se consiga fazer este expurgo manualmente e em caso de empilhamento acidental, um alarme é disparado (a máquina deveria parar de operar, mas falhas de programa comumente inativam esta habilidade). Não é uma falha que cause grandes impactos

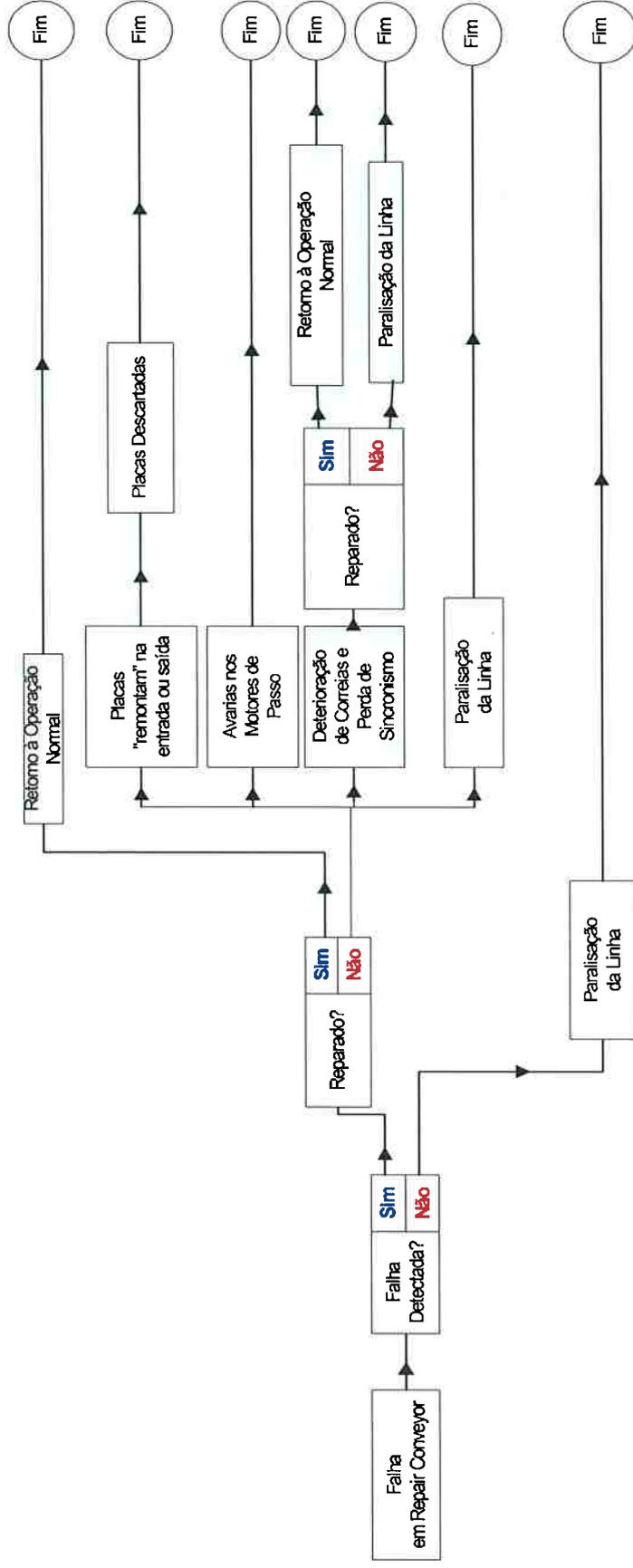


Figura 8.26 - Diagrama Causa-Consequência para Falha no Repair Conveyor

#### **8.4 - Cálculo das Probabilidades de Falha para a Comparação e Seleção das Políticas de Manutenção para SMD e ROUTER**

Verificadas as conseqüências das falhas listadas anteriormente, deve-se – de forma a continuar a aplicação do método proposto – construir as árvores de decisão. Para o cumprimento deste requisito, é necessário executar a etapa de **Cálculo das probabilidades de falha relacionadas à situação analisada (anterior)**, como indicado no item 7.4, o que é feito neste item.

Um problema da linha de produção pesquisada, é que apenas poucos itens realmente estavam sujeitos à manutenção preventiva da forma como planejada. Então, o que se notou foi uma predominância no emprego da manutenção corretiva pura. A Tabela 8.1 mostra, para a Linha 3, períodos de até 5 semanas sem que as intervenções planejadas ocorressem, ou seja, foram “puladas”. Portanto, na maioria dos casos nem mesmo se poderia auferir qual a probabilidade de falha associada à manutenção preventiva (quando indicada) ou mesmo à manutenção preditiva (embora este não seja o caso das máquinas da linha em questão em virtude dos modos de falha esperados).

Logo, o que se deve fazer é determinar a situação operacional vigente, ou seja, qual a probabilidade de ocorrência das falhas sob a política de manutenção em vigor, ajustar esta política e verificar a nova probabilidade de falhas, aí sim, construindo-se as árvores de decisão e avaliando-se os efeitos da decisão por uma ou outra política.

A coleta dos dados se deu entre março e julho de 2003 (semanas – simbolizadas por W 10 a 29), sendo os dados armazenados em um aplicativo utilizado pela empresa denominado MP2<sup>®</sup>.

Pela estrutura de documentação deste aplicativo, resgatar os dados é simples, mas manipulá-los é bastante laborioso, mesmo porque não se consegue copiá-los diretamente para

uma planilha. Assim, os dados relativos às falhas selecionadas foram copiados para uma planilha normal e a partir deles se calculou as probabilidades de falha.

A Tabela 8.2 mostra um exemplo de relatório de dados de falha, a Tabela 8.3 mostra quais os modos de falha pesquisados e suas descrições e a Tabela 8.4 mostra os resultados finais, em termos de quantidade de falhas observadas no período da pesquisa, para um modo de falha considerado por equipamento (por unidade, não por tipo de equipamento). A Figura 8.27 mostra esquematicamente a linha analisada em termos dos equipamentos das seções SMD e *ROUTER*.

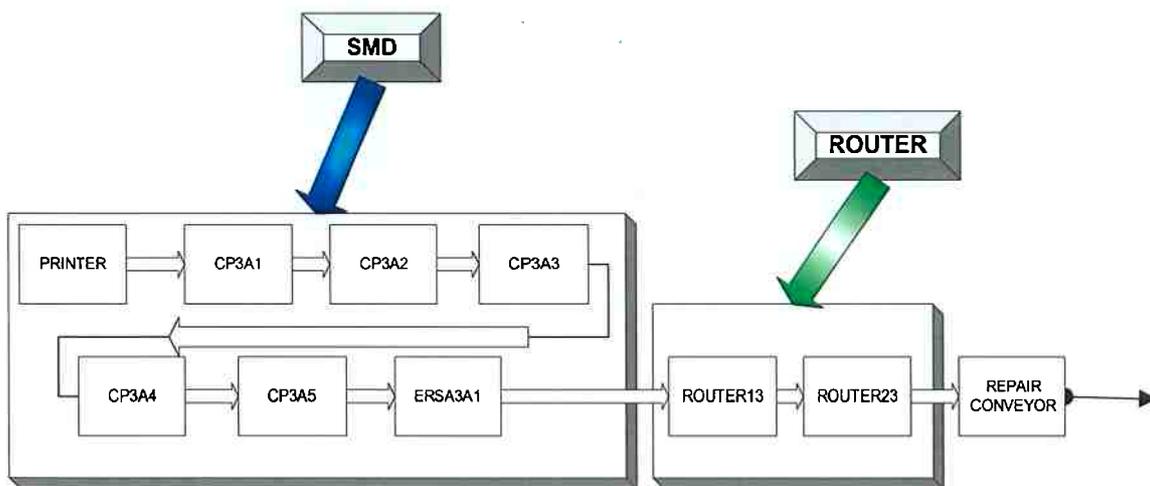


Figura 8.27 – Representação Esquemática da Linha 3 em Função dos Equipamentos de SMD e *ROUTER*



Tabela 8.2 – Forma de Arquivar Dados de Falhas na Empresa Analisada

WONUM	CLOSEDATE	EQNUM	LOCATION	TEXTS
0000083062	03/14/2003	MPM3A1	Linha 3	Troca do stencil; level squeegee; stencil height; board stop position; OK.
0000083324	03/17/2003	MPM3A1	Linha 3	antes desse acionamento, já havia atuado nessa máquina e aplicado um offset em Y-, o qual funcionou por certo tempo, ao retornar o defeito, foi feito o alinhamento da câmera reset da máquina e verificado a printagem.
0000083764	03/19/2003	MPM3A1	Linha 3	Reset no equipamento
0000083920	03/20/2003	MPM3A1	Linha 3	Reset no equipamento
0000084236	03/24/2003	MPM3A1	Linha 3	troca do relé de dispenser
0000085612	04/04/2003	MPM3A1	Linha 3	Feito várias ações porém o problema persistia. A solução veio após troca do stencil. Stencil que estava foi posto p/ lavagem.
0000085824	04/08/2003	MPM3A1	Linha 3	limpeza do stencil / level squeegee.
0000085990	04/06/2003	MPM3A1	Linha 3	Foi réfeito o device lay out e stencil adjust.
0000091298	05/07/2003	MPM3A1	Linha 3	Depois de muita analise, foi constatado que o problema estava no motor da camera X.
0000091611	05/09/2003	MPM3A1	Linha 3	stencil hight e level squeege, com ajuda manual
0000092696	05/14/2003	MPM3A1	Linha 3	Foi feito novamente o device layout e reset do equipamento.

Tabela 8.3 – Descrição dos Modos de Falha Pesquisados

Equipamento	Modo de Falha	Descrição
CP3A1	1	Falha em acionar ar comprimido para expulsão do componente
CP3A1	2	Falha em acionar vácuo para captura do componente
CP3A1	3	Desgaste, imprecisão de montagem e vibração
CP3A2	1	Falha em acionar ar comprimido para expulsão do componente
CP3A2	2	Falha em acionar vácuo para captura do componente
CP3A2	3	Desgaste, imprecisão de montagem e vibração
CP3A3	1	Falha em acionar ar comprimido para expulsão do componente
CP3A3	2	Falha em acionar vácuo para captura do componente
CP3A3	3	Desgaste, imprecisão de montagem e vibração
ERSA3A1	1	Avárias em resistência Elétrica devido a acúmulo de impurezas
ERSA3A1	2	Avárias em componentes mecânicos devido a acúmulo de impurezas
REPAIR Conveyor JOT 2M L3	1	Desgaste de Componentes Mecânicos
ROUTER 13	1	Falhas no gripper e suas extensões
ROUTER 23	1	Falhas no gripper e suas extensões

Cabe aqui uma breve explicação da estrutura de codificação das máquinas nas linhas da empresa analisada. As primeiras letras das máquinas da seção SMD representam – de forma simplificada – o nome comercial e o modelo do equipamento (assim, uma máquina modelo CP7 passa a ser designada simplesmente por **CP**, por sua vez, um forno modelo ERSA<sup>®</sup> passa a ser designado apenas por **ERSA**). O primeiro algarismo que surge no código refere-se à linha em que está operando a máquina, no caso a linha 3. Máquinas SMD montam

um lado da placa por vez (até porque não se pode expor à nova operação de soldagem uma face parcialmente concluída, ou seja, monta-se uma face por vez, independente de quanto tempo isto venha a consumir). A próxima letra refere-se justamente à face da placa que a máquina está designada para montar, no caso em questão, o lado A (não há outro carácter que não seja A ou B). O último algarismo refere-se à posição e quantidade de equipamentos idênticos na mesma linha. No caso analisado, há 1 impressora, 1 forno ERSA®, 5 máquinas CP7 e 2 ROUTER. A codificação das ROUTERS obedece a uma lógica diferente : como o tipo de equipamento é sempre o mesmo para a linha (embora linhas diferentes possam utilizar ROUTERS de diferentes marcas e modelos, desde que para cada linha sejam idênticas), a nomenclatura se inicia com ROUTER, o dígito numérico seguinte indica qual a posição da máquina e o último dígito indica a linha.

Tabela 8.4 – Histórico das Falhas Ocasionada por um Modo de Falha por Equipamento

EQUIPAMENTO	FALHAS
CP3A1modo1	20
CP3A2modo1	22
CP3A3modo1	30
CP3A4modo1	20
CP3A5modo1	27
CP3A1modo2	25
CP3A2modo2	18
CP3A3modo2	23
CP3A4modo2	21
CP3A5modo2	27
CP3A1modo3	5
CP3A2modo3	3
CP3A3modo3	3
CP3A4modo3	2
CP3A5modo3	3
ERSA3A1modo1	16
ERSA3A1modo2	13
REPAIR CONVEYOR JOT 2M - L3	3
Router 13	21
Router 23	58
<b>TOTAL NO PERÍODO</b>	<b>217</b>

Tabela 8.5a - Distribuição das Falhas por Modo (1) nos Períodos (Quinzenas)

Período / Máquina	CP3A1mod1	CP3A2mod1	CP3A3mod1	CP3A4mod1	CP3A5mod1	ERSA3A1
1 (W10/11)	2	0	2	2	1	0
2 (W12/13)	3	2	1	0	3	1
3 (W14/15)	2	3	3	0	2	3
4 (W16/17)	2	3	4	4	3	1
5 (W18/19)	1	3	3	3	2	0
6 (W20/21)	3	3	3	3	4	2
7 (W22/23)	3	4	4	2	3	3
8 (W24/25)	2	2	4	3	4	2
9 (W26/27)	2	0	3	1	3	3
10 (W28/29)	0	2	3	2	2	2
<b>Total</b>	20	22	30	20	27	17

Tabela 8.5b - Distribuição das Falhas por Modo (2) nos Períodos (Quinzenas)

Período / Máquina	CP3A1mod2	CP3A2mod2	CP3A3mod2	CP3A4mod2	CP3A5mod2	ERSA3A1mod2
1	3	2	1	1	2	1
2	3	2	3	2	3	1
3	2	1	2	1	3	2
4	2	3	3	2	2	1
5	3	2	2	3	2	2
6	2	2	3	2	3	0
7	3	1	2	2	2	1
8	1	2	3	3	3	2
9	2	1	2	3	3	1
10	3	2	2	2	3	2
<b>Total</b>	24	18	23	21	26	13

Tabela 8.5 c – Distribuição das Falhas por Modo (3) ao Longo dos Períodos

Período / Máquina	CP3A1mod3	CP3A2mod3	CP3A3mod3	CP3A4mod3	CP3A5mod3
1	1.000	0.000	0.000	0.000	1.000
2	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000
3	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000
4	0.000	0.000	1.000	0.000	1.000
5	2.000	1.000	0.000	0.000	0.000
6	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
7	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
8	1.000	1.000	1.000	1.000	0.000
9	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000
10	1.000	0.000	0.000	0.000	1.000
<b>Total de Falhas</b>	5	3	3	2	3

Tabela 8.5d \_ Distribuição das Falhas por Modo para ROUTERS e CONVEYOR

Período / Máquina	REPAIR CONVEYOR JOT 2M-L3	Router 13	Router 23
1	1.000	2.000	3.000
2	0.000	2.000	7.000
3	0.000	1.000	3.000
4	0.000	3.000	5.000
5	0.000	2.000	2.000
6	0.000	3.000	12.000
7	0.000	2.000	10.000
8	1.000	4.000	5.000
9	0.000	2.000	9.000
10	1.000	0.000	2.000
<b>Total de Falhas</b>	3	21	58

A partir da análise dos dados de falha de cada máquina empregada na linha 3 e da classificação conforme indicado na Tabela 8.4, pode-se analisar a distribuição temporal da ocorrência destas falhas, por máquina e por modo de falha. Para a execução desta análise, dividiu-se o número total de falhas em número de ocorrências por quinzena. Justifica-se esta análise quinzenal em virtude da política de divisão dos lotes a serem produzidos, por parte da empresa analisada. Em geral, se nenhum evento impedir, os lotes são fechados a cada 15 dias, especialmente para exportação (caso da linha estudada). Isto explica, em parte, a

impossibilidade da execução das revisões semanais registradas em vermelho na Tabela 8.1. Então, qualquer intervenção planejada da manutenção contempla um horizonte múltiplo de 15 dias. Este fato, por um lado, norteia a periodicidade a ser atribuída às políticas de manutenção, por outro, impõe um certo nível de risco, já que a vida útil dos itens controlados cujos modos de falha é governada pelas causas-raízes pesquisadas e expostas nos diagramas causa-conseqüência, sem nenhum compromisso em se revelarem a cada 15 dias ou múltiplos. Cabe salientar que mesmo dentro deste nível de risco, é esperado que o mesmo seja mínimo, adotada a política de manutenção adequada. Os dados relativos à distribuição das falhas por modo e por equipamento são expostos nas Tabelas 8.5a a 8.5d.

De posse dos dados acima referenciados, procede-se ao cálculo da probabilidade de ocorrência de um dado modo de falha, por máquina, em cada uma das 10 quinzenas que constituíram o período de coleta de dados.

