

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA  
DEPARTAMENTO DE PROJETO MECÂNICO

# DETERMINAÇÃO DE CRITÉRIOS PARA A ESCOLHA DE METODOLOGIAS DE MANUTENÇÃO

*por Marcos Alves dos Reys  
orientador Prof Dr. Robson Pederiva*

Dissertação submetida à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica.

*5 de setembro de 1995*

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL  
DA TESE DEFENDIDA POR MARCOS ALVES DOS  
REYS E APROVADA PELA  
COMISSÃO JULGADORA EM 11/10/1995

*R.P.*

ORIENTADOR

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

Tese de Mestrado.

Título da Tese: "Determinação de Critérios para a Escolha de Metodologias de Manutenção"

Autor: Marcos Alves dos Reis

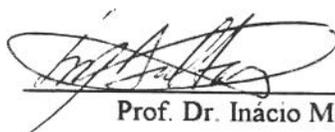
Orientador: Prof. Dr. Robson Pederiva

Aprovado por:



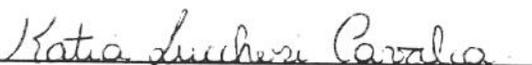
---

Prof. Dr. Robson Pederiva - Presidente



---

Prof. Dr. Inácio Maria Dal Fabro



---

Prof. Dr. Katia Luchesi Cavalca Dedini

Campinas , 11 de outubro de 1995

*Este trabalho contou com o apoio financeiro do CNPq.*

# Sumário

Lista de Figuras	v
Lista de Tabelas	vii
Resumo	viii
Abstract	ix
Agradecimentos	xii
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 A questão da manutenção	1
1.2 As interfaces	2
1.3 Os modelos	4
1.4 A exploração das interfaces	5
1.5 Comentários	6
<b>2 As inspeções em sistemas reparáveis</b>	<b>7</b>
2.1 O valor das inspeções no equipamento	7
2.2 Padronização da manutenção em sistemas reparáveis	11
2.2.1 Os processos de renovação e NHPP	12
2.2.2 A função intensidade de falha	13
2.3 A natureza das falhas em sistemas mecânicos	16
2.4 Comentários	17
<b>3 Evolução das metodologias de manutenção</b>	<b>19</b>
3.1 Manutenção de Emergência	20
3.1.1 Reparos mínimos	21
3.2 Manutenção Preventiva	22
3.3 Manutenção Preditiva	24
3.4 Manutenção Planejada Corretiva	29
3.5 A manutenção como base de uma SCA	29
3.6 Comentários	31

<b>4</b>	<b>Gestão de custos na manutenção</b>	<b>32</b>
4.1	O acompanhamento da manutenção . . . . .	32
4.2	Tendências da gestão de custos . . . . .	34
4.3	O planejamento de capital . . . . .	35
4.4	O gerenciamento de custos da tecnologia . . . . .	36
4.5	A função manutenção em ambientes industriais . . . . .	37
4.6	O gerenciamento de custos na manutenção . . . . .	38
4.7	Comentários . . . . .	41
<b>5</b>	<b>Sobre a Organização do Trabalho</b>	<b>42</b>
5.1	A confiabilidade coletiva e a automação . . . . .	42
5.2	O enriquecimento de funções . . . . .	44
5.3	O Sistema de Informações Gerenciais . . . . .	45
5.4	A competência técnica e econômica . . . . .	48
5.5	Comentários . . . . .	50
<b>6</b>	<b>Análise de segurança</b>	<b>52</b>
6.1	O gerenciamento ativo de riscos . . . . .	52
6.2	A análise de risco . . . . .	54
6.3	Comentários . . . . .	56
<b>7</b>	<b>Critérios para a escolha de metodologias de manutenção</b>	<b>57</b>
7.1	A distribuição de Weibull . . . . .	58
7.1.1	Introdução e conceitos . . . . .	58
7.1.2	A distribuição de Weibull . . . . .	59
7.1.3	A função de distribuição acumulada . . . . .	60
7.1.4	A função densidade de probabilidade de falha . . . . .	63
7.1.5	A função intensidade de falha . . . . .	64
7.1.6	Medidas de tendência central . . . . .	67
7.2	A otimização da manutenção . . . . .	69
7.2.1	O modelo de Thompson . . . . .	70
7.2.2	O modelo de Kamien e Schwartz . . . . .	72
7.2.3	Outros modelos . . . . .	78
7.3	A otimização de modelos que utilizam a MPC . . . . .	80
7.3.1	As decisões . . . . .	80
7.3.2	A Manutenção Planejada Corretiva . . . . .	82
7.3.3	A questão da obsolescência . . . . .	91
7.4	Comentários . . . . .	94
<b>8</b>	<b>Manutenção baseada da confiabilidade</b>	<b>96</b>
8.1	Base de dados . . . . .	97
8.2	Critérios de confiabilidade . . . . .	101
8.2.1	O comportamento da função $\lambda(t)$ . . . . .	101
8.2.2	O efeito da MPC . . . . .	106

8.3	Aplicações . . . . .	108
8.3.1	Valores de entrada . . . . .	108
8.3.2	Análise de sensibilidade . . . . .	112
8.4	Comentários . . . . .	114
<b>9</b>	<b>Critério de custos</b>	<b>115</b>
9.1	Os custos na qualidade . . . . .	116
9.2	As condicionantes da reposição de ativos . . . . .	117
9.3	Simbologia utilizada . . . . .	118
9.4	As variáveis componentes do custo . . . . .	119
9.4.1	Aplicações . . . . .	122
9.5	Influência da taxa de juros . . . . .	126
9.6	Comentários . . . . .	128
<b>10</b>	<b>Conclusões e sugestões para próximos trabalhos</b>	<b>129</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>134</b>

# Lista de Figuras

1.1	Modelos de manutenção	6
2.1	As atividades da manutenção	8
2.2	Same-as-new	16
2.3	Same-as-old	17
2.4	Curva da bacia	18
2.5	Influência da Manutenção	18
3.1	Manutenção sistêmica	20
3.2	Hierarquia do monitoramento	26
6.1	O gerenciamento de riscos	53
7.1	A influência de $\beta$ em $F(t)$	62
7.2	A influência de $\beta$ em $f(t)$ ( $\alpha$ constante)	63
7.3	A influência de $\alpha$ na dispersão de $f(t)$ ( $\beta$ constante)	64
7.4	Influência de $\beta$ na função intensidade de falha	66
7.5	Variação de $\lambda(t)$ em função de $\alpha$ para diferentes valores de $\beta$	67
7.6	Política de Manutenção de Thompson	71
7.7	Política de manutenção contínua e não crescente	73
7.8	Forma de $S(t)$ até atingir o valor de descarte $J$ .	74
7.9	fluxo de caixa	77
7.10	A abordagem tradicional de custos	81
7.11	A descontinuidade da função Intensidade de Falha	84
8.1	A tarefa de manutenção	99
8.2	Comportamento da função intensidade de falha	104
8.3	Evolução da taxa de falha ( $\delta = 5 \cdot 10^{-5}$ )	109
8.4	Evolução da taxa de falha nos períodos	111
8.5	Diminuição do intervalo entre MPV	113
8.6	Análise de sensibilidade à B e D	113
9.1	As categorias de custo	116
9.2	A descontinuidade da função de custos	126

9.3	Sensibilidade do custo do capital à taxa de juros . . . . .	127
9.4	Sensibilidade do custo total à taxa de juros . . . . .	127

# Lista de Tabelas

8.1	Evolução da função intensidade de falha . . . . .	110
9.1	Resultados obtidos . . . . .	124

# Resumo

O presente trabalho pretende observar a esfera de decisão da atividade da manutenção em ambientes industriais. Inicia-se este estudo pela revisão dos modelos de engenharia econômica, de decisão markoviana, programação linear e dinâmica, teoria de controle ótimo e variações. Entendemos que a maioria absoluta destes estudos não leva em conta o caráter específico de cada metodologia de manutenção no que se refere aos diferentes critérios observáveis, parcialmente, em vários ramos do conhecimento como, por exemplo, a teoria da decisão, análise de risco, teoria econômica, confiabilidade, etc. Desta forma, o trabalho realiza uma coletânea de textos que circunscrevem o espaço de decisão enfatizando o caráter temporal das variáveis e privilegiando a confiabilidade, a análise de risco e custos associados. São colocados, ainda, considerações sobre o elemento humano na tarefa da manutenção, questões sobre o desenvolvimento tecnológico e sobre as bases computacionais necessárias para a conformação de um modelo que permeie estes diferentes critérios.

Palavras-chave: Confiabilidade, Manutenção, Segurança do trabalho, Recursos humanos na indústria, Engenharia - estimativa e custo, Tecnologia.

# Abstract

This work intends to deal with maintenance framework in the industrial environment. We begin our research by a survey of several models from engineering economics, Markov decision making, linear and dynamic programming, optimal control theory and variations of these. We have found that an overwhelming majority of these methods doesn't take into account the specific characteristics of each maintenance methodology as concerns the different partially observable criteria in several areas of knowledge; for instance, decision theory, risk analysis, economics theory, etc. Thus the work surveys some papers that circumscribed maintenance decision space while emphasising the temporal characteristics of the variables and while giving special attention to reliability, risk analysis and related costs. Furthermore, we included some considerations that the human element plays in the maintenance problem, questions on the technological development and, finally, the necessary software basis to the conformation of a model which permeates these different criteria.

Key-words: Maintenance, Reliability, Costs, Safety, Technology, Human Resources.

Aos meus pais que deram o adorno de minha alma.

À minha querida Cristiane, o adorno de meu coração. E ao nosso querido  
filho Matheus.

# Agradecimentos

Especialmente, ao Prof. Dr. Robson Pederiva, pela oportunidade que me concedeu de me orientar no desenvolvimento deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Carlos Amadeu Pallerosi, pelo exemplo

aos amigos da Pós-Graduação da UNICAMP

em especial ao Eng. MSc. Axel Fuerst , ao Prof. Marco Lucio Bittencourt e ao Eng. Agrícola MSc. Marcelo de Almeida Pierossi

"Blessed is the spot, and the house, and the place, and the city, and the heart, and the mountain, and the refuge, and the cave, and the valley, and the land, and the sea, and the island, and the meadow where mention of God hath been made, and His praise glorified."

Bahá'u'lláh

# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 A questão da manutenção

Um problema que muitas vezes é colocado na área de manutenção de máquinas é a respeito da adequação de uma determinada metodologia de manutenção (preventiva, preditiva, etc) para um sistema novo ou já operante. Normalmente este problema é tratado de duas formas opostas, ou como um exercício matemático onde as hipóteses geralmente utilizadas diminuem a praticidade dos modelos, ou então é considerado um problema estritamente prático, isto é, não passível de ser tratado metodologicamente e cuja resolução depende, na maior parte das vezes, do conhecimento subjetivo dos mantenedores.

Uma abordagem que se desenvolve entre estes dois polos é a que considera a manutenção como uma atividade que pode gerar uma vantagem competitiva sustentável. Por este ponto de vista, o conjunto de interfaces, que constitui a dimensão da manutenção, é tratado pela empresa como uma forma de angariar vantagens dificilmente equiparáveis por seus competidores.

Estas interfaces, por sua vez, são tão abrangentes quanto a disponibilidade de recursos e as especificidades de cada empresa em seu ambiente competitivo. Assim, por exemplo, questões de segurança industrial e ambiental podem ser fundamentais para determinado setor industrial, enquanto que outro pode ter, em gargalos tecnológicos, o seu principal foco de atenção.

Porém, independentemente do setor, as empresas são constituídas de bens de capital que consubstanciam a produção e que devem ser mantidos pelo tomador de decisão dentro de critérios específicos de uma lógica determinada.

Dentro desta problemática, discute-se a posição hierárquica de determinada máquina ou processo dentro do sistema global, assim como efeitos decorrentes de quebras repentinas, tempo de reparo, custos associados, etc.

Objetiva-se com este estudo fornecer subsídios mais claros, para o tomador de decisão, destas interdependências de fatores, na determinação da metodologia mais adequada de manutenção a ser aplicada à máquina ou processo em questão.

## 1.2 As interfaces

Dentre estes fatores, os relacionados com a dimensão técnica da manutenção (Confiabilidade, Manutenibilidade, etc) são usualmente os mais considerados nas decisões de aquisição e descarte de ativos permanentes [72]. E, desta forma, os custos associados a estes ativos são afetados amplamente pelo tipo de manutenção escolhida para cada específico equipamento [72], [73], [75].

Entretanto, nas empresas que utilizam bens de capital de modo intensivo, principalmente, os investimentos em ativos permanentes representam dispêndios imensos [33] e, portanto, é necessário ater-se não somente ao montante inicial destinado à sua aquisição, mas também aos custos subseqüentes relacionados à sua adequada operacionalidade.

Neste contexto, a confiabilidade de muitos produtos pode ser vista em termos econômicos [56]. O projeto de uma peça de uma máquina, por exemplo, pode envolver considerações de equilíbrio entre o aumento do custo de capital envolvido na consecução de uma confiabilidade mais alta, acrescentando-se o aumento nos custos de manutenção e os oriundos da perda de produção decorridos de uma baixa confiabilidade.

Os usuários, por sua vez, esperam que os produtos e sistemas que eles utilizam sejam confiáveis, seguros e econômicos. Uma pergunta que então se apresenta é: "Quão confiável, seguro e economicamente viável será o sis-

tema durante os próximos períodos de operação?” Esta pergunta pode ser respondida, em parte, através da avaliação do comportamento quantitativo da confiabilidade [12],[75].

Por outro lado, as questões envolvidas na viabilidade econômica de determinado ativo permanente estão intimamente relacionadas ao tipo de empresa a que está vinculado, notadamente no nível de utilização destes ativos e insumos na obtenção do seu produto final [33].

Um outro ponto a se considerar é que a cada dia o ciclo de vida tecnológico dos produtos diminui e o número de alterações de engenharia aumenta. Ao mesmo tempo, a aceleração das mudanças tecnológicas está também diminuindo o ciclo de vida das instalações industriais. Máquinas, equipamentos e sistemas tornam-se muitas vezes obsoletos antes de completar a sua vida útil, de forma que é cada vez mais importante compreender a composição do custo total do produto para determinar a sua lucratividade e diminuir perdas. Desta forma, os sistemas gerenciais devem propiciar maior visibilidade do impacto dos custos de engenharia, de manutenção e de fabricação. Neste contexto, as possíveis alternativas de engenharia e , especialmente, de manutenção e sua influência nos custos do processo deve ser entendidas a fim de avaliar a oportunidade de tais alterações [11].

Neste sentido, diferentes políticas de reposição otimizada de ativos permanentes têm sido consideradas por vários autores. Nestes trabalhos, diferentes critérios de otimização são utilizados: a minimização do custo total [39], a maximização de lucros, a maximização da disponibilidade [56], dentre outros.

Segundo Jardine [42], uma vez que o equipamento esteja instalado e em operação, as práticas de manutenção são importantes para assegurar que o equipamento seja mantido em um nível economicamente aceitável. Desta forma as decisões da atividade de manutenção são relacionadas com as seguintes principais áreas: a) a recolocação de componentes e sistemas ; b) inspeção; c) recondicionamento e reparos; d) política de manutenção para sistemas redundantes; e) estrutura organizacional; f) aprovisionamento de peças sobressalentes.

Neste ponto inclui-se na esfera de decisão da manutenção as preocupações com a segurança industrial através de considerações sobre a análise de risco.

### 1.3 Os modelos

Consideráveis esforços têm sido devotados para modelar o problema da decisão econômica colocado pela necessidade de se substituir ou manter equipamentos sujeitos à deterioração no tempo.

Métodos de engenharia econômica [39], processos de decisão markoviana [27], programação linear e dinâmica [18],[42], teoria de controle ótimo [48], [95], processos parcialmente observáveis, semi markovianos [99], [102] e muitas outras variações destes têm sido aplicadas a este problema.

Na maioria dos modelos pesquisados na literatura, a missão manutenção atém-se exclusivamente à substituição de equipamentos. Em alguns trabalhos, a inspeção faz parte das considerações como um instrumento para diminuir o caráter não observacional do estado do equipamento.

A reposição de equipamentos é uma das mais importantes decisões estratégicas de uma empresa. O problema da reposição é clássico nos estudos de pesquisa operacional, gerenciamento, programação linear e áreas correlatas. Pode-se obter uma significativa coletânea de artigos sobre esta questão no trabalho de Pierskalla e Voelker [80] (até 1976) e no de Valdez-Flores e Feldman [98] (até 1987). Em especial na utilização de processos de decisão markoviana, pode-se encontrar uma significativa coletânea no trabalho de White [102] (até 1993).

Em relação ao trabalho de White [102], é significativo salientar que dos 18 artigos na área de manutenção, inspeção e reparo citados, nenhum deles foi realmente implementado e nem ao menos teve algum efeito sobre o processo de decisão envolvido.

O trabalho de Pierskalla e Voelker inclui modelos que envolvem uma tomada de decisão ótima para inspecionar, reparar e/ou substituir um ativo permanente sujeito à deterioração. Os modelos são apresentados em duas

partes como pode ser visto na figura (1.1). Nos modelos de manutenção de natureza discreta, isto é, em períodos discretos, a unidade é monitorada e uma decisão é tomada entre reparar, trocar e/ou recuperar estoques. Muitos destes modelos apresentados são markovianos, isto é, o estado do sistema é descrito pelo nível de deterioração e/ou número de peças sobressalentes disponíveis em estoque.

Estes modelos são subdivididos, então, entre os que pressupõem a existência de um estoque infinito e os que rejeitam esta condição. Novamente, os modelos que não comportam estoques subdividem-se entre si baseados no tipo de informação disponível (completa ou incompleta).

Os modelos de natureza contínua também apresentam subdivisões. A primeira delas é a que aplica a teoria de controle sobre a mantabilidade onde se sobressai o trabalho de Thompson [95] e o de Kamien e Schwartz [48], os quais serão explicitados dentro do enfoque deste trabalho.

O segundo tipo desta série de modelos são os baseados no critério de idade dos componentes. Uma hipótese empregada nestes modelos é que o custo de troca de um equipamento que chegue até a falha é  $c_2$  enquanto que o custo de troca do mesmo equipamento antes da falha é  $c_1$ . A suposição básica destes modelos é que  $c_1 < c_2$ .

Quanto aos modelos de choque, os de interação entre atividades de reparo e os de informação incompleta, que não serão abordados neste trabalho, estes podem ser vistos no trabalho de Pierskalla e Voelker [80].

## 1.4 A exploração das interfaces

Por outro lado, uma alternativa apresentada para a reposição de ativos permanentes é o recondicionamento, [35],[42],[72], descrito por Pallerosi [75] como Manutenção Planejada Corretiva (MPC).

A Manutenção Planejada Corretiva é vista como um complemento residual da Manutenção Preventiva (MPV) e, embora não recoloca o equipamento numa condição que na literatura é denominada bom-como-novo (good-as-new), definitivamente melhora as suas condições operacionais [35],[40], [57],

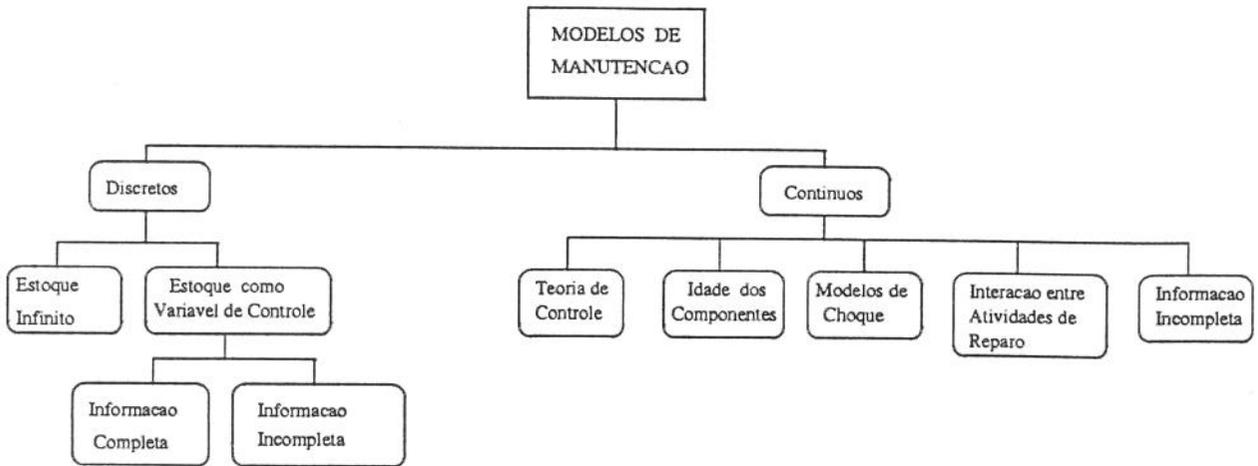


Figura 1.1: Modelos de manutenção

[60], [64].

Situando, portanto, a missão da MPC em uma posição intermediária entre os conceitos de tão ruim quanto a antiga (bad-as-old) , em que a taxa de falha de um equipamento não é melhorada pela manutenção (manutenção imperfeita) e o de "good-as-new" em que o equipamento retorna à situação de novo após a manutenção. Estes conceitos serão vistos mais detalhadamente.

Finalmente, é preciso analisar, mesmo que parcialmente, o papel do operador no processo e no levantamento de dados que irão constituir, em última análise, o cerne da metodologia aqui apresentada.

## 1.5 Comentários

Neste capítulo posiciona-se o problema da manutenção dentro das esferas de decisão que serão abordados ao longo deste trabalho. Os modelos de otimização da manutenção foram apresentados sucintamente, pois se pretende privilegiar as interfaces existentes entre os modelos de natureza contínua e nelas incluir considerações sobre os diferentes tipos de missões de manutenção e, desta forma, desenvolver critérios de decisão sobre as metodologias de manutenção.

## Capítulo 2

# As inspeções em sistemas reparáveis

### 2.1 O valor das inspeções no equipamento

As inspeções do equipamento são pressupostos básicos da manutenção planejada. A manutenção preditiva feita em equipamentos de alta prioridade, segundo algum critério, inclui a sua inspeção periódica e cuidadosa, visando avaliar o seu estado operacional. Além disso, as inspeções inserem-se no contexto de uma avaliação econômica das medidas a serem tomadas, de modo a evitar a deterioração do equipamento e acompanhar o seu ciclo de vida.

Por este ponto de vista, poder-se-ia classificar as atividades de manutenção sob os três aspectos da figura (2.1).

A manutenção planejada, vista como uma vantagem competitiva sustentável, reduz os custos proporcionais decorrentes da perda de produção oriundas de paralizações não previstas. Além disso há as considerações quanto à segurança humana e o efeito de uma eventual falha em equipamentos interconectados.

A avaliação do equipamento é condição necessária da manutenção planejada. A ela somam-se as atividades de reparo ou MPC propriamente ditas que elevam a condição do equipamento a uma fração de "good-as-new". Estas atividades, por sua vez, estão intimamente ligadas ao treinamento dos

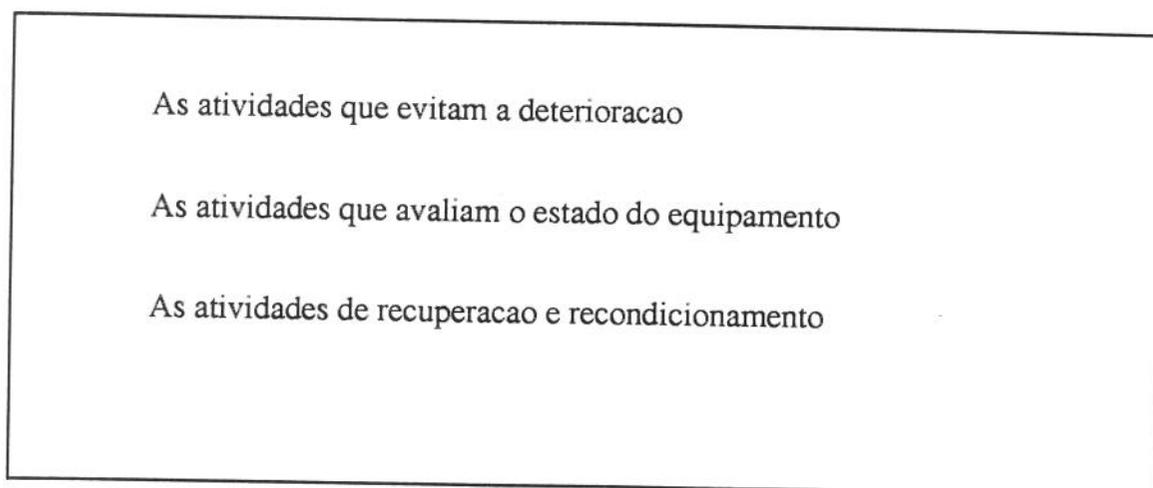


Figura 2.1: As atividades da manutenção

mantenedores.

Isto é, a simples detecção, a 'priori', da falha não significará a redução no número de falhas ou em maiores prazos para a MPC, necessitando, para isso, de melhores técnicas de reparos, regulagens e "set-up".

Quando a garantia da qualidade é deslocada para os processos, todos na empresa têm de se envolver e se responsabilizar pela qualidade. O conceito de processo, então, se estende por toda a empresa incluindo inspeção, compras, engenharia, marketing, finanças, manutenção, etc. Assim, o processo de produção é organizado de tal forma a permitir objetivar índices de defeitos baixíssimos. A garantia da qualidade em cada processo de produção deve ser montada de tal forma a não produzir defeitos ou, se produzir, não transferir. Este objetivo é perseguido através da busca da melhoria da capacidade estatística do processo e prevenção de defeitos pela análise de falhas, manutenção preventiva e automação da inspeção [21].

Entretanto, no contexto da manutenção preventiva, não é sempre possível observar continuamente a condição operacional de um equipamento e/ou sistema. Assim, inspeções periódicas são efetivadas para se conhecer a situação de um sistema antes de uma tomada de decisão.

O problema de se planejar estas inspeções em sistemas que se deterioram com o tempo tem sido objeto de pesquisa nos últimos anos. O trabalho de

Valdez-Flores [98] apresenta alguns destes modelos em que a premissa básica é que as perdas devido às paralizações da produção podem ser reduzidas através de freqüentes inspeções. Há, entretanto, a pressão em se reduzir o número de inspeções frente ao seu alto custo.

As inspeções são consideradas perfeitas, isto é, revelam o verdadeiro estado do sistema. O decisor deve optar, normalmente, entre duas ações: 1) Qual ação mantenedora deve ser implementada ; 2) Determinar qual o próximo período de inspeção.

Esta bidimensionalidade do espaço da decisão é explorada por diversos autores no que se concerne às diferentes variáveis do sistema, o tipo e quantidade de informação disponível, o horizonte de tempo analisado, a natureza dos custos, etc.

O modelo básico dependente da idade é o de Barlow [80] em que não se prevê manutenção preventiva e o sistema é substituído quando de sua falha. Além disso, o modelo assume que:

1. a falha do sistema somente é conhecida através da inspeção,
2. as inspeções propriamente ditas não degradam o sistema,
3. o custo da inspeção é  $c_1$ ,
4. o custo de uma falha não detectada por unidade de tempo é  $c_2$ .

Desta forma, a função custo por ciclo de inspeção é dada por

$$C(t, x) = c_1 n + c_2(x_n - t) \quad (2.1)$$

onde  $t$  é o tempo até a falha,

$x = (x_1, x_2, x_3, \dots)$  é a seqüência de inspeções  $x_1 < x_2 < x_3 < \dots < x_n$  e  $n$  é tal que  $x_{n-1} < t < x_n$ .

A inspeção ótima é aquela que minimiza a função custo  $C(t, x)$ , onde  $t$  (o tempo até a falha do sistema) é uma variável aleatória não negativa.

Uma restrição do modelo proposto por Barlow é que ele se apresenta ótimo quando a distribuição de falha do sistema é do tipo exponencial, isto é, uma distribuição estritamente crescente.

Luss [58] propõe uma outra abordagem para o problema das inspeções. Para ele, o grau de deterioração do sistema pode ser medido através de inspeções. Ele assume que, durante as inspeções, o sistema possa ser classificado em algum estado  $0, 1, 2, 3, \dots, L$ . Se o sistema for 0 ele é novo e se for  $L$ , o estado de falha, ele é imediatamente substituído a um custo  $c_2$ , que é superior ao custo  $c_n$ , se o sistema fosse substituído antes da falha  $0 < n < L$ .

Uma limitação do modelo proposto por Luss é que  $c_n$  é considerado constante  $\forall n$ .

Sengupta [87], em um trabalho posterior ao de Luss, apresenta um problema de manutenção em tempo contínuo onde a deterioração é "markoviana" e o estado real do sistema só pode ser avaliado por meio de uma inspeção.

Enquanto Luss assume que a substituição de um ativo precisa ser feita imediatamente após uma inspeção, Sengupta permite uma substituição retardada por  $t$  unidades de tempo em seu modelo. Um exemplo dessa situação, apresentada em seu artigo, é quando  $c_i, i = 0, 1, 2, 3, \dots, n$ , representa a diferença entre o preço de compra de um equipamento novo e o valor de revenda (salvage value) do equipamento antigo. Em sua argumentação, se o comprador se encarregar de inspecionar o sistema por sua própria conta não seria justificável inspecionar o sistema antes de vendê-lo.

Sengupta considera, ainda, que o custo de substituição  $c_n$  é uma variável estritamente crescente em função da deterioração do sistema. O autor mostrou também que os intervalos ótimos de manutenção e de inspeção são funções decrescentes em relação à deterioração do sistema.

Nakagawa [66] propôs um modelo modificado de inspeção. Neste modelo o sistema tem a mesma idade após a checagem com probabilidade  $p$  e ele se tornará "good-as-new", isto é, ele será substituído, com uma probabilidade  $q = 1 - p$ .

Ainda segundo o autor, é muito difícil obter soluções analíticas para períodos ótimos de inspeção em seu modelo. Ele sugere, então, o uso de procedimentos de busca numérica para contornar esta dificuldade.

Em outro artigo, Nakagawa e Yosui [65] apresentam um algoritmo que encontra uma solução ótima (aproximada) para o caso em que a distribuição

de intensidade de falha do sistema não é exponencial. Os autores apresentam um exemplo numérico em que há uma boa aproximação para uma distribuição de Weibull.

Munford [63] demonstrou que quando a função intensidade de falha é crescente, a política de inspeção com intervalos decrescentes entre sucessivas missões em função da idade do sistema, é superior à política de inspeção periódica de intervalos constantes.

## 2.2 Padronização da manutenção em sistemas reparáveis

Basicamente, os equipamentos podem ser divididos em reparáveis e não reparáveis. Normalmente um equipamento não é projetado para não sofrer nenhum tipo de manutenção [56]; esta, entretanto, pode ser feita de modo que o equipamento ou módulo, desde que esteja avariado, seja rapidamente substituído colocando-o novamente em operação.

Entretanto, para que os sistemas sejam efetivamente reparados é necessário que se possua o domínio tecnológico sobre os mesmos. Este domínio, entretanto, só pode ser mantido através de uma padronização de atividades [20].

Segundo Falconi Campos [20], a padronização de atividades de prevenção e preservação dos equipamentos da empresa tem como objetivos:

- prevenir problemas nos equipamentos de produção
- prevenir o aumento da dispersão das características da qualidade do produto devido à deterioração das condições do equipamento
- prevenir a queda da eficiência do equipamento
- prevenir o aumento dos custos de manutenção

Por sua vez, os padrões de sistema para o controle dos equipamentos de produção referem-se à seqüência e procedimentos de preservação periódica,

procedimentos de preservação (plano de execução da inspeção periódica, registro de resultados de inspeção, procedimentos da missão manutenção, procedimentos de "set-up", etc), seleção de equipamentos, objetivos para prevenção e preservação, método de utilização dos registros da inspeção periódica e outros, para citarmos os mais relevantes.

Quanto aos padrões de inspeção periódica dos equipamentos, estes referem-se, segundo a sua criticidade, a locais de inspeção, itens a serem inspecionados, frequência da inspeção, método da inspeção, instrumentos a serem utilizados, critérios e ações após a inspeção ( a missão manutenção propriamente dita).

É preciso também relacionar os padrões de sistema para o controle de equipamentos de teste e inspeção. Estes, referem-se à seqüência e procedimentos para o controle da precisão - plano de execução da inspeção periódica, procedimentos de execução da inspeção periódica, registro dos resultados da inspeção, procedimentos de reparo, procedimentos da inspeção de recebimento, etc.

Por outro lado, algumas considerações como acesso, configuração, disposição, etc, têm uma grande importância no projeto de novos equipamentos. Este trabalho, entretanto, não se deterá a estes aspectos.

### 2.2.1 Os processos de renovação e NHPP

Os dois modelos mais comuns para a confiabilidade de sistemas reparáveis são os processos de renovação e o processo não homogêneo de Poisson (NHPP) [83]. Estes modelos diferem-se na forma pela qual o sistema atua imediatamente após a sua falha e respectivo reparo.

Se a confiabilidade de um sistema reparado é a mesma de um sistema novo, então o sistema é modelado por um processo dito de renovação. O termo "good-as-new", já citado neste trabalho, tem sido utilizado para descrever tais processos de renovação. Esta terminologia é um pouco confusa, porque alguns sistemas, cuja confiabilidade inicial é pequena, podem se tornar "bad-as-new" após o reparo. Alguns autores, entre eles Rigdon [83], recomendam a frase

"same-as-new" para descrever os processos de renovação.

Devido ao fato de que um sistema reparado pode estar na mesma condição de um sistema novo, um processo de renovação não pode ser utilizado para modelar um sistema que se deteriora ou que apresente melhoria com o tempo.

Se, por outro lado, a confiabilidade do sistema não se altera depois de um reparo, isto é, um sistema reparado está na mesma condição antes e depois do reparo de uma falha, então o modelo apropriado é um NHPP. A frase "bad-as-old" tem sido utilizada para descrever um NHPP. Esta frase também apresenta uma certa confusão, porque um sistema em fase de desenvolvimento que esteja passando por um crescimento de sua confiabilidade, pode estar "good-as-old" após o reparo. A frase "same-as-old" é então adotada por alguns autores citados por Rigdon.

O termo "reparo mínimo" também tem sido utilizado para descrever o efeito de uma falha e o seu subsequente reparo em um sistema modelado por um NHPP. Mais adiante, quando se descrever a manutenção corretiva de emergência (MEC), poderá ser observada uma definição mais formal de reparo mínimo e sua aplicação no âmbito deste trabalho.

### 2.2.2 A função intensidade de falha

Uma importante característica de um NHPP é a função intensidade de falha, ou apenas função intensidade, denotada por  $\lambda(t)$ . Ela é o limite da probabilidade de falha, em um intervalo de tempo suficientemente pequeno, dividido pelo comprimento deste intervalo; isto é

$$\lambda(t)dt = P[\text{falha}(t, t + dt)]. \quad (2.2)$$

A função intensidade de falha depende somente do tempo acumulado  $t$  desde o "start-up" do sistema. Podemos diferenciar o tempo global  $t$  do tempo local  $x$ , onde  $x$  seria o tempo decorrido desde a mais recente falha do sistema. Se a função intensidade é crescente então a probabilidade de falha em um intervalo de tamanho fixo é crescente. Este fato nos leva à situação em

que as falhas se tornam mais freqüentes com o tempo, correspondendo ao caso em que há uma deterioração do sistema.

Uma vez que a função intensidade pode ser descrita como uma derivada em função do tempo, podemos ver porque  $\lambda(t)$  é muitas vezes chamada de taxa de falha do NHPP [68]. O problema é que a literatura de confiabilidade utiliza o termo taxa de falha em outros tantos sentidos que ele se tornou confuso [5], [83].

O processo denominado "Power-law" é um NHPP com uma particular forma da função intensidade de falha. Se  $t$  é o tempo global, então a equação

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta-1} \quad (2.3)$$

é válida para  $\forall t > 0$ .

Assim o chamado processo "power-law" depende de dois parâmetros desconhecido  $\alpha$  e  $\beta$ . Quando  $\beta = 1$  o "power-law" se torna um processo homogêneo de Poisson (HPP) com o tempo médio entre falhas igual a  $\alpha$ .

O HPP é caracterizado por tempos entre falhas interdependentes e identicamente distribuídos de acordo com uma distribuição exponencial, isto é, se a primeira, segunda, terceira, etc, falha ocorrer em tempos  $0 \leq T_1 \leq T_2 \leq T_3 \leq \dots$  então as diferenças  $D_1 = T_1 - 0; D_2 = T_2 - T_1; D_3 = T_3 - T_2; \dots$  têm uma distribuição exponencial com taxa de falha  $\lambda$  e são estatisticamente independentes. Isto é [68]:

$$P(D_i \leq t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (2.4)$$

para  $i = 1, 2, 3, 4, \dots$  ou mais formalmente [22],

$$P(a < D_i < b) = e^{-\lambda a} - e^{-\lambda b} \quad (2.5)$$

onde

$$P(D_i > a) = e^{-\lambda a},$$

$$P(D_i < a) = 1 - e^{-\lambda a}$$

Somente neste caso especial o NHPP pode ser considerado como um processo de renovação.

Quando  $\beta > 1$  a função intensidade de falha é crescente. Isto corresponde à situação em que o tempo entre falhas torna-se cada vez menor, por outro lado,  $\beta < 1$  implica em que a função intensidade de falha é decrescente e, conseqüentemente, os tempos entre falhas se tornam maiores.

Segundo Rigdon [83], nem o processo de renovação (same-as-new) nem o NHPP (same-as-old) são perfeitamente realistas para muitos sistemas. No caso de deterioração, restaurar um sistema (sem substituí-lo) a uma condição "good-as-new" parece não ser correto. Por outro lado, um sistema reparado usualmente está em uma melhor condição do que a encontrada antes de sua falha. Ainda segundo o mesmo autor, dos dois modelos apresentados, o NHPP é o que mais se aproxima da realidade em muitas situações.

Neste trabalho, as considerações envolvidas nas missões manutenção de emergência serão analisadas segundo o modelo NHPP em sua formulação "power-law" de acordo com a equação (2.3).

Em recente artigo de Sheu e Griffith [88], os autores consideram que é usual admitir-se que a peça reparada retorna a uma condição "good-as-new" (reparo perfeito). Esta suposição significa que uma vez reparada, a peça tem a mesma densidade de probabilidade de falha de uma peça nova. Se apenas o tempo de operação for considerado, isto é, se o "down-time" do sistema for negligenciado, a sequência de tempos de falha terá a forma geral da figura (2.2).

Entretanto, na maioria dos casos, a suposição mais realista é considerar que a probabilidade de falha não é a mesma para uma peça reparada e uma nova. Alguns autores como Blumenthal, Greenwood, Herbarch [14], Brown e Proschan [17], Black, Borges e Savits [13] consideram que a peça retorna a uma condição "bad-as-old" (reparo imperfeito). Assim, se apenas o tempo de operação for considerado, isto é, se novamente o "down-time" não for considerado, a seqüência de tempos de falha terá a forma geral da figura (2.3).

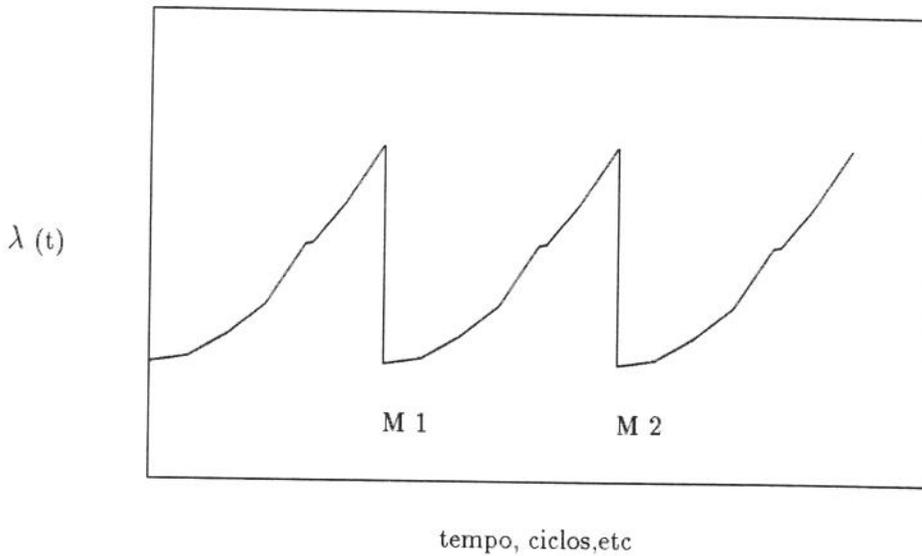


Figura 2.2: Same-as-new

Mais adiante serão vistas as considerações que indicam a adoção de uma posição intermediária entre as aceções "same-as-new" e "same-as-old" e os problemas envolvidos na adoção deste ponto de vista na determinação deste critério.

### 2.3 A natureza das falhas em sistemas mecânicos

A curva característica da taxa de falha em sistemas mecânicos, válvulas, bombas, motores possui um período inicial de decréscimo - onde são observadas as falhas oriundas do controle de qualidade - seguido por um crescimento ao longo do tempo. Nestes sistemas as falhas, em sua maioria, têm característica acumulativa, desgaste, corrosão, fadiga, etc, de modo que a manutenção planejada deve se reportar a uma prática em que se estime a vida útil dos equipamentos.

Por vida útil, entende-se a vida do equipamento a partir de um determinado tempo em que ele possa desempenhar a sua operação de modo seguro e economicamente viável no contexto da produção.

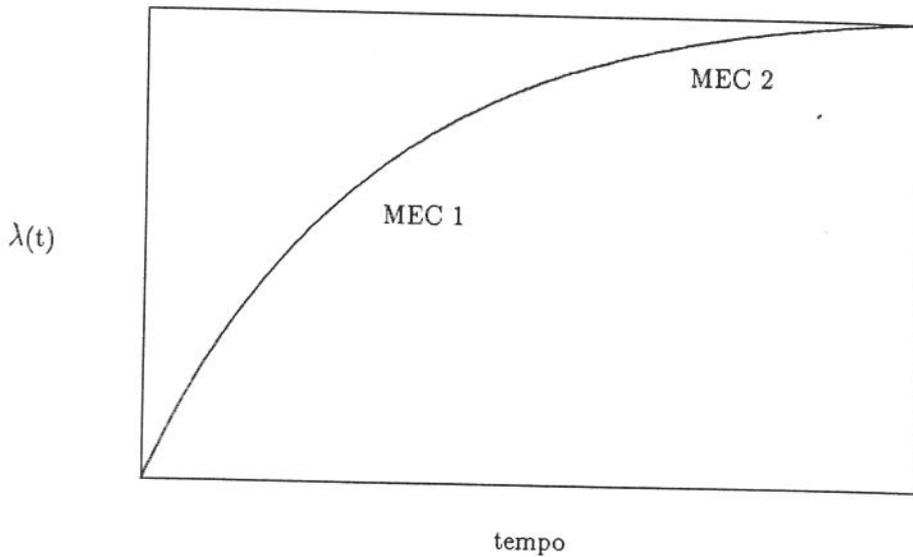


Figura 2.3: Same-as-old

Assim, a manutenção planejada deve determinar os períodos de manutenção preventiva, de MPC e os critérios econômicos e técnicos da substituição de componentes e sistemas.

A figura (2.4) mostra a curva da bacia, e a figura (2.5) mostra o efeito da manutenção e do controle de qualidade nesta curva.

## 2.4 Comentários

Este capítulo apresentou os conceitos básicos envolvidos nos modelos de manutenção no que se refere às inspeções de sistemas reparáveis. Quando da inspeção, o decisor deverá explorar (1) qual o tipo de ação mantenedora a ser implementada e (2) qual o próximo período a ser cumprido para uma nova inspeção. Ambas as questões são diretamente influenciadas pelo tipo de modelo confiabilístico adotado ("same-as-new" ou "same-as-old"). Mais adiante, será demonstrado como a adoção de um modelo confiabilístico intermediário influenciará o resultado da otimização da atividade da manutenção.

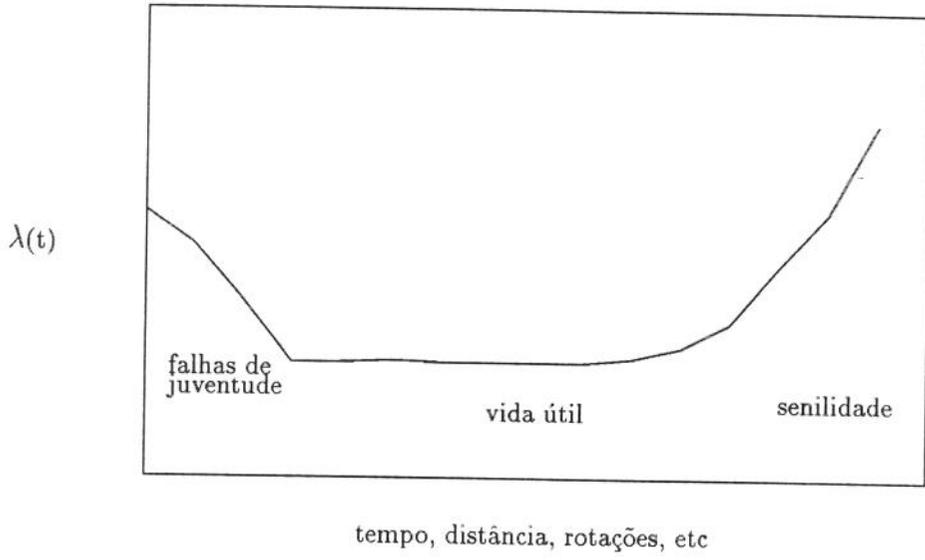


Figura 2.4: Curva da bacia

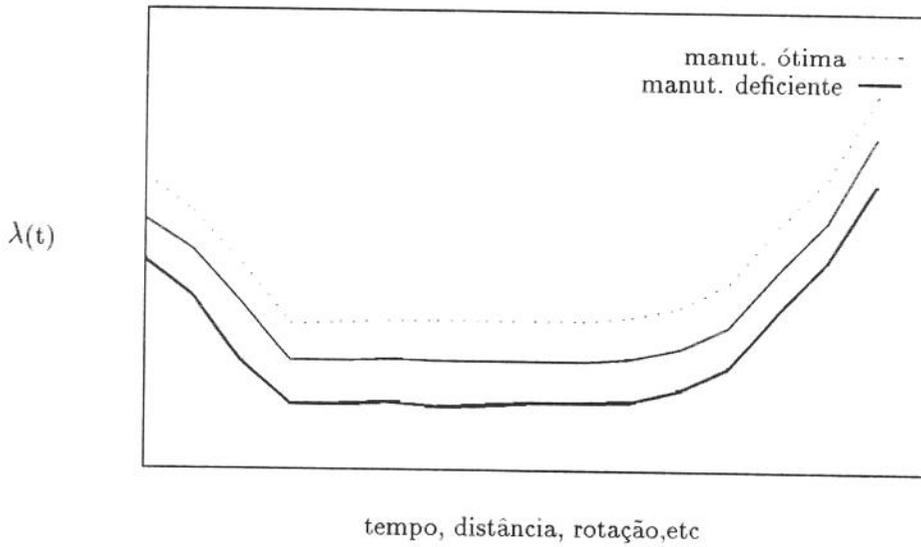


Figura 2.5: Influência da Manutenção

## Capítulo 3

# Evolução das metodologias de manutenção

Segundo Pallerosi [75], como toda ciência, a manutenção tem evoluído significativamente com a adição de tecnologias e da transformação do papel de conservar (consertar ou reparar, a fim de dar continuidade à produção) para o de manter (escolher os meios de prevenir, corrigir ou de renovar, segundo a utilização de materiais e técnicas, com o intuito de otimizar os custos e benefícios). Pode-se, então, classificar a manutenção em 4 fases progressivas, como pode ser visto na figura (3.1):

- I Manutenção de crises : Reparar quando falhar;
- II Manutenção Preventiva: Reparar antes que falhe;
- III Manutenção Preditiva: Monitorar o momento da falha e reparar somente na iminência da falha;
- IV Manutenção como parte integrante da vantagem competitiva de manufatura

O manejo adequado do conjunto de metodologias de manutenção é o que denominamos Manutenção Sistêmica. Isto é, no contexto da produção, os

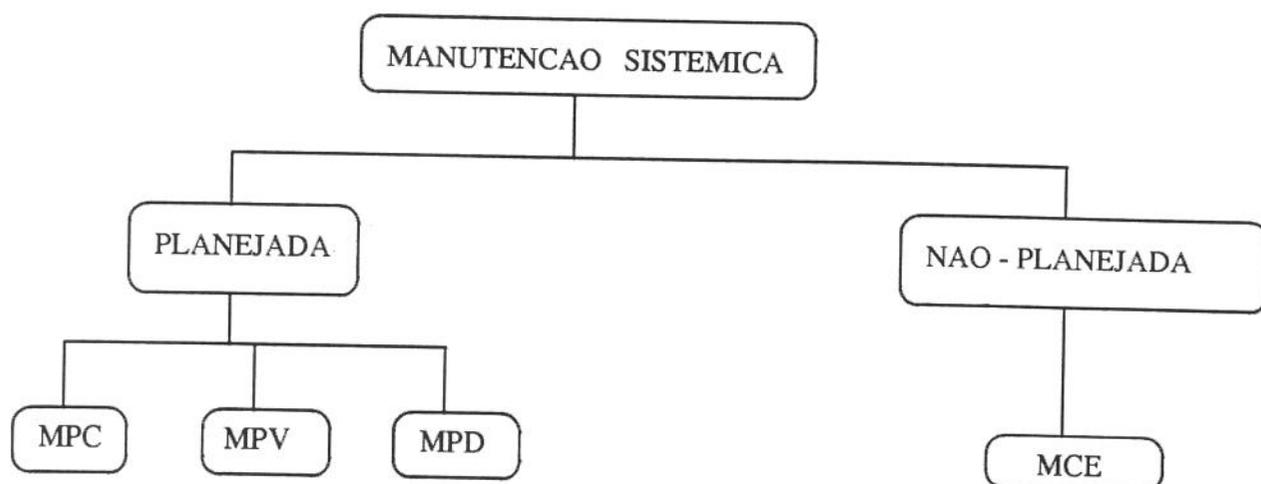


Figura 3.1: Manutenção sistêmica

diferentes equipamentos e sistemas podem estar, segundo algum critério, sujeitos a diferentes metodologias de manutenção na busca de uma atividade otimizada e que garanta uma vantagem competitiva sustentável. Confundindo-se, mesmo, as atividades da fase IV da evolução das Metodologias de Manutenção com o objetivo da Manutenção Sistêmica a qual pretende-se contribuir com este trabalho.

### 3.1 Manutenção de Emergência

A Manutenção Corretiva de Emergência é na realidade uma correção. O que difere a Manutenção Corretiva de Emergência (MCE) das demais é que a falha já ocorreu, não havendo uma programação da missão manutenção. É a que mais danos traz aos equipamentos e ao processo de produção.

Alguns equipamentos, no entanto, podem ser planejadamente configurados para MCE. Neste caso interessa não apenas a probabilidade de falha, mas também o número de falhas e, em particular, o tempo necessário para que os reparos sejam feitos. Para estas considerações, dois parâmetros de confiabilidade são ressaltados: a disponibilidade e a mantenabilidade.

A disponibilidade de um objeto é, segundo Pallerosi [75], a sua capacidade, expressa por uma probabilidade, de:

- apresentar um tempo real de efetivo funcionamento compatível com a missão requerida, em um dado tempo especificado;
- ser reparado (recolocado em serviço)
  - em condições operacionais e ambientais especificadas;
  - com custos de reparos compatíveis;
  - com tempos de recolocação, os menores possíveis.

O outro parâmetro é a *Mantenabilidade*, definido pela ABNT [2] como a facilidade de um item em ser mantido ou recolocado no estado, no qual ele pode executar suas funções requeridas, sob condições de uso especificadas, quando a manutenção é executada sob condições determinadas e mediante os procedimentos e meios prescritos.

Outras definições colocam a *mantenabilidade* como uma medida de quão rapidamente um sistema pode ser reparado após uma falha.

### 3.1.1 Reparos mínimos

Neste trabalho, as intervenções de natureza emergencial serão consideradas de probabilidade muito baixa e, em sua eventualidade, cobertas por reparos mínimos. Este tipo de atividade de manutenção, portanto, retornará o equipamento/sistema a uma condição "bad-as-old", como citado anteriormente.

O leitor poderá encontrar uma coletânea de modelos de manutenção baseados em reparos mínimos no trabalho de Valdez-Flores [98]. Destes, destacam-se os trabalhos de Nakagawa [65],[66] por incluir em suas considerações o tempo gasto entre a falha de um equipamento e sua efetiva substituição, o custo das peças sobressalentes usadas nas MCE e o custo de substituição de equipamentos entre os períodos previstos para a substituição. Além disso, em [66] os autores apresentam uma definição mais rigorosa do termo "reparo mínimo" e, baseado nestes resultados, desenvolvem um modelo de substituição ótima de equipamentos.

Segundo Nakagawa pode-se definir "reparo mínimo" como se segue: suponha que o sistema inicie sua operação no tempo 0 . Se o sistema falha, então são realizadas ações MCE, em caráter de reparo mínimo e reinicia-se a operação. Assume-se que o tempo de reparo possa ser desprezado. Denota-se  $y_0, y_1, y_2, \dots, y_n, \dots$  os tempos de falha do sistema onde  $y_0 = 0$ . O tempo entre falhas é  $x_n \equiv y_n - y_{n-1}$  para  $n > 0$ .

Define-se: Seja  $P\{x_1 \leq t\} \equiv F(t)$  para  $t \geq 0$  . O sistema é recolocado em serviço por um reparo mínimo, se e somente se,

$$P\{x_n \leq x \mid x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_{n-1} = t\} = \frac{F(t+x) - F(t)}{\bar{F}(t)} \quad n = 2, 3, \dots (3.1)$$

para  $x > 0, t \geq 0$  de tal forma que  $F(t) < 1$  e  $\bar{F}(t) = 1 - F(t)$

A função

$$\frac{[F(t+x) - F(t)]}{\bar{F}(t)} = \textit{taxa de falha}$$

é denominada por Barlow como taxa de falha e representa a probabilidade que o sistema com idade  $t$  falhe em um intervalo finito  $(t, t+x]$  . A definição mostra que a taxa de falha do sistema permanece inalterada quando submetida a um reparo mínimo, isto é, o sistema após o reparo mínimo possui a mesma taxa de falha do NHPP.

### 3.2 Manutenção Preventiva

Uma outra metodologia possível de manutenção é a Manutenção Preventiva (MPV). A Manutenção Preventiva é realizada para manter o sistema em uma condição consistente com os níveis requeridos de desempenho e confiabilidade [12].

Neste tipo de manutenção efetuam-se regulagens, ajustes e alinhamentos, trocam-se lubrificantes e componentes, de modo a evitar a falha do sistema [56].

A MPV é uma manutenção efetuada para se reduzir a probabilidade de falha ou a degradação do serviço prestado pela mesma. Pode também ser

entendida como uma intervenção de manutenção programada com uma certa regularidade antes do possível aparecimento de uma falha [75].

O objetivo da MPV é manter as taxas de falha do sistema abaixo de um determinado valor de projeto de operação [12]. Isto é, objetiva-se aumentar a confiabilidade do sistema agindo-se sobre os efeitos do desgaste, corrosão, fadiga e fenômenos correlatos [56].

As atividades de MPV são geralmente postas em prática em uma frequência periódica baseadas na idade cronológica (mensal, semanal, etc), no tempo de operação e quantidades processadas. Entretanto, a execução de missões de MPV como função de uma dessas frequências podem não levar a um resultado ótimo. Segundo Leake [54], como resultado de diversos estudos, foi determinado que o intervalo ótimo entre missões de MPV precisa ser baseado na condição operacional do equipamento. Assim, os intervalos entre MPV podem ser classificados nas seguintes categorias:

- por idade cronológica;
- por tempo de operação; ou
- por condição operacional.

Ainda segundo este autor, algumas organizações realizam atividades de MPV que são, em essência, de natureza preditiva. Isto é, missões MPV que são idealizadas para medir o desempenho ou condição de um componente ou de um sistema. Estas missões podem, portanto, ser vistas como MPD nas quais quando uma parte do equipamento é encontrada funcionando em um nível de desempenho reduzido, um recondicionamento (MPC) pode ser efetuado.

Estas atividades de MPV também podem fornecer informações que podem ser utilizadas para prever quando um equipamento pode atingir um nível inaceitável de desempenho. Assim, um programa de MPV pode incluir atividades do tipo preditiva. A MPD será considerada a seguir.

### 3.3 Manutenção Preditiva

A Manutenção Preditiva (MPD) tem por enfoque o monitoramento em operação dos equipamentos de forma a serem detectados quaisquer sintomas de anomalias [75].

A inspeção "on-line" é uma técnica que estima uma hierarquia dos elementos internos de um sistema com base na observação de fenômenos externos. Neste sentido, a técnica é semelhante aos diagnósticos médicos: raio X, testes hematológicos, eletroencefalograma, etc.

Em muitos casos, a máquina demonstra sintomas antes da avaria e, assim sendo, um estudo analítico especializado pode permitir o reconhecimento precoce desse tipo de sintoma e permitir a previsão do "caminho" da avaria.

Aos operadores caberia observar cuidadosamente e compreender estes sintomas e ter capacidade para prever uma avaria. Entretanto, em múltiplos e complexos sistemas esta tarefa é, no mínimo, extremamente difícil.

Neste contexto, a MPD evita a tendência à supermanutenção - entendida como as freqüentes missões de MPV e MPC, além disso, é uma filosofia de promoção de atividades econômicas com base sobre os ciclos de manutenção otimizados.

Nas operações de produção complexas, algumas questões sobre a metodologia de manutenção devem ser consideradas individualmente em relação a cada equipamento. Dadas as quantidades produzidas, ao montante das perdas decorrentes de paralizações programadas ou não, que equipamentos devem ser monitorados e possuir um plano de MPD? A presença ou a ausência de um fator preponderante que determine os períodos de MPV faz diferença na opção pela metodologia de manutenção? Estas questões podem ser resolvidas mantendo-se o padrão competitivo da produção em relação a custos?

Em [56] encontra-se: "Um grande número de fatores aparecem na determinação do tempo médio de reparo. Estes fatores vão, por um lado, da habilidade de diagnosticar a causa da falha e, por outro, até a disponibilidade do equipamento e a qualificação do pessoal de manutenção." Neste ponto cabe salientar que geralmente os estudos na área de manutenção assumem que

as peças sobressalentes estão disponíveis no exato momento em que são necessárias. Além disso, consideram que é óbvio quanto do sistema precisa ser trocado para eliminar a falha. De fato, tanto a disponibilidade de peças sobressalentes quanto o nível de reparo envolvem questões econômicas de inventário, pessoal e interrupção da produção devido a falhas.

Nesta linha, Billinton [12] descreve a taxa de reparo  $\mu$  como sendo igual a relação entre o número de reparos de um componente em um determinado período e o período total de tempo em que o componente esteve sob manutenção. E, acrescenta, este tempo é contado do momento em que o componente falha até o momento em que ele retorna a uma condição operacional.