Considerando-se que ao longo do período analisado foram executadas quase que exclusivamente intervenções corretivas, pode-se supor que a distribuição de falhas não apresenta uma tendência definida, seja ela de crescimento ou redução ao longo do tempo.

A partir desta hipótese, confirmada pela análise dos dados constantes da Tabela 8.4, pode-se calcular a taxa média de ocorrência de um dado modo de falha por período de operação, correspondendo a uma quinzena, pela relação mostrada na Equação 8.1:

$$(Taxa \ de \ Ocorrência \ de \ um \ Dado \ Modo \ de \ Falha) = \frac{N^{\circ} \ total \ de \ falhas \ em \ 10 \ quinzenas}{10 \ quinzenas} \quad (8.1)$$

Considerando-se que esta taxa de ocorrência de um dado modo de falha seja constante, pode-se assumir que a probabilidade de ocorrência de um determinado número de falhas –

conforme um modo específico – em uma quinzena possa ser representada pela expressão da Equação 8.2.

$$p(X) = \frac{\lambda^X e^{-\lambda}}{x!} \quad (8.2)$$

Na equação acima,  $\lambda$  é a taxa de ocorrência de um dado modo de falha em uma quinzena de operação, calculado conforme a expressão 8.1 e X é o número de falhas na quinzena.

Empregando-se esta distribuição, pode-se calcular a probabilidade de ocorrência de uma falha de cada um dos equipamentos da linha em estudo, conforme um modo de falha específico. Assumindo-se que em caso de ocorrência de falha já se caracteriza a necessidade de intervenção da manutenção no equipamento, esta probabilidade deve ser utilizada para análise da viabilidade de alteração da política de manutenção do mesmo. Na verdade, o que se quer quantificar é a probabilidade de haver uma falha em uma quinzena, pois deseja-se evitar a ocorrência da mesma.

Em 10 quinzenas deve-se calcular a taxa de ocorrência de falhas ( $\lambda$ ) por quinzena, que é o número de falhas observados em 10 quinzenas – período durante o qual se procedeu às observações iniciais - dividido por 10.

Com esta taxa de ocorrência de falhas, modela-se a probabilidade de haver um certo número de falhas em uma quinzena com a distribuição de Poisson, como indicado por CARDOSO (2000), mostrando-se a forma geral de tal modelo na Equação 8.2.

Para o caso em estudo, deseja-se a probabilidade de ocorrência de uma falha, ou seja fazemos  $X=1$ . Queremos de uma falha, pois a manutenção sempre entrará em ação com a ocorrência de uma falha, o que já paralisa a linha em muitos dos casos expostos. Claro que se ocorrerem mais de uma falha, a manutenção entra em ação. Porém se a política de

manutenção for correta, quando reduz-se a probabilidade de ocorrência de uma falha, reduz-se a probabilidade de ocorrência de mais falhas no período.

Na Tabelas 8.6a a 8.6d indica-se a proporção de ocorrência de um dado modo de falha para os equipamentos em análise por quinzena. Para obter a probabilidade experimental, deve-se contar o número de períodos em que houve 1 falha em 10 quinzenas, dividindo-se este total por 10.

A Figura 8.28 mostra o histograma contendo a proporção de ocorrência de falhas por quinzena, baseado no comportamento das falhas da máquina CP-7 (máquina CP3A3), modo de falha 1. A partir destas ocorrências se calcula a taxa de ocorrência ( $\lambda$ ). Nota-se que não é correto associar uma distribuição a este histograma, haja visto a variável aleatória não ser a quantidade de quinzenas (tempo). A idéia é, a partir destas proporções, calcular a probabilidade de haver uma falha em uma quinzena.

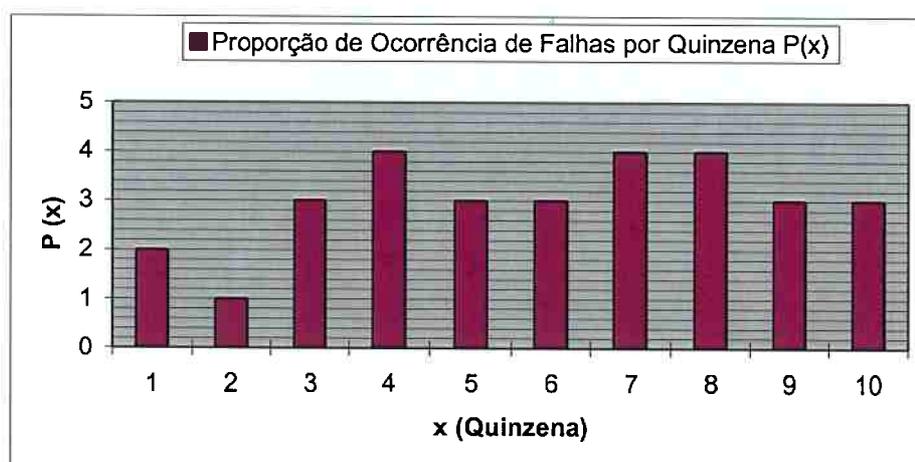


Figura 8.28 – Histograma Contendo a Proporção de Ocorrência de Falhas por Quinzena para Máquina CP3A3 Modo de Falha 1

Tabela 8.6a - Proporção de Falhas ao Longo dos Períodos (Quinzenas)

Período / Máquina	CP3A1mod1	CP3A2mod1	CP3A3mod1	CP3A4mod1	CP3A5mod1	ERSA3A1
1	0.100	0.000	0.067	0.100	0.037	0.000
2	0.150	0.091	0.033	0.000	0.111	0.063
3	0.100	0.136	0.100	0.000	0.074	0.188
4	0.100	0.136	0.133	0.200	0.111	0.063
5	0.050	0.136	0.100	0.150	0.074	0.000
6	0.150	0.136	0.100	0.150	0.148	0.125
7	0.150	0.182	0.133	0.100	0.111	0.188
8	0.100	0.091	0.133	0.150	0.148	0.063
9	0.100	0.000	0.100	0.050	0.111	0.188
10	0.000	0.091	0.100	0.100	0.074	0.125
<i>P<sub>méd</sub></i>	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.099997	0.1000

Tabela 8.6b – Proporção de Falhas ao longo dos períodos (Quinzenas), Modo de Falha 2

Período / Máquina	CP3A1mod2	CP3A2mod2	CP3A3mod2	CP3A4mod2	CP3A5mod2	ERSA3A1mod2
1	0.125	0.111	0.043	0.048	0.077	0.077
2	0.125	0.111	0.130	0.095	0.115	0.077
3	0.083	0.056	0.087	0.048	0.115	0.154
4	0.083	0.167	0.130	0.095	0.077	0.077
5	0.125	0.111	0.087	0.143	0.077	0.154
6	0.083	0.111	0.130	0.095	0.115	0.000
7	0.125	0.056	0.087	0.095	0.077	0.077
8	0.042	0.111	0.130	0.143	0.115	0.154
9	0.083	0.056	0.087	0.143	0.115	0.077
10	0.125	0.111	0.087	0.095	0.115	0.154
<i>P<sub>méd</sub></i>	0.1000	0.1001	0.0998	0.1000	0.099800	0.1111

Tabela 8.6 c – Proporção de Falhas ao longo dos períodos (Quinzenas) Modo de Falha 3

Período / Máquina	CP3A1mod3	CP3A2mod3	CP3A3mod3	CP3A4mod3	CP3A5mod3
1	0.200	0.000	0.000	0.000	0.333
2	0.000	0.000	0.000	0.500	0.000
3	0.000	0.000	0.333	0.000	0.000
4	0.000	0.000	0.333	0.000	0.333
5	0.400	0.333	0.000	0.000	0.000
6	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
7	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
8	0.200	0.333	0.333	0.500	0.000
9	0.000	0.333	0.000	0.000	0.000
10	0.200	0.000	0.000	0.000	0.333
<i>Total de Falhas</i>	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1

Tabela 8.6d – Proporção de Falhas ao longo dos períodos (Quinzenas) para Repair Conveyor e Router

Período / Máquina	REPAIR CONVEYOR JOT 2M-L3	Router 13	Router 23
1	0.333	0.095	0.052
2	0.000	0.095	0.121
3	0.000	0.048	0.052
4	0.000	0.143	0.086
5	0.000	0.095	0.034
6	0.000	0.143	0.207
7	0.000	0.095	0.172
8	0.333	0.190	0.086
9	0.000	0.095	0.155
10	0.333	0.000	0.034
$P_{méd}$	0.1	0.1	0.1

As Tabelas 8.7a a 8.7d mostram as estimativas de probabilidades de falha calculadas a partir dos dados das falhas obtidos nas 10 quinzenas, utilizando-se a distribuição de POISSON.

Tabela 8.7a – Taxas de Ocorrência de Falha e Probabilidade de Falha Média para o Período de 15 dias, Modo de Falha 1

	CP3A1mod1	CP3A2mod1	CP3A3mod1	CP3A4mod1	CP3A5mod1	ERSA3A1mod1
$\lambda$	2	2.2	3	2	2.7	1.7
Pfalha	0.2707	0.2438	0.1494	0.2707	0.1815	0.3106
Pexperimental	0.1000	0.0000	0.1000	0.1000	0.1000	0.2000

Tabela 8.7 b - Taxas de Ocorrência de Falha e Probabilidade de Falha Média para o Período de 15 dias, Modo de Falha 2

	CP3A1mod2	CP3A2mod2	CP3A3mod2	CP3A4mod2	CP3A5mod2	ERSA3A1mod2
$\lambda$	2.4	1.8	2.3	2.1	2.6	1.3
Pfalha	0.2177	0.2975	0.2306	0.2572	0.1931	0.3543
Pexperimental	0.1	0.3	0.1	0.2	0	0.5

Tabela 8.7 c - Taxas de Ocorrência de Falha e Probabilidade de Falha Média para o Período de 15 dias, Modo de Falha 3

	CP3A1mod3	CP3A2mod3	CP3A3mod3	CP3A4mod3	CP3A5mod3
$\lambda$	0.5	0.3	0.3	0.2	0.3
Pfalha	0.3033	0.2222	0.2222	0.1637	0.2222
Pexperimental	0.3000	0.3000	0.3000	0.2000	0.3000

Tabela 8.7 d - Taxas de Ocorrência de Falha e Probabilidade de Falha Média para o Período de 15 dias, Falhas dos Conveyors e ROUTERS

	Repair Conveyor JOT 2M-L3	Router 13	Router 23
$\lambda$	0.3	2.1	5.8
Pfalha	0.2222	0.2572	0.0176
Pexperimental	0.3000	0.1000	0.0000

A análise da probabilidade da ocorrência de uma falha – conforme um modo específico – em uma quinzena é adequadamente simulada com o emprego da distribuição de POISSON.

Como ressalva, pode-se citar o modo de falha 3 (mod3) das máquinas *pick-and-place*, CP3, pois obteve-se, no período estudado, um número reduzido de falhas, fato que reduz a precisão da análise probabilística. Entretanto, para efeito de comparação com as frequências de falha observadas com a implantação da nova política de manutenção, este resultado pode ser considerado satisfatório.

Ressalta-se que a Tabela 8.2 mostra como é laborioso aproveitar os dados das ordens de serviço arquivadas para uso da manutenção. Em primeiro lugar, porque a descrição das falhas é imprecisa e sujeita a erros conceituais gritantes, tais como atribuir a componentes mecânicos, falhas oriundas do controlador, como é bastante comum em motores de passo.

Por esta razão, passou a utilizar, para a coleta de dados, o formulário proposto na Tabela 4.4, o qual permite levantar as informações necessárias para a aplicação do método proposto neste trabalho. Desta forma, a tabulação dos dados passou a ser padronizada e calcular as probabilidades acumuladas de falha e taxas de falha (esta última destinando-se a nortear as práticas de manutenção indicadas para a situação em análise).

Uma análise das tabelas para tratamento dos dados relativos às falhas construídas, permitiu observar que embora haja uma intenção de se aplicar a manutenção preventiva, a mesma não era efetivamente aplicada, como já provado pela Tabela 8.1, pois na maioria dos casos notou-se um acentuado aumento na taxa de ocorrência de falhas e, após uma intervenção, a mesma retornava a seus valores anteriores. Também considerando-se a Tabela 8.1 para a Linha 3, a qual apresenta períodos extensos sem que nenhuma ação de manutenção programada fosse levada a cabo, nota-se que em muitas máquinas, tais como as ROUTERS, após longos períodos em “vermelho” ou mesmo durante estes, há uma concentração elevada de falhas, como pode ser visto pela inspeção da Tabela 8.5d, no período 6 (semanas 20 e 21 de 2003). Um problema adicional diz respeito ao estado dos equipamentos : já no início do trabalho, os mesmos acumulavam um período de uso e, portanto, danos. Uma simplificação se fez necessária : considerar os equipamentos como novos (*as new*), pois não se poderia inferir conclusões a respeito de sua confiabilidade. Esta simplificação não interferiu com as análises, principalmente em SMD (onde os efeitos de propagação são naturalmente menores em virtude da natureza dos equipamentos, robustez dos mesmos e mesmo uma característica modular de seu projeto, que permite considerar independentes as falhas ocorridas), pois considerou-se componentes ou subsistemas, obedecendo à concepção do maquinário. Assim sendo, o subsistema, após reparo, pode ser considerado como novo e aplicar o método proposto se torna confiável.

## 8.5 - Proposta da Nova Política de manutenção: Subsídios para Elaboração das Árvores de Decisão

Nesta seção do trabalho, são executados os passos de **Emprego das alternativas elencadas e Cálculo das novas probabilidades de falha (possível revisão dos diagramas causa-conseqüência)**, conforme indicado em 7.4.

### 8.5.1 – Composição das Propostas de Planos de Manutenção Integrantes da Política a ser Adotada

A política de manutenção proposta neste trabalho leva em conta, conforme já citado por CARDOSO (2000), XENOS (1998), O'CONNOR (1986) e muitos outros autores e profissionais da área, a natureza dos modos de falha os quais acometem os equipamentos pesquisados. Para itens constantes dos manuais dos fabricantes dos equipamentos, procurou-se utilizar as especificações constantes nos mesmos, porém isto foi possível em uma minoria dos casos, pois os manuais não entram em detalhes sobre como remover, instalar e alinhar guias lineares ou fusos de esferas recirculantes, por exemplo. Tal fato justifica-se em parte porque há os já citados contratos de acionamento de “hot line”, em que os fornecedores efetuam tal tipo de intervenção, francamente aquém das necessidades da empresa, pois se realmente há a necessidade de tal recurso, este deve ser alocado de forma sistemática e não considerada como exceção ou como um evento excepcional, sujeito a custos associados ao serviço prestado.

Os modos de falha percebidos, até em virtude da seleção dos subsistemas pesquisados, são concernentes a sistemas mecânicos – predominantemente desgaste e fadiga -, portanto, sob condições de utilização conhecidas, tais como solicitações, taxa de utilização e ambiente, além da habilidade do operador (quando for o caso), a intervenção da manutenção fica baseada em assegurar as condições operacionais (o que começa com as óbvias políticas de limpeza e lubrificação), passando pelos ajustes e calibrações, chegando à lista de ações, com

as tarefas a serem executadas, componentes a serem substituídos e periodicidade. Tal como no período de observação, que indicou a periodicidade quinzenal para registro dos dados, a programação de produção da empresa analisada conduz a manutenção a se programar em intervalos múltiplos de quinze dias. Se de um lado esta periodicidade impõe limitações de uso aos equipamentos, por outro acaba com a inconveniência de planos semanais não cumpridos, isto porque lotes costumam ser fechados a cada quinze dias e entre novos lotes programa-se as intervenções, muito mais exequível que exigir a parada da máquina semanalmente e não se obter resultado positivo, tal como indicado na Tabela 8.1. É evidente que esta imposição da logística da empresa não governa a evolução das falhas dos equipamentos e isto se traduz na operação, ainda que as práticas adequadas sejam adotadas, com um certo nível de risco, esperado ser bem menor que o nível de risco observado na situação anterior. Este fato pode ser comprovado observando-se o reduzido número de falhas após a adoção da política de manutenção proposta : falhas candidatas à manutenção preventiva, mantidas as demais condições, deveriam ser totalmente debeladas, entretanto não é o que ocorre, não apenas porque nem sempre se pode intervir na periodicidade ideal (ou compatibilizar esta periodicidade com as “janelas quinzenais”), mas porque há fatores aleatórios determinando a ocorrência de falhas, correspondendo ao patamar da curva da banheira ou ao reduzido mas finito nível da taxa de falhas nas curvas associadas a componentes mecânicos, como citado por LEWIS (1986).

Com base nos modos de falha apontados na Tabela 8.3 e explorados na Seção 8.3 deste trabalho, baseando-se ainda nos conceitos de análise de confiabilidade e nos diagramas causa-consequência mostrados neste capítulo, cada modo de falha listado teve sua manutenção descrita em maiores detalhes, procurando conciliar as necessidades técnicas com as “janelas quinzenais”. Tal detalhamento é mostrado nas Tabelas 8.8a a 8.8d.