Isto é, a escolha da metodologia de manutenção deve levar em conta os tempos de reparo e, além disso, o tempo necessário para se adquirir novas peças ou equipamentos em condições comercialmente vantajosas. Em outras palavras, uma metodologia escolhida determina, com certa margem, os períodos entre as missões de manutenção, o recondicionamento e/ou descarte dos equipamentos segundo algum critério. Esta possibilidade dá ao decisor a vantagem de prever gastos, adquirir flexibilidade suficiente para negociar melhores condições de fornecimento (custos e prazos) e influencia, ainda, a questão da escolha de novos equipamentos no que se refere a novas tecnologias.

Por outro lado, a operacionalidade de um equipamento, muitas vezes, está ligada às conseqüências de sua avaria. A MPD pode oferecer, neste caso, um menor efeito "cascata" e diminuir o tempo de retorno operacional de um equipamento.

### O monitoramento contínuo

O principal propósito do monitoramento contínuo é a detecção de condições de falha. Este objetivo pode ser atingido definindo-se regiões de trabalho classificadas com regiões de operação normal, de alerta e de emergência. Essa classificação deve ser feita para cada quantidade monitorada e deve ser baseada sobre dados coletados em operação normal em cada máquina. A prévia detecção de um mau funcionamento de um equipamento e a identificação do

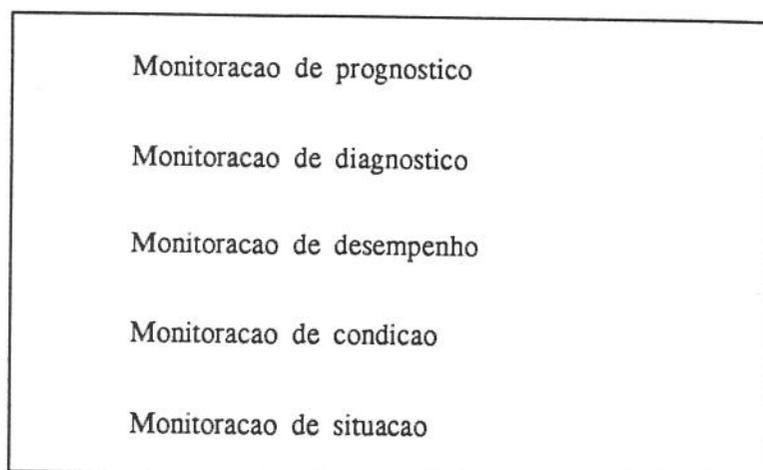


Figura 3.2: Hierarquia do monitoramento

tipo de falha torna possível as ações de MPD e melhora as condições de segurança e a disponibilidade da máquina [6],[28].

### A hierarquia do monitoramento

Por outro lado, é preciso salientar que existe uma hierarquia no monitoramento. Nesta hierarquia há um aumento de sofisticação tecnológica envolvida e, conseqüentemente, uma elevação dos custos associados. Segundo Brawley [16], a hierarquia da monitoração é dada pela figura (3.2).

A monitoração de situação, segundo o mesmo autor, é o nível mais baixo de monitoramento. Este monitoramento indica se um sistema está ou não em funcionamento. Este monitoramento permite a resposta à questão: O sistema está funcionando?

O monitoramento da condição de funcionamento [96], [90] indica se o equipamento está funcionando adequadamente. Normalmente, este monitoramento exige maior quantidade de dados, porém, a resposta à questão se o sistema está funcionando adequadamente é, ainda, sim ou não.

O terceiro nível na hierarquia é o monitoramento de desempenho. Essencialmente, é um monitoramento de condição em que se acrescenta condições operacionais em que se deseja que o sistema atue. Este monitoramento procura responder à questão: Como está indo a operação desse sistema?

O monitoramento de diagnóstico [91], [82], [3] utiliza alguns dos mesmos dados coletados nos níveis anteriores. Entretanto, o diagnóstico considera os dados anteriores e os atuais para determinar a condição operacional do equipamento e, além disso, considera que uma missão manutenção retornará o sistema a uma situação de bom como novo. Este nível pretende responder à questão: O que, se houver alguma coisa, está errado na operação deste equipamento?

Finalmente, a monitoração de prognóstico pretende predizer quando algum equipamento ou sistema irá falhar usando informações de desempenho anterior ou alguma teoria de modo de falha como base de um modelo de falha. Desta forma, o monitoramento por prognóstico pretende responder à questão: Quando este equipamento vai falhar?

### As metas da MPD

A MPD auxilia a equipe de manutenção no desafio apresentado por pequenas margens de operação e a possibilidade de súbitas degradações. Ela permite atingir estes objetivos fornecendo indicações de desempenho e falha que anteriormente não eram mapeadas devido ou ao desconhecimento da fonte da anomalia ou à inexistência de equipamentos para revelá-la [69].

Em suma, pode-se apresentar as metas da MPD como sendo:

- Determinar o melhor período para a manutenção;
- Reduzir o volume de trabalho da MPV;
- Evitar falhas catastróficas e reduzir MCE;
- Aumentar a vida útil dos equipamentos;
- Aumentar a Disponibilidade;
- Reduzir custos de manutenção; e
- Melhorar a efetividade da missão manutenção.

E, apenas para se situar, alguns modos de Manutenção Preditiva são:

- Inspeção visual
- Medição de níveis de ruído
- Estudo de vibrações
- Termografia
- Ferrografia
- Estudo do desgaste

Por sua vez, os sensores que quantificam estes parâmetros devem ser analisados quanto aos seus próprios coeficientes de confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade, além de custos associados a possíveis arranjos lógicos.

A introdução destes novos equipamentos como sensores e computadores estão ocorrendo quer se queira ou não. Entretanto, a maioria dos ativos das empresas foi projetado antes do advento da microeletrônica e, exceto na indústria automobilística, o uso da robótica ainda está nos primeiros passos, bem aquém das previsões dos futuristas dos anos 80 [30].

É compreensível, portanto, a relutância do pessoal de manutenção em adotar técnicas e ferramentas de MPD para auxiliar o seu trabalho. Estes equipamentos permitem acumular uma quantidade inimaginável de dados e sua lógica é, no mais das vezes, muito difícil de entender sem uma profunda especialização. Por outro lado, as técnicas que permitem simplificar a saída de dados tendem a obscurecer a lógica utilizada e, portanto, dificultam as bases para uma decisão eficiente. Acrescente-se a isso a maior dificuldade e custo de treinamento da equipe de manutenção devido à complexidade tecnológica e a pouca motivação. Discutir-se-á um pouco mais este assunto e o papel dos operadores na manutenção no capítulo referente à organização do trabalho.

Apesar desta relutância em se adotar tecnologias de MPD, cada vez mais as empresas têm observado a vantagem de entrar nesta corrida. O aumento da capacidade dos microprocessadores e o seu custo relativamente baixo fará com que a competição e a inovação em termos de "softwares" se acirre ainda mais no futuro próximo.

### 3.4 Manutenção Planejada Corretiva

A Manutenção Planejada Corretiva (MPC) é efetuada no equipamento que tenha sofrido missões de manutenção preventiva ao longo de sua vida e que, mesmo assim, possua partes que atingiram sua vida final.

A troca de componentes, lubrificação e outros itens, retorna o equipamento a uma condição operacional bastante melhorada. O valor do melhoramento assim efetuado deve ser determinado na prática e, normalmente, são efetuadas algumas MPC durante a vida do equipamento e estes melhoramentos, por sua vez, são diminuídos com o passar do tempo.

Serão apresentados, no capítulo 7, as consequências da adoção deste tipo de manutenção e seus parâmetros no planejamento e otimização da atividade da manutenção.

No capítulo 8, por sua vez, será apresentada como a adoção da MPC e destes melhoramentos pode ser empregada na definição de períodos de manutenção dentro de um horizonte  $Z$  determinado.

### 3.5 A manutenção como base de uma SCA

Como já foi citado, a manutenção pode ser vista como uma atividade que pode gerar uma vantagem competitiva.

Neste sentido, as práticas, normas e procedimentos das missões de manutenção são obtidos após um longo aprendizado sobre o desempenho individual e sistêmico dos equipamentos ou agrupamento de equipamentos constituindo, assim, em um conjunto de informações que podem levar à criação de uma vantagem competitiva sustentável (Sustainable Competitive Advantage - SCA).

O conceito, implicações e desenvolvimento de vantagens competitivas sustentáveis (SCA) pode ser visto em Aaker [1].

O caráter sustentável da vantagem competitiva assim adquirida provém do alto grau de dificuldade de se copiar um sistema de manutenção eficiente, baseado em critérios técnicos e econômicos, por parte de uma empresa con-

corrente. Desta forma, a obtenção de procedimentos otimizados de inspeção, MPV, MPD, MPC, descarte e compra de equipamentos pode, em seu conjunto, propiciar uma substancial vantagem em relação à concorrência e, além disso, uma vantagem dificilmente equiparada.

Os passos para se obter uma SCA na área da manutenção estão intimamente ligados aos procedimentos de análise de falhas adotados pela empresa.

Estes procedimentos iniciam-se pela determinação da árvore de falhas [12], [56] de cada componente de um equipamento e dos vários equipamentos de um sistema. Normalmente os equipamentos e sistemas já possuem um arranjo lógico determinado onde não obstante são possíveis alterações que possam melhorar o desempenho. Entretanto, estas alterações, por si só, não constituem uma base para uma SCA.

Em uma segunda etapa são levantadas as taxas de falha e os parâmetros de forma da distribuição que melhor se adapte ao comportamento de falha do sistema. Nesta etapa são levantados, também, as considerações sobre a confiabilidade humana e as condições ambientais de operação.

Levantados estes dados passa-se ao cálculo das probabilidades de falha, confiabilidade, manutenibilidade, disponibilidade e procura-se arranjos físicos e lógicos (em série, paralelo, composições) dos equipamentos que coloquem o sistema em um nível confiabilístico econômico e tecnologicamente satisfatório.

A posse destes dados e soluções lógicas para a melhoria do desempenho dos sistemas são os primeiros passos para se obter uma SCA na manutenção.

Por outro lado, os fatores de risco se constituem em um possível critério para a escolha de metodologias de manutenção. Neste contexto, de posse dos dados confiabilísticos, passa-se para a fase da análise de risco. São efetuados cálculos com probabilidades condicionais de falha e os consequentes resultados em termos de segurança física, patrimonial e resultados de produção. Estas análises, por sua vez, são feitas pela tríade FEA (Failure Effect Analysis), FEMEA (Failure Mode Effect Analysis) e FEMECA (Failure Mode Effect and Critically Analysis).

Com os resultados das análises de modo de falha são propostas ações corretivas (substituição de componentes, utilização de sensores, testes, etc) e também propostos os procedimentos de manutenção para cada equipamento e sistema.

Este resultado, aliado a considerações econômicas, constituem a base de uma vantagem competitiva sustentável na manutenção.

### 3.6 Comentários

Neste capítulo foram apresentadas as metodologias de manutenção dando a elas um caráter evolutivo. Entretanto, é preciso salientar que a Manutenção Sistêmica deve englobar, na previsão e no planejamento, todos os diferentes tipos de metodologias de manutenção pois, efetivamente, as soluções econômicas e tecnológicas estarão na distribuição de todas elas por entre os diferentes equipamentos de um sistema produtivo. Desenvolve-se, também, o conceito de vantagem competitiva sustentável integrado à atividade da manutenção. Procura-se, desta forma, justificar o estudo das diferentes esferas de decisão e suas interfaces que envolvem a determinação de critérios para a escolha de metodologias de manutenção em ambientes cada vez mais mercadologicamente competitivos.

## Capítulo 4

# Gestão de custos na manutenção

O acompanhamento efetivo da missão manutenção em termos dos custos associados permite avaliar o tipo de manutenção mais apropriado para os diferentes equipamentos e sistemas.

Neste contexto, as tendências atuais de gestão de custos aponta para a menor eficiência da mão de obra, maior peso do custo dos equipamentos e a crescente importância da informação.

### 4.1 O acompanhamento da manutenção

Empresas que desejem prosperar em um ambiente de manufatura avançado, devem associar competência de engenharia e de técnicas a um rigoroso monitoramento financeiro [11].

Novas filosofias de manufatura enfatizam a necessidade de se evitar inventários excessivos e ociosos na fábrica sem pronta utilização. O inventário por sua vez tem uma função preventiva contra incertezas garantindo o processo produtivo mas, de certa forma, podem mascarar muitos problemas da produção.

Por sua vez, segundo Labini [53], os empresários e contabilistas julgam problemático e não justificável o cálculo metódico das variações no custo

da utilização, incluindo-o na depreciação dos ativos.

Segundo Ostrenga [74], o comprador de um produto ou serviço tem uma perspectiva muito diferente dos estágios da vida do produto. Por outro lado, muitas vezes, a empresa assume este papel de cliente. Os custos que interessam à empresa neste papel são [33],[39],[74] :

- Custo inicial de compra,
- Custos de operação e manutenção do produto,
- Custo de alienação,
- Custo de implementação e "set-up".

Parece claro que o tipo de manutenção influenciará profundamente a matriz de custos da empresa e sua escolha é, portanto, um fator que possibilitará obter uma vantagem competitiva [1].

Por sua vez, essa preocupação com custos e Assistência Técnica era feita no passado de uma forma pouco formal dependendo, muitas vezes, da intuição dos engenheiros e de sua experiência. Sua importância, entretanto, aumenta cada vez mais nos mercados competitivos.

Por outro lado, a coleta dessas informações que podem levar a uma administração de custos, requer a colaboração dos fornecedores e dos usuários e, dentro do contexto da manutenção, está ligada ao diagnóstico e ao comportamento do sistema no tempo.

A tecnologia de redes locais (LAN) combinada com o acompanhamento automatizado de componentes, no caso da manutenção preditiva, está melhorando a apresentação e eficácia destes dados. Apesar disso, muitas das informações obtidas em ambientes informatizados são usadas principalmente para decisões locais sobre processos [11]. Isto é, existe a necessidade de se integrar dados de processos (no nosso caso de condicionantes e alternativas de manutenção) para o efetivo acompanhamento e planejamento da produção [42].

## 4.2 Tendências da gestão de custos

No contexto da manutenção, essas mudanças tecnológicas apontam para as seguintes tendências na gestão de custos [11]:

- Menor influência da mão-de-obra: os processos de manufatura estão mudando de tal forma que a inclusão da automação está reduzindo a participação da mão-de-obra direta na composição de custos. Entretanto, segundo alguns autores [71],[76] a qualificação do pessoal de apoio será bastante desenvolvida além de não se caracterizar uma diminuição em seu número.
- Maior influência de equipamentos: Uma significativa parte do custo total dos produtos está mudando para custos relacionados com equipamentos. Enfatiza-se, portanto, a necessidade de se administrar a tecnologia da manutenção e os custos associados aos equipamentos e sistemas como vantagem competitiva.
- Maior influência de informação: Cresce a dependência de informações computadorizadas no gerenciamento da produção como um todo. Por outro lado, aumenta a dependência da empresa tanto em relação à confiabilidade dos dados (recolhidos automaticamente ou não) quanto à velocidade de processamento dos mesmos.
- Mudanças na base de cálculo da depreciação: os métodos usuais do cálculo da depreciação de ativos fixos assumem o uso contínuo e uniforme do ativo durante a sua vida útil. Uma alternativa é depreciar os custos dos equipamentos baseados nas horas de uso ao invés de um período fixo. Uma outra abordagem, mas de difícil implementação, é o período de vida tecnológica.

Os métodos correntes de contabilização de tecnologia têm distorcido os custos tecnológicos e, freqüentemente, impedem as empresas de visualizar oportunidades de investimentos em novas tecnologias mais adequadas ao seu ambiente competitivo. Mais adiante serão discutidos alguns aspectos

da obsolescência tecnológica como uma variável dos modelos de reposição de ativos.

### 4.3 O planejamento de capital

Uma das decisões mais importantes do executivo é a ligada a investimentos em equipamentos e tecnologia [33],[42],[74]. Esta decisão se refletirá na saúde financeira da empresa por vários anos fiscais.

No ambiente tradicional estas decisões são justificadas com base no retorno sobre o investimento, baseado na redução de custos de mão-de-obra, incentivos fiscais, etc. Esta abordagem, entretanto, não leva em conta o papel estratégico da qualidade, da Confiabilidade, da flexibilidade nas transações tecnológicas (internamente) e comerciais [1],[74].

Os novos investimentos devem ser considerados dentro de uma dimensão estratégica. Se efetiva, as novas tecnologias podem melhorar a qualidade e diminuir custos. Na manutenção, especialmente, pode significar a redução de tempos improdutivo, maior controle sobre o processo, prevenção de perdas, etc.

Normalmente, as empresas querem partir para a automação de seus processos como forma de reduzir custos [74]. Entretanto, os investimentos para automatizar procedimentos que não agregam valor, via de regra, lançam uma cortina de fumaça diante dos problemas reais. Uma possível abordagem aplicável à manutenção é a utilização da análise de processo do negócio (BPA). Um princípio básico da BPA é a eliminação de desperdícios que não agregam valor através da remoção dos impedimentos e restrições à melhoria do fluxo de trabalho. Neste contexto, a manutenção pode ser vista como um conjunto de procedimentos que afetam a produção e é passível de otimização. Esta otimização, levando-se em conta os critérios técnicos e econômicos dentro de um contexto de competitividade, significa eliminar gastos desnecessários e/ou diminuí-los a um patamar aceitável.

A BPA é uma abordagem administrativa e não possui a complexidade dos modelos de otimização de reposição de ativos baseados nos custos de capital, operacional, produção e condicionantes da confiabilidade. Entretanto, seu uso é uma poderosa ferramenta para iniciar um processo de otimização na manutenção, devido a menor exigência de dados e melhor visualização e flexibilidade de resultados.

Na prática, Ostrenga [74] tem visto muitos casos em que as empresas perceberam a necessidade de melhoramentos, mas sua abordagem aos mesmos foi mal orientada. Segundo o mesmo autor, muitas empresas investem em equipamentos na tentativa de reduzir custos, embora seja muito melhor eliminar o máximo possível as causas de desperdício que não agregam valor, simplificar ou racionalizar o processo, estabilizar insumos e, somente então, automatizar.

#### 4.4 O gerenciamento de custos da tecnologia

A importância das oportunidades de investimento oferecidas pelas inovações tecnológicas foi analisada no contexto interno das empresas por Schumpeter [53].

Ao entender o mercado como o campo da concorrência entre capitais, confere-se um entendimento específico para a concorrência entre estes capitais inserindo-os, como coloca Possas [81], em um processo de defrontação.

Neste sentido, ainda segundo Possas, os requerimentos tecnológicos da estrutura produtiva abrangem aqueles condicionantes, tanto da estrutura produtiva quanto a existência de um dado leque de técnicas diretamente disponíveis ou num horizonte próximo.

Assim, neste contexto, uma empresa que procure diminuir custos, via

introdução de novas tecnologias na atividade da manutenção, tenta explorar vantagens da prioridade na inovação.

A tecnologia, portanto, normalmente referida como um dado do processo, pode se configurar numa estratégia de concorrência em um horizonte de tempo definido. Desta forma, a adoção de critérios para a determinação de metodologias de manutenção se insere neste campo de disputa de capital, como mais um elemento de concorrência.

## 4.5 A função manutenção em ambientes industriais

A função manutenção deve se compatibilizar com o ambiente industrial em que se pretende implementá-la. Em um cenário industrial diversificado, diferentes indústrias atingem patamares tecnológicos em diferentes momentos, trazendo consigo os problemas e os depósitos de informações referentes ao seu processo produtivo, suas máquinas e, neste contexto, as práticas e procedimentos referentes à manutenção de seus equipamentos.

São as seguintes as principais características da função manutenção nos diferentes ambientes industriais [11]:

- Manufatura tradicional:
  - \* "Lay-out" funcional;
  - \* Manutenção corretiva MCE;
  - \* Função de suporte centralizada;
  - \* Necessidade de grandes espaços para o armazenamento de inventários;
  - \* Poucos sistemas de modelamento de manutenção.
- Simplificação de Processos:
  - \* Redução da necessidade de espaços;

- \* "Lay-out" reduzido devido à Tecnologia de Grupo;
  - \* Cronograma de manutenção como parte do ciclo de produção;
  - \* Atividades de suporte mais descentralizadas;
  - \* Planejamento e modelagem de manutenção;
  - \* A função manutenção é considerada no Planejamento Estratégico [94].
- Ilhas de Automação :
- \* "Lay-out" para a automação;
  - \* Aumento da qualificação do pessoal de apoio;
  - \* Ferramentas de modelagem e decisão sofisticadas;
  - \* Planejamento das atividades de manutenção estreitamente ligadas ao Planejamento Estratégico.
- Manufatura Integrada por Computador:
- \* Fábrica planejada para a automação;
  - \* Grande necessidade de pessoal de suporte;
  - \* Maior qualificação do pessoal de suporte;
- Manufatura Otimizada:
- \* Ambiente de monitoramento e realimentação de informações;
  - \* Menor necessidade de pessoal de suporte.

Segundo o ambiente de produção, o decisor deverá considerar diferentes alternativas e critérios no gerenciamento da missão manutenção. A seguir, pode-se observar um pouco mais as características deste gerenciamento.

## 4.6 O gerenciamento de custos na manutenção

Durante a operação normal da empresa no ano fiscal, uma série de incentivos para a máxima produção são enfatizados. Estes incentivos incluem

gratificações, adicionais, etc, que visam o atendimento ou a superação das metas de produção estabelecidas para este período. As empresas voltam seus esforços para obter de seus empregados o máximo de resultado com o menor custo possível. As determinações governamentais sobre taxas e impostos e mesmo subsídios tendem a ser observados dentro deste mesmo intervalo de operação. Existem, entretanto, poucos incentivos para se observar a operação a longo prazo do ciclo de vida dos equipamentos da planta industrial [69].

As rotinas de manutenção de natureza preventiva normalmente também são voltadas para a prática de curto prazo. Durante estes períodos, o pessoal da manutenção está totalmente ocupado com tarefas de prevenção. Mesmo missões de emergência necessárias para restaurar determinado componente são levadas em consideração neste período de operação e não nos intervalos, isto é, não se leva em conta o ciclo de vida dos equipamentos e, portanto, não se planeja a sua manutenção fora destes períodos. O histórico de operação anterior ao presente ciclo normalmente está apenas na mente dos empregados mais antigos ou sequer existe. Em poucas empresas estes conhecimentos estão acumulados de uma forma útil e acessível.

A atenção gerencial em longo prazo na vida útil dos equipamentos retornará em dividendos para a empresa. Por exemplo, se durante cada ciclo operacional for feito um esforço para se gravar minuciosamente os indicadores característicos do desempenho dos equipamentos, estará formada a base para o treinamento do pessoal de manutenção na detecção de falhas. Além disso, estes dados também possibilitarão determinar o coeficiente de melhoramento que é proporcionado ao equipamento após cada missão de MPV ou MPC.

Por outro lado, a taxa de progressão de uma falha não é, necessariamente, igual em todos os casos, mas muitas outras características o são. A taxa de degradação determinará a frequência de coleta de dados e ela só será obtida, com certa margem de confiança, através do meticoloso tratamento de dados. Os resultados precisam ser consistentemente apresentados e acumulados durante a vida do equipamento de forma a serem facilmente recuperados.

À medida que o conhecimento sobre a degradação dos equipamentos é acumulado, a curva de aprendizagem [29] fica cada vez mais difícil de ser

equiparada por seus concorrentes; por outro lado, os gerentes passam a ter mais controle sobre a atividade mantenedora e são habilitados a tomar decisões importantes referentes à:

- Quando interromper a produção para MPV;
- Como evitar perdas de produção;
- Quais equipamentos necessitam ser reprojctados ou descartados;
- Quais peças de reposição precisam ser alocadas;
- Onde serão melhor alocados os fundos para treinamento;
- Períodos e prazos para compras de novos ativos.

Entretanto, se o decisor optar por uma metodologia preditiva, lidar apenas com dados históricos descaracteriza a MPD. Para ser preditivo, o analista precisa prever futuras degradações. O decisor, entretanto, só poderá fazer isso com uma considerável quantidade de dados históricos referentes às características de desempenho dos ativos. O risco da previsão está no fato de uma decisão errada ser tomada. Entretanto, à medida em que se acumulam conhecimentos existe a tendência do erro ser tomado em favor da segurança. Isto é, a missão manutenção pode ser efetuada antes do momento realmente necessário. Mesmo nestas ocasiões, as informações assim obtidas servirão para aumentar o conhecimento sobre modos de degradação e indicadores [69].

Os benefícios obtidos pela gerência da MPD, neste caso, podem ser considerados tangíveis e intangíveis:

- tangíveis:
  - maior disponibilidade devido ao menor tempo de reparo;
  - redução no custo de reparo relativamente à MPV e MCE;
  - economias obtidas por paradas planejadas;
- intangíveis:

- maior habilidade de prever a mesma falha no futuro;
- maior conhecimento das condições do equipamento;
- capacidade para justificar a extensão da vida de equipamentos ou seu descarte.

Este acúmulo de conhecimento que possibilita a série de benefícios, tanto das missões MPD quanto MPV são baseados, em última análise, na atividade dos operadores [32], [37]. O capítulo seguinte tecerá alguns comentários sobre a participação dos operadores-mantenedores no processo da manutenção.

## 4.7 Comentários

Este capítulo pretendeu ressaltar a importância da gestão de custos na atividade da manutenção. Segundo o ambiente e o tipo de indústria e em função de seu estágio de desenvolvimento na sua organização produtiva, a manutenção deve ser efetivada de diferentes formas que, na atividade gestora, devem ser demonstradas em termos dos benefícios proporcionados ao capital aplicado e os resultados obtidos.

## Capítulo 5

# Sobre a Organização do Trabalho

A importância do elemento humano na atividade mantenedora é citada por vários autores. Dentro do contexto da determinação de critérios para a escolha de metodologias de manutenção, as implicações da interferência humana têm um papel muito importante a ser analisado.

### 5.1 A confiabilidade coletiva e a automação

Cada vez mais, as pesquisas de desenvolvimento industrial estão voltadas tanto para o desenvolvimento de equipamentos e sistemas do chão-de-fábrica (shop floor) quanto para a atividade dos operadores e dos quadros na empresa em relação à sua Organização do Trabalho.

No texto de Schimitz [86] faz-se algumas considerações sobre a dinâmica do trabalho nas indústrias. Na produção por processo contínuo, por exemplo, as atitudes dos empregadores em relação a salários e rotatividade são fundamentalmente diferentes das de outros setores. A indústria de fibras sintéticas revela baixos índices de rotatividade e salários e benefícios assistenciais relativamente altos. A explicação não se encontra nas altas exigências de qualificações. As empresas dão aos empregados um período de treinamento que vai de três a seis meses para satisfazer os padrões de desempenho exigidos. A

explicação está, portanto, na preocupação dos empregadores com a confiabilidade.

A natureza do processo contínuo significa que as paralisações e interrupções são mais dispendiosas do que em processos tecnologicamente menos sofisticados de natureza descontínua. Assim, os salários e as condições de emprego vêm a ser determinados primordialmente por fatores endógenos à firma e menos pelas condições do mercado de trabalho.

E é neste ambiente que se deve posicionar para avaliar as atividades de manutenção e suas relações com a Organização do trabalho.

Coriat [24] (indústria de cimento) e Borges [15] (siderurgia) indicam em seus trabalhos que seria equivocado enfatizar a eficiência ou a confiabilidade do trabalhador individual. As próprias condições tecnológicas exigem uma preocupação com a *confiabilidade coletiva*. Na prática, ainda segundo os autores, um desempenho confiável do trabalhador coletivo só pode ser desenvolvido com o tempo e sob relações de trabalho estáveis.

Se o padrão de utilização de mão-de-obra encontrado na produção por processo contínuo é a reação racional dos administradores às novas condições tecnológicas e as exigências de uma economia global, isto significa que tais indústrias representam as condições de trabalho da fábrica do futuro?

Por outro lado, não é uma tendência da manufatura otimizada, como já foi citado, uma menor necessidade de pessoal de suporte? A resposta, segundo Schimitz, parece depender de duas questões. Até que ponto é generalizada a tendência à automação? Sem dúvida, a longo prazo há uma tendência no sentido da produção industrial sofisticar-se tecnologicamente. A microeletrônica está acelerando este processo, mas o papel sociológico por ela desempenhado nos países periféricos ainda não está claro. Em segundo lugar, a automatização dos processos produtivos sempre aumenta a importância da confiabilidade? Ainda que seja de se esperar que os aperfeiçoamentos automáticos terminem por levar à eliminação das áreas de incerteza, e, portanto, à redução da responsabilidade do operador, a cada etapa avançada da automação corresponde uma série de problemas técnicos e um potencial de disfunção que exigem o monitoramento e intervenção humana.

Da mesma forma, segundo Coriat [25], o "defeito-zero", um dos entraves prévios que o sistema "Kan-ban" deve superar, significa que não é tolerável qualquer ponto de estrangulamento relacionado a uma deficiência, ou parada, de máquina. Isso é assegurado por uma disposição técnica particular dos controles de qualidade não somente em relação às peças produzidas, mas o mesmo princípio se aplica ao diagnóstico e à reparação das máquinas, a previsão de compras de ativos e seu descarte.

De uma forma geral, cresce, portanto, a pressão psicológica organizada sobre os operários, na medida em que há um risco permanente de que uma sessão ou Posto de Trabalho se transforme num ponto de estrangulamento, particularmente no "Kan-ban", sujeito a um efeito paralisante em cadeia de toda a instalação produtiva.

Assim, um sistema que se utilize da confiabilidade para a decisão sobre os critérios para a escolha de metodologias de manutenção e seu monitoramento em um processo (contínuo ou não) deve considerar o papel do operador e do mantenedor. Isto deve ser feito na medida em que na ação mantenedora reside a eficiência e a eficácia do sistema no reparo dos equipamentos, no levantamento dos dados de falha e do comportamento da máquina, na retroalimentação destes dados e, sobretudo, no processo decisório.

## 5.2 O enriquecimento de funções

No estudo da manutenção preventiva, afirma Billinton [12], uma manutenção preventiva deficiente pode degradar ainda mais a confiabilidade do sistema e, portanto, a habilidade e a qualificação do pessoal da manutenção é um fator fundamental nestas situações.

Ainda, segundo Lewis [56], qualquer que seja a metodologia de manutenção, fatores humanos terão um papel fundamental. É por esta razão, explica, que dados de laboratório normalmente não são representativos da realidade do chão-de-fábrica (shop floor). Neste ambiente, a qualidade da manutenção não costuma ser tão alta como nos laboratórios. Além disso, reparos efetuados no chão-de-fábrica costumam consumir mais tempo e ser menos

precisos. As medidas das quantidades de manutenção dependem, portanto, extremamente da confiabilidade humana, daí a grande dificuldade de se obter dados reproduzíveis e a importância de se levar em consideração estes fatores. Os números dependem, não apenas do estado físico dos equipamentos, mas também do treinamento, vigilância e julgamento do pessoal de manutenção. Estas quantidades, por sua vez, conclui, dependem de muitos fatores psico-sociais que variam em tal extensão que as probabilidades de falhas de manutenção e tempos de reparo são geralmente mais variáveis do que as taxas de falha dos equipamentos.

Por outro lado, é preciso salientar que a inspeção, enquanto atividade do operador, deve se enquadrar nos conceitos de melhoria contínua, isto é, no conceito "kaizen", que é a base do gerenciamento da qualidade total no estilo japonês. Isto é, deve-se passar da análise de falhas supondo-se um certo nível de qualidade aceitável, para a busca dessa melhoria contínua que agregue valor às informações obtidas na planta.

Por este ponto de vista, quando a inspeção se torna parte do processo produtivo, tanto de forma funcional como organizacional, todos se tornam inspetores e capazes de resolver problemas. Para isso é necessário que se desenvolva o operador de inspeção através de treinamentos múltiplos, enriquecimento e expansão de funções. Em uma organização tradicional, isto é melhor conseguido através da inspeção como parte da unidade de produção em vez de controle de qualidade. O controle de qualidade, certamente, permanece responsável pelo treinamento, qualificação e questões referentes à comunicação dos problemas dos clientes. É importante, no entanto, que o operador inspetor faça parte do time de operação e do processo [89] e possa assegurar o adequado desempenho da manutenção.

### 5.3 O Sistema de Informações Gerenciais

Segundo Jardine [42], uma área que necessita ser desenvolvida no gerenciamento da manutenção é a integração de sistemas de informação com modelos de manutenção que permitam a criação de sistemas especialistas onde

as decisões referentes à manutenção possam ser automaticamente visualizadas e modificadas baseadas em dados históricos.

Ao fazer parte deste processo, o operador passará a manipular o recurso mais imprescindível para a tomada de decisões - a informação. Para que se possa efetivar um planejamento integrado é preciso adotar mecanismos que possam superar as deficiências deste recurso tão valioso. As considerações sociotécnicas devem servir de pano de fundo para se incluir um sistema de coleta, tratamento e disseminação de informações consideradas mais relevantes ao processo decisório, o chamado Sistema de Informações Gerenciais (SIG).

Na montagem do módulo manutenção de um SIG, a organização deve levar em conta fatores como o porte, setor de atuação e cultura. Do setor de atuação chegam as informações referentes ao mercado, à concorrência e as de onde derivam as necessidades das áreas financeiras, humana e tecnológica. Isto é, a empresa deverá olhar para fora de suas fronteiras e observar seus concorrentes, seus custos de manutenção, índices de retrabalho, volume de produção perdida, etc.

O nível funcional trabalhará, principalmente, com as informações relacionadas ao ambiente operacional e interno da organização. A natureza do processo decisório, por outro lado, também influencia a velocidade na obtenção de informações. Por exemplo, os dados ligados à vida útil dos equipamentos são de baixa perecibilidade, mas de alta rotatividade na medida em que são acrescentadas novas informações oriundas das missões de manutenção. Por sua vez, outras informações, também utilizadas na decisão da manutenção, são de longo e médio prazos, como a expectativa de inflação, juros de mercado, recursos disponíveis para a atividade mantenedora, incentivos fiscais, etc.

Por sua vez, os investimentos em novas tecnologias e processos exigem um período maior de maturação e decisão, notadamente, devido aos custos associados de compra, descarte e adequação de novas tecnologias ao processo produtivo.

A montagem de um módulo de manutenção de um SIG deve cuidar para que as informações por ele geradas fluam sem maiores dificuldades. A montagem deve ser orientada, portanto, para as necessidades da manutenção

além das considerações relacionadas à viabilidade e custo. Deve-se questionar a respeito dos seguintes itens [94]:

- Tipos de informações necessárias para orientar o processo decisório,
- Tipos de informações recebidas, periodicidade e fontes,
- Tipos de assuntos considerados importantes - em função do ambiente específico .

Pau [78] apresenta em seu trabalho as características básicas de sistemas especialistas, sua aplicação em sistemas de gerenciamento da manutenção, exemplos de sistemas baseados no conhecimento (KBS) e os requerimentos e parâmetros básicos de projetos de um KBS.

A base de conhecimento para a manutenção consiste de diversas outras bases cada uma delas ligada a uma fonte independente de conhecimento como, por exemplo:

- imagens
- sinais
- observações
- FEMEA
- dados históricos da manutenção
- dados históricos de desgaste
- tempo
- custos
- análise de segurança

Segundo Frankel [31] muitas falhas de um sistema podem ser resultado de uma seqüência de outras falhas. Desta forma, a análise de risco e a

confiabilidade de um sistema não podem ser entendidas como um fenômeno estático, isto é, são processos dinâmicos que necessitam ser atualizados à medida que informações obtidas no chão de fábrica sejam produzidas.

Em outras palavras, um módulo de manutenção que agregue parâmetros de confiabilidade e análise de risco precisa ser operado interativamente usando novas e adicionais informações sobre a base de dados de análise de falhas e desempenho de componentes.

Ao mesmo tempo, a operação destes modernos sistemas de informação coloca o problema do despreparo dos operadores e as alternativas entre treiná-los mais intensamente e com melhor qualidade, ou substituí-los por sistemas automáticos ainda mais complexos.

Isto é, os caminhos estão entre buscar a integração do elemento humano na atividade produtiva, quer seja através de sua efetiva participação no processo decisório, no engajamento na atividade criadora, na manipulação de informações e no enriquecimento de funções ou, então, recorrer ao auxílio de sistemas automáticos e, cada vez mais, de tecnologias preditivas. A adoção deste último caminho reduziria a mão de obra envolvida e, via de consequência, a dependência para com a confiabilidade humana. Por qual caminho seguir ainda é uma questão a ser respondida.

Sobre esta questão, Gaffard [32] nos coloca que o ponto importante não é tanto a aceleração do ritmo das inovações no ambiente industrial, mas sim o fato de que estas inovações devem ser conhecidas e desenvolvidas no âmbito do processo de produção. Por corolário, enfatiza o autor, todos os recursos humanos em todos os estágios do processo de produção entendido em seu sentido mais amplo, estão relacionados com a inovação e devem, portanto, adquirir competências múltiplas e evolutivas.

## 5.4 A competência técnica e econômica

O problema está, mais especificamente, na definição destas competências. Essencialmente, a competência mede a capacidade de um tomador de decisão de resolver problemas. Cada nível de competência implica,

segundo Pelikan [79], um nível máximo de dificuldade dos problemas para que eles possam ser resolvidos de modo otimizado. Se problemas mais difíceis são apresentados e requerem solução, as respostas encontradas acarretarão em custos e, portanto, serão sub-otimizadas.

Esta limitação de competência é causada pela imperfeita utilização da informação disponível, cabendo-nos, ainda, distinguir esta limitação da referente ao uso de informação imperfeita.

No contexto da tecnologia e, em relação a este trabalho, na atividade da manutenção, é preciso distinguir a competência econômica de outras competências envolvidas no processo produtivo, tais como a técnica e a gerencial. Segundo Pelikan, a competência econômica pode ser vista como uma mistura de três componentes básicos, correspondendo às três dimensões do comportamento econômico, quais sejam:

- Competência alocativa: a competência para decidir sobre quantidades e/ou preços de insumos e produtos, ou para a escolha de tecnologias associadas à produção;
- Competência associativa: a competência para projetar, unir, modificar a organização; e
- Competência para aprender aspectos econômicos e comerciais da função.

Em contraste, a competência técnica seria a competência em projetar e decidir sobre metodologias de manutenção em termos das variáveis físicas envolvidas como, por exemplo, as taxas de falha, os intervalos de manutenção, etc. Incluindo-se, neste caso, a competência para aprender mais sobre estas variáveis técnicas.

No caso da escolha de metodologias de manutenção, a solução técnica requer uma avaliação econômica enquanto a solução do problema sob o ponto de vista econômico é, como veremos, restringida pela tecnologia disponível. Normalmente, a mesma pessoa deverá lidar com os dois tipos de dados disponíveis. Ou seja, o decisor deverá possuir tanto a competência técnica quanto a competência econômica.

Entretanto, ainda segundo Pelikan, uma coisa é projetar um produto ou um processo de produção em termos dos parâmetros físicos, e outra coisa é avaliar a relação custo benefício de um projeto frente à sociedade e à empresa, de modo a determinar a sua adoção ou rejeição no processo produtivo.

A teoria neo-clássica supõe que o tomador de decisão possui inerentemente a competência econômica. A literatura Schumpeteriana apresenta os conceitos de aprendizado pelo uso "learning by using" e aprendizado pela manufatura, "learning by doing" mas, claramente, estes conceitos são aplicáveis à aquisição, desenvolvimento e domínio de habilidades técnicas e não econômicas.

Pelikan demonstra que, quando os engenheiros agem como trabalhadores, eles podem ser vistos como fatores de produção. Mas quando agem como investidores, gerentes, tomadores de decisão ou planejadores, eles são reconhecidos como agentes econômicos. O problema é que assim os considerando, e levando-se em conta os diferentes níveis de competência econômica dos agentes frente a diferentes exigências da produção, contradiz-se um axioma fundamental da teoria neo-clássica, qual seja, o de que todos os agentes econômicos são perfeitamente racionais otimizadores, isto é, que possuem igualmente abundante competência para a resolução de problemas econômicos.

Finalmente, como Pelikan sintetiza, a inovação tecnológica de um sistema econômico depende, em última análise, das suas habilidades em alocar eficientemente suas competências econômicas. Em particular, a competência dos empreendedores internos, gerentes, investidores e tomadores de decisão para obter e interpretar os sinais econômicos, para avaliar a probabilidade de sucesso de diferentes projetos e por fim, mas não menos importante, para estimar os limites de competência dos níveis de decisão e o seu próprio, enquanto decisor.

## 5.5 Comentários

Neste capítulo pretendeu-se mostrar a importância da consideração do elemento humano disponível pela empresa como um critério na escolha de

metodologias de manutenção. A evolução tecnológica tem colocado a questão entre a automação de processos e a utilização de mão-de-obra cada vez mais exigente com o nível de desenvolvimento das relações de trabalho. As metodologias de manutenção parecem se adequar aos diferentes níveis tecnológicos apresentados pelas empresas e, da mesma forma, parecem indicar que empresas com baixa capacitação tecnológica podem ser mantidas por missões MPV e MCE, enquanto que outras mais desenvolvidas devem buscar aumentar a previsibilidade do comportamento de seus equipamentos através da intensificação do uso de MPD e, assim, "livrar-se" das limitações provocadas pela confiabilidade humana. No entanto, esta questão de modo algum é tão simplista devendo cada empresa buscar o seu caminho de desenvolvimento nesta área observando os seus objetivos a longo prazo. Finalmente, o conceito de competência econômica é apresentado e procura-se mostrar a sua importância na definição de critérios para a escolha de metodologias de manutenção.

# Capítulo 6

## Análise de segurança

A questão da segurança física e patrimonial é um ponto importante a se considerar na escolha de metodologias de manutenção. Em função do tipo de empresa, dos processos em andamento e das condições desejadas de segurança, o decisor deverá optar entre os tipos de missão manutenção frente a uma disponibilidade de capital para ser investido. O jogo de interesses segurança/custos é uma constante nos processos de decisão na manutenção. Neste capítulo pretende-se discutir um pouco mais este assunto.

### 6.1 O gerenciamento ativo de riscos

O gerenciamento de riscos ou da segurança consiste em alterar, de um modo desejado, a probabilidade de um determinado estado que um sistema pode atingir. Genericamente, isto pode ser feito das seguintes formas [93]:

- seguro contra perdas,
- prevenção de perdas e
- mudanças tecnológicas

A prevenção de perdas e as inovações tecnológicas são formas ativas do gerenciamento de riscos, enquanto que os seguros são atitudes passivas

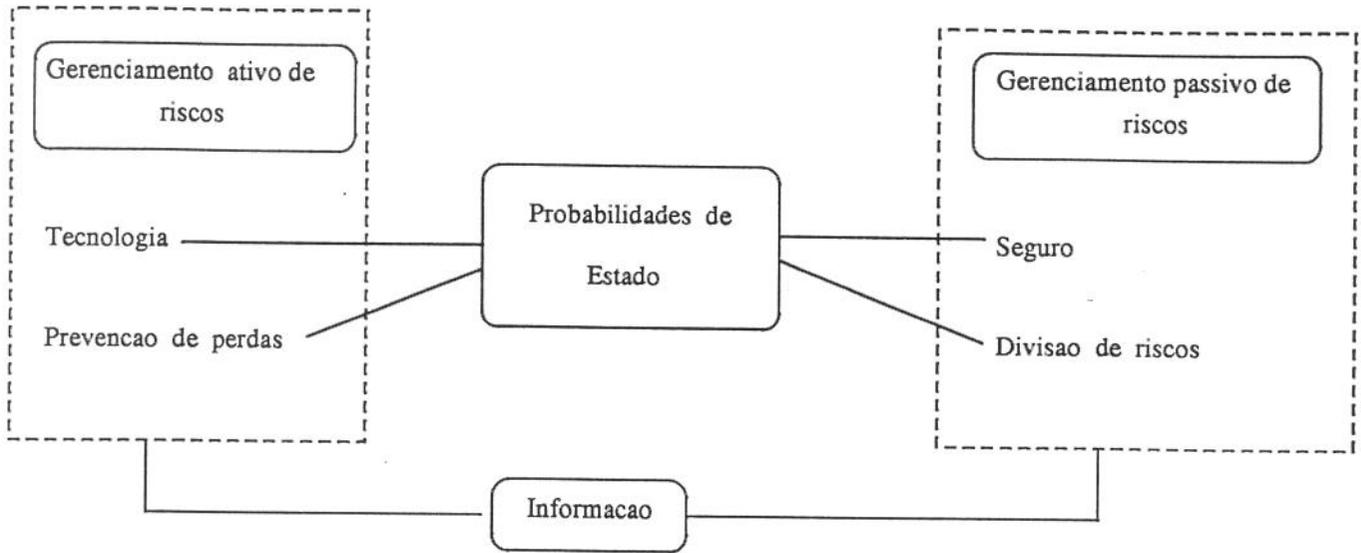


Figura 6.1: O gerenciamento de riscos

frente ao risco. Não se atentará, devido ao caráter deste trabalho, ao gerenciamento passivo de riscos.

A prevenção de perdas é uma forma de se alterar as probabilidades de ocorrência de um estado indesejável de um determinado equipamento ou sistema. Neste sentido, a metodologia de manutenção de equipamentos é uma forma de prevenção de perdas. A figura 6.1 mostra o quadro do gerenciamento de riscos.

Por outro lado, a substituição de equipamentos por outros de maior nível de confiabilidade é uma mudança na função de produção do sistema.

Outro aspecto importante são as interfaces da produção com o meio. As leis de proteção ambiental têm motivado, segundo Tapiero [93], alterações nos processos produtivos e nos seus limites de segurança.

Estes e outros aspectos da segurança aparecem para cobrir a lacuna de informações disponíveis entre fornecedores e compradores de tecnologia, isto é, nos níveis de confiabilidade dos produtos e as possíveis conseqüências advindas de uma possível falha e os modos de falha destes. Assim, a aprendizagem e a retenção de conhecimentos sobre o desempenho destes sistemas são partes fundamentais do gerenciamento de riscos.

A inevitabilidade da falha em sistemas mecânicos faz com que apareça a necessidade do decisor se preparar materialmente para as conseqüências da interrupção de seu processo produtivo ou, então, tentar evitar esta interrupção. Por outro lado, as conseqüências da falha podem atingir questões de segurança patrimonial e humana.

Por muitos anos, a prática tem sido reduzir as falhas dos equipamentos através da introdução de fatores de segurança, os também denominados "fatores de incerteza". Estes fatores, por sua vez, eram usados no cálculo de limites de qualidade, cargas suportáveis por estruturas, pressões admissíveis, etc, na tentativa de se reduzir a probabilidade de falha. Na maioria dos casos, porém, esta redução era conseguida, parcialmente, pela perda de eficiência nos processos e pelo alto custo associado.

Há uma diferença básica entre as acepções de risco sob o ponto de vista da Engenharia e o da Sociedade [31],[78]. Para o pessoal encarregado da produção, a preocupação está fundamentada em termos dos parâmetros de confiabilidade do sistema. Para a sociedade, no entanto, a questão situa-se sobre o risco propriamente dito oferecido por um equipamento. Isto é, a chance de um avião cair, para os engenheiros, é a probabilidade de interrupção das duas turbinas vezes a quebra de uma das asas vezes o falecimento do piloto e co-piloto. Para um passageiro com medo de avião, porém, suas preocupações são outras: o avião pode cair.

Neste trabalho será abordada a acepção dada pela Engenharia, isto é, a questão do risco em termos tecnológicos, baseados nos parâmetros da confiabilidade e de segurança.

## 6.2 A análise de risco

Ao se focar o problema do risco sobre o ponto de vista da Engenharia passa-se a apresentar a subdivisão dada à análise de risco. Em primeiro lugar os engenheiros se preocupam com a determinação do risco [31] que consiste na identificação dos pontos de risco e na estimação destes.

Depois, em uma segunda etapa, a avaliação do risco onde se analisa

as conseqüências da falha e a análise da aceitação destes riscos.

Ainda segundo Frankel [31], a identificação dos pontos de risco nos permite identificar novos riscos, mudanças nestes pontos, os parâmetros de risco e a ocorrência e magnitude das conseqüências destes. Na avaliação, por outro lado, determina-se graus de possíveis reduções de riscos, estabelece-se limites de aceitação e avalia-se o seu impacto.

Para o mesmo autor, é importante assegurar que os riscos de pequenos efeitos também sejam incluídos na análise. Normalmente estes são de pequena monta, porém, de alta probabilidade. Em outras palavras, sugere, não assumir uma hipótese limite, o que não obstante é feito e, geralmente, esta situação tem a propriedade de ocultar importantes conseqüências para o desenvolvimento da análise.

Segundo Romei [84], até recentemente os analistas de decisão têm se utilizado da expectativa matemática para medir riscos. A abordagem do valor esperado, entretanto, em muitos casos leva a uma análise incompleta devido à inerente propriedade da expectativa em combinar vários eventos com diferentes níveis de risco. O fato é que, quando a variância é larga, a ocorrência de eventos extremos (catastróficos) não pode, segundo o autor, ser ignorada, mesmo se o valor esperado estiver sobre rigoroso controle. Por outro lado, em muitas situações os tomadores de decisão estão mais preocupados com os valores extremos do que com os valores normais de operação.

Segundo Kahneman e Lovallo [47], os tomadores de decisão têm uma forte tendência em considerar problemas como únicos. Eles isolam o problema de possíveis implicações positivas e negligenciam a estatística do comportamento passado na avaliação das atividades correntes. Neste ponto de vista, as atitudes e decisões tomadas com respeito ao risco resultam da falha na apreciação dos efeitos da análise estatística na mitigação de riscos relativos.

Segundo os autores, a análise cognitiva de riscos difere-se do padrão dos modelos de economia e também da auto análise dos gerenciadores de sua própria atividade. O modelo racional descreve as decisões dos gerenciadores como escolha entre decisões que se aproximam da visão de jogos e, além disso, assumem que o julgamento dos gerenciadores é Bayesiano e que suas escolhas

tendem a maximizar a utilidade esperada.

### 6.3 Comentários

Neste capítulo pretendeu-se demonstrar as variantes da segurança na determinação de critérios para a escolha de metodologias de manutenção. A segurança como critério é ressaltada em sistemas que utilizam materiais e processos notadamente perniciosos à saúde humana e ambiental como, por exemplo, a indústria petroquímica e as que se utilizam de componentes radioativos. Independentemente do grau de periculosidade, entretanto, as considerações de segurança devem estar presentes em qualquer equipamento que necessite manutenção. A confiabilidade assume portanto importância fundamental na análise da segurança. Ao decisor cabe então a tarefa de hierarquizar riscos e procedimentos de segurança.

## Capítulo 7

# Critérios para a escolha de metodologias de manutenção

Como já citado anteriormente, na prática da manutenção deve-se entender que todas as missões influenciarão a taxa de falha em um montante intermediário entre as asserções "good-as-new" e "bad-as-old". Normalmente, um equipamento sofre várias atividades de manutenção preventiva intercalando-se por ações de manutenção planejada corretiva até que, por algum critério, seja decidido o seu sucateamento ou venda.

Ações de manutenção corretiva não planejada podem ocorrer entre as missões de manutenção preventiva. Assume-se que a probabilidade de falhas catastróficas [2], ou seja, a ocorrência de Manutenção Corretiva de Emergência (MCE) é extremamente pequena devido à frequência de missões preventivas e de manutenções corretivas planejadas.

O programa elaborado incorpora fatores de melhoramento relacionados com as atividades de manutenção preventiva, corretiva planejada e preditiva. Estes fatores, descritos como coeficientes de melhoramento do equipamento após a missão de manutenção nele efetuado, devem ser determinados empiricamente através de uma base de dados que correlacione dados de falha e custos de manutenção [72]. Além disso, desenvolve um modelo matemático que incorpora estes coeficientes e gera períodos de manutenção preventiva e corretiva planejada em função do comportamento da taxa de falha.

Preocupou-se, também, em se acoplar uma análise financeira que possibilita analisar o desempenho do equipamento nos mesmos períodos de utilização. Foram incluídas considerações sobre a depreciação, custo do equipamento novo, taxa de juros e valor de revenda possibilitando, assim, observar o comportamento dos custos operacionais e custos de capital.

Inicialmente desenvolve-se os conceitos utilizados no modelamento dos parâmetros confiabilísticos aplicados aos ativos permanentes de um ambiente de produção. A seguir, são descritos alguns modelos de reposição de ativos, considerando que esta reposição é função da metodologia de manutenção aplicada.

## 7.1 A distribuição de Weibull

### 7.1.1 Introdução e conceitos

Esta seção apresenta os conceitos básicos da distribuição contínua. Estas distribuições são usadas como modelos para o estudo da vida de produtos, materiais, equipamentos, etc [68].

Considera-se que os equipamentos e sistemas representados neste trabalho possam ser adequadamente representados por uma distribuição contínua, daí o interesse em explicitar os conceitos e particularizar a distribuição de Weibull.

Considera-se experimento a qualquer processo que gere observações ou dados. O conjunto de todos os resultados possíveis de um experimento é chamado espaço amostral ( $\Omega$ ). Cada resultado, em um espaço amostral, é chamado ponto amostral. Um evento é um subconjunto de um espaço amostral. Um evento simples é um evento que não pode ser decomposto.

Nem sempre um espaço amostral é constituído de valores numéricos. Podemos definir uma variável aleatória  $X$  como uma função numérica definida no espaço amostral. Assim, como os espaços amostrais, as variáveis aleatórias podem ser classificadas em discretas ou contínuas.

A função densidade de probabilidade de uma variável aleatória  $X$

contínua, é uma curva tal que a área sob a mesma entre dois pontos 'a' e 'b', é igual à probabilidade de que a variável aleatória X esteja no intervalo (a,b).

Isto é, para variáveis aleatórias contínuas, a função densidade de probabilidade representa a área sob a curva entre dois pontos considerados [22]. Ou mais formalmente:

Uma função densidade de probabilidade  $f(x)$  é uma função de X tal que:

1.  $f(x) \geq 0 \forall x \in \Omega$ ;
2.  $\int_{\Omega} f(x) dx = 1$

### 7.1.2 A distribuição de Weibull

Este trabalho fixa-se no estudo da distribuição de Weibull. Outras distribuições podem ser analisadas nos trabalhos de Nelson [68] e Battacharyya e Johnson [7].

A distribuição de Weibull é uma distribuição estatística que muitas vezes é adequada para a descrição de observações de falha. Em um recente e interessante trabalho, Hallinan [36] apresenta o desenvolvimento histórico da distribuição de Weibull e as razões que, segundo ele, esta distribuição é utilizada de cinco formas diferentes gerando uma certa confusão de conceitos e, desta forma, dificultando a sua utilização e interpretação de um modo mais amplo pela comunidade da qualidade.

A formulação original de Weibull referia-se à distribuição de resistência de materiais sujeitas a uma carga  $\sigma$  e era representada pela equação

$$n(\sigma) = \left[ \frac{\sigma - \sigma_u}{\sigma_o} \right]^m, \quad (7.1)$$

onde  $\sigma_u, \sigma_o$  e  $m$  são constantes características de cada material. Neste trabalho, é utilizada uma outra convenção segundo a qual a variável  $\sigma$  será trocada por  $t$  (que representa tempo, ciclos, etc), o parâmetro de escala  $\sigma_o$

por  $\alpha$  e o parâmetro de locação  $\sigma_u$  por  $t_o$  de modo que a equação (7.1) se torna

$$\phi(t) = \left[ \frac{t - t_o}{\alpha} \right]^\beta. \quad (7.2)$$

É a partir desta equação que iremos apresentar os conceitos básicos da distribuição contínua. Isto é, iremos utilizar da distribuição de Weibull e sua abordagem original, segundo a nossa convenção de unidades, como um exemplo de distribuição e, ao mesmo tempo, desenvolvermos os seus resultados.

### 7.1.3 A função de distribuição acumulada

Segundo Charnet [22], a função de distribuição acumulada (FDA) para uma variável aleatória  $X$ , calculada no ponto 'a' é dada por  $P(X \leq a)$ . Pode-se entender esta definição reportando-se a uma das definições de confiabilidade:

Confiabilidade  $R(t)$  é definida como a probabilidade que um item não falhe no intervalo de 0 ao tempo  $t$ , dado que ele inicie sua operação em 0.

Seu complemento é a probabilidade que o item falhe no mesmo intervalo, indicado por  $F(t)$ . A probabilidade de que qualquer das situações ocorra em um tempo  $t$  é 1, isto é,

$$R(t) + F(t) = 1.$$

Podemos escrever também, segundo a álgebra de eventos que  $R(t)$  e  $F(t)$  são mutuamente exclusivos, isto é,  $R \cap F = \phi$ , ou seja, não podem ocorrer simultaneamente. Por outro lado, a união dos dois eventos  $R \cup F$  representa a ocorrência de, pelo menos, um dos dois eventos.

A função  $F(t)$  é chamada função de distribuição acumulada onde a falha é a variável aleatória  $X$  e, calculando-se para um determinado tempo  $t$  podemos escrever

$$F(t) = P(X \leq t).$$

A função de distribuição acumulada para uma distribuição contínua é dada por

$$F(t) = P(X \leq t) = \int_{-\infty}^t f(y)dy .$$

Assim,  $F(t)$  e  $f(t)$  são formas de representar a distribuição . Estas formas são relacionadas entre si através da diferenciação de ambos os termos da equação anterior,

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} .$$

Além disso, a distribuição acumulada  $F(t)$  tem as seguintes propriedades:

- é contínua  $\forall t$  ,
- $\lim_{t \rightarrow 0} F(t) = 0$  e  $\lim_{t \rightarrow \infty} F(t) = 1$  ,
- $F(t_1) \leq F(t_2) \quad \forall t_1 < t_2$  .

Isto é, a  $F(t)$  é estritamente crescente em  $t$ .

A função de distribuição acumulada de Weibull é dada por

$$F(t) = 1 - e^{-\left[\frac{t-t_0}{\alpha}\right]^\beta} , \tag{7.3}$$

onde:

- $\alpha$  é o parâmetro de escala ou vida característica;
- $t_0$  é o parâmetro de locação, o menor tempo em que existe uma probabilidade não negativa;
- $\beta$  é o chamado parâmetro de forma ( $\beta > 0$ ) .

Além disso,  $\alpha$  tem a mesma unidade da variável da função intensidade de probabilidade, isto é, horas, meses, ciclos, quilômetros, etc. O parâmetro de forma é um número adimensional. A figura (7.1) mostra a função distribuição acumulada da distribuição de Weibull para diversos valores de  $\beta$  .