Tabela 8.8a - Políticas de Manutenção Sugeridas e Aplicadas para os Modos de Falha das Máquinas Posicionadoras tipo *Pick and Place*, marca FUJI, modelo CP-7

Equipamento	Modo de Falha	Política de Manutenção	Detalhamento
CP3	1	Preventiva <b>MPCP1</b> Corretiva Programada <b>MCPCP1</b>	Limpeza quinzenal dos bicos, substituindo se necessário (registrar bico substituído), teste quinzenal das válvulas, verificação da resposta, limpar e lubrificar carretéis, substituição de bicos, mangueiras e válvulas a cada 2000 horas (~6 quinzenas) conforme recomendações do fabricante, verificação dos sinais enviados pelo controlador. Verificação semanal do estado da linha de ar comprimido e <del>regulagem da pressão</del>
CP3	2	Preventiva <b>MPCP2</b> Corretiva Programada <b>MCPCP2</b>	Limpeza quinzenal dos bicos, substituindo se necessário (registrar bico substituído), teste quinzenal das válvulas, verificação da resposta, limpar e lubrificar carretéis, substituição de bicos, mangueiras e válvulas a cada 2000 horas (~6 quinzenas) conforme recomendações do fabricante, verificação dos sinais enviados pelo controlador. Verificação semanal do nível de óleo e pressão negativa (vácuo). Substituição de vedações das conexões a cada 2000 horas, limpeza de filtros quinzenal, substituição de filtros a cada 1000 horas, retirada e revisão das bombas de vácuo, com troca de todas as mangueiras e conexões a cada 5000 horas.
CP3	3	Preventiva <b>MPCP3</b>	Verificação quinzenal do estado de protetores (coifas) e quanto à presença de partículas de metal (usar barra imantada, conforme indicações do fabricante), alinhar em caso de haver excesso de partículas, substituir fusos se continuar a soltar partículas, substituição dos protetores a cada 1500 horas (aproximadamente mensal), lubrificação das guias lineares com graxa própria ("graxa para mecanismo") quinzenalmente, substituição das guias e fusos a cada 10000 horas (pode ser aproximado p/ anual), alinhar fusos após instalação, calibrar máquina após instalação de novos fusos (pode ser executado pelo fabricante, desde que planejado).

Tabela 8.8b - Políticas de Manutenção Sugeridas e Aplicadas para os Modos de Falha dos Fornos ERSA®

Equipamento	Modo de Falha	Política de Manutenção	Detalhamento
ERSA3A1	1	Preventiva MPES1 Corretiva Programada MCPES1	Abriu câmara do forno, examinar estado de roletes, esteira e guias. Jatear com detergente próprio, remover incrustações quinzenalmente. Substituir roletes que permanecerem travados, ajustar guias, verificar presença de parafusos quebrados, substituindo de imediato. Limpeza de dutos de exaustão mensal, limpeza do exaustor mensalmente, com troca da hélice ou fan se estes apresentarem trincas ou ausência de palhetas. Remover excesso de detergente e lubrificar com graxa apropriada. Substituição de roletes e esteira anualmente. Substituição de duto de exaustão semestralmente.
ERSA3A1	2	Preventiva MPES2 Corretiva Programada MCPES2	Examinar perfil do forno por meio de uso do analisador por infravermelho semanalmente, testar controlador quinzenalmente (sinais). Abrir câmara do forno quinzenalmente, verificar ocorrência de incêndio e testar alarmes, substituição dos sensores de fogo se houver sinais de incêndio, examinar funcionamento das resistências, examinar estado das resistências e jatear detergente apropriado, jatear ar comprimido para remover detergente e crosta e lavar com água. Substituição anual das resistências, substituição de fiação e conexões a cada 10000 horas.

Tabela 8.8c - Políticas de Manutenção Sugeridas e Aplicadas para a Falha em REPAIR

CONVEYOR JOT 2M

Equipamento	Modo de Falha	Política de Manutenção	Descrição
REPAIR CONVEYOR JOT 2M	1	Preventiva MPCV	Ajuste quinzenal das guias executando alinhamento e reaperto de parafusos, substituição trimestral de correias, substituição semestral da correia transportadora, limpeza e lubrificação quinzenal de componentes mecânicos (roletes, guias, cobertura dos motores de passo) com graxa para mecanismos, verificação do nivelamento quinzenalmente.

Tabela 8.8d - Políticas de Manutenção Sugeridas e Aplicadas para as Falhas em *ROUTERS*

Equipamento	Política de Manutenção	Descrição
<i>ROUTER</i> (13 e 23)	Preventiva MPRT	Reaperto de parafusos e juntas quinzenalmente, verificação quinzenal do estado dos grippers, remoção dos grippers mensalmente para medição e verificação de empenamento (substituir se for constatado empenamento), limpeza e lubrificação dos grippers, guias, coberturas de motores de passo e mandril do spindle mensalmente, troca anual dos mancais do spindle ou após travamento do mesmo, limpeza dos sensores quinzenal, teste de sensores e de programa de controle quinzenalmente (executar rotina programada no controlador da máquina), substituição da fresa a cada 200 horas. Verificação quinzenal do alinhamento das guias e nivelamento da máquina.

As tabelas 8.8 (a até d) mostram, para alguns equipamentos, a possibilidade de haver uma política baseada em manutenção corretiva programada. Ocorre que os procedimentos para debelar as falhas relacionados aos modos pesquisados devem ser idênticos aos da manutenção preventiva, porém, devem ser registrados de forma diferente da manutenção preventiva, até porque haverá uma falha já ocorrida, apenas o equipamento é tolerante à mesma. Assim, não se trata de procedimentos complementares, são políticas distintas, mas a intervenção no equipamento é idêntica (obviamente, no caso da manutenção corretiva programada, alguma ação a mais pode ser requerida, já que a falha pode ter evoluído e induzido novas falhas em outros subsistemas ainda que não sejam os mecânicos). Uma observação final diz respeito aos códigos não conterem indicação da linha à qual pertencem os equipamentos : as linhas utilizam equipamentos idênticos, por isso, não é necessário especificar um plano baseado na linha, a menos que a política da empresa para sua operação seja diferente, por exemplo, em termos de política de lotes (não ocorre na planta pesquisada).

### 8.5.2 – Comportamento das Falhas dos Equipamentos após a Implementação dos Planos de Manutenção Propostos

A partir da adoção dos procedimentos indicados nas Tabelas 8.8a a 8.8d, tornou-se necessário, a fim de se aferir quais os resultados obtidos, verificar qual o comportamento da falha sob ação das novas políticas de manutenção, ou seja, verificar os resultados, como indicado na seção 7.4. Estas novas observações, feitas ao longo de 8 quinzenas (já que após estas 8 quinzenas o produto deixou de ser fabricado e a linha foi completamente alterada), são mostradas nas Tabelas 8.9 a 8.10d.

Tabela 8.9 – Distribuição das Falhas nos Equipamentos Após a Implantação da Política de Manutenção

EQUIPAMENTO	FALHAS	$\lambda$
CP3A1modo1	5	0.6250
CP3A2modo1	3	0.3750
CP3A3modo1	5	0.6250
CP3A4modo1	2	0.2500
CP3A5modo1	3	0.3750
CP3A1modo2	5	0.6250
CP3A2modo2	2	0.2500
CP3A3modo2	3	0.3750
CP3A4modo2	3	0.3750
CP3A5modo2	2	0.2500
CP3A1modo3	1	0.1250
CP3A2modo3	1	0.1250
CP3A3modo3	0	0.0000
CP3A4modo3	0	0.0000
CP3A5modo3	1	0.1250
ERSA3A1modo1	1	0.1250
ERSA3A1modo2	0	0.0000
REPAIR CONVEYOR JOT 2M - L3	2	0.2500
Router 13	6	0.7500
Router 23	4	0.5000
<b>TOTAL NO PERÍODO</b>	<b>49</b>	

Tabela 8.10a - Distribuição das Falhas por Modo (1) nos Períodos (Quinzenas)

Período / Máquina	CP3A1mod1	CP3A2mod1	CP3A3mod1	CP3A4mod1	CP3A5mod1	ERSA3A1
1	2	1	2	1	0	0
2	2	0	1	1	1	0
3	0	2	1	0	1	1
4	1	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	1	0
7	1	0	1	0	0	0
8	0	0	0	1	0	0
<b>Total</b>	5	3	5	2	3	1

Tabela 8.10b - Distribuição das Falhas por Modo (2) nos Períodos (Quinzenas)

Período / Máquina	CP3A1mod2	CP3A2mod2	CP3A3mod2	CP3A4mod2	CP3A5mod2	ERSA3A1mod2
1 (W30/W31)	2	1	1	1	2	0
2 (W32/W33)	1	1	2	1	0	0
3 (W34/W35)	0	0	0	0	0	0
4 (W36/W37)	1	0	0	0	0	0
5 (W38/W39)	0	0	0	1	0	0
6 (W40/W41)	0	0	0	0	0	0
7 (W42/W43)	1	0	0	0	0	0
8 (W44/W45)	0	0	0	0	0	0
<b>Total</b>	5	2	3	3	2	0

Tabela 8.10c – Distribuição das Falhas por Modo (3) ao Longo dos Períodos

Período / Máquina	CP3A1mod3	CP3A2mod3	CP3A3mod3	CP3A4mod3	CP3A5mod3
1 (W30/W31)	1.000	0.000	0.000	0.000	1.000
2 (W32/W33)	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000
3 (W34/W35)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
4 (W36/W37)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5 (W38/W39)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
6 (W40/W41)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
7 (W42/W43)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
8 (W44/W45)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
<b>Total de Falhas</b>	1	1	0	0	1

Tabela 8.10d \_ Distribuição das Falhas por Modo para ROUTERS e CONVEYOR

Período / Máquina	REPAIR CONVEYOR JOT 2M-L3	Router 13	Router 23
1 (W30/W31)	1.000	2.000	1.000
2 (W32/W33)	0.000	1.000	1.000
3 (W34/W35)	0.000	1.000	0.000
4 (W36/W37)	0.000	1.000	1.000
5 (W38/W39)	1.000	0.000	0.000
6 (W40/W41)	0.000	1.000	1.000
7 (W42/W43)	0.000	0.000	0.000
8 (W44/W45)	0.000	0.000	0.000
<b>Total de Falhas</b>	2	6	4

Verifica-se que com a implantação da proposta de manutenção indicada na Tabela 8.8 houve uma sensível redução no número de falhas, nas máquinas, reduzindo o número de interrupções de operação da linha analisada.

Em virtude da presença de muitos intervalos seguidos onde há zero ocorrências de falhas, as tentativas de se buscar a aderência dos dados a uma distribuição probabilística conhecida resulta ineficaz e até inconsistente, pois se for usado o modelo de POISSON, algumas vezes obtém-se probabilidades de falha maiores que a situação anterior, o que não é de forma alguma verdadeiro. Assim sendo, diante da impossibilidade de calcular uma probabilidade associada ao novo comportamento das falhas após a adoção da nova política de manutenção, optou-se por executar uma análise de sensibilidade, transposta para as árvores de decisão, considerando probabilidades de falha ( $p_j$ ) iguais a 5%, 10% e 15%.

A partir da definição da proposta de prática de manutenção e da obtenção de um banco de dados de falhas associados com esta proposta, pode-se tomar a decisão sobre a validade da mesma, considerando o método proposto no capítulo 7 desta tese.

Para a aplicação do método proposto, define-se as árvores de decisão associadas com a escolha das práticas de manutenção visando combater as falhas dos equipamentos. Estas árvores são apresentadas nas Figuras 8.29 a 8.35, indicadas na seqüência deste texto.

### **8.6 - Determinação dos Custos Associados à Manutenção**

A montagem as árvores de decisão exige que se conheça – com a maior precisão possível – os custos associados à manutenção, conforme determinado na seção 7.4 - **Determinação dos custos associados às alternativas.**

Como já explicado no Capítulo 6, este assunto é controverso, porém, existem fatores a serem considerados em todas as propostas de elaboração de políticas de manutenção e mesmo de custos industriais, como citado por MARTINS (1990) e DRAPINSKI (1973). Em primeiro lugar, deve-se determinar quais atividades e fatores podem ser considerados como **diretos** ou **indiretos**, a seguir, detalhar como tais atividades compõem a manutenção no setor analisado e como se dá a operação dos equipamentos componentes das linhas de produção. No caso em estudo, o primeiro fator a ser considerado, até porque se não houver ação da manutenção a degradação se dá de forma descontrolada, é a depreciação do equipamento (codificado como DLI). Em que pese este fator ser acrescido ao custo do produto, a forma de compor tal preço inclui considerar como parte dos custos de produção os custos de manutenção. O critério da empresa estudada – e é uma praxe internacional, como citado por DRAPINSKI (1973) – é considerar 20% ao ano, ou seja, depreciar em 5 anos. A princípio, deveria ser considerado que, no início das operações da linha, o equipamento já não era novo, porém, ao ser trazido para o Brasil, a maior parte dos equipamentos foi recondicionada e inclusive atualizada em termos de controladores, programas de computador e processadores. Levando-se ainda em

consideração que, para efeitos de análise operacional dos equipamentos e aplicação do método proposto neste trabalho o maquinário foi considerado como em estado de novo (*as new*), para efeitos de levantamento dos custos se tornou conveniente e necessário adotar a mesma abordagem, mesmo porque, máquinas tipo *ROUTER* são novas e faltam registros progressos dos equipamentos. Vale comentar que modelos sofisticados de depreciação não conduzem a resultados significativamente diferentes, então, pode-se adotar a mesma taxa independentemente da idade do equipamento quando no curso de sua vida útil.

O próximo fator, custo direto, é composto pelos custos de peças de reposição e contratos permanentes de manutenção e suporte junto aos fornecedores (codificado como SPP). Em alguns casos, as peças de reposição são colocadas na empresa em consignação, mantendo os preços por um ano (condição contratual, já que o provisionamento de peças é conhecido e variações podem ser absorvidas com tranquilidade). Então, estes custos foram incluídos na mesma categoria.

Mão-de-obra direta da manutenção compõe o próximo fator (MOD). Embora a manutenção não seja um departamento da empresa, existem times subordinados à Engenharia Industrial dedicados à manutenção (isto torna o gerenciamento mais barato e facilita a integração, embora no caso estudado, estes benefícios não se tenham mostrado). Neste custo, foram adicionados os impostos e encargos trabalhistas.

Energia e água (EAG) são debitados à manutenção, pois como o desempenho dos equipamentos impacta diretamente no consumo destes recursos e este desempenho é indiscutível responsabilidade da manutenção, justificando sua inclusão como custo de manutenção.

Estes fatores formam o conjunto de custos diretos. Os custos indiretos começam pela mão-de-obra indireta (MOS), como suporte, serviços, limpeza, segurança, setor financeiro,

alimentação, produção, setor de RH, tributos, logística e outros tantos que não se envolvem diretamente na execução da manutenção, mas cuja presença é indispensável para a produção e venda dos produtos e mesmo para suporte à execução de tarefas de manutenção. Deve-se ressaltar que custos indiretos para a manutenção podem não ser indiretos para a produção.

Um custo indireto – sob o ponto de vista da manutenção, pois sob o ponto de vista da produção são claramente custos diretos – é o dos componentes inseridos (CPN) e a determinação deste custo pode causar uma certa dificuldade de compreensão. O valor médio de componentes inseridos por telefone é de US\$ 50.00. Obviamente pode chegar a 10 vezes mais, dependendo da sofisticação do produto, mas para o produto analisado e para a linha em questão, esta média reflete um valor bem próximo ao real. Cada ciclo trabalha conjuntos de 4 placas por vez e do início da montagem em SMD até a montagem final (antes dos testes e embalagem) consome-se, no caso deste produto, 20 minutos. Já foi mencionado que pode haver mais de uma dezena de máquinas do tipo “*pick and place*”, isto porque estas são dedicadas a inserirem um grande número de componentes e, mais que isso, placas diferentes (por exemplo, de RF – rádio frequência, de amplificador, tela) são montadas em máquinas diferentes, na mesma linha, procurando manter a disposição linear (em série). Para o produto montado no período de coleta (março a julho de 2003), os equipamentos de SMD e *ROUTER* podem processar até 30 conjuntos de 4 placas por hora (taxa máxima de produção). À esta taxa, o custo de operação da linha por conjunto de 4 placas cai porque pode-se dividir o custo de 1 ciclo (à exceção dos componentes inseridos) pela taxa, isto porque, durante os 20 minutos que dura 1 ciclo, pode-se produzir 10 conjuntos de 4 placas, portanto, em uma hora, produz-se até 30 conjuntos, usando os mesmos recursos. Cabe ressaltar que, à taxa máxima, pode-se ter uma degradação mais acelerada dos equipamentos, aumentando custos de SPP e acionando cada vez mais, se não for cumprida a manutenção programada, os *Hot Lines*

(CHO) dos fornecedores (*Hot Lines* são contratos de suporte imediato mantidos com fornecedores chave de certas máquinas, sobretudo *ROUTER* e *pick and place*, que cobrem serviços de manutenção corretiva especializados e que a equipe própria da empresa não justifica executar, reprogramação de máquinas e mesmo a reposição temporária por equipamento similar no caso da necessidade de intervenção pesada). Não foi possível quantificar ou mesmo determinar se esta aceleração da degradação foi muito sensível durante o período de coleta de dados. Note-se que a substituição temporária de equipamentos é possível em limitadíssimos casos, logo, o impacto mostrado nos diagramas causa consequência, prevendo paralisação demorada da linha é fortemente preferível à paralisação de curta duração.

Com estes dados em mãos, torna-se possível calcular os custos por ciclo e por hora. A Tabela 8.11 mostra os valores obtidos, adicionalmente mostrando que em caso de ocorrência de falhas catastróficas (que levam à paralisação da linha com danos mais severos ao equipamento ou resultando falhas de resolução complexa), o custo de operação da linha aumenta bastante. Os custos por ciclo foram estimados para um conjunto de placas apenas ou para a linha operando à taxa máxima mostrando que, devido à divisão por diversas unidades do produto (30 vezes mais, resultando em custos 30 vezes menores). A razão da divisão dos custos indiretos pela taxa não é uma exceção, mas sinaliza que foi dividido por unidade de produto, portanto, não foi deturpada a definição de custo indireto – MARTINS (1990) e DRAPINSKI (1973) – o que se deve observar é que, à taxa máxima, os custos diretos podem variar, especialmente se houver horas-extra (isto pode ocorrer para a manutenção) e mudança da faixa de consumo de energia elétrica.

O reduzido tempo em que se dá o início da produção de um lote e a venda do produto, ou mesmo o retorno de uma máquina de um reparo demorado, não exige que a manutenção

considere o valor do dinheiro no tempo, embora seja recomendável efetuar esta análise na composição do orçamento anual de manutenção, como citado por XENOS (1998).

Tabela 8.11 – Custos Associados às Falhas e à Manutenção da Linha 3

Código	Descrição	Custo US\$	Obs.
<b>Diretos</b>			
DLI	Custo de Depreciação da linha	30,00/h	
SPP	Spare Parts e Contratos	35000/mês	para as 13 linhas
MOD	Mão de Obra Direta de Manutenção	45000/mês	
EAG	Energia/água	50,00/h	Por Linha
<b>Indiretos</b>			
MOS	Mão de Obra de Produção, Engenharia e Suporte (Suporte inclui tributos, programas de computador, alimentação)	100000/mês	Rateado por Linha
CPN	Componentes Inseridos	50,00	por placa
<b>Ciclo</b>			
DMC	Duração Média de 1 ciclo		20 Minutos (0,3333...h)
CCU	4 placas a cada 20 minutos : 4 x 50,00	200,00	Custo de componentes inseridos por conjunto/ciclo
CPH	Componentes Inseridos por Hora, até 30 conjuntos de 4 placas/hora = 120	24000,00/hora	
<b>Custos Horários</b>			
DLI		30,00	10,00/ciclo*
SPP		3,74	1,25/ciclo*
MOD		4,81	1,60/ciclo*
EAG		50,00	16,67/ciclo*
MOS		138,89	46,30/ciclo*
CPH		24000,00	200,00/ciclo
CHO	Acionamento do Hot Line	30,00	Em caso de corretiva
CHL	Custo Horário da Linha	24227,00	
<b>Totais</b>			
CHL	SMD e ROUTER	24227,00	por hora na taxa máxima
CLC	SMD e ROUTER	275.82/202.53*	por ciclo/por ciclo tax. máx
CCR	SMD e ROUTER	305.82/232.53	corretiva acionando HotLine
* à taxa máxima, estes custos são divididos pelo valor da mesma			

Os custos horários da linha foram calculados a partir da estimativa dos custos horários individuais. Custos indiretos não costumam ser caracterizados como horários, entretanto, como são rateados e compõem o preço do produto, procurou-se trazê-los (MOS e CPN) para bases horárias. Cabe lembrar que o custo CPN, sob o ponto de vista da manutenção é indireto, o que não seria verdade para abordagem pela produção. Embora seja uma tendência de considerar um ano de 300 dias, a realidade da fábrica estudada mostra que este número está muito mais próximo de 360 dias (mês de 30 dias de 24 horas cada), especialmente para a produção e para a manutenção. Deve-se ainda lembrar que custos rateados por toda a fábrica e os diretos, são divididos ainda por 13, que é a quantidade de linhas em operação (a linha 13 não aparece na Tabela 8.1 por absoluta falta de espaço). O acionamento de *hot lines* custa US\$ 30,00/hora, e se for ativado, este custo é somado diretamente ao custo horário. Para estimar os custos por ciclo, deve-se considerar 2 situações : em primeiro lugar, um ciclo da linha não possui a mesma definição que um ciclo de *pick-and-place*, conforme explicado anteriormente (seção 8.3.1.1). Um ciclo da linha compreende o tempo necessário para que o telefone entre em SMD e saia montado e embalado. Como este trabalho não se dedica a estudar as seções de teste, montagem e embalagem, consideramos o ciclo desde a entrada em SMD até a saída dos REPAIR CONVEYORS. Assim sendo, durante um ciclo, o qual dura 20 minutos para o produto na linha 3 na época de coleta dos dados, pode ser processada apenas um conjunto de 4 placas (taxa mínima de produção) e todos os custos associados são debitados às 4 placas sendo processadas, conduzindo ao maior custo por ciclo (US\$275,82). Entretanto, as máquinas podem dar uma cadência de até 30 conjuntos de 4 placas por hora para este produto (120 aparelhos). Esta é a taxa máxima de produção desta linha para este produto, então os custos são rateados não entre 4, mas entre 120 unidades. Este é também o custo mínimo por ciclo (US\$ 202,53), em que pese a degradação possivelmente mais

acelerada dos equipamentos à taxa máxima. Note-se, no entanto, que este trabalho não considerou esta possibilidade, pois os equipamentos foram assumidos como estando trabalhando durante as horas operacionais, logo, a deterioração já está sendo considerada no ritmo mais intenso.

O custo das intervenções preventivas é obtido somando-se os custos horários DLI (US\$ 30,00/h), SPP (US\$ 3,74) e MOD (US\$ 4,81). A rigor, o custo relacionado a energia elétrica e água (EAG) deveria ser debitado à manutenção, porém, apenas um resíduo dos US\$ 50,00 é consumido, logo, sem haver um valor conhecido, optou-se por desconsiderar tal valor. A depreciação da linha é debitada à manutenção pelo fato de que, esteja o equipamento operando ou não, a depreciação é contabilizada. Assim, à manutenção preventiva é debitado o custo de US\$ 38,55/h. Deve-se lembrar que, no caso de intervenções planejadas tais como as preventivas, não se utiliza *hot line*, se algum suporte for necessário por conta dos fornecedores, este estará contabilizado nos custos SPP (peças de reposição e contratos).

Não faz muita diferença qual máquina está sendo atendida, pois no caso da planta pesquisada, não há equipes de manutenção suficientes para atender a uma linha de uma só vez (ou seja, todos os equipamentos ao mesmo tempo). A paralisação de uma linha para efeitos de manutenção preventiva, é a soma de todos os tempos de parada relativos aos equipamentos, até porque a linha tem uma disposição em série. Por esta razão, o custo da manutenção preventiva é o mesmo para cada equipamento de SMD ou *ROUTER*. Outros custos, tais como os indiretos, não são contabilizados porque, em se tratando de manutenção planejada, já se sabe previamente que não haverá produção neste período, portanto, espera-se que não haja entregas planejadas para aquela(s) data(s) e deixam de incorrer os custos relativos ao produto. Obviamente isto é um ponto de muita discussão entre manutenção e produção, mesmo a abordagem utilizada pelo setor de PCP (Planejamento e Controle da Manutenção) pode exigir

considerar os custos de atividades de apoio e outros custos indiretos. No caso em questão, como atividades de apoio não são utilizadas em taxas que requeiram sua consideração para fins de manutenção preventiva (no máximo são servidas as refeições aos funcionários da manutenção, mas deve ser lembrado que se uma linha estará paralisada, outras estarão ativas e haverá muito mais funcionários trabalhando na produção que na manutenção), optou-se por não considerar tais valores.

Em termos de manutenção corretiva programada e da corretiva pura, os custos indiretos passam a ser debitados à manutenção, pois o setor de PCP raramente tem tempo de alterar a programação (e às vezes não tem este interesse, já que uma meta não alcançada estaria sendo imputada à produção). Logo, assume-se que há perdas. Assim sendo, os custos tanto da manutenção corretiva programada quanto da corretiva são resultado da soma dos fatores diretos (DLI, MOD, EAG e SPP) com os indiretos (MOS e CPH, mais CHO quando houver necessidade), lembrando-se que os custos foram tomados em bases horárias. Ao ser constatada a necessidade de haver manutenção corretiva programada, ou melhor, quando se confirma esta possibilidade, mais atenção é dispensada ao produto sendo montado, já que há muito mais possibilidade de problemas. Assim sendo, os riscos associados a produtos defeituosos operando em campo podem ser desconsiderados neste caso, pois são feitos mais testes – o que aumenta custos, especialmente o MOS – e produtos defeituosos são imediatamente descartados. Discute-se sobre a conveniência da adoção desta política, já que a falha terá sido revelada e seria tecnicamente mais adequado intervir imediatamente. Porém, há casos em que há subterfúgios para estender a utilização do equipamento até uma data mais conveniente para a intervenção (casos em que, devido à redundância de componentes ou de operação passível de ser repetida como a captura e inserção de componentes, pode-se utilizar o equipamento por um período além da falha). Geralmente, isto ocorre em finais de lotes –

CARDOSO (2004)

portanto em finais de quinzenas – pois no início ou no meio da fabricação destes, dificilmente há uma oportunidade (*slot*) para programar uma parada não planejada anteriormente. Outra possibilidade é a presença de feriados ( como visto anteriormente, esta empresa pára em muito poucas ocasiões e em caso de feriados, sabe-se de uma parada de produção com 3 dias de antecedência). Enfim, a corretiva programada é uma alternativa de oportunidade, não se propõe conceber um sistema de planejamento e controle de manutenção que recomende adotar esta possibilidade.

Uma vez que os custos se tornaram conhecidos, inicia-se a **Análise de Decisão** indicada em 7.4. Logo, a seguir, são executadas as sub-etapas de **Construção das Árvores de Decisão e Cálculo do risco médio.**

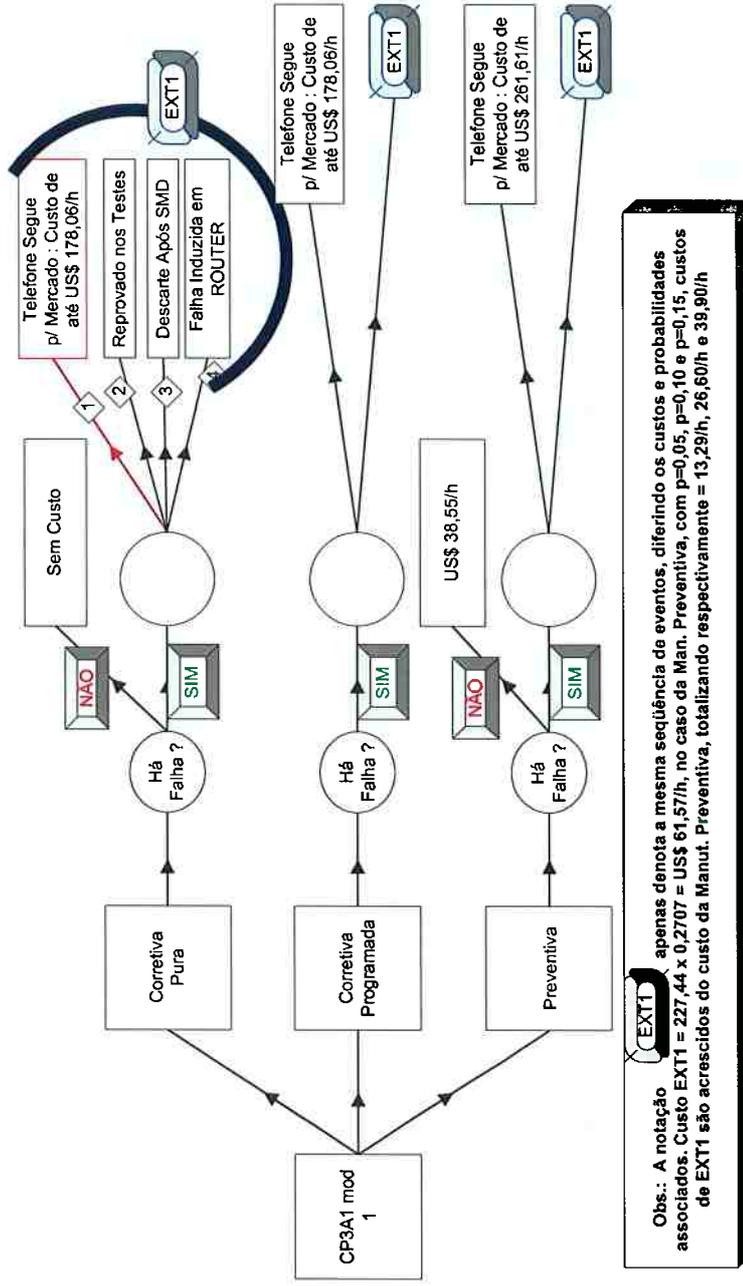


Figura 8.29 - Árvore de Decisão para Política de Manutenção a ser Adotada para Combate às Falhas de Ar Comprimido *nozzle* em Máquinas Posicionadoras CP3A1, CP3A2 e CP3A3, considerando-se Modo de Falha 1

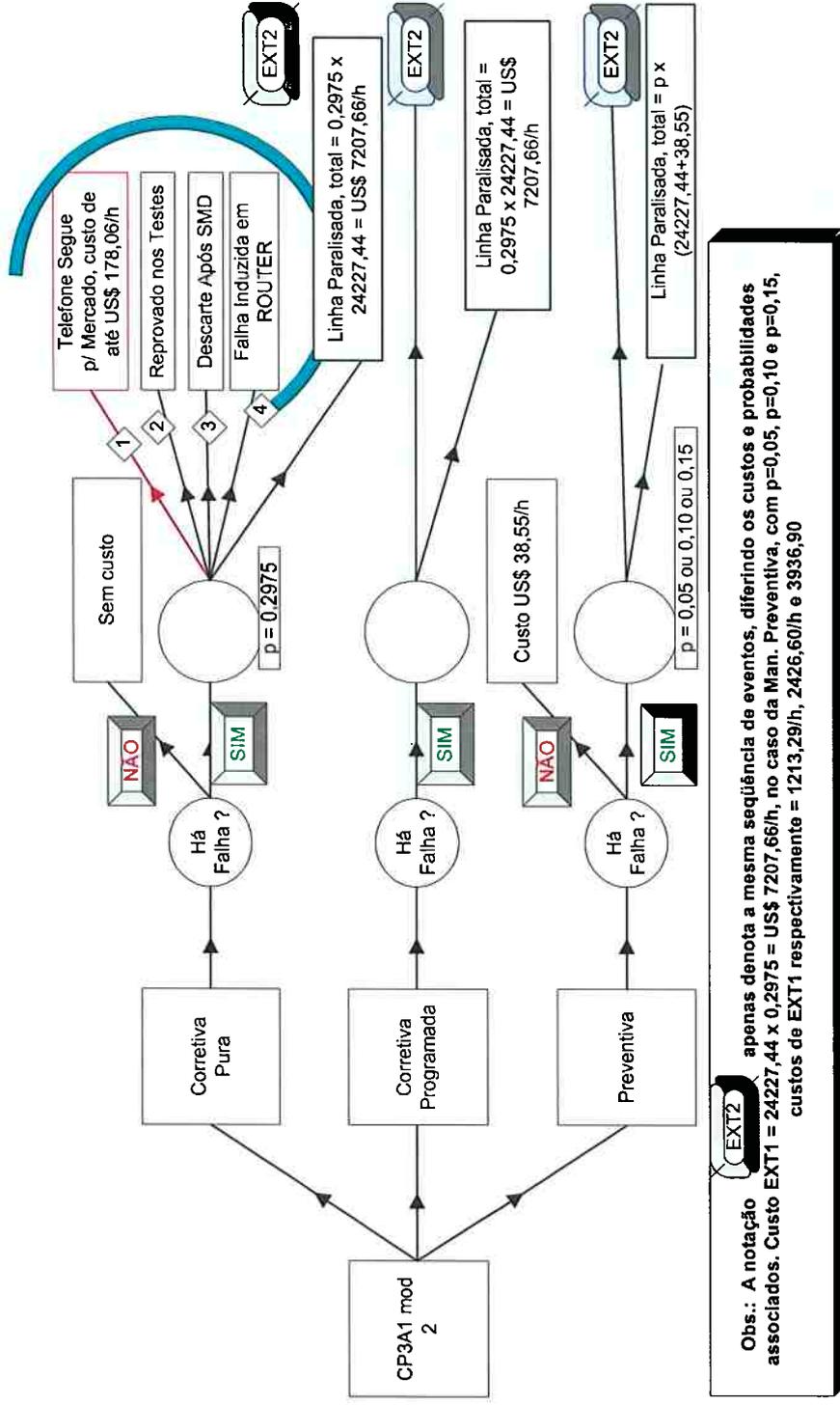


Figura 8.30 - Árvore de Decisão para Política de Manutenção a ser Adotada para Combate às Falhas de Vácuo em *nozzle* em Máquinas