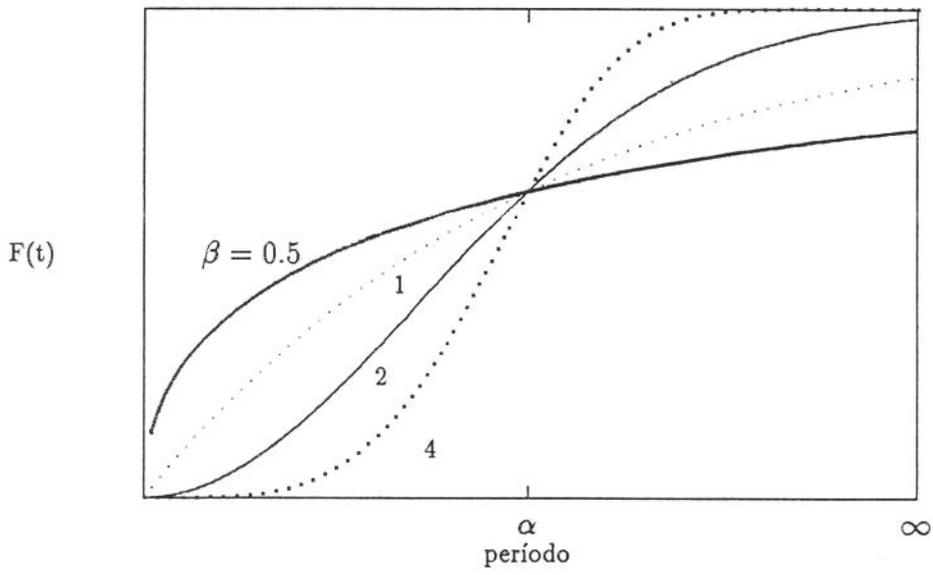


Figura 7.1: A influência de  $\beta$  em  $F(t)$

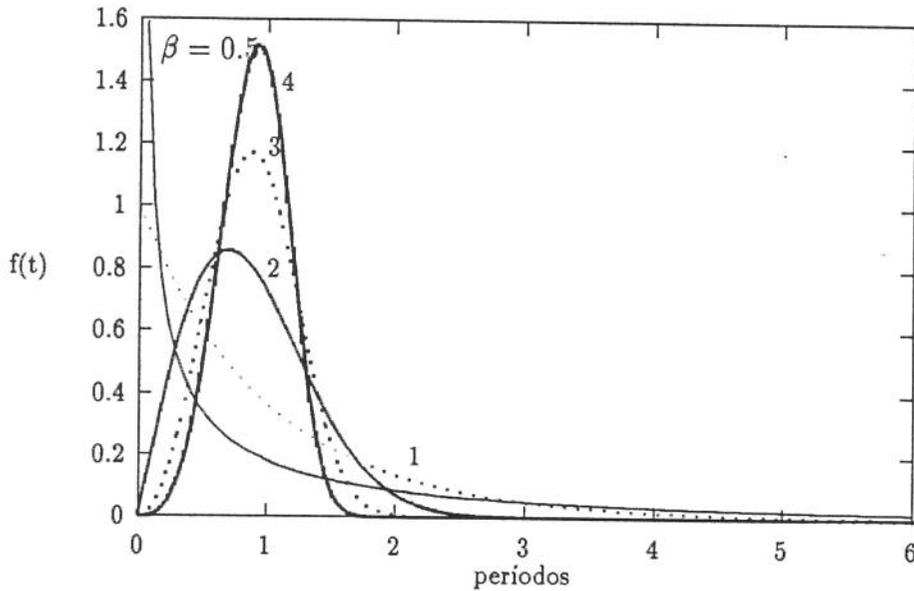


Figura 7.2: A influência de  $\beta$  em  $f(t)$  ( $\alpha$  constante)

Em alguns textos, os parâmetros de Weibull são expressos ainda de outra maneira:

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda(t-t_0)^\beta}$$

onde  $\lambda = \frac{1}{\alpha^\beta}$

#### 7.1.4 A função densidade de probabilidade de falha

Pela diferenciação da equação (7.3) obtém-se a função densidade de probabilidade de falha para a distribuição de Weibull:

$$f(t) = \frac{\beta}{\alpha^\beta} (t - t_0)^{\beta-1} e^{-[\frac{t-t_0}{\alpha}]^\beta} \quad (7.4)$$

A figura (7.2) mostra como a forma da distribuição de densidade de probabilidade de falha é influenciada por  $\beta$  e a figura (7.3) como  $\alpha$  determina a sua dispersão.

Para o caso especial de  $\beta = 1$ , a distribuição de Weibull é a distribuição exponencial. A distribuição exponencial foi largamente utilizada no

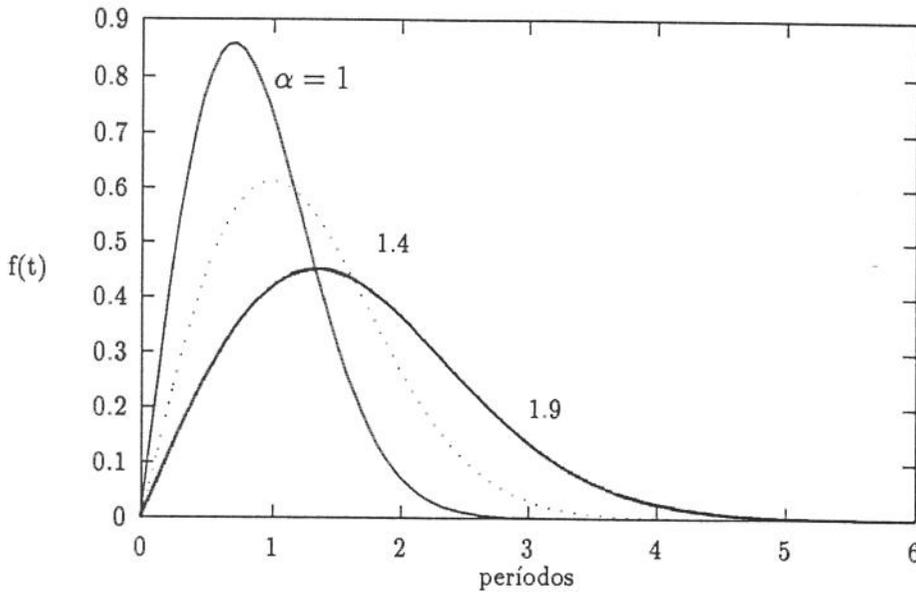


Figura 7.3: A influência de  $\alpha$  na dispersão de  $f(t)$  ( $\beta$  constante)

passado como uma distribuição de vida de produtos, mas está em desuso porque se mostrou inadequada para uma série de novas aplicações [68]. Para o caso de  $\beta = 2$ , a distribuição de Weibull passa a ser a distribuição de Rayleigh. Para valores  $3 \leq \beta \leq 4$ , a forma da distribuição de Weibull é próxima da distribuição normal.

### 7.1.5 A função intensidade de falha

A taxa de falha, também denominada função intensidade de falha,  $\lambda(t)$ , de uma distribuição contínua de vida é definida por

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)}. \quad (7.5)$$

Esta relação expressa a taxa de falha instantânea na idade  $t$ , isto é, em um pequeno espaço de tempo  $\delta$ , correspondente ao intervalo  $(t, t+\delta)$  uma proporção  $\delta f(t)$  da população inicial que atingiu a idade  $t$  falha. Assim, a função intensidade de falha é uma medida da propensão de falha em função da idade.

Além disso, a função intensidade de falha  $\lambda(t)$  que satisfaz:

- $\lambda(t) \geq 0$  para  $0 < t < \infty$  ,
- $\lim_{t \rightarrow 0} \int_0^t \lambda(t) dt = 0$  e
- $\lim_{t \rightarrow \infty} \int_0^t \lambda(t) dt = \infty$

é uma função intensidade de falha de uma distribuição [68]. Assim, a função intensidade de falha é uma outra maneira de se representar a distribuição contínua.

Substituindo a equação de densidade de probabilidade de falha  $f(t)$  e a função de distribuição acumulada  $F(t)$  na equação (7.5) obtem-se

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\alpha^\beta} (t - t_0)^{\beta-1} . \quad (7.6)$$

Que pode ser expressa, também, segundo a proposição utilizada por Pallerosi

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\alpha} \left( \frac{t - t_0}{\alpha} \right)^{\beta-1} . \quad (7.7)$$

A figura (7.4) mostra a função intensidade de falha. Pode-se observar como  $\lambda(t)$  cresce com o tempo para  $\beta > 1$  e é estritamente decrescente para  $\beta < 0.5$  .

No caso particular onde  $\beta = 1$  obtem-se uma função intensidade de falha para a distribuição exponencial. Neste caso, a função intensidade de falha não é mais uma função do tempo e sim uma constante

$$\lambda(t) = \frac{1}{\alpha} \quad (7.8)$$

Como já citado ,  $\alpha$ , o parâmetro de escala da distribuição de Weibull, é também denominado vida característica. Este nome é originário do estudo do percentil de uma distribuição. O percentil ( $y_p$ ) de uma distribuição contínua

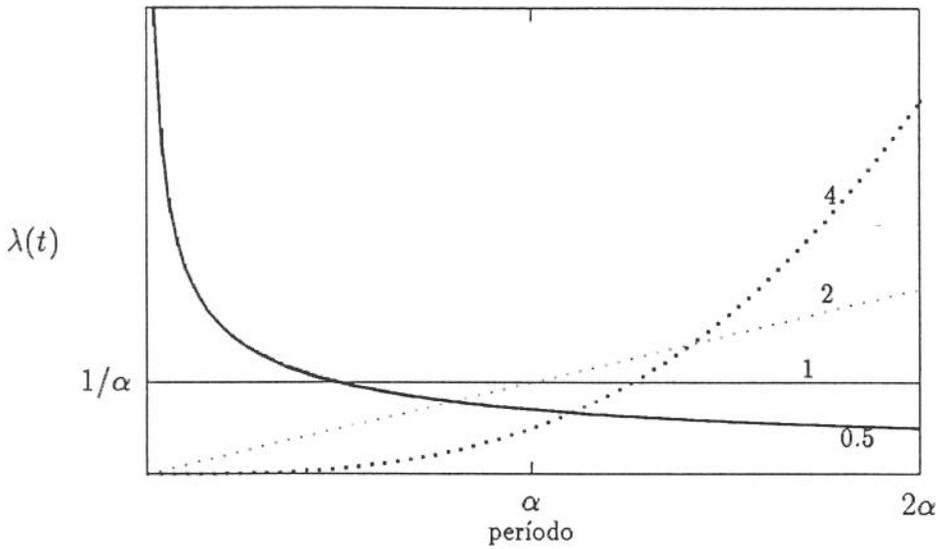


Figura 7.4: Influência de  $\beta$  na função intensidade de falha

é a idade em que uma proporção  $P$  da população tenha falhado. Portanto,  $y_p$  satisfaz a igualdade

$$P = F(y_p) . \tag{7.9}$$

Isto é, na equação (7.3) pode-se obter o percentil de Weibull através de

$$F(y_p) = P = 1 - e^{-(\frac{y_p}{\alpha})^\beta} \tag{7.10}$$

e, utilizando as propriedades da função logarítmica, encontra-se

$$y_p = \alpha [-\ln(1 - P)]^{\frac{1}{\beta}} . \tag{7.11}$$

Através da relação (7.11) pode-se observar que, para qualquer distribuição de Weibull, aproximadamente 63% da população está no estado de falha no tempo  $\alpha$ . Isto é,

$$y_{.63} \simeq \alpha . \tag{7.12}$$

Este resultado pode ser visto na figura (7.5).

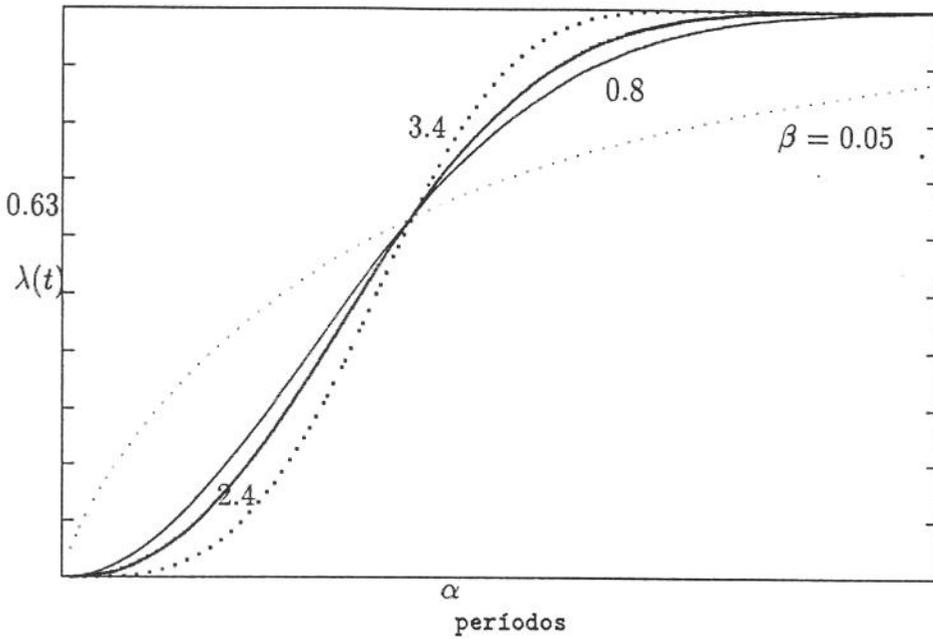


Figura 7.5: Variação de  $\lambda(t)$  em função de  $\alpha$  para diferentes valores de  $\beta$

### 7.1.6 Medidas de tendência central

As medidas de tendência central (ou de locação) são aquelas que 'localizam' o centro de uma distribuição ou de um conjunto de dados. Juntamente com a média e o desvio padrão, as medidas de tendência central caracterizam uma determinada distribuição.

#### A moda da distribuição de Weibull

A moda ( $y_m$ ) é a observação que ocorre com maior frequência, isto é, o valor onde a densidade de probabilidade de falha é máxima. Esta idade pode ser calculada através da localização do máximo de uma função, obtendo-se a idade onde a derivada da densidade de probabilidade de falha com respeito à variável (tempo, ciclos, etc) assume valor zero [68].

Assim,

$$\frac{df(t)}{dt} = 0 \tag{7.13}$$

para a distribuição de Weibull, considerando  $t_o = 0$ ,

$$f(t) = \frac{\beta}{\alpha^\beta} \cdot t^{\beta-1} \cdot e^{-(\frac{t}{\alpha})^\beta} \quad (7.14)$$

derivando, igualando a zero e rearranjando os termos da equação 7.14 encontra-se

$$t_m = \alpha \cdot [1 - \frac{1}{\beta}]^{\frac{1}{\beta}} \quad (7.15)$$

e assim, para a distribuição de Weibull, pode-se escrever

$$t_m = \begin{cases} \alpha \cdot (1 - \frac{1}{\beta})^{\frac{1}{\beta}} & \text{para } \beta > 1 \\ 0 & \text{para } 0 < \beta \leq 1 \end{cases} \quad (7.16)$$

### Esperança matemática

A esperança  $E(X)$  de uma variável aleatória  $X$  com uma distribuição contínua de densidade de probabilidade de falha  $f(t)$  é dada por

$$E(X) = \int_{-\infty}^{\infty} x f(x) dx . \quad (7.17)$$

Segundo Nelson [68], para uma distribuição de vida teórica, a esperança matemática, que o autor chama de média, também é conhecida por vida média ou vida esperada. A esperança é igual à média aritmética de todas as vidas das unidades de uma população. Assim, a esperança matemática para a distribuição de Weibull é obtida para

$$E(T) = \int_{-\infty}^{\infty} t f(t) dt , \quad (7.18)$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} t \left\{ \frac{\beta}{\alpha^\beta} \cdot t^{\beta-1} \cdot e^{-(\frac{t}{\alpha})^\beta} \right\} dt \quad (7.19)$$

como  $f(t)$  é definida para o intervalo  $[0, \infty)$ :

$$= \int_0^{\infty} t^\beta \cdot \frac{\beta}{\alpha^\beta} \cdot e^{-(\frac{t}{\alpha})^\beta} dt \quad (7.20)$$

variando os parâmetros pode-se demonstrar que

$$E(T) = \alpha \cdot \int_0^{\infty} z^{\frac{1}{\beta}} \cdot e^{-z} dz \quad (7.21)$$

A integral da equação (7.21) é uma função não elementar denominada função Gamma [52] que é definida pela integral:

$$\Gamma(v) = \int_0^{\infty} e^{-t} \cdot t^{v-1} dt \quad (7.22)$$

assim, comparando as equações (7.21) e (7.22) obtém-se

$$\frac{1}{\beta} = v - 1$$

$$v = 1 + \frac{1}{\beta}$$

e, desta forma, a esperança matemática para a distribuição de Weibull é dada por:

$$E(T) = \alpha \cdot \Gamma\left(\frac{1}{\beta} + 1\right) \quad (7.23)$$

### A variância da distribuição de Weibull

A variância de uma variável aleatória X com uma distribuição contínua com densidade de probabilidade f(x) é dada por:

$$Var(X) = \int_{-\infty}^{\infty} [x - E(x)]^2 \cdot f(x) dx$$

Semelhantemente ao cálculo da esperança matemática pode-se demonstrar que, para a distribuição de Weibull, a variância é dada por:

$$Var(T) = \alpha^2 \cdot \left\{ \Gamma\left(1 + \frac{2}{\beta}\right) - \left[\Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)\right]^2 \right\} \quad (7.24)$$

## 7.2 A otimização da manutenção

No capítulo 1 observou-se os diferentes modelos aplicados ao problema da manutenção. A otimização da manutenção é um problema clássico enfrentado por pesquisadores de diversas áreas. Esta otimização, baseada em custos, é feita sobre diversas variáveis e considerações. Não se pretende, aqui, englobar os diferentes pontos de vista desta questão, mas sim caminhar numa lógica de desenvolvimento destes modelos para concluir sobre a proposição deste trabalho.

### 7.2.1 O modelo de Thompson

A determinação de uma política ótima de manutenção tem sido objeto de estudo de diversos pesquisadores. O enfoque dado por Thompson [95] tornou-se bastante difundido e referenciado nos estudos posteriores. Thompson relaciona a produtividade decrescente dos equipamentos com o tempo e a probabilidade de se reduzir, parcialmente, este problema via MPV.

O modelo de Thompson relaciona as seguintes variáveis:

- $S(t)$ : "Salvage value" - valor de revenda
- $Q(t)$ : as receitas operacionais
- $r$ : a taxa de juros
- $m(t)$ : a variável de controle (capital gasto na função manutenção no tempo)
- $f(t)$ : a efetividade da manutenção (capital adicionado ao  $S(t)$  por capital gasto na manutenção)
- $V(t)$ : valor presente
- $T$ : ótima data da venda do ativo
- $d(t)$ : a função obsolescência (capital subtraído de  $S(t)$  no tempo)
- $P$ : taxa de produção

Este modelo baseado na produção pretende buscar a solução ótima para a data de venda. Considerando as variáveis envolvidas, o modelo é baseado como se segue.

O valor presente do ativo é a soma de dois termos, o valor de revenda descontado no tempo por uma taxa  $r$  mais as receitas obtidas durante este tempo e, segundo Thompson, representado por

$$V(T) = S(T).e^{-rT} + \int_0^T Q(t).e^{-rt} dt. \quad (7.25)$$

A variável valor de revenda é afetada pelo fator de obsolescência e a quantidade e efetividade das missões de manutenção;

$$\frac{dS(t)}{dt} = -d(t) + f(t).m(t) \quad (7.26)$$

Os aspectos referentes à obsolescência tecnológica na questão da escolha de metodologias de manutenção serão abordados ao longo deste texto.

O problema é, então, determinar uma política de manutenção  $m(t)$  e uma data de venda  $T$  de forma que se possa maximizar  $V(T)$ .

Thompson, usando o princípio do máximo de Pontryagin e relacionando os resultados na forma Hamiltoniana [93], [103], demonstra que a opção de venda do ativo existe. Além disso, mostra que uma política ótima para este modelo é do tipo "bang-bang", isto é, as atividades e gastos de manutenção devem ser efetuados a um nível máximo permissível por um determinado período e zero após atingir um certo ponto no tempo ao final do qual se pretende vender o ativo.

A figura (7.6) mostra a política de manutenção "bang-bang" do modelo de Thompson.

Este resultado pode ser colocado na seguinte forma: deve-se investir na manutenção no tempo  $t$  somente se a máquina possa ser mantida por um período suficientemente longo depois de  $t$ , de modo que o valor investido possa ser recuperado devido ao aumento de lucratividade resultante da manutenção antes da venda. Para este modelo, a escolha da metodologia de manutenção influenciaria diretamente a efetividade da manutenção referente à equação (7.26) e, desta forma, também a equação (7.25).

### 7.2.2 O modelo de Kamien e Schwartz

Kamien e Schwartz [48] usaram um modelo similar ao de Thompson incluindo, porém, importantes modificações. Estes autores consideraram que o valor produzido pelos equipamentos é independente de sua idade mas, por outro lado, que a probabilidade de falha cresce com o tempo. Desta forma, o

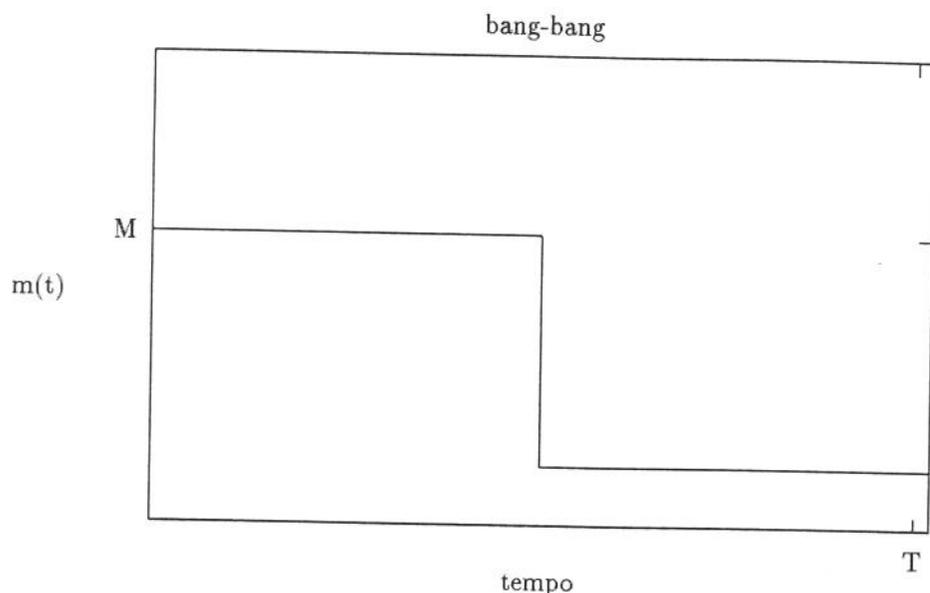


Figura 7.6: Política de Manutenção de Thompson

propósito da manutenção preventiva neste modelo é, essencialmente, reduzir a probabilidade de falha do equipamento.

O problema enfocado é a seleção de uma política ótima de manutenção para o período de compra e de uma data de venda planejada onde o ativo seria vendido em um estado operacional (não em falha).

Segundo os autores, esta política ótima de manutenção não é do tipo "bang-bang", como demonstrado por Thompson, mas sim uma função contínua e não-crescente.

A figura (7.7) mostra uma política de manutenção deste tipo.

O modelo considera  $R$  (a taxa constante de produção) como uma constante positiva e independente da idade do ativo.

O valor de descarte do equipamento  $J \geq 0$  também é independente de sua idade quando da falha. O valor de revenda  $S(t)$  é assumido como uma função decrescente em  $t$ .

A figura (7.8) mostra a diminuição do valor de revenda no tempo

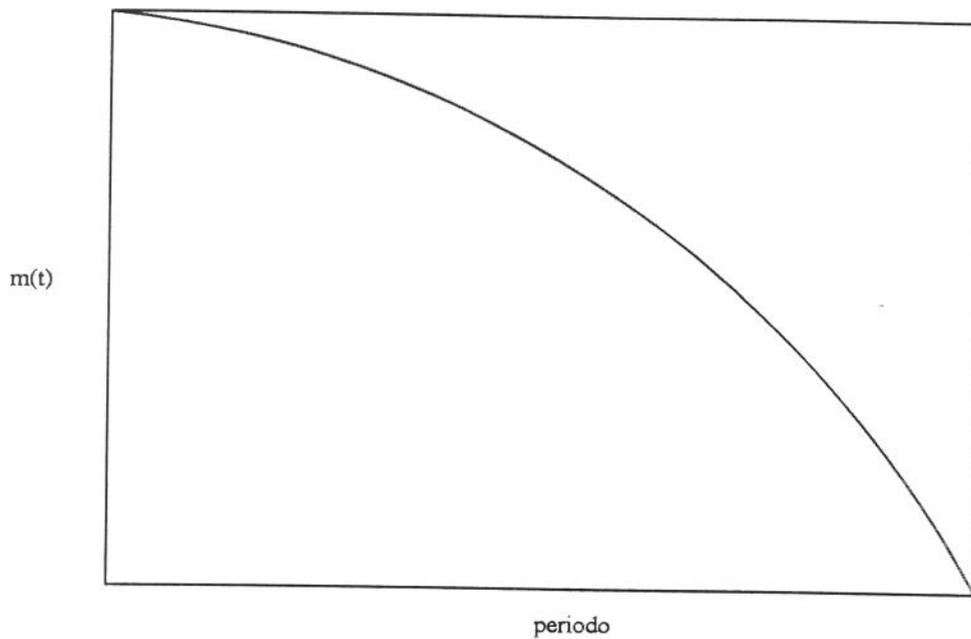


Figura 7.7: Política de manutenção contínua e não crescente

como uma função contínua e limitada pelo valor de descarte  $J$ .

Assim, uma máquina em operação deve sempre valer mais do que uma máquina a ser descartada e seu valor de revenda não pode exceder o montante realizável para um período considerado infinito. Desta forma, para  $r$  (taxa de juros), a derivada do valor de revenda é

$$S'(t) < 0$$

$$0 \leq J \leq S(t) \leq R/r \tag{7.27}$$

$$\forall t \geq 0$$

Se  $F(t)$  denota a probabilidade de falha em  $t$ , a probabilidade de falha em um tempo  $t$ , dado que tenha sobrevivido até este tempo, depende de uma taxa de falha "natural" que depende da idade do equipamento e de uma política de manutenção nele efetuada.

Considerando

$$R(t) = 1 - F(t) \tag{7.28}$$

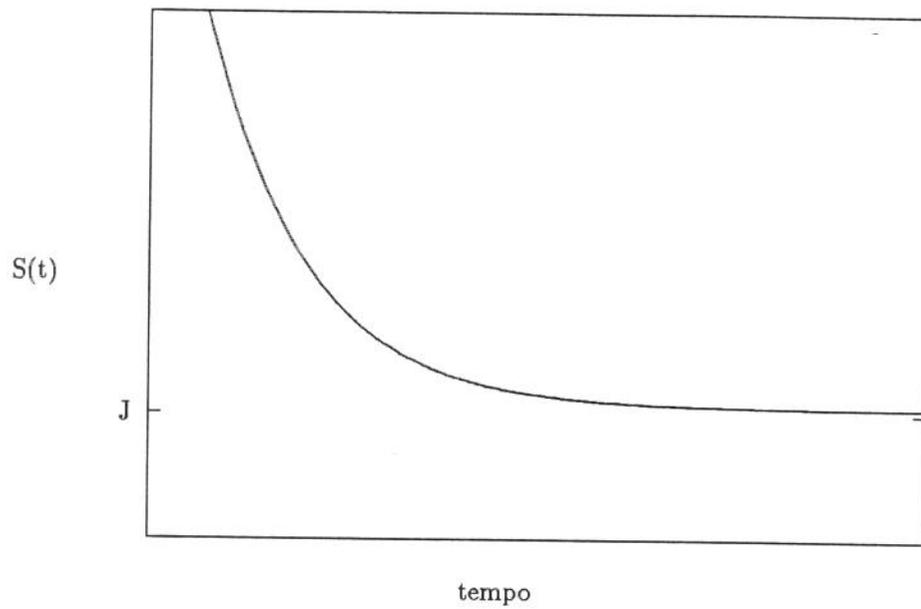


Figura 7.8: Forma de  $S(t)$  até atingir o valor de descarte  $J$ .

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = F'(t) \quad (7.29)$$

e que

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)}, \quad (7.30)$$

temos

$$F'(t) = \lambda(t).R(t) \quad (7.31)$$

e, neste ponto, o modelo acrescenta uma variável de controle ou de decisão  $\mu(t)$  nesta equação assumindo a forma

$$F'(t) = (1 - \mu(t)).\lambda(t).(1 - F(t)) \quad (7.32)$$

com a condição inicial

$$F(0) = 0 \quad (7.33)$$

onde a taxa de falha, ou função intensidade de falha, é não decrescente e positiva em função da idade do equipamento, isto é:

$$\lambda(t) \geq 0 \quad (7.34)$$

e a variável de controle  $\mu(t)$  está no intervalo

$$0 \leq \mu(t) \leq 1. \quad (7.35)$$

Assim, a densidade de probabilidade de falha em  $t$ , dado que tenha sobrevivido até esta data, é  $(1 - \mu(t)).\lambda(t)$ . Os autores consideram esta densidade condicional como taxa de falha do equipamento. Neste caso, se  $\mu(t) = 0$ , então a taxa de falha assume o valor "natural"  $\lambda(t)$ . à medida que o valor de  $\mu(t)$  se eleva, a taxa de falha declina com valor limite zero. Se  $\mu(t) = 1$ , então a máquina é mantida em perfeitas condições durante a sua operação.

A taxa de falha, portanto, depende apenas da idade  $t$  da máquina em  $\lambda(t)$  e da política atual de manutenção  $\mu(t)$ . O modelo considera que a

manutenção efetuada no passado somente afeta a probabilidade  $1 - F(t)$  de que a máquina tenha sobrevivido até a idade  $t$ .

Assume-se que o custo associado à redução da taxa de falha  $(1 - \mu(t)) \cdot \lambda(t)$  é uma função crescente  $C[\mu(t), \lambda(t)]$  que depende, por um lado, da política de manutenção efetuada e o conseqüente percentual de redução obtido na taxa de falha  $e$ , por outro, da função intensidade de falha "natural"  $\lambda(t)$ .