Posicionadoras CP3A1, CP3A2 e CP3A3, considerando-se Modo de Falha 2

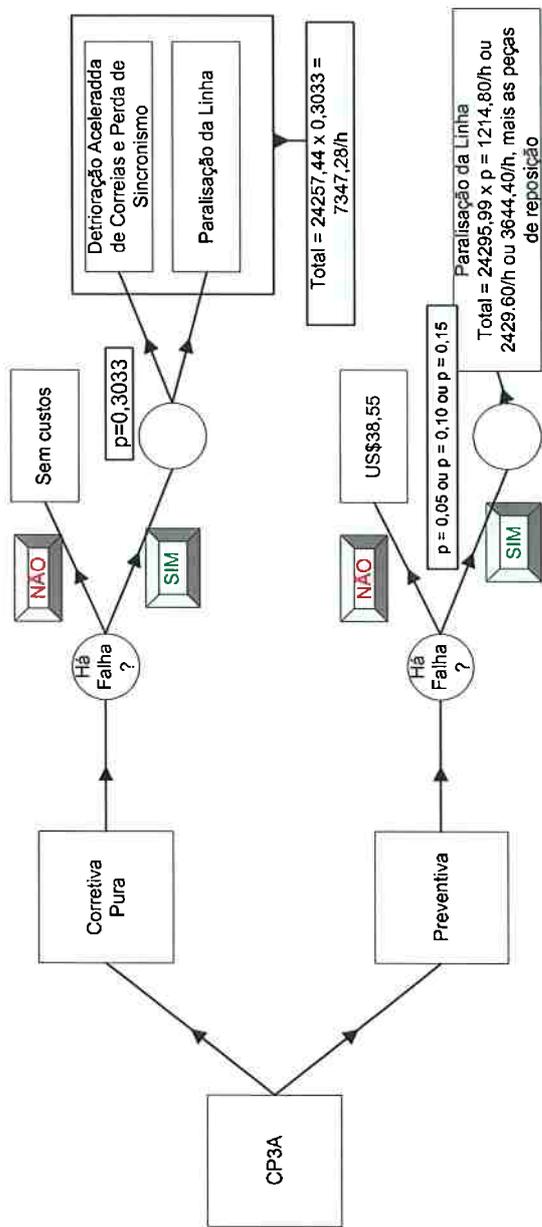


Figura 8.31 - Árvore de Decisão para Política de Manutenção a ser Adotada para Combate às Falhas de Fusos de Esferas Recirculantes em Máquinas Posicionadoras CP3A1, CP3A2 e CP3A3, considerando-se Modo de Falha 3

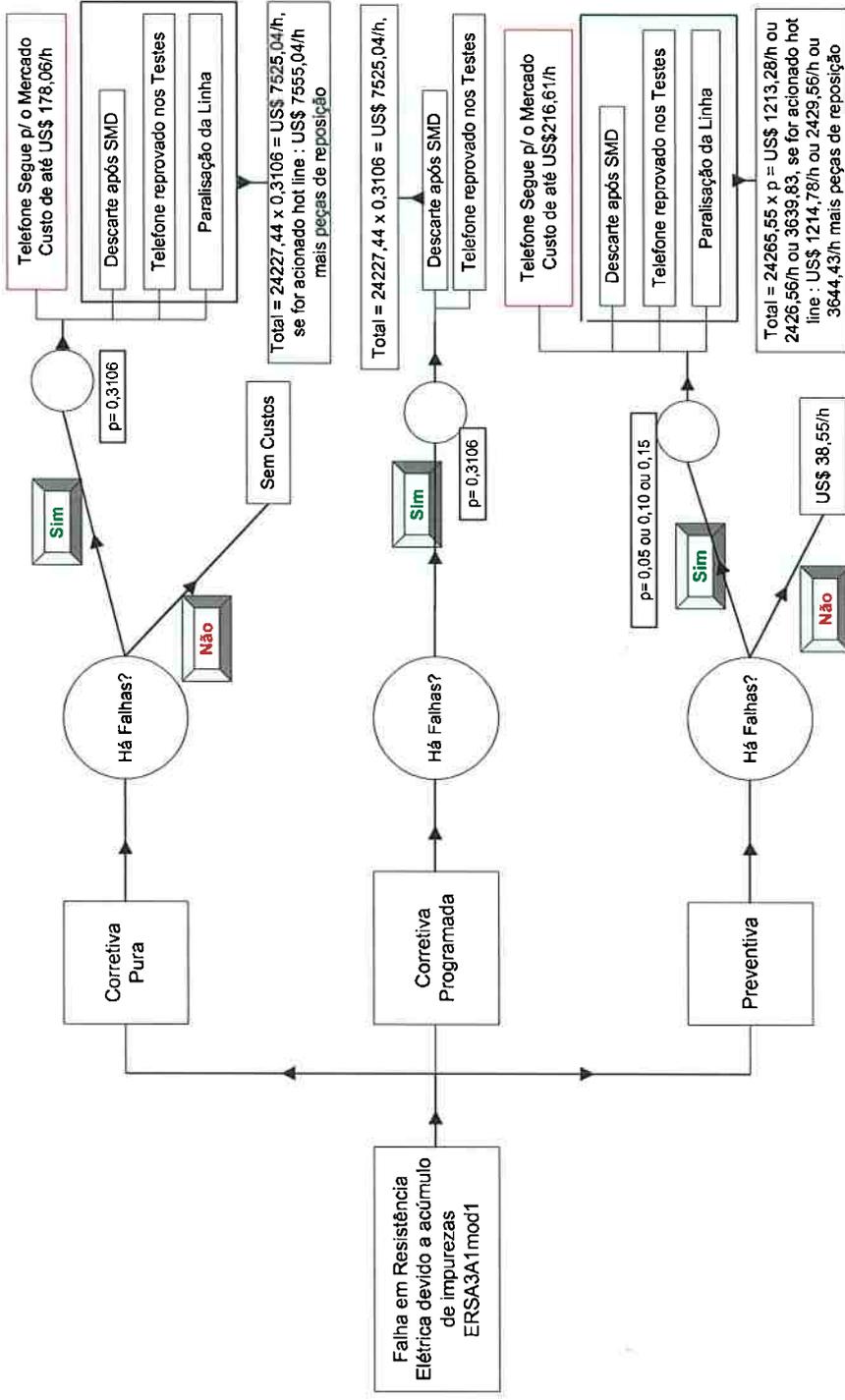


Figura 8.32 – Árvore de Decisão para Política de Manutenção a ser Adotada para Combate às Falhas considerando-se Equipamento ERSA3A1,

Ocorrência Modo de Falha 1

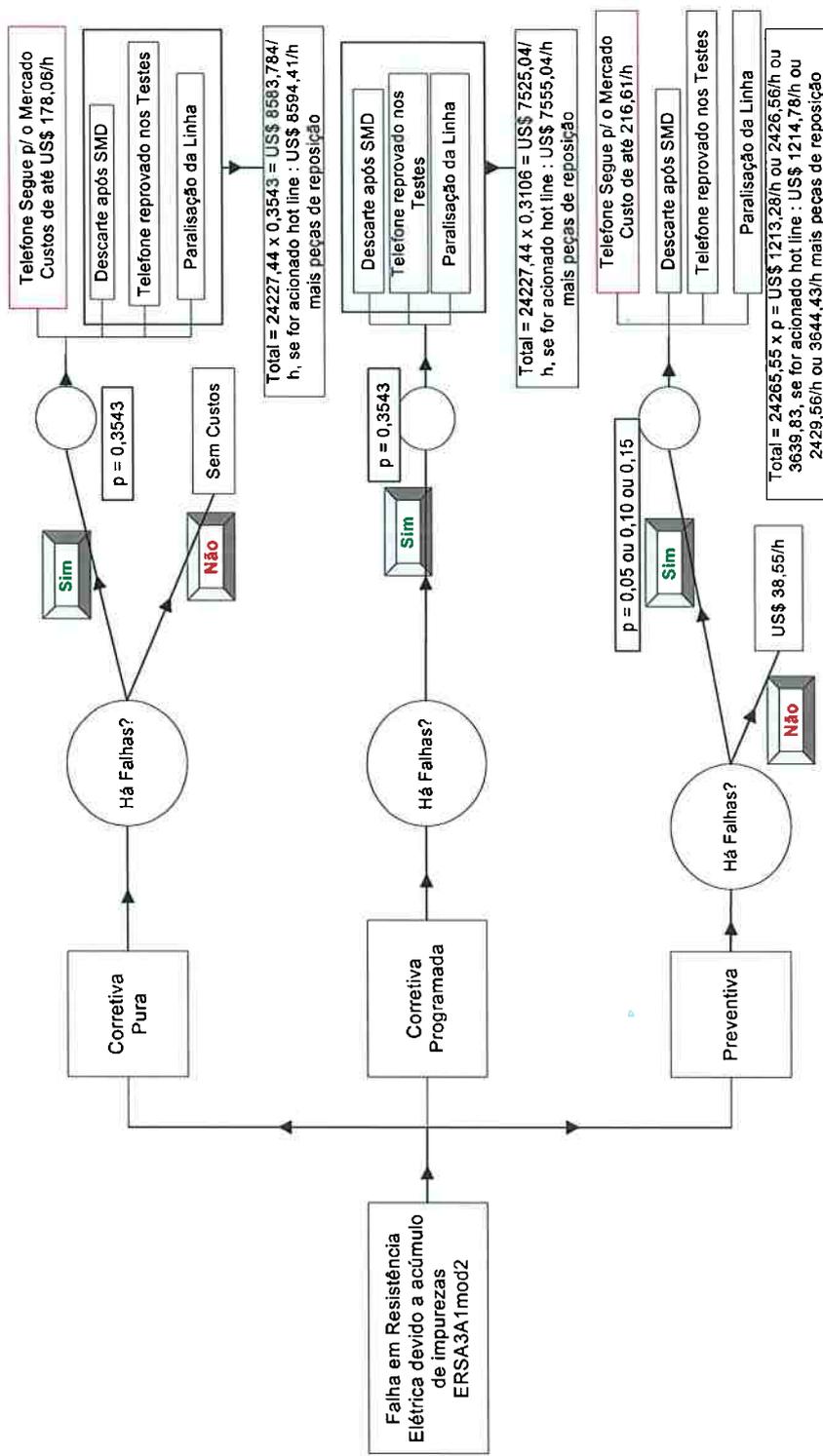


Figura 8.33 - Árvore de Decisão para Política de Manutenção a ser Adotada para Combate às Falhas de Acúmulo de Impurezas sobre Componentes

Mecânicos, ocorrência do Modo de Falha 2

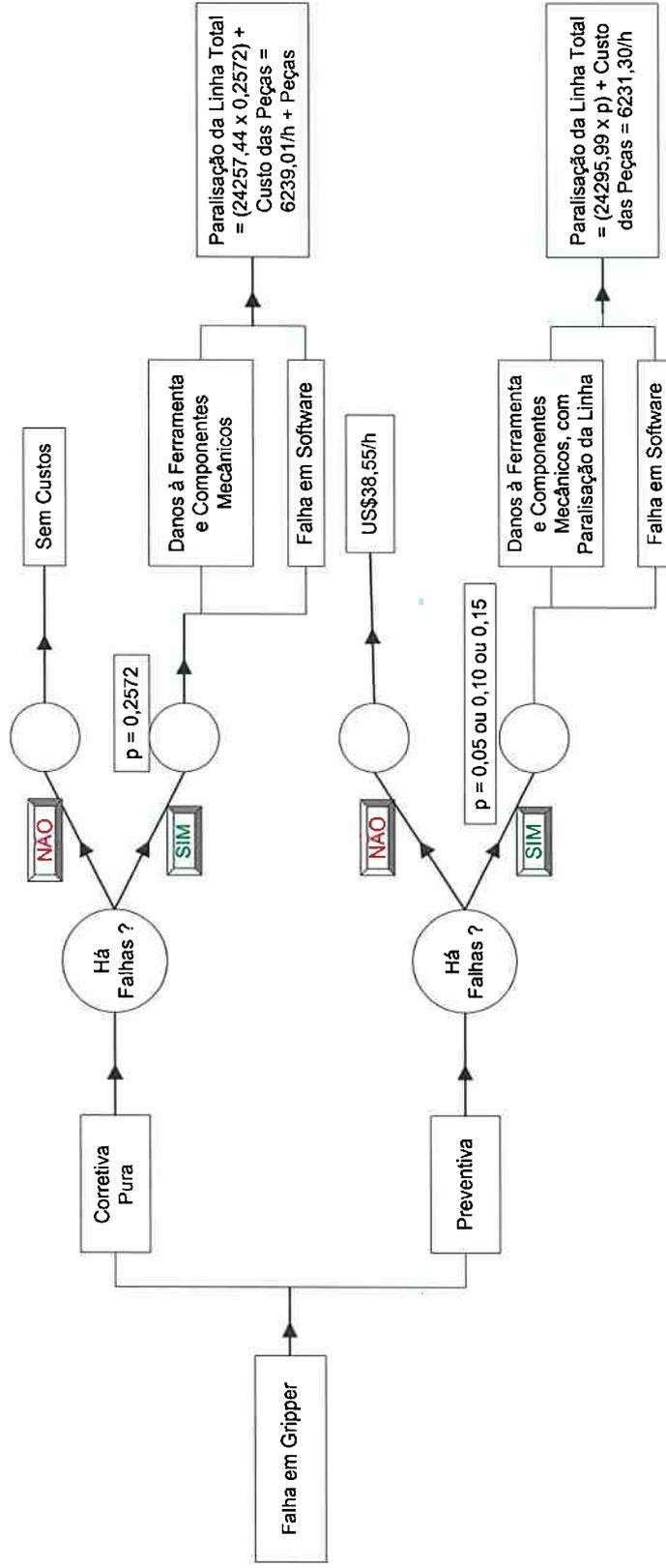


Figura 8.34 – Árvore de Decisão para Seleção da Política de Manutenção a ser Adotada para Combate às Falhas em ROUTER HiSAC1000 BR

(ROUTERS 13 e 23)

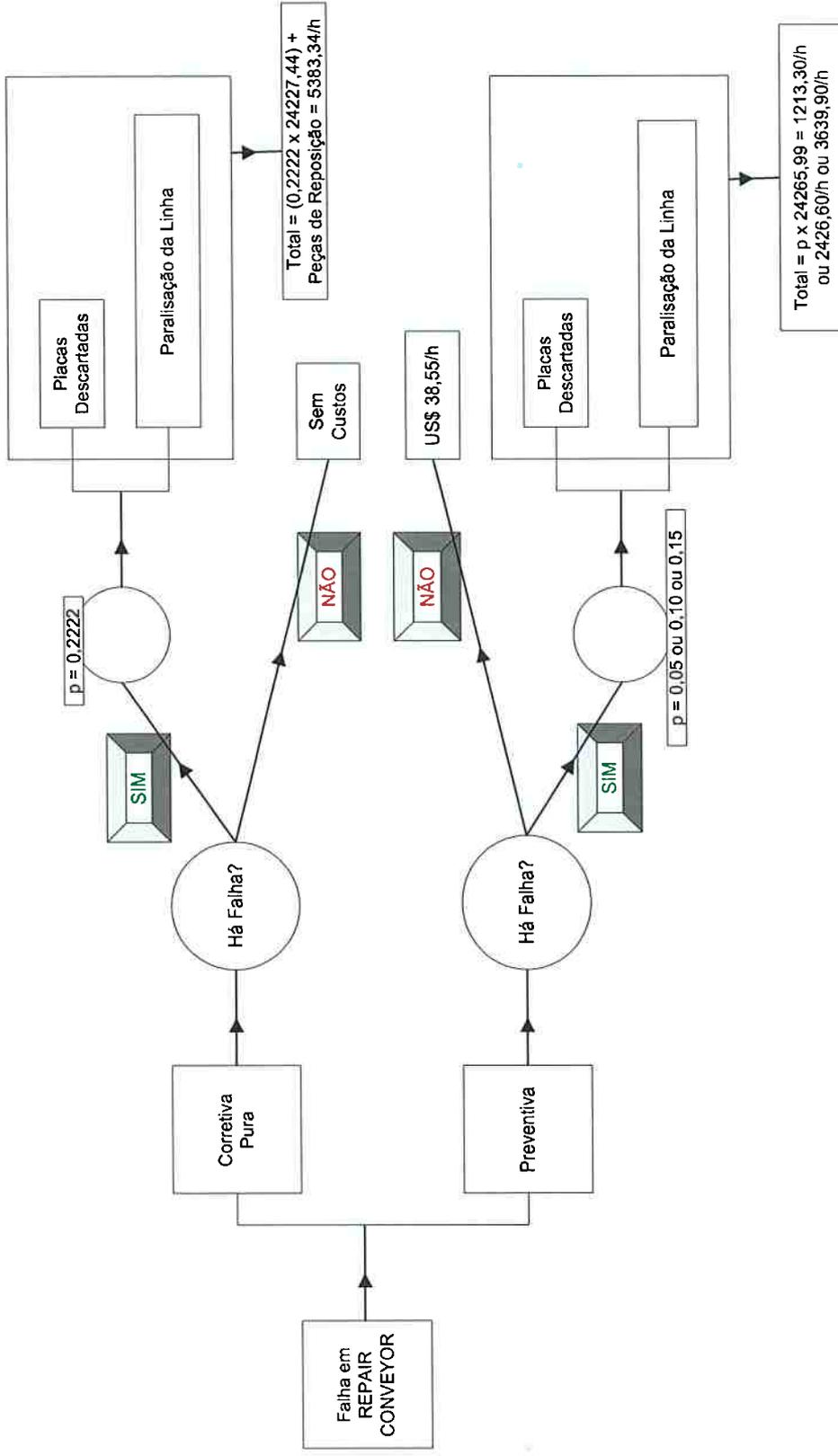


Figura 8.35 – Árvore de Decisão para Seleção da Política de Manutenção para Combate às Falhas em REPAIR CONVEYOR

Cabem alguns comentários a respeito da construção das árvores de decisão mostradas nas Figuras 8.29 a 8.35. Inicialmente, inspecionando-se as Tabelas 8.7a a 8.7d, nota-se que há probabilidades de falha diferentes relacionadas cada máquina, válido para as posicionadoras – das quais há 3 unidades – e para as *ROUTERS* - das quais há 2 unidades idênticas. Em favor da segurança, optou-se por utilizar o maior valor de probabilidade de falha, já que, estando os equipamentos em série, seria o de maior probabilidade de falha o equipamento “gargalo”. Para se determinar os custos da falha (ou melhor, de seus impactos) no caso das Figuras 8.29 e 8.30 (respectivamente para os modos de falha 1 e 2 das máquinas posicionadoras), levou-se em consideração que há uma seqüência de eventos (denominadas de EXT1 e EXT2) os quais se repetem a cada vez que há a possibilidade de uma falha. Dentro destas extensões ou seqüências, há um evento dos mais graves, destacado em vermelho, que é a possibilidade do telefone ir parar no mercado. Neste caso, o custo da conseqüência foi obtido rateando-se para esta linha os US\$ 20 milhões anuais, obtendo-se US\$ 178,06/hora (se esta conseqüência for observada ainda que esteja sendo empregada a manutenção preventiva, soma-se US\$ 38,55, correspondente ao custo próprio desta atividade, totalizando US\$ 216,61/h em perdas). No caso das políticas corretiva e corretiva programada, a manutenção não assume qualquer compromisso se não houver falha, entretanto, se houver, até mesmo o custo da energia é assumido pela manutenção, já que se deve lembrar que os US\$ 50,00/h recebem uma parte dos rateios dos setores indiretos da produção, os quais não param (como as máquinas) em caso de falhas. A taxa pode não ter este valor, já que os equipamentos estarão paralisados e sem consumir energia, mas não é possível aferir qual a parcela do chão de fábrica e dos outros setores. Especificamente sobre a política de corretiva programada, se esta for adotada com exclusividade, é certo que a intervenção ocorrerá sempre após uma falha em algum instante.

Desta feita, a probabilidade de falha foi considerada como idêntica àquela associada à manutenção corretiva e não há a possibilidade de não haver falha.

A rigor, seria ainda somado o lucro cessante, o que sempre é uma abordagem controversa. Mas se uma falha passível de ser tratada por meio de políticas preventivas ocorrer e causar paradas imprevistas, a produção costuma debitar à manutenção as perdas. Nesse caso, o lucro cessante é calculado levando-se em consideração os componentes que deixariam de ser inseridos à taxa máxima de utilização da linha, os quais representam a maior parte do preço do produto. Isto se justifica porque não há outra fonte disponível para coletar o preço do produto, este é um setor bastante sigiloso da fábrica. Pesquisar o preço do telefone no mercado não se revelaria uma boa solução, pois as operadoras podem comercializar os produtos a preços às vezes menores que o de custo, vinculando o cliente a planos com parcelas mínimas mensais, as quais cobrem o preço do produto. Sendo assim, o lucro cessante pode chegar a US\$24000,00/h (CPH), um valor indubitavelmente elevado. Este valor é o mesmo associado aos custos das seqüências EXT1 e EXT2, excetuando-se a consequência “telefones defeituosos seguem para o mercado”. No caso das consequências relacionadas às Figuras 8.29, 8.30 e 8.31, o lucro cessante relacionado a falhas que paralisam a linha é muito maior que os custos de quaisquer outras consequências relacionadas à manutenção. No caso de ocorrência de falhas ainda que o equipamento esteja sob manutenção preventiva, soma-se os US\$38,55/h, resultando em US\$24265,99/h. Ainda, se houver a necessidade de acionamento do “hot line”, não sendo o caso dos modos de falha 1 e 2 das máquinas posicionadoras CP-7 nem do REPAIR CONVEYOR, somam-se US\$30,00/h aos custos, totalizando US\$24295,99/h (como no caso dos fornos ERSA<sup>®</sup> e das ROUTERS). Ocorre que a probabilidade de falha sob manutenção preventiva se revelou muito menor (embora não calculada) que a probabilidade sob manutenção corretiva pura. Considerando-se as

probabilidades de 5%, 10% e 15%, observa-se que (vide caixa de observações nas Figura 8.29 e 8.30) os riscos associados e por conseguinte os custos decorrentes se revelaram menores quando comparados aos custos das políticas meramente corretivas. Para se obter os totais, os custos foram multiplicados pelas probabilidades : no caso da corretiva pura, pela probabilidade indicada na caixa sobreposta ao nó de probabilidade, no caso da corretiva programada, pelo mesmo valor, já que foi considerada ser idêntica à probabilidade de falha sob ação da manutenção corretiva pura. No caso da preventiva, fez-se uma análise de sensibilidade considerando os valores já citados e, conforme o caso, quando houver falha foi multiplicado por tais probabilidades o valor US\$24265,99/h (se não for acionado “hot line”), US\$24295,99 se houve esta necessidade e, no caso das *ROUTERS*, onde é debitado à manutenção o custo de fresas acidentalmente quebradas, soma-se mais US\$ 30,00 aos custos já incorridos. Além disso, nos casos em que há falhas, é freqüente a necessidade de compra de peças fora dos contratos (SPP), exigindo despesas adicionais. Estas despesas são adicionadas após as parcela proporcionais (horárias) e após isto, multiplicadas pelas probabilidades de falha.

Na Figura 8.31, que mostra a árvore de decisão para a política de manutenção para o modo de falha 3 das máquinas posicionadoras, ainda que fusos de esferas recirculantes sejam componentes caros, os mesmos devem estar incluídos nos custos SPP (peças de reposição e contratos), se for considerada uma política baseada em intervenções planejadas (preventiva). No caso de haver falha, além da perda de produção, há o custo de acionamento do “hot line” (CHO, a US\$ 30,00/h) e mais o das peças de reposição, além do lucro cessante. Assim, pode-se passar dos US\$24295,99/h acrescidos de aproximadamente US\$6000,00 em peças de reposição. Nada mais apropriado então que optar pela manutenção preventiva, de acordo com os procedimentos sugeridos nas Tabelas 8.8a a 8.8d.

Para os fornos ERSA<sup>®</sup>, a Figura 8.32 mostra conseqüências bastante graves, traduzidas na forma de custos bastante elevados. Isto porque as falhas em fornos têm o potencial de gerar produtos defeituosos (especialmente as falhas em componentes mecânicos, já que se houver falhas em resistência o forno é paralisado mais rapidamente) sem que seja percebido o fato mesmo pela seção de testes. Algumas vezes, só após a montagem final são percebidos problemas (quando não, o aparelho segue para o mercado ocasionando os já conhecidos efeitos) e neste ínterim, as máquinas trabalharam inutilmente, o que é muito pior que apenas paralisar a linha. Os custos são os mesmos que a paralisação da linha – no caso da adoção da política corretiva pura – porque raramente podem ser retrabalhadas placas com defeitos tais como “solda fria”, ou seja, durante o tempo em que a produção prosseguiu com os fornos apresentando estas falhas (especialmente o modo de falha 1), todos os componentes inseridos são perdidos. Após a parada, ainda há os custos da paralisação da linha, ou seja, para estas falhas, perde-se tudo 2 vezes. Novamente, se mesmo com a adoção da política preventiva ainda houver falhas, os custos das conseqüências são os mesmos, somados do próprio custo desta política (US\$ 38,55/h), porém, a probabilidade de ocorrência da falha é muito menor que aquela observada com a adoção da corretiva pura.

Para o modo de falha 2 dos fornos, a árvore de decisão mostra os mesmos valores associados ao modo de falha 1 e ainda tem-se uma probabilidade de falha maior, porém, este modo de falha se revela menos severo que o modo 1 em virtude do equipamento operar por muito menos tempo se comparado à falha por acúmulo de impurezas em componentes mecânicos, já que o acúmulo de impurezas nas resistências elétricas ocasiona muitas mensagens de erro rapidamente e o controlador imobiliza a máquina, o que se traduz em menos perdas.

Há casos em que os valores de perda de placas e telefones ainda na linha têm os mesmos valores das falhas que paralisam a linha. Isto ocorre porque, como já dito, os componentes inseridos não podem ser reaproveitados e tudo é descartado (vide, por exemplo a falha dos REPAIR CONVEYORS).

As conseqüências das falhas não puderam ser divididas em termos de sua probabilidade de ocorrência, por isso citou-se quais são estas conseqüências e optou-se por considerar, tanto quanto possível, seus efeitos como um todo, mesmo porque, quando há a possibilidade de paralisação da linha e de perda de produtos, o impacto acaba sendo muito semelhante.

De maneira geral, a perda de produtos dura muito menos tempo que uma parada de linha de emergência, por esta razão, às vezes apenas um conjunto de 4 placas é perdido e fica-se nos US\$200,00. Se estas perdas se estendem por longo período, aí sim, tem-se perdas vultosas : todo o trabalho anterior à parada e mais os custos da própria parada (aqueles da ordem de US\$24200/h).

Ressalta-se que há falhas onde tecnicamente não é possível utilizar a alternativa da corretiva programada, pois os efeitos sobre a operação da linha e mesmo sobre a qualidade dos produtos são bastante graves caso se pretenda operar tais equipamentos com a falha já desenvolvida, assim os modos de falha das Figuras 8.31, 8.34 e 8.35 não são passíveis de serem tratados pela política de corretiva programada.

As equações propostas no Capítulo 7, especialmente as constantes na Figura 7.4 foram respeitadas, embora possam estar implícitas, pois no caso da manutenção corretiva pura, no caso de não haver falha o custo é zero e a parcela **custo da não-ocorrência x probabilidade de não ocorrência** é zero. No caso da manutenção preventiva, o custo da não-ocorrência é o próprio custo da manutenção preventiva (US\$38,55) e a probabilidade de falha assume os

*CARDOSO (2004)*

valores da análise de sensibilidade feita (5%, 10% ou 15%). Não seria prudente nem afetaria o resultado desta análise se fosse adotado o valor complementar da probabilidade de falha (95%, 90% ou 85%) para caracterizar a probabilidade de não-ocorrência, nem faz diferença, como já dito, pois o custo associado a esta possibilidade é várias vezes menor que os custos associados à ocorrência de falhas.

Finalmente, há que se considerar a possibilidade, a fim de refinar a estimativa das perdas de materiais já trabalhados, tais como componentes inseridos, de se adotar os custos por ciclo. No caso de eventos sobre os quais se tenha certeza sobre o tempo de ocorrência, é possível contar o número de ciclos, estimando-se então as perdas. Porém há uma dificuldade adicional : o custo por ciclo depende da taxa de utilização, o que nem sempre é simples de ser calculado. Além disso, após a parada, é mais conveniente adotar a contagem horária, razão pela qual este trabalho optou por esta forma para estimar custos e impactos.

### **8.7 - Tomada da decisão de seleção das políticas de manutenção : Análise das Árvores de Decisão**

Esta seção corresponde à execução da sub-etapa **Seleção da alternativa de menor risco médio**, determinada na seção 7.4.

Baseadas nas situações observadas na linha de produção, foram produzidas as árvores de decisão, elencando as possibilidades associadas às políticas de manutenção aplicáveis ao caso em estudo. Em que pese haver programas de manutenção preventiva, dois problemas se evidenciaram ao se inspecionar o histórico das falhas:

I – as intervenções programadas não estavam sendo executadas;

II – as práticas definidas não estavam sendo adequadas ou suficientes para tratar as falhas às quais se propunham tratar.

Assim sendo, todas as falhas têm práticas corretivas associadas.

Referências tais como CARDOSO (2000), LEWIS (1986), MOUBRAY (1997), apontam que, para sistemas mecânicos, afeitos a apresentarem taxas de falhas crescentes, indicam o emprego da prática preventiva, porém, em alguns casos, utilizar a prática preventiva apenas em um subsistema isolado traz mais inconvenientes que benefícios. Um exemplo clássico é a falha de ar comprimido ou de vácuo nos *nozzles*. Intervir em apenas um *shaft* pode trazer problemas tais como perda do sincronismo do castelo (*turret*), aumento na quantidade de componentes incorretamente posicionados e aumento da possibilidade de paralisação da linha. Mesmo a intervenção em todos os *shafts* não garante a qualidade operacional do equipamento, pois para trocar *o'rings*, por exemplo, é necessário desmontar o conjunto do *shaft*, desmontar cada unidade e reinstalar. Isto foi corrigido no procedimento proposto e foi possível notar um acentuado decréscimo na ocorrência de falhas deste tipo. Ocorre que deve-se assegurar que o componente será instalado na posição original e além disso, aferir o sincronismo, ajustar o curso vertical e a ação dos cames, como pode ser visto na Figura 8.16. Não basta solucionar o problema de entupimento do *nozzle* ou o travamento da válvula.

Nestes casos, mais valeria aumentar o número de tentativas para o *shaft* defeituoso e programar uma intervenção corretiva. Há que se atentar para o fato de que esta programação não deve se estender, ela é apenas uma medida para postergar para brevemente a parada sem prejudicar a linha e sem acarretar as conseqüências de uma falha que tenha se desenvolvido.

Sem a inspeção das árvores de decisão, esta constatação não seria possível, pois não haveria maneira de conciliar impactos financeiros, impactos de natureza técnica e probabilidades de ocorrência das falhas sob uma determinada política.

De uma forma geral, a adoção das políticas preventivas conduz às mais baixas probabilidades de ocorrência de falha, bem como aos mais baixos custos associados às suas extensões. Porém, em geral esta alternativa também conduz aos mais altos valores de custo direto de manutenção e, se houver problemas derivados de erros em sua execução, os impactos são mais profundamente sentidos, já que há mais custos envolvidos. Por esta razão, selecionar a política de manutenção preventiva não contempla apenas o trato com os equipamentos, mas deve-se estar atento às necessidades de qualificação das equipes.

As falhas das *ROUTERS* são, em boa parte, induzidas por falhas de programa de computador do seu controlador. Em que pese a manutenção pouco poder fazer além das ações corretivas apropriadas, há a necessidade de se ter os recursos em condições de uso (disponíveis), sejam eles materiais ou humanos. As conseqüências são as mesmas se forem comparadas àquelas oriundas de falhas próprias dos subsistemas mecânicos destas máquinas, já que os efeitos são mesmo muito similares.

Portanto, utilizar o método proposto neste trabalho para definir e selecionar uma política de manutenção aplicável a um sistema mecânico, resulta numa abordagem mais ampla que métodos já conhecidos, como RCM.

A Tabela 8.12 mostra o risco médio relacionado à situação anterior da linha, comparando-se com o risco médio associado à adoção da alternativa de política de manutenção indicada e a Tabela 8.13, mostra quais políticas foram selecionadas (uma para cada modo de falha) baseado na análise das árvores de decisão.