Os autores colocam, então, que o custo da manutenção tem a forma  $C(\mu, \lambda) = M(\mu)\lambda$ ; onde a função  $M(\mu)$  é uma função estritamente convexa que satisfaz

$$0 \leq \mu \leq 1 \begin{cases} M(0) = 0 \\ M'(0) > 0 \\ M''(0) > 0. \end{cases} \quad (7.36)$$

Desta forma, o custo de não manutenção é zero e o custo de reduzir a taxa de falha cresce mais do que proporcionalmente do que  $\mu(t)$ . O custo de se obter um dado  $\mu(t)$  cresce linearmente com o crescimento da taxa "natural" de falha do sistema, daí o fato do custo de obter uma redução via  $\mu(t)$  ser crescente com o tempo.

Assim como a abordagem deste trabalho, os autores também assumem que o decisor visa um horizonte distante, porém, finito  $Z$ . O decisor procura, desta forma, uma data de venda  $T$  onde  $0 < T \leq Z$  e uma política de manutenção  $\mu(t)$  onde  $0 \leq t \leq T$  para a máquina, de modo que ela seja descartada em sua falha ou vendida antes desta ocorrência.

O problema, então, é maximizar o valor presente dos montantes realizáveis pela máquina considerando todos os custos incluindo os de manutenção.

O fluxo de caixa descontado para a máquina em  $t$  é zero se a máquina já estiver no estado de falha (com probabilidade  $F(t)$ ), caso contrário, é a taxa de produção (considerada constante) menos os montantes dispendidos na manutenção, isto é,

$$R - M(\mu(t)) \cdot \lambda(t) \quad (7.37)$$

somado ao valor de descarte  $J$  se a máquina falha em  $t$ . Além disso, o valor de revenda  $S(t)$  é computado para  $T$  com probabilidade  $(1 - F(t))$  já que somente será vendida na eventualidade de não estar em falha.

Observando-se o fluxo de caixa descontado da figura (7.9), contando-se com estas variáveis, multiplicando-as por suas probabilidades e integrando de  $t = 0$  a  $T$  obtém-se

$$e^{-rT} \cdot S(T) \cdot (1 - F(T)) + \int_0^T e^{-rt} \cdot \{ [R - M(\mu(t)) \cdot \lambda(t)] \cdot (1 - F(t)) + J \cdot F'(t) \} dt \quad (7.38)$$

e o problema então passa a ser maximizar esta equação com respeito a  $T$  (onde  $0 < T \leq Z$ ) e a  $\mu(t)$  (onde  $0 \leq t \leq T$ ) sujeito à (7.32), (7.33), (7.35) e as propriedades especificadas por (7.27), (7.34).

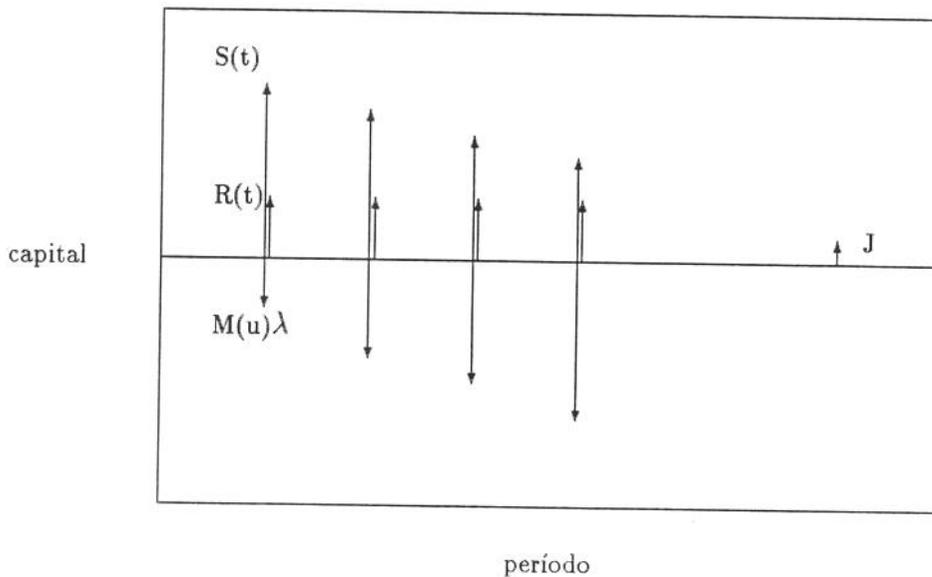


Figura 7.9: fluxo de caixa

O problema passa a ser determinar  $V(T)$ , o valor máximo da equação (7.38) e  $V'(T)$  fixando-se para todas as políticas  $m^*(t)$ ,

$$V'(t) = e^{-rt} \cdot (1 - F) \cdot \{ R - M(\mu^*) \cdot \lambda + J \cdot (1 - \mu^*) \cdot \lambda - [r + (1 - \mu^*) \cdot \lambda] \cdot S + S' \} \quad (7.39)$$

Assim, a data ótima de venda  $T$  é obtida para  $V'(T) = 0$  de forma que

$$R - M(\mu^*) \cdot \lambda + J \cdot (1 - \mu^*) \cdot \lambda - [r + (1 - \mu^*) \cdot \lambda] \cdot S = -S' \quad (7.40)$$

em  $T$  e, considerando o horizonte  $Z$ , é necessário que

$$R - M(\mu^*) \cdot \lambda + J \cdot (1 - \mu^*) \cdot \lambda - [r + (1 - \mu^*) \cdot \lambda] \cdot S \geq -S' \quad (7.41)$$

em  $Z$ , isto é, caso a máquina seja mantida até o tempo  $Z$ . Neste caso, é necessário que seja vantajoso manter a máquina em operação até este horizonte.

Utilizando-se esta idade ótima para a venda, o modelo de Kamien e Schwartz procura caracterizar a política de uma manutenção ótima  $\mu^*$  o que equivale dizer uma metodologia de manutenção a ser aplicada no sistema. Os resultados mostram que uma política ótima é obtida para uma taxa decrescente de manutenção no tempo embora não necessariamente se reduza a taxa de gastos.

Algumas restrições do modelo está no fato dos autores não considerarem o recondicionamento e não distinguirem entre as missões MPV, MPD e MCE. A seguir são apresentados alguns diferentes modelos propostos e as dificuldades analíticas impostas aos que consideram a MPC na otimização da manutenção.

### 7.2.3 Outros modelos

Lie e Chun [57] formularam um modelo de custo onde uma missão preventiva era efetuada, assim que o sistema atingisse uma pré determinada taxa de falha máxima, isto é, ao atingir um valor  $\delta = \lambda(t)$  dispara-se um gatilho e efetua-se a missão.

Jayabalan e Chaudhuri [44] obtiveram uma política de manutenção e descarte de equipamentos para um período finito, onde o tempo de parada para instalação, "set-up" e da MPV propriamente dita, foram considerados desprezíveis.

Em outro trabalho, Jayabalan e Chaudhuri [43] consideram o tempo de parada de produção como constante para os diversos reparos, uma vez que o sistema é trocado por um novo e similar. Os autores consideram, ainda, o tempo gasto nas missões MPV como estritamente crescente à medida que

avança a idade cronológica dos equipamentos. Para incorporar esta característica de seu modelo, os autores consideram que as missões MPV seguem uma distribuição exponencial com uma média crescente. As médias dessas distribuições são crescentes ao passo que o número de missões MPV aumenta.

Hopp e Wu [40] apresentam um modelo que trabalha com equipamentos que sofrem deterioração markoviana, isto é, o estado do equipamento é unidimensional e completamente observável. Seus principais resultados foram que, sob determinadas condições, uma política ótima de manutenção:(1) terá uma estrutura limite de controle, isto é, existe um nível de deterioração abaixo do qual a decisão ótima é "não fazer nada" - o que corresponderia em nossas considerações à MCE - e (2) será monotônica, isto é, a atividade de manutenção irá ser decrescente ou crescente (discordando do modelo de Kamien e Schwartz), dependendo das hipóteses assumidas no nível de deterioração.

Em suas conclusões, os autores colocam a necessidade de estudos sobre problemas em que múltiplas ações de manutenção possam ser efetivadas em um ambiente em que o estado do equipamento não seja completamente observável. Os autores entendem que tal abordagem eleva consideravelmente a dificuldade do problema e o resultado não é tão contundente como os citados acima. Concluem, ainda, que há a necessidade de mais estudos que envolvam a esfera tecnológica na decisão da manutenção e reposição de equipamentos, uma área, segundo os autores, muito pouco explorada.

Valdez-Flores e Feldman [99] apresentam um algoritmo para o problema da manutenção semi-markoviana. Novamente, considera-se que o sistema é contínua e perfeitamente observável de modo que o seu estado é conhecido com certeza em todo o tempo. Os autores procuram minimizar a função custo esperado por unidade de tempo para uma determinada política de manutenção preventiva. A abordagem privilegia o critério de custos embora não os discriminem.

## 7.3 A otimização de modelos que utilizam a MPC

Na introdução deste trabalho foram apresentadas as esferas de decisão da função manutenção. Discutiu-se, ao longo do texto, alguns dos modelos de reposição de ativos apresentados por diversos autores. Por outro lado, as políticas de inspeção também foram observadas em seu conceito mais amplo. Da mesma forma, características da estrutura organizacional receberam atenção nos capítulos anteriores, assim como alguns tópicos relevantes sobre a análise de risco.

Entende-se que estas considerações conformam o pano de fundo para a determinação de critérios para a escolha de metodologias de manutenção.

Este trabalho não pretende apresentar soluções prontas frente a um quadro tão complexo que ora é apresentado, mas auxiliar a escolha de metodologias de manutenção através do exame destas interfaces e tendências. Assim, ao se examinar mais atentamente este pano de fundo proposto, pode-se tecer ainda alguns comentários que reforçarão a proposição deste trabalho.

### 7.3.1 As decisões

As decisões sobre a reposição de ativos necessitam ser tomadas sobre um ponto de vista de seu ciclo econômico. Genericamente, este ciclo é baseado em 3 custos principais:

- custo operacional
- custo de capital
- custo fixo

A figura (7.10) mostra a abordagem tradicional de custos [50], [33]:

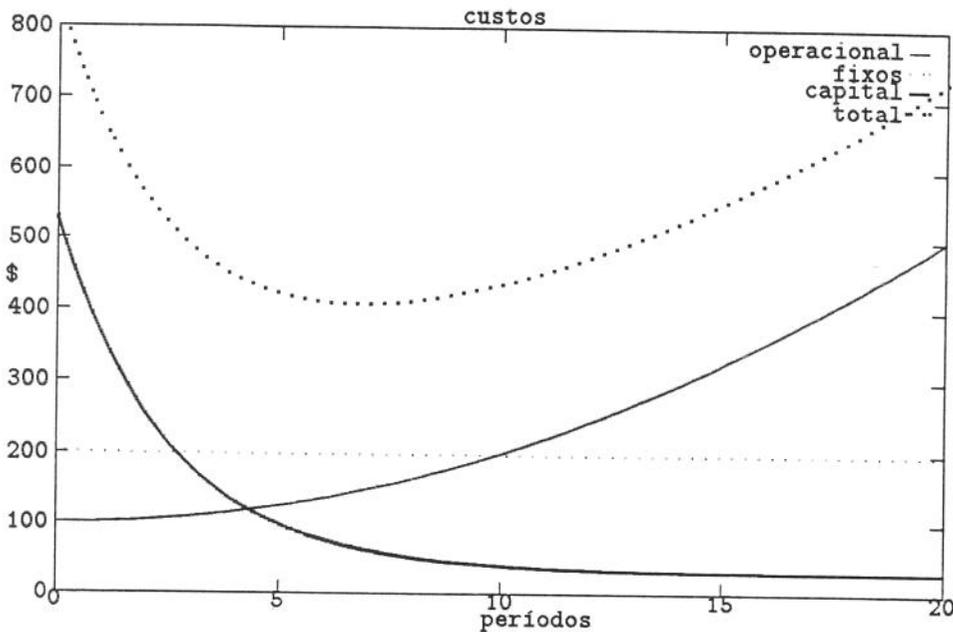


Figura 7.10: A abordagem tradicional de custos

As decisões sobre a aquisição de capital, como já citado, devem ser tomadas ainda tendo em conta os avanços tecnológicos, subsídios, interface com outros ativos, etc. Desta forma existe um considerável nível de incerteza associado às decisões sobre este tipo de investimento.

Segundo Jardine [42], a análise sobre decisões de reposição de ativos permanentes é bastante facilitada pelo acesso à micro-informática. Muitos programas são interativos e permitem visualizar uma série de cenários para períodos subsequentes de produção/manutenção.

Entende-se que o custo operacional é função, também, da metodologia de manutenção escolhida para o sistema dentro de algum critério. No modelo apresentado neste trabalho considera-se as MPV, MPC e MCE dentro de uma certa lógica do processo da manutenção, não havendo impedimento de que as missões MPV sejam substituídas por MPD. Como citado, as MPV podem ser visualizadas como atividades MPD [54].

Alguns modelos apresentados avaliam a taxa de obsolescência, outros a influência da atividade mantenedora na evolução da função intensidade de falha. Entretanto, menos ou mais abrangentes sob o aspecto prático, com

exceção dos modelos que se utilizam de uma abordagem heurística [51], [55], da lógica incerta [97] e de análise de multi-critério [59], a base matemática destes modelos é a programação linear.

Um exemplo é o trabalho de Valdez-Flores e Feldman [99], onde os autores adotam a hipótese de melhoramento parcial, intermediário entre as acepções "as new" e "as old" e determinam um tempo ótimo de manutenção, através do critério de custo esperado por unidade de tempo, onde o problema é resolvido achando-se o mínimo desta função de custos em um algoritmo.

Segundo Brown [18], para se obter uma política ótima de manutenção em uma dada situação, precisamos coletar todos os dados pertinentes e tratá-los de forma inteligente e objetiva. Em geral, as informações necessárias na análise de otimização de manutenção são as relacionadas com as falhas dos equipamentos, custos de parada de produção e os associados à ineficiência do sistema (a sua degradação no tempo). Ainda segundo Brown, as informações mais úteis para a otimização de tais processos são obtidas através da análise de dados históricos, dados do fabricante, especialistas e do próprio pessoal da manutenção.

Nesta linha de raciocínio, a análise que permite a otimização de custos da manutenção e, também, caminhar para a determinação de critérios para a escolha de metodologias de manutenção, é baseada na teoria da confiabilidade e programas computacionais que possibilitem transcrever os dados obtidos nas missões de manutenção como, por exemplo, períodos de tempo, custos, inspeções, etc., de forma a possibilitar ao decisor as opções de cenários dentro de um horizonte finito de tempo.

### **7.3.2 A Manutenção Planejada Corretiva**

A manutenção planejada corretiva MPC, também denominada recondição, é uma missão de manutenção tomada para melhorar a condição de um item ou sistema antes de sua falha. É, essencialmente, uma forma de manutenção preventiva que, diferentemente de uma reposição pura e simples, recoloca o equipamento em uma condição intermediária entre as hipóteses

"same-as-new" e "same-as-old".

O modelo apresentado neste trabalho lida com estas considerações e adota este melhoramento intermediário propiciado pela MPC.

Segundo Jardine [42], a matemática associada à resolução deste tipo de modelo que considera o melhoramento 'parcial' devido à MPC e a busca de uma solução ótima de reposição é muito mais complexa do que a associada a problemas que não consideram este tipo de hipótese devido à variabilidade das características da confiabilidade e de seus parâmetros entre períodos subsequentes.

Isto se deve ao fato de que a consideração da MPC e do melhoramento propiciado por ela, torna a função intensidade de falha descontínua. Por outro lado, os custos de capital e o valor de revenda são modificados de tal forma que também não se pode mais tratá-los como funções contínuas no tempo. Isto é, os melhoramentos propiciados pela MPC ao colocar o equipamento em uma posição intermediária entre "same-as-new" e "same-as-old", também altera, na prática, o valor de revenda e o custo do capital a uma mesma fração.

Por outro lado, o próprio melhoramento das condições da máquina não é uma constante, isto é, o equipamento que sofre uma missão MPC é "melhorado" cada vez menos entre sucessivas missões.

O melhoramento propiciado e a lei que o rege devem ser obtidos empiricamente para cada equipamento. Uma técnica é, por tentativa e erro, estimar valores confiáveis deste melhoramento [43].

Estas variáveis, como se vê, fornecem limites para a descontinuidade do modelo e lançam desafios para a determinação empírica destes valores e variações dentro de uma abordagem de base de conhecimento.

A figura (7.11) mostra a descontinuidade da função intensidade de falha resultante de uma missão MPC.

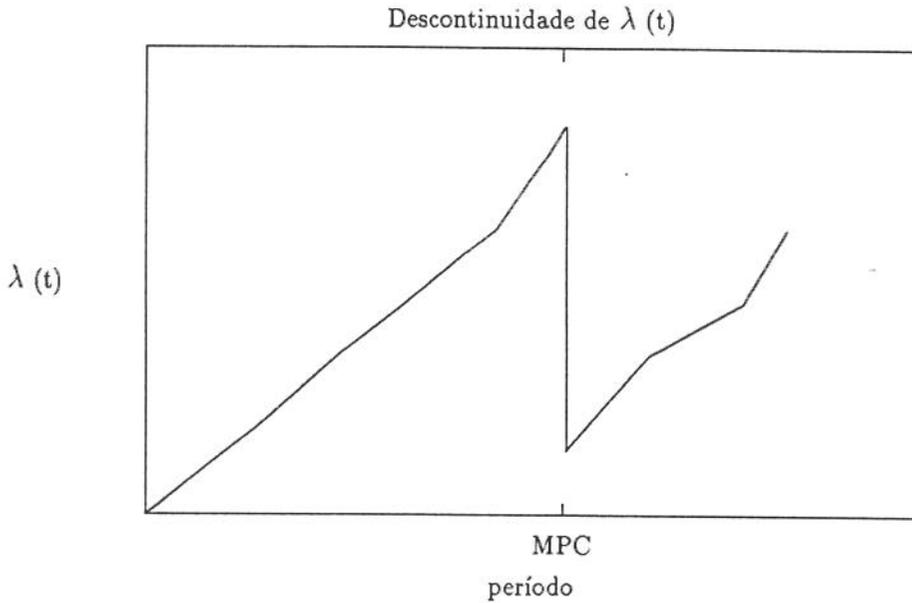


Figura 7.11: A descontinuidade da função Intensidade de Falha

### A abordagem numérica

Neste contexto, segundo Vanderplaats [100], entre as limitações da otimização numérica está o fato de que a maioria destes algoritmos de otimização tem dificuldade em lidar com funções descontínuas. Além disso, problemas altamente não lineares convergem muito vagorosamente ou nem mesmo convergem.

A técnica matemática da programação dinâmica [31], [93], parece ser uma boa ferramenta para lidar com as considerações envolvidas na MPC. Mesmo assim, segundo Jardine, o uso de modelos baseados em programação dinâmica é limitado devido, em parte, ao número muito maior de dados detalhados necessários para solucionar os problemas com a aplicação de MPC, comparado com os de reposição simples onde a suposição "same-as-new" pode ser feita.

Tapiero [92], em suas conclusões de um trabalho sobre a manutenção de máquinas no contexto da qualidade, coloca que os efeitos da manutenção

poderiam alterar em um determinado momento (o momento da decisão sobre as diferentes práticas de manutenção) a dinâmica da degradação do sistema. A solução para este problema, segundo o autor, leva-nos ao estudo de desigualdades quasivariacionais que podem, em alguns casos, ser resolvidas.

Frankel [31] coloca o problema ainda mais claramente: "Inúmeros modelos têm sido desenvolvidos para a determinação do custo mínimo na atividade da manutenção" (modelos que incluem MPC). "O modelo proposto assume funções de custo lineares, outros modelos permitem utilizar funções parabólicas ou outras de ordem superior não lineares, porém, funções monotonicamente crescentes e contínuas. As técnicas de programação matemática como a linear, não linear e dinâmica são usualmente aplicadas para a determinação de uma estratégia ótima de manutenção. Em alguns modelos, os custos de reparo e operação são combinados e esta estratégia provê o mínimo custo por unidade de tempo de efetiva operação sujeito a condicionantes particulares de operação. Quando o modelo se torna complexo ou então as funções de custo se tornam descontínuas, a simulação matemática é usualmente o único método efetivo para a resolução de tais problemas"

### A abordagem gráfica

Por outro lado, uma alternativa para a solução analítica de modelos, como os utilizados neste trabalho, é a utilização de uma abordagem gráfica. Bergman e Klefsjö [9],[10] apresentam um método de solução gráfica para diferentes critérios de otimização. Segundo os autores, embora a solução gráfica não seja mais eficiente do que a solução numérica simples, ela é mais útil para a análise de sensibilidade das diferentes variáveis.

A solução gráfica, portanto, parece adaptar-se melhor aos objetivos deste trabalho. E, embora não se possa obter, convencionalmente, os valores exatos através de soluções numéricas sofisticadas, a capacidade de visualização e da análise de sensibilidade das diversas variáveis que a solução gráfica proporciona, são vantagens consideráveis.

Por outro lado os coeficientes, índices e multiplicadores que carac-

terizam a segurança, a hierarquia dos equipamentos e a influência destes no sistema podem ser, dentro desta abordagem gráfica, melhor representados e, desta forma, configuram um pano de fundo delineado capaz de sustentar a necessidade de informações do decisor.

A capacidade de integrar dados históricos de manutenção e acumular informações referentes aos custos associados e aos parâmetros da confiabilidade de cada equipamento vem ao encontro à necessidade do desenvolvimento de sistemas que integrem modelos de manutenção e banco de dados para a criação de sistemas especialistas na área da gerência da manutenção.

Segundo Antunes [4], em muitos contextos do mundo real, decisões tem que ser tomadas na presença de múltiplos, conflitantes e incomensuráveis critérios. A situação considerada é caracterizada pelo tomador de decisão que precisa escolher a alternativa que melhor lhe convenha ou então formar um "ranking" de alternativas possíveis. Estas alternativas precisam ser avaliadas sobre diversos critérios que são normalmente conflitantes, no sentido de que não existe uma única medida do que é melhor e, portanto, não existe, "a priori", uma alternativa predominante.

Em um contexto multicritério, as preferências do decisor desempenham um papel chave no processo de tomada de decisão. O objetivo é solucionar uma alternativa que melhor corresponda as suas preferências. Ainda segundo Antunes, algumas escolas entendem que estas preferências são estáticas, mas este pode não ser bem o caso. Estas preferências são normalmente vagas e não explicitamente conhecidas e um estágio de aprendizado sobre o problema contribui para o refinamento e revisão das preferências em curso durante o processo de decisão.

Nestas circunstâncias é essencial que o gerenciador tenha acesso a ferramentas computacionais. Estas ferramentas, por sua vez, precisam prover um ambiente de interação entre o usuário e o sistema visando a aprendizagem.

Tem sido comumente reconhecido que representações gráficas de informações geradas pelo computador facilitam a percepção holística do seu sentido e relevância, diminuindo, desta forma, o peso cognitivo do tomador de decisão e facilitando a emergência de novos "insights" sobre o problema.

O uso de gráficos contribui, portanto, para potencializar as capacidades humanas de inspeção visual através da descrição das relações espaciais, mostrando a estrutura e o comportamento das variáveis desempenhando um papel importante na provisão de informações de melhor qualidade para o auxílio do gerenciador.

### Sistema de suporte a decisão

Um sistema como este, portanto, pode ser entendido como um sistema de suporte à decisão (DSS).

Chau [23] em recente trabalho sobre tecnologias de decisão apresenta as seguintes características de um DSS:

- o sistema auxilia a tomada de decisão em tarefas semi estruturadas,
- suporta e fortalece mais do que corrige o julgamento gerencial,
- caminha para a efetividade da tomada de decisão mais do que para a sua eficiência,
- procura combinar o uso de modelos e técnicas analíticas com o acesso tradicional de dados,
- tem qualidades que o tornam fácil de usar pelo pessoal operacional de forma interativa , e
- enfatiza a flexibilidade e a adaptabilidade para acomodar mudanças no ambiente e na estratégia da tomada de decisão pelo usuário.

Estas qualidades distintas separam o DSS das técnicas tradicionais de gerenciamento como, por exemplo, as técnicas de pesquisa operacional, modelos que, como vimos, procuram por uma solução ótima (analítica) para problemas operacionais e estruturados e mais recentemente para problemas tratados pelo SIG. Segundo o autor, um DSS auxilia principalmente na tomada de uma decisão para a qual modelos adequados podem até ser construídos, mas que dos quais não se pode extrair uma solução ótima.

Basicamente um DSS consiste de uma base de dados, de um modelo básico e um sistema de diálogo. Como o DSS lida com um sistema semi estruturado e, como foi visto, vários autores apontam para a impossibilidade ou dificuldade de se obter uma solução analítica para tais considerações, a escolha natural, segundo Chau, é que se elabore modelos de simulação.

Este trabalho apresenta um modelo baseado no comportamento da taxa de falha e demais parâmetros de confiabilidade e uma interação, via períodos de manutenção, com um sistema que pretende analisar o comportamento de variáveis de custo. Aliado a este fato, associa-se um caráter mais realista no comportamento da taxa de falha em função da metodologia de manutenção escolhida.

A base de dados deve ser buscada na atividade diária no chão de fábrica. Este trabalho entende que o usuário dispõe de uma série de dados para a adequada consecução do modelo. A formação desta base de dados merecerá mais alguns comentários adiante.

No que se refere ao quadro de diálogos, entende-se que ele pode ser construído com uma interface gráfica do tipo Visual Basic ou Smalltalk-80 acessando a base de dados disponível, podendo agregar uma série de dados dentro da filosofia TPM (Manutenção Preventiva Total).

Uma série de exemplos de aplicação foram considerados e serão apresentados nos resultados deste trabalho. Neste contexto, dentro da filosofia de simulação apresentada por Chau, os gráficos foram gerados com os seguintes propósitos :

- comparar o efeito de mudanças de variáveis,
- predizer o comportamento do sistema em um horizonte de tempo,
- investigar o possível comportamento do sistema frente a diferentes estímulos normais ou anormais.

Através do módulo interativo o usuário pode mudar valores de alguma variável de decisão, atribuir pesos e examinar os efeitos de diferentes decisões na forma gráfica na tela do computador. O poder de um sistema como um

instrumento de decisão vem da confiança do modelo. Esta confiança cresce na medida em que o gerenciador vê como o modelo confirma o seu entendimento do sistema real como um todo.

Há algum tempo, modelos de visualização interativa (VIM) têm sido aplicados a problemas geo-referenciados e de caminho crítico que usualmente consistem de um mapa ou carta para o processo de resolução do problema. Mais tarde, estes modelos começaram a usar ícones para representar a dinâmica de operação estudada. Nesta linha, pode-se encontrar diversas referências no trabalho de Bell [8]. Com a ajuda de pacotes comerciais como GENETIK, IDRISI, REGIS, SIMFACTORY, o VIM tem expandido suas aplicações por áreas de planejamento financeiro, projeto de plantas industriais, etc.

Por outro lado, a aplicação de sistemas de suporte à decisão de grupo (GDSS) [59] tem sido utilizada em áreas como planejamento, alocação de recursos, análise de investimentos e transferência de tecnologia.

Esta metodologia pretende buscar na experiência de algumas pessoas os parâmetros para a decisão sobre processos como os citados acima. Segundo Madu [59], a qualidade das decisões obtidas na GDSS depende de quanto podemos explicitar e entender as divergências de opiniões entre os participantes de um grupo de decisão.

### Decisão baseada em orientação por objeto

Sage [85] apresenta em seu trabalho definições sobre a metodologia orientada ao objeto em tecnologias de decisão. Segundo o autor, objetos representam entidades do mundo real como máquinas, produtos, sinais, pessoas, coisas e lugares. Podem ser entidades físicas ou abstratas. Cada atributo pode ser dinamicamente associado a um valor numérico e a combinação destes valores em conjunto com a descrição do objeto no domínio do problema representa o estado do objeto [55].

Atributos podem incluir o nome do objeto, número de indentificação, enfim, dados que, no contexto deste trabalho, sejam adequados dentro da filosofia TPM.

As operações como, por exemplo, as missões de manutenção se constituem de processos e estruturas de dados que são aplicados ao objeto com os quais são relacionados. São geralmente entidades dinâmicas cujo valor pode mudar no tempo. Cada objeto, por sua vez, pode estar sujeito a um número de operações que proporcionam informações relativas ao controle e procedimentos aplicáveis ao objeto.

As abordagens atuais no gerenciamento de operações podem ser classificadas, segundo Lefrancois e Montreuil [55] em três classes principais:

- abordagens de otimização linear e não-linear e achando uma solução analítica e estática via programação dinâmica;
- abordagens heurísticas baseadas em modelos de simulação, e
- abordagens baseadas em sistemas especialistas que incorporam conhecimento prático e empírico.

Ainda segundo os autores, visto como uma técnica de otimização em um ambiente estático, a alocação de recursos requer unicamente o uso de conhecimento teórico para determinar uma alocação ótima ou factível. Entretanto, um ambiente dinâmico exige mais do que técnicas de otimização exatas, técnicas de estimação heurística ou estocástica. Tais ambientes necessitam incorporar flexibilidade para lidar com requerimentos e situações não esperadas. Ambos os conhecimentos derivados de simulação heurística (empírico) e os baseados na experiência prática sobre as variáveis tecnológicas são necessários.

Na conclusão de seu trabalho, os autores indicam que protótipos de sistemas que utilizam técnicas de programação orientada a objeto dentro desta abordagem estão em andamento, de modo a obter um refinamento da capacidade cognitiva do tomador de decisão.