Tabela 8.12 – Comparação dos Valores dos Riscos Médios Antes e Após a Adoção da

## Política de Manutenção Proposta

Equipamento	Política Seleccionada	Risco Médio Antes [US\$/h]	Risco Médio Após [US\$/h]
CP3	MPCP1	61,57	38,55
CP3	MPCP2	7207,66	38,55 a 3936,90
CP3	MPCP3	7347,28	38,55 a 3644,40
ERSA	MPES1	7525,04	38,55 a 3644,43
ERSA	MPES2	8583,78	38,55 a 3644,43
REPAIR CONVEYOR	MPCV	6239,01	38,55 a 3639,90
ROUTER	MPRT	5383,34	38,55 a 6231,30

Tabela 8.13 – Políticas de Manutenção Seleccionadas por meio do Emprego do Método

## Proposto

Equipamento	Política Seleccionada
CP3	MPCP1
CP3	MPCP2
CP3	MPCP3
ERSA	MPES1
ERSA	MPES2
REPAIR CONVEYOR	MPCV
ROUTER	MPRT

A partir da seleção da alternativa de menor risco médio, mostradas na Tabela 8.13, executa-se a última etapa do método detalhado na seção 7.4 deste trabalho : a **Implementação definitiva da solução**.

### 8.8 - Análise dos Resultados da Aplicação do Método Proposto

Um benefício que não foi revelado nem nos diagramas nem nas árvores de decisão foi que a aplicação do método em SMD se refletiu muito positivamente em *ROUTERS*, tendo a quantidade de falhas caído quase que simultaneamente à adoção das políticas corretas de manutenção.

No caso da seção de SMD, primeiramente se notou um período de concentração de – poucas – falhas e depois as mesmas decresceram a quase zero na maior parte do tempo. Em termos das ocorrências de modos de falha, discrepâncias nos perfis dos fornos e falhas de montagem de componentes nas placas (*placement*) decresceram bastante, embora não tenha sido possível coletar dados para uma análise quantitativa acurada. Mas o fato de haver menos falhas induzidas nas *ROUTERS*, indica que as ações foram acertadas. Mais ainda, como a quantidade de placas rejeitadas após *pick-and-place* se reduziu drasticamente, passou-se a adotar, no programa de captura e posicionamento, apenas 1 única tentativa (*shot*) em lugar das 3 anteriores. Em placas que podem receber mais de 100 componentes em sucessivas baterias de máquinas FUJI<sup>®</sup>, isto representa uma economia de tempo apreciável, em um processo que apresenta um custo horário da ordem de mais de US\$24000,00. Isto pode até representar um impacto mais severo de uma eventual falha, mas às custas de uma sensível queda na probabilidade de ocorrência.

As demais linhas, as quais não foram objeto de análise deste trabalho, continuaram apresentando desempenho semelhante ao da linha em questão (3), e bem diferente do apresentado por esta linha após a adoção das medidas indicadas por este trabalho.

Uma função que não apresentou mudança em seu desempenho foi o reconhecimento óptico, onde as falhas continuaram a ocorrer com perfil semelhante ao anterior. Isto porque, excetuando-se as condições das lentes, uma causa para falha nesta função é devida ao próprio programa – algumas vezes, não é possível “ler” o componente tão velozmente quanto se necessita, ou o formato não é reconhecido devido a problemas no programa de computador, os quais não são objetos de estudo deste trabalho.

## **9 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

### **9.1 Conclusões**

O foco deste trabalho consistiu em elaborar um método para seleção de uma política de manutenção aplicável a um ambiente determinado, tendo como objetivo minimizar conjuntamente – o que se mostrou uma característica inovadora – os custos próprios da manutenção, os custos indiretos (estes tomados considerando-se as particularidades do ambiente pesquisado) e os impactos da ocorrência de diversos eventos sobre o desempenho dos equipamentos de uma linha de montagem de aparelhos eletrônicos portáteis, sobre as operações da planta com um todo e até mesmo sobre a qualidade e confiabilidade do produto. A elaboração deste método se baseou no emprego da análise de risco para o levantamento da situação anterior (objeto de estudo e necessidade a ser satisfeita), eventos e subsistemas iniciais para as falhas (o que se traduziu em identificar os modos de falha para os subsistemas mecânicos), definição dos riscos e impactos associados à ocorrência destes eventos – o que exigiu o emprego de conceitos de confiabilidade para o cálculo das probabilidades de falha e a construção dos diagramas causa-conseqüência para determinar com exatidão quais são e qual a extensão das falhas iniciais – e levantamento dos custos da manutenção em si e destas conseqüências, levando à proposta de aplicação do método utilizando-se de árvores de decisão alimentadas pela análise de risco e novamente pelos conceitos de confiabilidade, utilizados para elaborar as propostas aplicáveis de planos de manutenção, baseados nas práticas básicas indicadas ao tratamento de cada modo de falha, visando adotar a alternativa de menor risco-custo-impacto tão simultaneamente quanto possível.

Alguns resultados do desenvolvimento do trabalho e relativos ao método elaborado são citados a seguir :

- 1 – A utilização dos conceitos trazidos ao longo do desenvolvimento dos capítulos 3 ao 6 deste trabalho permitiu elaborar um método abrangente, provendo ao mesmo informações obtidas por meio da análise detalhada dos aspectos técnicos (sobretudo das ações de manutenção e práticas recomendadas a cada caso), das extensões das conseqüências dos eventos iniciais (falhas) e dos custos associados a tais extensões, aspectos estes percebidos anteriormente como dissociados quando da tomada de decisão em manutenção;
- 2 – O emprego dos conceitos de confiabilidade foi bastante útil em determinar quais modos de falha acometem os componentes das máquinas, as ações – principalmente no que concerne às práticas – recomendadas com base nestes modos de falha e quais as probabilidades de falha associadas a cada decisão de manutenção, informação crucial para uma tomada de decisão consistente quando se aplica o método proposto;
- 3 - Os conceitos de análise de risco resgatados no desenvolvimento do trabalho – algumas vezes de áreas outras que não a engenharia - se revelaram vitais para a definição das extensões dos eventos associados a cada alternativa de decisão, sobretudo pela delimitação do ambiente das operações das organizações e não apenas das linhas de produção, bem como pelo correto encadeamento dos eventos, o que leva à determinação dos riscos associados às falhas. Este benefício se estendeu ao levantamento dos custos, haja vista a análise de risco auxiliar a determinar quais os impactos sobre as operações das organizações como um todo, chegando ao desempenho do produto manufaturado nos equipamentos das linhas de produção quando em uso;

- 4 – Tendo identificada a seqüência de eventos, conhecendo em detalhes as tarefas de manutenção e o ambiente das operações das organizações, o modo de determinar os custos também se revelou capaz de produzir estimativas com boa precisão, mas principalmente, com um nível de detalhe o qual responde à questão dos custos associados à manutenção, abrangendo todos os aspectos afetados pelo desempenho – e por conseguinte por uma eventual falha – dos equipamentos de uma linha de produção;
- 5 – O método proposto se mostrou abrangente por compatibilizar, na tomada de decisão, aspectos identificados como dissociados quando da abordagem da manutenção por meio de métodos correntes, além de prover decisões consistentes apoiadas na precisão e detalhamento das tópicos relacionados às falhas em si, às suas extensões e seus custos (relacionado-os com as alternativas de política de manutenção elencadas), sendo que o risco médio orienta de forma eficaz a seleção da política de manutenção em favor da alternativa de menor valor;
- 6 - Adicionalmente, a aplicação do método proposto permite identificar pontos onde ações se mostram requeridas com maior intensidade, ou seja, quais os setores onde as falhas são mais críticas (sem ignorar que as falhas ocorridas em outros setores comprometem a operação do sistema como um todo, embora em menor grau), tendo em vista que os recursos para a implantação das políticas de manutenção (assim como em qualquer outra atividade ou projeto) são limitados e pode ser necessário priorizar o que deve ser atendido;

Então, os resultados planejados na proposta do método foram satisfatoriamente alcançados, especialmente porque o levantamento dos riscos pôde ser executado de forma detalhada e abrangente.

No que tange à aplicação do método proposto, os benefícios alcançados são relatados a seguir.

Os conceitos de análise de risco, permitiram compor um cenário inicial bastante revelador, mostrando que as falhas mais críticas causavam simultaneamente o maior tempo de imobilização da linha, danos moderados em equipamentos posteriores no processo (no caso as ROUTERS), custos diretos e indiretos altíssimos (pode-se ratear, inclusive, os custos de garantia da ordem de US\$ 20 milhões/ano). Neste cenário, embora houvesse uma lista de ações preventivas, as mesmas se revelaram incipientes e agravava-se a situação operacional da linha em virtude das intervenções programadas não serem executadas, tendo sido encontrados hiatos na execução destas intervenções de até 8 semanas.

A aplicação do método proposto permitiu levantar com boa exatidão a extensão das conseqüências das falhas iniciais associadas aos subsistemas isolados para análise. Também foi possível levantar os custos associados aos reparos e intervenções propriamente ditos, bem como, estimar os custos das conseqüências associadas às falhas. Empregando as técnicas da análise de confiabilidade de sistemas – poder-se-ia utilizar ferramentas mais elaboradas como o FMEA, porém, devido à configuração dos equipamentos, tal recurso se revelou dispensável, tendo sido de grande valia para este trabalho a análise dos diagramas de blocos – foi possível elaborar uma lista de procedimentos não somente baseada em recomendações dos fabricantes mas também em observações colhidas durante o período de coleta de dados, contendo informações tais como as práticas, ações, e periodicidade, passando a se constituir numa política de manutenção, ou seja, elencando as práticas de manutenção - tal como apresentadas no Capítulo 4 - ações e procedimentos, periodicidade e alocação de recursos (materiais e humanos).

Para implantar estas políticas, procurou-se também agregar melhorias na forma de planejar e controlar a manutenção, tendo-se mais atenção à gestão de contratos, alocação de

mão-de-obra e sua qualificação, visando manter no nível mínimo os custos da manutenção e também os riscos associados à erros em sua execução. Uma inspeção às tabelas relativas ao número de falhas observadas no equipamentos analisados após a implantação desta política de manutenção, apresentadas no item 8.5 do Capítulo 8, revela que, imediatamente após a adoção das políticas para os equipamentos da Linha 3, algumas falhas apresentam alguma taxa de ocorrência quinzenal inicial, a despeito de serem tratadas por políticas preventivas – perfeitamente indicadas aos modos de falha que as governam - mais adequadas que as anteriormente em voga. Em parte, estas ocorrências estão relacionadas à falta de habilidade das equipes de manutenção da empresa em questão, especialmente porque as habilidades destes profissionais são muito mais dirigidas à sistemas elétricos e eletrônicos do que à mecânica e automação. Nem mesmo após um extenso programa de formação de técnicos e engenheiros de automação foram notados progressos nas atividades de todos os profissionais, pois faltava mesmo formação básica aos envolvidos.

A capacidade de se planejar e programar as intervenções permitiu, após a aplicação do método proposto, utilizar melhor o contrato de suporte (que já era um custo direto da manutenção) do fornecedor para acompanhar as intervenções e instruir operadores, embora, neste tipo de máquina, uma ação acidental de um operador dificilmente cause ou agrave uma falha. Desta feita, a política de manutenção escolhida revelou-se – rapidamente – eficaz em combater as falhas às quais se propôs tratar. Tanto é que falhas um tanto óbvias, tais como falhas em *nozzles* devidas a vácuo e ar comprimido, as quais geram impactos significativos, em muito se reduziram, chegando a inviabilizar o cálculo de sua probabilidade, uma vez que por muitas quinzenas consecutivas se observou zero ocorrências.

Um outro problema bastante notado no início da fase de coleta de dados para caracterizar a sistema de manutenção da empresa foi a falta de registros adequados das causas de falhas, bem como das ações de combate às mesmas, o que se estende as intervenções

preventivas. Além da falta de padronização na descrição e no relato das causas-raízes, muitas delas não eram sequer descritas, já que era comum confundir sintoma com causa (modo de falha). Uma importante contribuição deste trabalho consistiu em relacionar modos de falha às ações para sua abordagem, sejam elas preventivas ou corretivas. Isto garante que um mesmo evento seja abordado de forma idêntica (ou quase), melhorando a precisão não só do diagnóstico, mas da solução adotada. Codificando-se tais modos de falha, é possível – automaticamente – relacioná-los às propostas de solução e gerar ordens de serviço já com a estimativa da duração da intervenção, procedimentos associados, recursos a serem alocados e outras informações relevantes. Isto beneficia em muito a confiabilidade do equipamento no retorno à operação e gera facilidade de programação, bom controle de custos (ainda que relacionados à intervenções corretivas) e para os sistemas mecânicos é facilmente implementável, embora laborioso.

A simples adoção das práticas adequadas e do cumprimento da programação, permitiu reduzir bastante os custos associados às falhas catastróficas, proporcionais a US\$275,82 por hora, sem considerar o custo da própria intervenção. Levando-se em conta que uma troca de fusos de esferas recirculantes pode consumir até 36 horas corridas de paralisação (se for necessário obter a peça em São Paulo e transportá-la a Manaus), e que esta falha é fruto apenas de fatores ligados à falta de manutenção preventiva (ao menos na planta pesquisada), uma economia da ordem de US\$10000,00 em 8 quinzenas apenas para um equipamento de uma linha pôde ser auferida, contando-se ainda com o impacto do desempenho correto de uma máquina sobre o produto. Em virtude do tempo que se gasta entre o embarque de um lote para o mercado e seus reflexos em termos de garantia e assistência técnica, em geral defasados de 4 meses, as mudanças na manutenção e, por conseguinte, no desempenho dos equipamentos e confiabilidade dos produtos não pôde ser comprovada ao longo das 8 quinzenas posteriores à implementação das políticas de manutenção. Com certeza, se US\$20 milhões são o horizonte

das despesas anuais com garantia, como mencionado no Capítulo 8, é de se esperar impacto significativo. Mas um benefício interno e muito sensível foi a acentuada redução na quantidade de falhas das ROUTERS, seja em virtude da adoção de políticas de manutenção corretas, seja em virtude da redução de falhas induzidas por erros de montagem em SMD.

Enfim, a implementação das políticas de manutenção elaboradas de acordo com o método proposto neste trabalho, permitiu à empresa reduzir custos e riscos (de forma geral, não apenas com relação ao desempenho do produto em campo) e possibilitou o cumprimento mais fiel da programação de produção e da própria manutenção, pois a política foi baseada nas restrições que o ambiente impõe.

Tal característica do método proposto neste trabalho é uma vantagem em relação, por exemplo, à aplicação de métodos como a RCM (do inglês *Reliability Centered Maintenance*), já que esta abordagem considera muito bem as ações para eliminação ou redução das causas-raízes (o que é válido inclusive para RCM II onde se visa entre outros objetivos, investir na qualidade da mão de obra de manutenção para evitar os erros humanos nesta) e mitigação dos efeitos das falhas, não permitindo elaborar uma política abrangente em termos de equilibrar custos, conseqüências e excelência técnica, motivo pelo qual a RCM foi rejeitada anteriormente na planta da empresa estudada. À luz da RCM, a impossibilidade de se executar revisões exatamente no período requerido – em razão da política de produção da empresa pesquisada - poderia levar a uma grande dificuldade de planejamento, exigindo a redução na taxa de utilização dos equipamentos (impensável) ou na redução da expectativa de vida útil do mesmo, ou ainda, sugerindo periodicidade menor para se encaixar na restrição, ocasionando desperdício e aumento de custos injustificados. Entretanto, o maior problema seria elaborar planos tecnicamente excelentes mas nunca executados, situação semelhante à encontrada na fase de coleta de dados, onde por até 8 quinzenas eram “puladas” intervenções programadas. O método proposto até assume um nível baixo de risco da eclosão de uma falha por não

designar o período ideal para intervenção em alguns casos, porém, quando examinado conjuntamente com outros fatores, o impacto é mínimo e a combinação risco/impacto/custos das conseqüências e custo da manutenção é minimizada. Quando um modo de falha pode apresentar grande e grave extensão de conseqüências, o método proposto não se exime de indicar mesmo uma periodicidade menor que a tecnicamente desejável (considerando-se modos de falha condizentes com taxas de falhas crescentes), indicando se o impacto, o custo e o risco são reduzidos de forma que compense adotar tal medida (tudo isto pode ser contemplado na construção das árvores de decisão). O método proposto neste trabalho é então uma salutar solução de compromisso entre aspectos técnicos (bem atendidos pela RCM), custos (em geral um entrave à qualquer política de manutenção) e impacto das conseqüências das falhas.

## 9.2 Recomendações para Trabalhos Futuros

Um projeto de implantação desta política em toda a fábrica está atualmente em curso, pretendendo, inclusive, elaborar um novo programa de computador, baseado na integração entre um banco de dados estruturado conforme o método proposto neste trabalho e uma planilha de cálculo e este fato leva à primeira recomendação para aperfeiçoamentos no método proposto.