Ainda sobre esta questão, o trabalho de Greenwood et alli. [34] coloca que a simulação não é uma técnica de otimização, isto é, não se pretende obter uma solução ótima para determinado problema. Devido a variedade de ambientes passíveis de simulação, a otimização envolve muitas técnicas e metodologias, assim como critérios e considerações heurísticas. Tem havido,

segundo os autores, um significativo esforço para desenvolver um otimizador automático para simulações computacionais. A maioria destes trabalhos tem utilizado abordagens de programação de computação convencional (linguagens de terceira geração).

Com o advento da tecnologia de inteligência artificial como, por exemplo, os KBS (Sistema de Base de Conhecimento), agora é possível melhorar consideravelmente o processo de simulação otimizada. O desenvolvimento de programas interativos dentro desta abordagem está, não obstante, em seus primeiros passos. Pode-se ter acesso a mais informações sobre este tema no trabalho de Lefrancois e Montreuil [55] onde são apresentados exemplos ilustrativos usando o ambiente Smalltalk-80 em estações de trabalho do tipo SUN. Outros artigos que retornam a este tema são os de Kamaruddin et alli. [50], Steven e Lai [91].

Por outro lado, a abordagem orientada a objeto que reúna o conhecimento do chão de fábrica e o teórico sobre o comportamento das variáveis tecnológicas deve ser, em nossa opinião, agregadas à análise econômica. Desta forma, a atualização e consistência do banco de dados que inclua tais variáveis e dimensões é uma questão importante a ser desenvolvida. O leitor poderá ter maiores detalhes sobre esta problemática no excelente trabalho de Nourani [70].

### 7.3.3 A questão da obsolescência

Desde o trabalho de Thompson [95] vários autores tentam aprimorar os seus modelos de reposição de ativos permanentes considerando a obsolescência dos mesmos.

Em seu trabalho, a variável de estado  $S$  (valor de revenda) da equação (7.26) trabalha com a uma função  $d(t)$  denominada função de obsolescência. Thompson não dá parâmetros para esta função, a não ser de que se trata de uma função contínua e não decrescente.

Segundo Hopp e Wu [40], são necessários modelos mais explícitos que auxiliem na decisão da manutenção e reposição de ativos em ambientes sujeitos

a desenvolvimento tecnológico. Ainda segundo os autores, até 1989, existiam muito poucos modelos analíticos para este tipo de decisão.

Uma outra abordagem é dada no trabalho de Kamaruddin et alli. [50]. Neste, é citado que a maioria das empresas se utiliza de justificativas econômicas como, por exemplo, o período de retorno ("pay-back") para a reposição de ativos. No entanto, os autores defendem que, no ambiente produtivo, a reposição de ativos, como, por exemplo, máquinas ferramentas, baseada unicamente em critérios econômicos é insuficiente para garantir que equipamentos adequados serão escolhidos para a reposição. Na opinião dos autores, a avaliação técnica é necessária para complementar a análise econômica.

Em um artigo mais recente, Bylka, Sethi e Sorger [19] apresentam o problema da reposição de ativos sob o ponto de vista da existência de novas tecnologias. Neste modelo, para que um determinado equipamento funcione, uma série de custos são relacionados: custo de mão de obra, eletricidade, manutenção, depreciação, etc. Normalmente, o desempenho dos equipamentos se deteriora, isto é, as despesas operacionais crescem com o tempo, de forma que o decisor poderá considerar a venda do ativo por seu valor de revenda e comprar uma nova unidade.

Segundo o modelo, o problema está em se achar os tempos ótimos destas reposições e as novas tecnologias selecionadas nestes momentos. Estas decisões se basearão sobre os custos citados além do custo de revenda do ativo e do custo da tecnologia a ser adquirida. Basicamente, os autores representam estas alternativas relacionando os custos operacionais e os custos de uma possível mudança tecnológica através da otimização da proposição

$$\sum_{i=1}^n [S_{t_i}(r_{i-1}, r_i) + O^{r_i}(t_i, t_{i+1} - 1)] + S_{T+1}(r_n, r), \quad (7.42)$$

onde  $O^r(t, k)$  é o custo operacional total para a máquina  $(r, t)$  (tecnologia  $r$ , período inicial  $t$ ), durante o intervalo  $(t, k)$ .

$S_t(r_1, r_2)$  é a função custo de troca que representa apenas os custos relacionados com a troca de tecnologias diferentes isto é,  $S_t(r, r) = 0$ .

Os autores consideram também que o custo operacional total no intervalo  $(t, k)$  é a soma dos custos operacionais nos  $n$  subintervalos de forma

que

$$O^r(t, k) = \sum_{n=t}^k O_{t,n}^r. \quad (7.43)$$

O custo operacional de uma máquina (r,t) no período  $k \geq t$  é dado por

$$O_{t,t}^r = \Pi_t^r - S_{t,t}^r + M_{t,t}^r \quad (7.44)$$

e

$$O_{t,k}^r = S_{t,k-1}^r - S_{t,k}^r + M_{t,k}^r \quad (7.45)$$

onde  $k \geq t + 1$ .

Nesta equação  $\Pi_t^r$  é o preço de compra e instalação da máquina (r,t),  $S_{t,k}^r$  é o valor de revenda da máquina (r,t) no fim do período  $k \geq t$  e  $M_{t,k}^r$  é o custo de manutenção para a máquina (r,t) no período  $k \geq t$ .

As restrições ao modelo estão no fato de não levar em conta o recondicionamento como uma alternativa tecnológica. Se assim a considerarmos, então esta alternativa pode ser analisada como se um novo equipamento (de diferente tecnologia) fosse adquirido ao custo do recondicionamento mais o valor de revenda deste.

Por outro lado, além do custo de aquisição de um novo equipamento deveria ser levada em conta o custo de treinamento, instalação, "set-up" e a aprendizagem necessária em termos da manutenção devido ao fato de que a maioria dos fornecedores não possuem informações confiabilísticas sobre os seus produtos.

Por fim a adoção da MPC faz com que a função custos operacionais não seja contínua e não seja sujeita a resolução proposta pelos autores.

A questão da obsolescência, portanto, está associada aos custos de operação, que por sua vez são uma função da metodologia de manutenção escolhida. Desta forma, a obsolescência é um critério a ser considerado na escolha de metodologias de manutenção, isto é, na medida em que em função da

obsolescência (instantânea ou como uma função no tempo) e os custos associados pode-se determinar as metodologias mais adequadas para a manutenção em um determinado equipamento. Demonstra-se, mais adiante, como a obsolescência influenciará, diretamente, a escolha de metodologias de manutenção.

O problema da não continuidade da função obsolescência deve ser solucionado pela visualização gráfica dos custos e da taxa de falha. O comportamento da obsolescência tem o mesmo padrão que estas funções. Um equipamento, por exemplo, que necessite missões de manutenção terá seus custos de peças sobressalentes cada vez mais ampliado no tempo, quer seja pelo custo do estoque ou pela dificuldade de se achar fornecedores. Entretanto, com o recondiçãoamento, na medida do possível, novas peças e sistemas serão adaptados e, com o aumento do conhecimento adquirido pelas missões de manutenção, novos problemas e soluções farão parte da esfera de decisão dentro de um horizonte especificado.

Novamente, a abordagem de multi critério como a apresentada por Madu [59] poderá fornecer intervalos de confiança para a determinação de índices quantitativos e qualitativos sobre a questão da obsolescência.

## 7.4 Comentários

Este capítulo pretendeu discutir de uma forma mais específica alguns conceitos e parâmetros que serão utilizados no capítulo seguinte. Para isso, foram apresentados os conceitos confiabilísticos e os da distribuição de Weibull que serão utilizados como exemplo neste trabalho.

A escolha pelos modelos de Thompson e de Kamien-Schwartz foi feita, entre tantos outros, porque introduzem os conceitos utilizados neste trabalho, embora tenham sido apresentadas restrições a um ou outro ponto os quais serão explorados no capítulo que se segue.

Da mesma forma, os outros modelos apresentados cobrem algumas lacunas e divergem em pontos de vista dos acima citados. Algumas destas particularidades serão utilizados neste trabalho.

Em seguida apresentou-se o problema da consideração do caráter não

linear do melhoramento propiciado pela MPC nos equipamentos durante sua vida útil. O problema é visto, também, sob o ponto de vista econômico e são apresentadas as abordagens numérica e gráfica para a sua solução.

Finalmente, a questão da obsolescência é abordada e pretendeu-se associá-la aos custos de operação e, desta forma, ao tipo de metodologia de manutenção empregada.

## Capítulo 8

# Manutenção baseada na confiabilidade

Entre as diferentes esferas de decisão apresentadas, quais sejam, o aspecto tecnológico, os custos associados, os recursos humanos envolvidos e a questão da segurança; a escolha de metodologias de manutenção tem como ponto em comum a confiabilidade. Confiabilidade aqui refere-se ao estudo do comportamento de falha dos equipamentos, não se pretende descartar ou ainda diminuir a importância do estudo da Disponibilidade e da Mantenabilidade em relação à atividade da manutenção. Ao se privilegiar o comportamento confiabilístico dos equipamentos de um sistema em uma determinada planta industrial, pretende-se focalizar este ponto em comum das esferas de decisão da manutenção e, assim o fazendo, analisar o efeito das diferentes metodologias em termos do comportamento da taxa de falha e suas condicionantes.

O estudo da Confiabilidade dos equipamentos para este fim pressupõe a existência de procedimentos normatizados de aquisição e arquivo de dados relacionados à atividade da manutenção.

Como já foi dito, o conhecimento adquirido no aprendizado pelo uso ("learning-by-using") dos equipamentos e sistemas e o advindo da prática diária da manutenção ("learning-by-doing") constituem a base de conhecimento para a obtenção de uma vantagem competitiva sustentável na atividade da manutenção.

Os dados assim obtidos são os gerados dos procedimentos da equipe de manutenção dos equipamentos.

Desta forma, pode-se determinar a confiabilidade dos diferentes equipamentos em um horizonte  $Z$  determinado, antecipar a realização de recondiçõamentos, a necessidade de peças sobressalentes, a oportunidade do descarte, a compra de novos ativos, etc.

## 8.1 Base de dados

Para o estudo que se propõe neste trabalho, o decisor deve ter em mãos os dados referentes

- às taxas de falha ( $\lambda(t)_i$ ), os parâmetros de escala ( $\alpha_i$ ), de forma ( $\beta_i$ ) e de manutenção ( $\mu_i$ )
- à idade cronológica de operação ( $t_i$ )
- ao melhoramento propiciado a cada MPV ( $B_i$ ) e MPC ( $D_i$ )
- ao comportamento destes melhoramentos no tempo

Como já foi citado, estes dados estarão disponíveis dentro de uma filosofia de TPM (Total Maintenance Program). O conjunto de dados da TPM abrange, entre outros aspectos [54]:

1. arquivos sobre o sistema, informações sobre os equipamentos,
2. sistema de processamento de ordens de serviço;
3. sistema de processamento de MPV;
4. arquivo do histórico de manutenção de cada ativo;
5. sistema de reportagem de tempo e custos de cada missão;
6. sistema de controle de inventário de peças de reposição;
7. programa de treinamento;

8. sistema de ferramentas de teste/diagnóstico;
9. sistema de calibração; e
10. programa de MPD.

Além disso, um sistema de manutenção como este necessita prover meios para o acúmulo de dados referentes ao histórico de suas atividades. Estas informações devem incluir os detalhes do desempenho do equipamento, código de falhas e descrições, códigos e descrições dos reparos efetuados, medidas de desempenho, testes, características de "set-up", tempos de reparo, custos envolvidos, etc. Este tipo de sistema pode ser implementado, como já citado, via um Sistema de Informações Gerenciais (SIG).

Em especial, a implementação de um programa de manutenção preditiva consiste, especialmente, dos seguintes passos [54]:

1. determinação de quais equipamentos serão monitorados em função de um critério específico;
2. determinação de qual técnica de MPD será utilizada;
3. montagem de um sistema que relacione materiais e mão de obra necessários para cada tarefa;
4. montagem de um sistema para acumular e analisar os resultados das atividades de MPD; e
5. desenvolvimento de instrumentos de medida da viabilidade do programa de MPD (capital investido por capital economizado, etc).

Uma tarefa de manutenção, dentro deste contexto, consiste geralmente dos itens apresentados na figura (8.1).

Por sua vez, o "objetivo" de uma tarefa de manutenção pode incluir os seguintes itens:

- número de identificação do equipamento;

## TAREFA DE MANUTENCAO

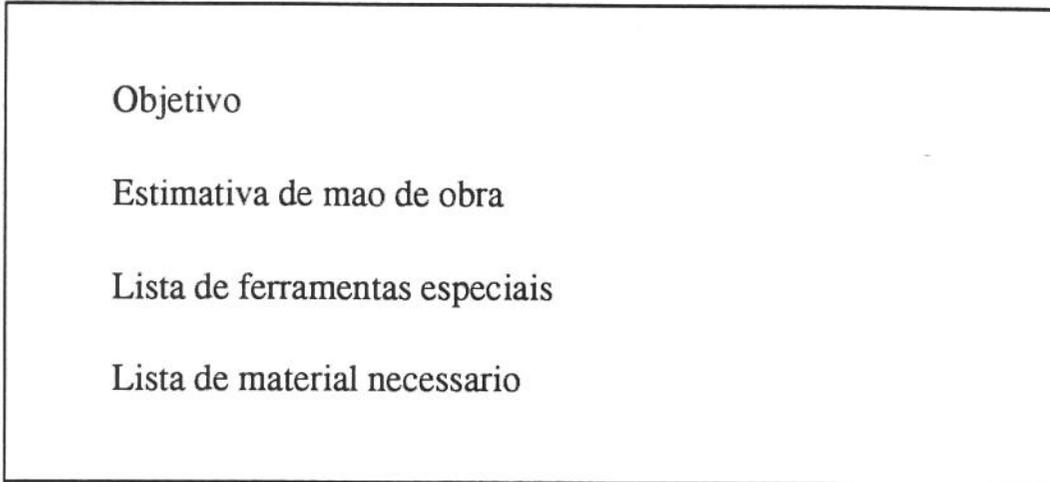


Figura 8.1: A tarefa de manutenção

- nome;
- critério de manutenção (frequência, condição, quantidade);
- detalhes de procedimento de testes, instruções; e
- tabelas de resultados dos testes.

A estimativa de mão de obra identifica os recursos necessários para realizar a tarefa. Esta é uma informação que permite determinar o número de homens/hora necessários, para dar suporte a atividade de manutenção.

É preciso, a partir deste ponto, determinar quais os equipamentos que deverão ser monitorados. O custo é o fator preponderante na determinação de qual equipamento será incluído em um programa de MPD. Entretanto, o custo pode não ser o único fator a ser considerado [54]. Passando-se, assim, a ser importante determinar a criticidade do equipamento no conjunto da planta. Isto é, o equipamento é considerado crítico quando, na sua falha, causa significativo impacto na produção e/ou segurança.

A maioria das empresas vê a criticidade de um equipamento como uma parte do impacto do custo associado a uma falha. Assim, o impacto do

custo devido a uma falha ou redução de desempenho pode ser representado por:

- custos de perda de produção;
- custo da mão de obra e materiais para o reparo; e
- custos de "start-up".

Desta forma, para se determinar qual equipamento é crítico, é preciso identificar cada item da planta que, em sua falha, determinará um impacto no custo. Depois, os vários mecanismos de falha para estes componentes, precisam ser determinados. Esta informação permitirá avaliar a relação custo/benefício do monitoramento do desempenho dos equipamentos como forma de prever a falha ou níveis inaceitáveis de desempenho.

Comparando-se o custo da falha com o custo de missão MPD em cada item, pode-se obter uma hierarquia dos equipamentos que deverão ser primordialmente colocados em um programa de MPD.

Um sistema de planilha eletrônica permite, via quadro de diálogos, alterações nos dados e o cálculo das saídas numéricas e gráficas do comportamento da confiabilidade, custos e da taxa de falha no tempo.

O decisor terá, então, a possibilidade de escolher entre as soluções econômicas e as de intervalo de manutenção (decrecente no tempo em função de uma taxa de falha máxima permitida).

Em muitos casos, é a atividade de MPD que identifica a necessidade de uma MPV, MPC ou descarte de um equipamento. Assim, o programa de MPD é uma parte integrante do programa de manutenção total. Estudos na área de Manutenção Centrada na Confiabilidade (RCM) indicam que o intervalo ótimo de atividade MPV devem ser baseadas mais no desempenho/condição do equipamento, do que no tempo de operação [54]. Portanto, as tarefas de MPD podem ser um meio de fornecer dados para iniciar atividades de MPV e MPC.

## 8.2 Critérios de confiabilidade

### 8.2.1 O comportamento da função $\lambda(t)$

#### Introdução

Nesta seção descreve-se o comportamento da função intensidade de falha de um equipamento sujeito a missões MPV e MPC. Pretende-se mostrar que os tempos entre inspeções e missões de manutenção consecutivos são decrescentes e quanto o melhoramento propiciado pelas MPV influi na função intensidade de falha.

#### O efeito da MPV

Como já citado, os trabalhos de Nakagawa [64] e Malik [60] introduziram o conceito de manutenção imperfeita onde o resultado das missões de manutenção é que o equipamento não retorna a uma condição de bom como novo ("same-as-new"). Cada missão de manutenção fará com que o equipamento atinja um determinado melhoramento de suas condições. Por sua vez, este melhoramento é função da quantidade e da qualidade dos recursos utilizados para a execução da atividade da manutenção [72].

#### Notação

- $\lambda(t)$  Função intensidade de falha. Modelada em nosso trabalho pela distribuição de Weibull,
- $t_i$  Tempo até a  $i^{\text{ez}}$  MPV,
- $n_j$  Número de intervalos entre MPV no  $j^{\text{ez}}$  ciclo de recondicionamento. Um ciclo de recondicionamento consiste de vários intervalos de MPV seguidos de uma MPC,
- B O fator de melhoramento devido à MPV,
- D O fator de melhoramento devido à MPC,

- $\delta$  A taxa de falha máxima permitida, isto é, ao atingir esta taxa de falha o equipamento deve sofrer MPV ou MPC,
- $t_{i,0}$  A idade virtual do equipamento antes da  $i^{ez}$  MPV,
- $t_{i,1}$  A idade virtual do equipamento depois da  $i^{ez}$  MPV.

### A idade virtual

Supondo que um equipamento atinja o limite máximo permitido para a sua taxa de falha, isto é,  $\lambda(t_1) = \delta$ , então uma MPV é realizada fazendo com que o equipamento retorne a uma situação melhor do que a anterior sem, contudo, atingir uma situação de novo. Este melhoramento pode ser explicado [72], usando o conceito de fatores de melhoramento. Através deste fator, um equipamento de idade cronológica  $t_1$  passa a ter uma idade  $\frac{t_1}{B}$  depois da missão manutenção. Embora a idade real do equipamento seja  $t_1$ , para efeito do cálculo de confiabilidade a sua idade passa a ser  $\frac{t_1}{B}$ . Esta idade,  $\frac{t_1}{B}$ , é denominada idade virtual do equipamento.

### O melhoramento proporcionado pelas MPV e MPC

Para se determinar o melhoramento proporcionado pelas MPV em um ciclo de recondicionamento, é necessário um certo nível de quantidade e qualidade de informações, oriundas das equipes de manutenção em sua atividade diária. Este melhoramento pode, também, ser obtido através de especialistas ou de informações provenientes do fabricante. Entretanto, cada empresa possui o seu arranjo de produção e o seu próprio ambiente operacional de forma que estas informações "externas" ao sistema podem servir, no máximo, como primeira aproximação do valor do melhoramento a ser determinado empiricamente.

Da mesma forma, e com mais variáveis "internas" a se considerar, o melhoramento proporcionado pela MPD deve ser obtido empiricamente dentro do contexto de cada empresa, isto é, dos recursos colocados à disposição da

atividade da manutenção e dos critérios determinados em função do interesse do decisor.

### A taxa de falha máxima permitida

A taxa de falha máxima permitida  $\delta$  é determinada através do estudo de equipamentos similares e determina o intervalo entre MPV. Isto é, quando a função intensidade de falha  $\lambda(t)$  chega ao valor  $\delta$ , é efetivada uma missão MPV ou MPC.

Novamente, a determinação do valor  $\delta$  que melhor se aplique a uma utilização otimizada, segundo algum critério, dos equipamentos de um sistema produtivo significa obter uma base que pode sustentar uma vantagem competitiva. Por outro lado, como  $\delta$  é função, também das práticas internas da manutenção, o seu valor é de difícil reprodução pelos concorrentes da empresa.

### A determinação dos intervalos MPV

Como foi apresentado, a função intensidade de falha  $\lambda(t)$  é dada por

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\alpha} \cdot \left(\frac{t_1 - t_0}{\alpha}\right)^{\beta-1}. \quad (8.1)$$

Considerando que as idades virtuais antes e depois das  $i$ -ésimas missões sejam  $t_{i,0}$  e  $t_{i,1}$  respectivamente, e, como Lie e Chun [57], Olorunniwo [72], [73] e Jayabalan [43], [44], que a função intensidade de falha assume um valor máximo admitido no ponto (a) na figura (8.2) como sendo

$$\lambda(t_1) = \delta = \lambda(t_{1,0}), \quad (8.2)$$

pode-se encontrar que

$$t_1 = \alpha \cdot \left(\frac{\delta \cdot \alpha}{\beta}\right)^{\frac{1}{\beta-1}}. \quad (8.3)$$

A equação (8.3) mostra que  $t_1$  é determinado unicamente por  $\delta$  e vice-versa. Assim podemos especificar o valor de  $\delta$  em vez de  $t_1$ .

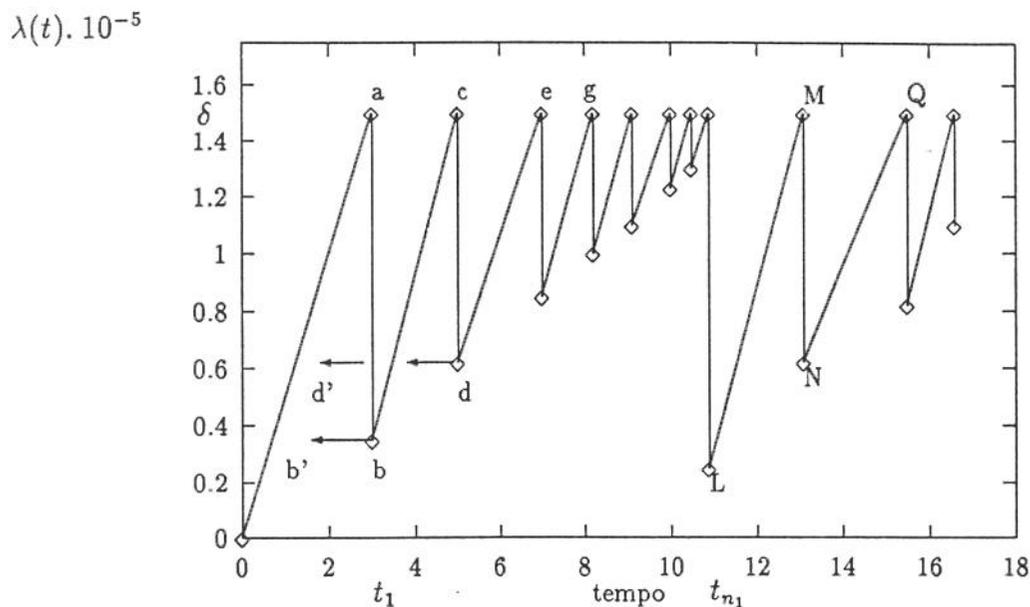


Figura 8.2: Comportamento da função intensidade de falha

No ponto (a) uma missão de manutenção preventiva é realizada fazendo com que a idade virtual seja diminuída para  $\frac{t_1}{B_1}$ . Portanto, tem-se agora que

$$\lambda(t_{1,1}) = \lambda\left(\frac{t_1}{B_1}\right) \tag{8.4}$$

e

$$\lambda(t_{1,1}) = \frac{\beta}{\alpha} \cdot \left(\frac{t_1}{B_1 \cdot \alpha}\right)^{\beta-1} \tag{8.5}$$

onde  $t_{1,1}$  é o ponto (b) na figura (8.2).

A taxa de falha no ponto (a) é agora reduzida para aquela do ponto (b') da curva. É como se trouxesse de volta a taxa de falha do ponto (a) até o ponto (b'), entretanto, a idade cronológica do equipamento é  $t_1$  no ponto (b).

O equipamento é, então, colocado novamente em funcionamento e a taxa de falha cresce até o valor máximo permitido ( $\delta$ ) no ponto (c) onde é efetuada uma outra missão MPV.

Tem-se então no ponto (c) que a idade virtual do equipamento antes da segunda MPV é dada por

$$t_{2,0} = \frac{t_1}{B} + t_2 - t_1 \quad (8.6)$$

e a taxa de falha no ponto (c) dada por

$$\lambda(t_{2,0}) = \lambda\left(\frac{t_1}{B} + t_2 - t_1\right) = \delta = \lambda(t_1). \quad (8.7)$$

E esta equação (8.7) leva a

$$t_1 = \frac{t_1}{B_1} + t_2 - t_1 \quad (8.8)$$

que pode ser colocado na forma

$$t_2 = t_1 + t_1\left(1 - \frac{1}{B_1}\right). \quad (8.9)$$

Após a segunda missão manutenção o período  $t_2 - t_1$  é reduzido para  $\frac{(t_2 - t_1)}{B_2}$ . E, desta forma, a segunda taxa de falha após a segunda MPV no ponto (d) é dada por

$$\lambda(t_{2,01}) = \delta = \left(\frac{t_1}{B_1} + \frac{t_2 - t_1}{B_2}\right) \quad (8.10)$$

e assim, da mesma forma, no ponto (e) tem-se

$$\lambda(t_{3,0}) = \lambda\left(\frac{t_1}{B_1} + \frac{t_2 - t_1}{B_2} + t_3 - t_2\right) = \delta = \lambda(t_1) \quad (8.11)$$

e

$$t_1 = \frac{t_1}{B_1} + \frac{t_2 - t_1}{B_2} + t_3 - t_2 \quad (8.12)$$

que pode ser colocado na forma

$$t_3 = t_2 + t_1\left(1 - \frac{1}{B_1}\right)\left(1 - \frac{1}{B_2}\right). \quad (8.13)$$

Generalizando para o primeiro ciclo antes da MPC obtem-se:

$$t_i = \begin{cases} t_1 & \text{para } i = 1 \\ t_{i-1} + t_1 \prod_{k=1}^{i-1} \left(1 - \frac{1}{B_k}\right) & \text{para } i > 1 \end{cases} \quad (8.14)$$

e as idades virtuais:

$$t_{i,0} = \sum_{k=0}^{i-1} \frac{t_k - t_{k-1}}{B_k} \quad (8.15)$$

$$t_{i,1} = \sum_{k=0}^i \frac{t_k - t_{k-1}}{B_k} \quad (8.16)$$

Para o caso onde  $B_i = B$  para todo  $i$ , a equação (8.14) se reduz a:

$$t_i = t_1 B \left(1 - \left(1 - \frac{1}{B}\right)^i\right) \quad (8.17)$$

e a equação (8.15) se reduz, usando a equação (8.17) à

$$t_{i,0} = t_1. \quad (8.18)$$

### 8.2.2 O efeito da MPC

Supondo agora que algum critério tenha sido usado para se determinar uma Manutenção Planejada Corretiva (MPC) após as  $(n_1 - 1)$  MPV.

Como citado, a MPC recoloca o equipamento em uma condição intermediária entre as aceções "same-as-new" e "same-as-old".

Com o condicionamento, a idade virtual do equipamento é reduzida de  $t_1$  para  $\frac{t_1}{D_1}$ , onde  $D_1$  é o melhoramento propiciado pela primeira MPC.