- 1 - Não fez parte do escopo do trabalho ora apresentado calcular a disponibilidade dos equipamentos, embora seja tácito que a mesma tenha aumentado, já que reduziu-se significativamente a quantidade e o tempo das paradas e padronizou-se, de certa forma, o tempo de parada, já que os procedimentos passaram a ser idênticos para eventos idênticos. Isto se traduz numa forte evidência de que o tempo de reparo foi reduzido. O

cálculo deste parâmetro é de grande valia para determinar com maior precisão os custos relacionados a cada intervenção. O projeto em curso contempla estes cálculos e visa a emissão automática de ordens de serviço para intervenções planejadas, contendo os procedimentos, equipe escalada para execução, orçamento previsto, duração e observações coletadas em intervenções interiores, tudo ligado ao número de série do equipamento e ao modo de falha que se pretende combater. Esta pretensão se estende às intervenções corretivas;

- 2 - Uma outra possibilidade a ser explorada como prosseguimento deste trabalho é a monitoração de parâmetros vitais do equipamento, aí considerando-se não somente os sistemas mecânicos e, explorando-se o banco de dados e análises efetuadas empregando-se o método proposto neste trabalho, obter-se a emissão automatizada de ordens de serviço e mesmo a reparação automatizada de sistemas, muito útil no caso de falhas oriundas do controladores e de programas de computador (por exemplo, se é necessário reiniciar o equipamento, o próprio sistema de diagnose se encarrega de emitir um alarme, parar o mesmo em condições tão normais quanto possível, reiniciar e mesmo reinstalar algum aplicativo, fazendo toda a aferição dos sistemas mecânicos, inclusive).

Utilizar a monitoração de parâmetros funcionais vitais é muito útil, por exemplo, no caso de máquinas tipo *pick-and-place* da marca SIEMENS (não tratadas neste trabalho em virtude da natureza eminentemente elétrica de seus subsistemas e das equipes de manutenção pouco interagirem com o equipamento em questão em tarefas além de programar, ajustar e limpar a máquina), as quais possuem um grande e caríssimo acionamento por indução magnética, proveniente de um toróide. Falhas neste componente provocam erros de posicionamento de placas e podem induzir danos muito semelhantes aos dos *grippers* das ROUTERS se, em virtude do estado dos toróides, o

mesmo não obedecer os sinais do controlador e retornar respostas incoerentes com seu desempenho. É uma oportunidade, por exemplo, para implantar uma política preditiva por meio de análise de corrente elétrica e de assinatura eletromagnética, podendo-se utilizar técnicas de análise térmica para o mesmo fim, já que são sensíveis as alterações de temperatura no caso de problemas de perda de isolamento das bobinas ou de engripamento das guias lineares, as quais forçam o controlador a liberar mais corrente para os toróides, deteriorando-os de forma acelerada;

- 3 - Outra atraente possibilidade de utilização de técnicas de manutenção preditiva é no monitoramento dos perfis de temperatura dos fornos, especialmente porque estão sendo introduzidas pastas de solda tipo *lead-free* (isentas de chumbo, conforme determinado por legislações ambientais e acordos entre indústrias, como citado por HWANG et al (2003). Tais composições são muito mais sensíveis a variações de temperatura e facilmente levam à falhas em juntas soldadas, pois seu ponto de fusão é maior que o das soldas estanho-chumbo – Sn-Pb - eutéticas (ou qualquer outra proporção Sn-Pb) anteriormente utilizadas e a composição se deteriora mais facilmente por ser mais instável quimicamente, gerando óxidos, sais e pontos fragilizados ante um simples aumento na temperatura em 15 °C. Os vapores gerados também são diferentes e podem vir a impregnar as resistências de aquecimento de forma distinta da contaminação gerada por soldas eutéticas ou Sn-Pb em qualquer proporção. Eventuais discrepâncias podem ser facilmente percebidas e um alarme pode alertar para a necessidade de um intervenção, gerando a abertura automática de uma ordem de serviço. Isto também é uma forma de mitigar conseqüências oriundas da restrição imposta pelo próprio ambiente de intervenções múltiplas de 15 dias. Deve-se lembrar que, atualmente, a planta possui 13 linhas de produção, algumas com 2 fornos para placas montadas dos 2 lados, refusão de solda, portanto é uma fase da montagem que carece de maiores

cuidados e depende diretamente do desempenho das resistências elétricas dos fornos. Além disso, problemas em resistências devido acúmulo de impurezas traduzem-se, também, em problemas nos exaustores.

- 4 – Para avaliar os benefícios do método proposto em relação às abordagens correntes de manutenção, uma proposta consiste em comparar este com as abordagens de RCM (ou MCC) e TPM, implementando as mesmas e verificando em que medida são atendidas as demandas do ambiente das operações da organização beneficiária, procurando traduzir os resultados em bases quantitativas.

Assim, em termos de técnicas, muito pode ser agregado ao método aqui proposto, tornando a política de manutenção selecionada a mais aderente às necessidades do ambiente.

## **10 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- [1] – AFFONSO, L. O., **Análise de Falhas e Soluções de Problemas de Equipamentos Mecânicos**, São Paulo, IBP - Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, curso ministrado em abril, 2002.
- [2] – APELAND, S.; AVEN, T, **Risk Based Maintenance Optimization**, Reliability Engineering and System Safety, nº 67, vol.3, pp.85-94, 2000.
- [3] - AYYUB, B.; KARASZEWSKI, Z.; WADE, M., **Probabilistic Risk Analysis of Diesel Power Generation Outboard Ships**, in Naval Engineers Journal, vol. 111, nº 3, 1999.
- [4]- AUGUST, J., **Applied Reliability Centered Maintenance**, Penn Well, Tulsa, EUA, 1999.
- [5] – BAIR, D., **Recreating Information Systems Organization**, Maintenance Technology Journal on-line, publicação em meio informatizado, fevereiro,1999.
- [6] – BRAGLIA, F.; BEVILACQUA, G., **Maintenance Decision Making : Ways of Solving Multicriterial Sceneries Focused on the Electronic Industry**, Electronic Packaging Journal, nº253, pp.73-79, Irving, TX, EUA, 2000.
- [7] – BIER, H., **Risk Assessment Approach Applied to Maintenance Planning**, s.n., 2000
- [8] - BLOCH, H.F.; GEITNER, F.K., **Machinery Failure Analysis and Troubleshooting**, vol. 2, 3ª ed., Gulf Publishing Company, Houston, 1997.
- [9] - BOUTALEB, T., **A Web-Based Decision Analysis for Risk Studies**. Term paper presented to the Faculty of the Graduate School of the University of Maryland as part of the Professional Master requirements, Maryland, EUA,1999.
- [10] – BRANCO, G., **Dicionário de Termos de Manutenção e Confiabilidade**, São Paulo, Ciência Moderna, 2000.

- [11] – BURNS. K.; TURCOTTE, R., **Prioritizing and Quantifying the Risk of Outstanding Corrective Actions**, Reliability Engineering and System Safety, nº 68, vol.1, pp.85-94, 2000.
- [12] - CARDOSO, I.A.P., **Elaboração de Políticas de Manutenção : Uma Abordagem Voltada à Análise de Confiabilidade**, dissertação apresentada à Escola Politécnica da USP como requisito do programa de Mestrado em Engenharia Mecânica, São Paulo, Brasil, 2000.
- [13] - CARDOSO, I.A.P.; BELHOT, R., **Reflexos da Manutenção no Contexto Global da Organização**, in **Metalurgia & Materiais**, v.50, São Paulo, Brasil, 1994.
- [14] - CARDOSO, I.A.P.; SOUZA, G.F.M.; BELHOT, R., **Aplicação do Método de Decisão AHP na Seleção das Práticas de Manutenção de Sistemas Mecânicos**, V CONEM, João Pessoa – PB, 2002.
- [15] - CARVALHO, L. T., **Manutenção e Manufatura Integradas. Manutenção**, ABRAMAN, nº 77, pp. 26-31, set/out-2000.
- [16] - CELLIS, J. T.; SCHÄUFFER, K., **Segurança no Trabalho : responsabilidade de todos nós. Manutenção**, nº 81, maio/junho, 2001.
- [17] - CLEMEN, R., **Making Hard Decisions : An Introduction to Decision Analysis**, 2ª ed., Duxburry Press, Belmont, EUA, 1996.
- [18] – CHURCHMAN, C., **Teoria dos Sistemas**, Petrópolis, Vozes, 1972.
- [19] – DAI, Y.; JIA, Y., **Reliability of a VMC and its improvement**, Reliability Engineering and System Safety, nº 72, pp. 99-102, 2001.
- [20] - DHILLON, B., **Reliability Engineering in System Design and Operation**. Van Nostrand Reinhold Company Inc., New York, 1983
- [21] - DHILLON, B.S., **Engineering Maintainability : How to Design for Reliability and Easy Maintenance**, 1ª ed., Gulf Publishing Co., Houston, EUA, 1999.

- [22] - DRAPINSKI, J., **Manutenção Mecânica Básica**, São Paulo, McGraw-Hill, 1973.
- [23] - EBELING, C. E., **An Introduction to Reliability and Maintainability Engineering**, 1ª ed., McGraw-Hill, New York, EUA, 1997.
- [24] – EISINGER, J.; RAKOWSKI, E., **RCM Based Frame for Maintenance Decision Making**, s.n., 2001.
- [25] - FREUDENBURG, W., **Risk Thinking : facts, values and blind spots in societal decisions about risks**. Reliability Engineering and System Safety, nº 72, pp. 125-130, 2001.
- [26] – FROWEIN, H. I.; LAMBER, J.; HAIMES, Y., **Alternative Measures of Risk of Extreme Events in Decision Trees**, Reliability Engineering and System Safety, nº66, vol.1, pp.69-84, 1999.
- [27] - GARBATOV, Y.; SOARES, C.G., **Cost and Reliability based strategies for fatigue maintenance planning of floating structures**, Reliability Engineering and System Safety, nº73, pp. 293-301, 2001.
- [28] - GERTAMN, D.I.; BLACKMAN, H., **Human Reliability & Safety Analysis Data Handbook**, 1ª ed., John Wiley & Sons, New York, EUA, 1994.
- [29] – GUEDES SOARES, C., **Maintenance Planning Guidelines : Beyond the Factory**, European Journal of Maintenance, s.n, 2001.
- [30] - HAIMES, Y., **Risk Modeling, Assessment and Management**. New York, Jonh Wiley & Sons, 1998.
- [31] - ISHIKAWA, K., **What is Total Quality Control (The Japanese Way)**. Prentice-Hall, New York, 1985.

- [32] – ISO-NBR-13533, **Coleta de Dados de Campo Relativos à Confiabilidade, Manutenibilidade, Disponibilidade e Suporte à Manutenção**, ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, Brasil, Novembro, 1995.
- [33] - KECECIOGLU, D., **Reliability Engineering Handbook**, vol. 1 e 2, 1ª ed., Prentice-Hall, New York, EUA, 1991.
- [34] - KECECIOGLU, D., **Maintainability, Availability and Operational Readness Engineering Handbook**, vol. 1 e 2, 1ª ed., Prentice-Hall, 1996.
- [35] - KUMAMOTO, H.; HENLEY, E., **Probabilistic Risk Assessment and Management for Engineers and Scientists**, 2ª ed., IEEE Press, New York, EUA, 1996.
- [36] – LEITCH, R., **Reliability Analysis for Engineers : an Introduction**. Oxford University Press, Oxford, Grã Bretanha, 1995.
- [37] - LEVITT, J., **Managing Factory Maintenance**, Springfield Resources, Springfield, EUA, 1997.
- [38] - LEWIS, E., **An Introduction to Reliability Engineering**, New York, John Wiley & Sons, 1986.
- [39] - LYONNET, P., **Maintenance Planning, Methods and Mathematics**, Chapman & Hall, Londres, Grã-Bretanha, 1991.
- [40] - MA, K.; ORISAMOLU, I.; BEA, R., **Optimal Strategies for Inspection of Ships for Fatigue and Corrosion Damages**, Relatório Técnico SSC-407, Ship Structure Committee, U.S. Coast Guard, New York, EUA, 1999.
- [41] - MARTINS, E., **Contabilidade de Custos**, s.n, 1990.
- [42] - MEIER, H., **Auditoria de Métodos e Processos de Manutenção**, Manutenção, ABRAMAN, nº 86, Março/maio, 2002.
- [43] - MIRSHAWKA, V. , **Manutenção Produtiva Total : a busca do zero defeito**, São Paulo, Makron, 1991.

- [44] - MODARRES, M.; KAMINSKIY, M.; KRISTSOV, V., **Reliability Engineering and Risk Analysis : A Practical Guide**, 1ª ed., Marcel Dekker, New York, EUA, 1999.
- [45] – MONLEVADE, E., **Relações de Orientação Resultantes da Precipitação de Austenita em Ferrita em Aço Inoxidável Dúplex** - Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002 - 93p.
- [46] – MOTA, J.; NEVES, D.; THURLER, L., **Inspeção Baseada em Risco Aplicada ao Planejamento de Paradas de Manutenção**, Manutenção, ABRAMAN, Ed. 96, Fev, 2004
- [47] - MOTTER, O., **Manutenção Industrial : o poder oculto na empresa**. São Paulo, Hemus, 1992.
- [48] - MOUBRAY, J., **Reliability Centered Maintenance**, Oxford Press, Oxford, Grã-Bretanha, 1997.
- [49] – NAKAGAWA, M., **ABC : Custeio Baseado em Atividades**. 1ª ed. Atlas. São Paulo, Brasil, 1994.
- [50] - NEPOMUCENO, L. X. *et alii*, **Práticas de Manutenção Preditiva**, 2v. São Paulo, Edgard Blücher, 1989.
- [51] – NORTON, E., **Machine design : an integrated approach**, Upper Saddle River, N.J. : Prentice Hall, c1998.
- [52] - O'CONNOR, P., **Practical Reliability Engineering**, 2ª ed., Suffolk, John Wiley & Sons, 1985.
- [53] - PAPAZOUGLOU, I., **Mathematical Foundation of Event Tree**, in Reliability Engineering and System Safety, n°61, pp 169-183, 1998.
- [54] – PARK, D.; JUNG, G.; YUM, J., **Cost Minimization for Periodic Maintenance Policy of a System Subjected to Slow Degradation**, Reliability Engineering and System Safety, n° 68, vol.2, pp. 105-112, 2000.

- [55] - RENN, O., The need for integration : risk policies requires the input from experts, stakeholders and the public at large, *Reliability Engineering and System Safety*, nº 72, pp 131-135, 2001.
- [56] – ROCHA, M. A., **entrevista**, *AEROMAGAZINE*, nº 35, pp 37-41, abril 1997.
- [57] - ROUSH, M.; XANG, J., **What Every Engineer Should Know About Risk Engineering and Management**, 1ª ed., Marcel Dekker, New York, EUA, 2000.
- [58] - SHIGLEY, J. E.; MISCHKE, C. R., **Mechanical Engineering Design**, 5ª ed., New York, Mc Graw Hill, 1989.
- [59] – SHIMIZU, T., **Decisão nas Organizações**, Atlas, São Paulo (2001).
- [60] - SOUZA, G.F.M.; AYYUB, B., **Risk-Based Inspection Planning for Ship Hull Structures**, Proceedings of the 37<sup>th</sup> Annual Technical Symposium of the Association of Scientists and Engineers of the Naval Sea Systems Command, Arlington, EUA, 2000.
- [61] - TAVARES, L. A., **Controle de Manutenção por Computador**. São Paulo, JR Editora LTDA., 1987.
- [62] - THOMPSON, G., **Improving Maintainability and Reliability Through Design**, 1ª ed., Professional Engineering Publishing, Londres, Grã-Bretanha, 1999.
- [63] - VAURIO, J. K., Reliability Characteristics of Components with Tolerable Repair Times, *Reliability Engineering and System Safety*, nº 56, pp. 43-52, 1997.
- [64] - VO, T.V.; BALKEY, K., **Chapter 17 : Risk-Based Inspection and Maintenance**, in *Probabilistic Structural Mechanics Handbook*, edit. P/ Sundararajan, Chapman and Hall, New York, EUA, 1995.
- [65] - WANG, Y.; JIA, Y.; ZHENG, Y.; Yi, S., Failure Probabilistic Model of CNC Lathes, *Reliability Engineering and System Safety*, nº 65, pp. 307-314, 1999.

- [66] - WEUSTINK, I. F.; ten BRINKE, E.; STREPPPEL, A.; KALS, H., A Generic Framework for Cost Estimation and Cost Control in Product Design, **Journal of Materials Processing Technology**, nº 103, pp. 141-148, 2000.
- [67] - WHITEHEAD, A., Cronometria :planejamento e custo do trabalho nas oficinas. Mestre Jou, São Paulo, 1968.
- [68] – WONNACOTT, R; WONNACOTT, D., **Economia**, trad. CRUSIUS Y; CRUSIUS, R., São Paulo, Mc Graw Hill, 1989.
- [69] – WOODHOUSE J., **Managing industrial risk : getting value for money in your business** John Woodhouse , Londres, Chapman&Hall, 1993.
- [70] – [www.cet.com.br](http://www.cet.com.br), “*website*” da Companhia de Engenharia de Tráfego da cidade de São Paulo.
- [71] - XENOS, H, **Gerenciando a Manutenção Produtiva**. EDG, Belo Horizonte, 1998.
- [72] – HWANG C; KIM K; SUGANUMA K, Interfaces in Lead-Free Soldering. **Journal of Electronic Materials**, vol. 32, nº 11, pp. 1249-1256, 2003.