Seguindo o mesmo raciocínio anterior obtem-se na figura (8.2):

No ponto L :

$$t_{n1,0} = \frac{t_1}{D_1} \quad (8.19)$$

No ponto M :

$$t_{(n1+1),0} = \frac{t_1}{D_1} + t_{n1+1} - t_{n1} \quad (8.20)$$

No ponto N :

$$t_{(n1+1),1} = \frac{t_1}{D_1} + \frac{t_{n1+1} - t_{n1}}{B_{n1+1}} \quad (8.21)$$

e

$$\lambda(t_{(n1+1),0}) = \lambda(t_1) = \delta \quad (8.22)$$

que leva a

$$\frac{t_1}{D_1} + t_{n1+1} - t_{n1} = t_1 \quad (8.23)$$

ou

$$t_{n1+1} = t_{n1} + t_1 \left(1 - \frac{1}{D_1}\right) \quad (8.24)$$

No ponto Q :

$$\lambda(t_{(n1+2),0}) = \lambda(t_1) = \delta \quad (8.25)$$

resultando na equação

$$\frac{t_1}{D_1} + \frac{t_{n1+1} - t_{n1}}{B_{n1+1}} + t_{n1+2} - t_{n1+1} = t_1 \quad (8.26)$$

ou

$$t_{n1+2} = t_{n1+1} + t_1 \left(1 - \frac{1}{D_1}\right) \left(1 - \frac{1}{B_{n1+1}}\right). \quad (8.27)$$

Generalizando para este segundo ciclo de MPV obtem-se:

$$t_{n1+i} = \begin{cases} t_{n1} + t_1 \left(1 - \frac{1}{D_1}\right) & \text{para } i = 1 \\ t_{n1+i-1} + t_1 \left(1 - \frac{1}{D_1}\right) \cdot \prod_{k=1}^{i-1} \left(1 - \frac{1}{B_{n1+k}}\right) & \text{para } i > 1 \end{cases} \quad (8.28)$$

Generalizando-se, ainda para o  $j^{\text{ez}}$  ciclo de MPC,  $j > 1$  pode-se obter:

$$t_{v_j+i} = \begin{cases} t_{v_j} + t_1 \left(1 - \frac{1}{D_j}\right) & \text{para } i = 1 \\ t_{v_j+i-1} + t_1 \left(1 - \frac{1}{D_j}\right) \cdot \prod_{k=1}^{i-1} \left(1 - \frac{1}{B_{v_j+k}}\right) & \text{para } i > 1 \end{cases} \quad (8.29)$$

onde,

$$v_j = \sum_{k=1}^{j-1} n_k \quad (8.30)$$

e a idade virtual do equipamento no  $i^{\text{ez}}$  intervalo do  $j^{\text{ez}}$  ciclo,  $j > 1$  pode ser obtida resultando:

$$t_{(v_j+1),01} = \frac{t_1}{D_j} + \sum_{k=1}^i \frac{(t_{v_j+k} - t_{v_j+k-1})}{B_{v_j+k}} \quad (8.31)$$

Para  $B_i = B$  para todos os valores de  $i$  no ciclo, a equação (8.31) pode ser reduzida a

$$t_{(v_j+1),01} = \frac{t_1}{D_j} + \frac{(t_{v_j+i} - t_{v_j})}{B}. \quad (8.32)$$

## 8.3 Aplicações

### 8.3.1 Valores de entrada

Através das equações anteriores e adotando os seguintes valores para efeito de cálculo

- $\alpha = 20000 \text{ h}$
- $\delta = 0.00005 \text{ falhas/hora}$
- $\beta = 2$
- $B = 4$

obtem-se:

$$t_1 = 20000 \left( \frac{0,00005 \cdot 20000}{2} \right) = 10000 \text{ h} . \quad (8.33)$$

Após a primeira missão de MPV há um melhoramento (B), considerando o valor adotado obtem-se em (8.5):

$$\lambda\left(\frac{t}{B}\right) = \frac{2}{20000} \cdot \left(\frac{10000}{4 \cdot 20000}\right)^{(2-1)} = 1,25 \cdot 10^{-5} \text{ falhas/hora} \quad (8.34)$$

#### A Redução do melhoramento no tempo

Como já citado, B deve ser obtido através da análise dos dados de falha e custos de manutenção. Além disso, normalmente, o valor de B é reduzido com o tempo por um valor que, nesta análise, será considerado constante e igual a f. Desta forma, o melhoramento proporcionado pela primeira MPC é  $B_1 = 4$ , enquanto os da segunda e terceira MPC são, respectivamente,  $B_2 = 4 \cdot f$  e  $B_3 = 4 \cdot f^2$ , , etc, para  $f < 1$ .

Da mesma forma, considera-se o melhoramento alcançado pela MPC como um valor a ser determinado empiricamente. Neste trabalho adota-se o valor  $D = 8$  entendendo que o melhoramento propiciado nas MPC subsequentes é também reduzido por um valor que, nesta análise, considera-se similar ao aplicado ao índice B.

A determinação dos intervalos de MPV

A idade virtual é calculada utilizando-se as equações (8.15) e (8.16), desta forma são obtidos:

$$t_{i,0} = \frac{10000 - 0}{4} = 2500 \text{ h} . \tag{8.35}$$

E o intervalo de manutenção passa a ser:

$$MI = 10000 - 2500 = 7500 \text{ h} . \tag{8.36}$$

E a idade cronológica através da equação (8.17) passa a ser:

$$t_2 = 10000 \cdot 4 \cdot (1 - (1 - \frac{1}{4})^2) = 17500 \text{ h} . \tag{8.37}$$

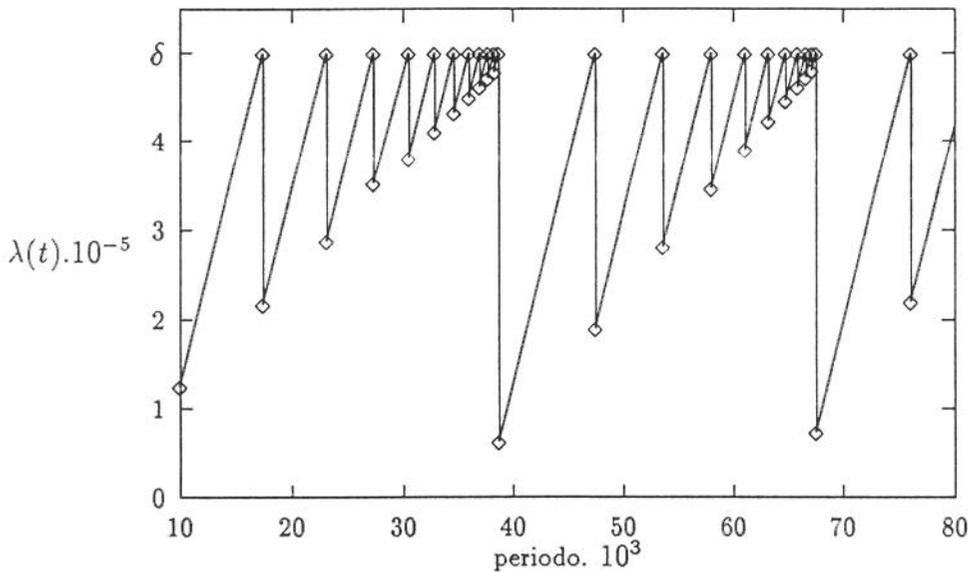


Figura 8.3: Evolução da taxa de falha ( $\delta = 5 \cdot 10^{-5}$ )

O critério de intervalo mínimo

Com o passar do tempo, o intervalo de manutenção tende para zero e atinge valores que, na prática, não são aceitáveis, de modo que é utilizado um

1	2	3	4	5	4
idade cronol.	intervalo MPV	idade virtual	taxa de falha $\lambda(t)$	período	
10000	10000	2500	$1,25 \cdot 10^{-5}$	0	
17500	7500	4375	$2,18 \cdot 10^{-5}$	1	
23125	5625	5781,2	$2,89 \cdot 10^{-5}$	2	
27343	4218	6835	$3,52 \cdot 10^{-5}$	2	
30507	3164	7626	$3,81 \cdot 10^{-5}$	3	
32881	2373	8220	$4,11 \cdot 10^{-5}$	3	
34660	1779	8665	$4,33 \cdot 10^{-5}$	3	
35995	1334	8998	$4,50 \cdot 10^{-5}$	3	
36996	1001	9249	$4,62 \cdot 10^{-5}$	3	
37747	750	9436	$4,72 \cdot 10^{-5}$	3	
38310	563	9577	$4,79 \cdot 10^{-5}$	3	MPC
38732	422	1250	$6,25 \cdot 10^{-6}$	3	
47482	8750	3823	$1,91 \cdot 10^{-5}$	4	
53659	6176	5640	$2,82 \cdot 10^{-5}$	5	
58019	4359	6922	$3,46 \cdot 10^{-5}$	5	
61096	3077	7827	$3,91 \cdot 10^{-5}$	6	
63269	2172	8466	$4,23 \cdot 10^{-5}$	6	
64802	1533	8917	$4,46 \cdot 10^{-5}$	6	
65885	1082	9235	$4,62 \cdot 10^{-5}$	6	
66649	764	9460	$4,73 \cdot 10^{-5}$	6	
67188	539	9619	$4,81 \cdot 10^{-5}$	6	MPC
67569	380	1470	$7,35 \cdot 10^{-6}$	6	
76098	8529	4422	$2,21 \cdot 10^{-5}$	7	
81676	5578	6352	$3,18 \cdot 10^{-5}$	8	
85324	3648	7614	$3,81 \cdot 10^{-5}$	8	
87710	2385	8439	$4,22 \cdot 10^{-5}$	8	
89270	1560	8979	$4,49 \cdot 10^{-5}$	8	
90291	1020	9332	$4,67 \cdot 10^{-5}$	9	

Tabela 8.1: Evolução da função intensidade de falha

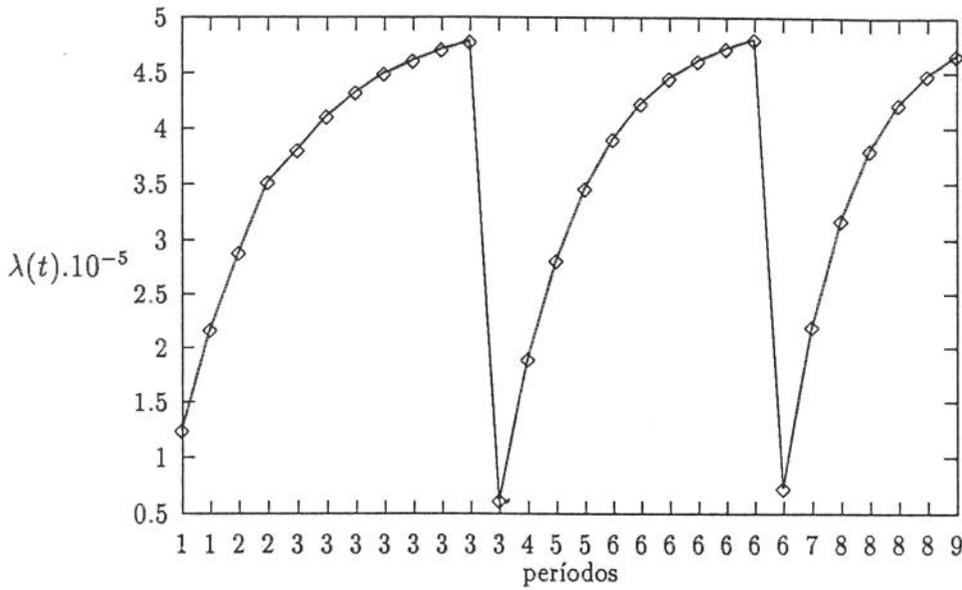


Figura 8.4: Evolução da taxa de falha nos períodos

valor mínimo como critério de MPC. Isto é, adota-se um horizonte de decisão  $Z$  tendo como base a diminuição do intervalo de manutenção. Este valor foi considerado como sendo de 480 horas ( 4 semanas de 6 dias de 20 horas de trabalho ). Assim, quando o intervalo entre MPV atinge um valor menor que 480 horas, é efetuada uma MPC, retornando o equipamento a uma condição melhor que a anterior.

A figura (8.3) mostra a evolução da intensidade de falha em função da idade cronológica do equipamento, e a figura (8.4) mostra a evolução da taxa de falha nos períodos considerados. Por sua vez, a diminuição gradativa dos intervalos entre MPV pode ser vista na figura (8.5).

**O comportamento de  $\lambda(t)$  após a MPC**

Após a primeira MPC, a idade virtual passa a ser, segundo a equação (8.19):

$$v = \frac{10000}{8} = 1250 \text{ h} . \tag{8.38}$$

E a taxa de falha que tem um melhoramento proporcionado pela MPC é agora dada por

$$\lambda = \frac{2}{20000} \left( \frac{1250}{20000} \right)^{(2-1)} = 6,25 \cdot 10^{-6} \text{ falhas/hora} \quad (8.39)$$

iniciando-se um novo ciclo.

Na tabela (8.1) pode-se observar o efeito das MPV e MPC no intervalo entre missões, na idade virtual e no comportamento da taxa de falha. Além disso, na mesma tabela, observa-se no final do terceiro período de 10000 horas uma MPC.

A idade cronológica do período subsequente, alterada pela hipótese intermediária entre "same-as-new" e "same-as-old", é obtida utilizando a equação (8.24):

$$t_{n1+1} = 38732 + 10000 \left( 1 - \frac{1}{8} \right) = 47482 \text{ h} . \quad (8.40)$$

O próximo valor da idade cronológica é obtido pela equação (8.28):

$$t_{n1+2} = 47482 + 10000 \left( 1 - \frac{1}{8} \right) \cdot \left( 1 - \frac{1}{4 \cdot 0,85} \right) = 53659 \text{ h} . \quad (8.41)$$

A idade virtual no período subsequente à primeira MPC é obtida pela equação (8.32):

$$\frac{10000}{8} + \frac{47482 - 38732}{4 \cdot 0,85} = 3823 \text{ h} . \quad (8.42)$$

### 8.3.2 Análise de sensibilidade

A figura (8.6) mostra a análise de sensibilidade do modelo para variações de dez por cento nos valores dos coeficientes de melhoramento B e D. Pela figura pode-se observar que, com o passar do tempo, a adoção de coeficientes de melhoramento dentro da faixa de dez por cento leva a diferenças entre os momentos de MPC cada vez maiores. Este resultado enfatiza a necessidade de se aferir, o melhor possível, estes coeficientes.

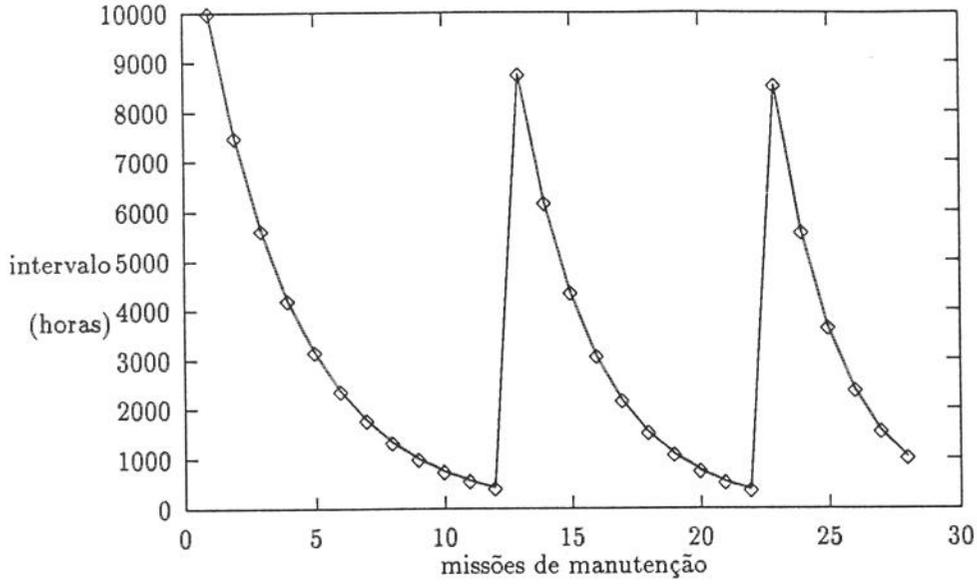


Figura 8.5: Diminuição do intervalo entre MPV

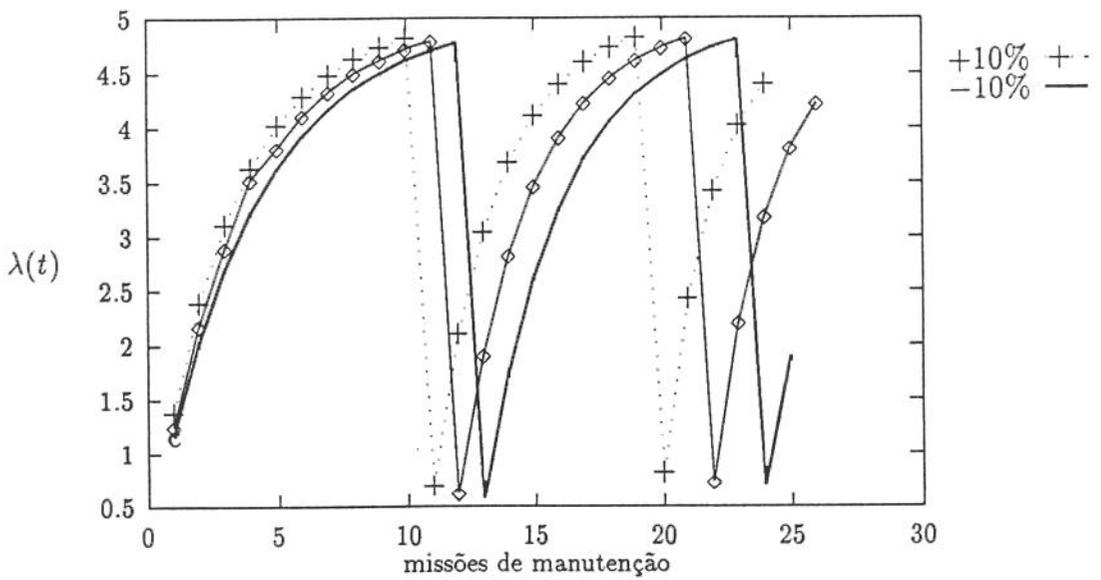


Figura 8.6: Análise de sensibilidade à B e D

## 8.4 Comentários

Este capítulo pretendeu apresentar a confiabilidade como a interface entre as diferentes esferas de decisão na determinação de critérios para a escolha de metodologias de manutenção. Para isso, estudou-se o comportamento da função intensidade de falha em relação às atividades de manutenção preventiva e de recondicionamento. O melhoramento parcial resultante destas intervenções resultou em um modelo de comportamento que pode ser visualizado graficamente e oferecer uma previsão do comportamento dos equipamentos e/ou sistemas em um horizonte definido. Assim, o decisor possui, agora, um instrumento para a decisão técnica sobre a alocação de recursos na manutenção e, por consequência, para a definição de critérios para a escolha de metodologias de manutenção mais adequadas ao seu ambiente. Falta ainda, entretanto, observar a decisão sob o ponto de vista de custos, de forma a permitir o desenvolvimento de competências econômicas para a alocação de recursos na atividade da manutenção. Estas são as considerações que serão vistas a seguir.

## Capítulo 9

### Critério de custos

No estudo de Engenharia Econômica depara-se com diferentes alternativas frente a uma proposta de investimento em determinado ativo permanente. Desta forma, uma decisão consciente deve levar em conta todas estas possíveis alternativas. O valor do dinheiro no tempo deve ser sempre levado em consideração, qualquer que seja a natureza do trabalho. Outra consideração importante é o custo de oportunidade, isto é, aplicar um capital em determinado ativo significa, em outras palavras, deixar de aplicá-lo em outros, talvez até mesmo mais importantes.

Como citado, vários autores ressaltaram a importância da análise econômica nos estudos de confiabilidade, entre eles Billinton [12], Lewis [56], Pallerosi [75]. As observações a seguir, fazem parte dos critérios econômicos a serem utilizados na escolha de uma metodologia de manutenção.

Neste contexto, a formulação da problemática da manutenção requer atentar, também, para outros aspectos da atividade econômica. O desenvolvimento tecnológico, por exemplo, apresenta novos processos e equipamentos que devem ser vistos como oportunidades de investimentos e de manter a empresa na dianteira da adoção de novas tecnologias. Embora esta adoção dependa, também, das políticas internas de investimento, estes fatores devem estar presentes na decisão do mantenedor.

Inicialmente são apresentados os custos na qualidade e as condicionantes de reposição de ativos e, a seguir, os conceitos utilizados na deter-

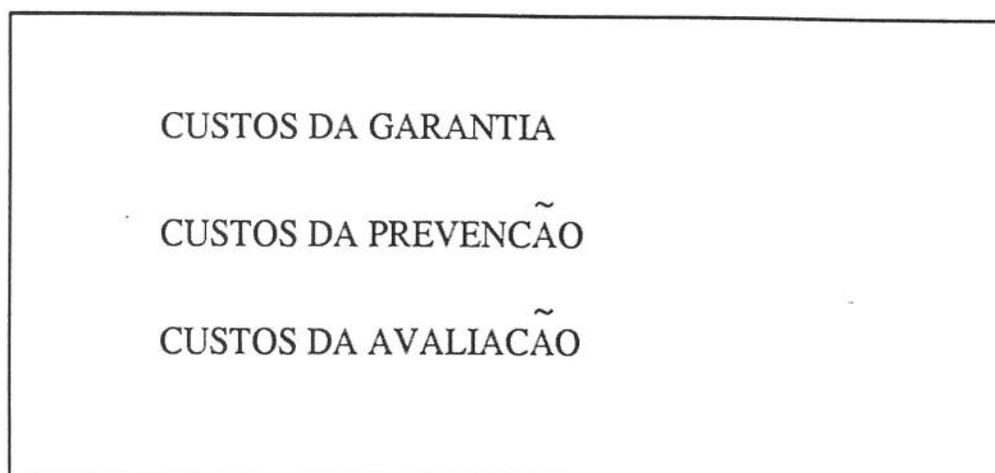


Figura 9.1: As categorias de custo

minação dos custos de capital e de operação que constituirão a base de um critério econômico.

## 9.1 Os custos na qualidade

Essencialmente, os modelos que pretendem medir e contabilizar o custo da qualidade dos produtos estão, ainda, muito voltados para os custos resultantes da falha dos itens produzidos. Estes custos são divididos nas três categorias principais [67] apresentadas na figura (9.1).

Os custos de garantia são os relacionados com a reposição de componentes comprados pelos clientes, o transporte do novo material, etc.

Por sua vez, os custos de prevenção são os relacionados com o projeto e funcionamento de um sistema de qualidade assegurada e os custos resultantes de alterações no projeto e/ou fabricação de componentes em função de falhas detectadas.

Finalmente, os custos de avaliação são os associados à inspeção de materiais e peças compradas e, também, dos testes com os produtos acabados.

Por outro lado, os custos resultantes da interrupção da produção devido ao planejamento incorreto da atividade da manutenção ou, ainda, da não otimização na escolha de metodologias de manutenção entre os diferen-

tes equipamentos ainda não foram incorporados à contabilidade de custos da qualidade.

Segundo Nandakumar [67], ignorar estes custos de interrupção significa subestimar e distorcer os custos de qualidade, de tal forma que não se pode mais identificar quais os produtos que proporcionariam um máximo benefício líquido (Maximum Net Benefit), resultante do melhoramento da qualidade.

## 9.2 As condicionantes da reposição de ativos

A maioria dos estudos encontrados na literatura e citados em Valdez-Flores [98] e Karabakal [49] estudam a reposição de ativos segundo as condicionantes de reposição serial.

No problema da reposição serial assume-se que não há interdependência econômica entre os equipamentos de um sistema de forma que as decisões sobre a substituição destes equipamentos e, ainda, sobre metodologias de manutenção a ser empregadas, podem ser feitas separadamente.

Por outro lado, como já citado, estes modelos consideram que a reposição é feita em um horizonte de tempo infinito e, além disso, dentro de um ambiente que possua um fluxo de caixa (entrada e saída de capitais) determinístico em que não haja competição por recursos entre os departamentos de uma empresa.

Finalmente, estes modelos consideram que a reposição de ativos pode se dar infinitamente por outro similar e de mesmo nível tecnológico. Isto é, não consideram, portanto, em um horizonte infinito, o desenvolvimento de novos produtos e/ou processos.

Segundo Karabakal [49], um modelo que rejeita estas condicionantes é o denominado de reposição paralela. Este modelo de reposição paralela requer que o tomador de decisão avalie um leque de possíveis ações de reposição em cada período de tempo levando em conta as diferentes esferas da decisão deste processo.

Da mesma forma, a avaliação sobre o comportamento dos equipamentos e sistemas pode também levar em conta as metodologias de manutenção já

empregadas ou a serem alocadas em cada equipamento.

Esta interdependência econômica pode ser causada pela restrição de capitais e a consequente competição por estes recursos entre os diferentes departamentos de uma empresa.

A resolução deste tipo de problema significa levar em consideração um grande número de possíveis ações de modo que, segundo Karabakal [49] a determinação da alocação ótima de recursos é bastante difícil mesmo para problemas razoavelmente pequenos. Novamente, deve-se citar o trabalho de Pelikan [79], em que o autor enfatiza a importância da competência econômica na alocação de recursos na atividade produtiva dando relevância à análise de custos como esfera de decisão da manutenção.

### 9.3 Simbologia utilizada

Na formulação dos custos da atividade mantenedora, devemos considerar diversos fatores, entre eles:

- $i$  - taxa de juros por período de capitalização;
- $n$  - número de períodos de capitalização;
- $P$  - capital no dia de hoje;
- $S$  - capital no fim de um determinado período;
- $R$  - série uniforme de pagamentos ou anuidade, definida com a série de pagamentos iguais que ocorrem no fim dos períodos  $1, 2, 3, \dots, n$ ;
- $L$  - Depreciação;
- $frc$  - fator de recuperação de capital;
- $Rc$  - Custo do capital;
- $Ro$  - Custo operacional;

## 9.4 As variáveis componentes do custo

### Fator de valor atual

Como se pode determinar a quantia a ser obtida pela aplicação de um valor por  $n$  períodos através da relação

$$S = P \cdot (i + 1)^n \quad (9.1)$$

então pode-se determinar o valor a ser aplicado para obter um montante  $S$  através da relação

$$P = \frac{S}{(1 + i)^n} \quad (9.2)$$

### Fator de Valor Atual de uma série

Se a série é uniforme, o primeiro pagamento é

$$\frac{R}{1 + i}; \quad (9.3)$$

o segundo pagamento é

$$\frac{R}{(1 + i)^2} \quad (9.4)$$

e assim por diante até

$$\frac{R}{(1 + i)^n} \quad (9.5)$$

para o último. E assim temos:

$$P = R \cdot \left\{ \frac{1}{1 + i} + \frac{1}{(1 + i)^2} \dots + \frac{1}{(1 + i)^n} \right\} \quad (9.6)$$

O fator entre chaves é a soma dos  $n$  primeiros termos de uma progressão geométrica. Portanto pode-se escrever

$$P = R \cdot \left\{ \frac{(1 + i)^n - 1}{i \cdot (1 + i)^n} \right\} \quad (9.7)$$

E o fator entre chaves é denominado fator de valor atual. De modo que:

$$P = R \cdot fva(i, n) \quad (9.8)$$

### Fator de recuperação de Capital

O fator de recuperação de capital (*frc*) representa o problema inverso do fator de valor atual e, portanto, determina uma série uniforme *R* resultante da aplicação de um montante *P*. Isto é, a quantia a ser retirada em cada período para que se recupere o investimento inicial *P*.

Este fator é dado por [33]:

$$frc = \frac{i(i+1)^n}{(i+1)^n - 1} \quad (9.9)$$

De forma que :

$$R = P.(frc)(i, n) \quad (9.10)$$

### Depreciação

A depreciação representa o desgaste econômico dos recursos que foram aplicados no ativo imobilizado da empresa [33]. As taxas de depreciação foram estabelecidas pela jurisprudência brasileira e vêm sendo aceitas pelo fisco para determinação dessas despesas. Este foi o critério adotado neste trabalho.

A taxa de depreciação para máquinas e equipamentos é de 10%, a lei permite que se considere coeficientes de depreciação acelerados para equipamentos que trabalhem em mais de um turno de oito horas. Desta forma, será aplicado o coeficiente de depreciação acelerada como sendo 1,5 (correspondente a dois turnos de oito horas).

### Custo do Capital

O custo anual equivalente ou custo do Capital (*Rc*) é dado por [39] :

$$Rc = P . frc(i, n) - L . ffc(i, n) \quad (9.11)$$

A equação (9.11) pode ser modificada levando-se em conta que o termo *ffc* (fator de formação de capital) é dado por:

$$ffc = \frac{i}{(1+i)^n - 1}$$

resultando, para  $n = 0$ ,

$$frc(i, 0) = \frac{i \cdot (i + 1)^0}{(i + 1)^0 - 1} = -i$$

e

$$ffc(i, 0) = \frac{i}{(1 + i)^0 - 1} = -i$$

isto é,

$$frc(i, n) = ffc(i).$$

então, pode-se demonstrar que:

$$frc(i, n) - i = ffc(i, n)$$

e, desta forma, a equação (9.11) pode ser escrita como

$$Rc = P \cdot frc(i, n) - L \cdot [frc(i, n) - i],$$

resultando em:

$$Rc = (P - L) \cdot frc(i, n) + (L \cdot i) \quad (9.12)$$

Note-se que, com  $P$ ,  $L$  e  $i$  constantes o valor do custo anual equivalente decresce quando  $n$  aumenta.

### Custos de operação

As despesas de operação e manutenção tendem a crescer à medida em que são utilizados. O valor de  $Ro$  é encontrado por [39]:

$$Ro = [(vas) \cdot (frc)] + [CN \cdot CM \cdot (i + 1)^n] \quad (9.13)$$

onde:

- **vas** é o valor atual de uma série não necessariamente homogênea;
- **CN** é o custo do ativo novo;
- **CM** é a depreciação

### A descontinuidade da função de custos

Assim, o custo do equipamento para uma vida de  $n$  períodos é dado pela soma  $R_c + R_o$ , onde o custo do capital ( $R_c$ ) decresce com o tempo, enquanto o custo de operação/manutenção tende a crescer no mesmo intervalo de tempo. A vida econômica, portanto, corresponderia ao mínimo da função ( $R_c + R_o$ ). Entretanto, a adoção do melhoramento parcial provocado pela MPC faz com que a função não seja mais contínua em  $t$  e que possua "saltos" devido ao fato de que uma máquina recondicionada tem também seus parâmetros econômicos de certa forma melhorados no tempo.

#### 9.4.1 Aplicações

Considerando o valor do equipamento novo como sendo \$23000,00, a taxa de juros  $i = 10\%$  e a taxa de depreciação 0.15, obtem-se os seguintes resultados apresentados na tabela (9.1):

#### frc e o valor de revenda

O valor frc é obtido pela equação (9.9) de modo que

$$\frac{0.1 \cdot (0.1 + 1)^1}{((1 + 0.1)^1 - 1)} = 1.1 \quad (9.14)$$

e o valor de revenda ( $L$ ) é dado por

$$P - (P \cdot 0.15) = 23000 - (23000 \cdot 0.15) = 19550. \quad (9.15)$$

Este valor, então, é atualizado pelo fator de recuperação de capital de modo que:

$$19550 \cdot 1.1 = 21505 \quad (9.16)$$

#### O custo total

O custo do capital é dado pela equação (9.12) de modo que

$$(23000 - 18400) \cdot (1.1) + (18400 \cdot 0.1) = 6900. \quad (9.17)$$

A seguir, o fator de correção do valor atual é obtido pela equação

$$\frac{1}{((1 + 0.1)^1)} = 0.909090 . \quad (9.18)$$

O valor atual da série (vas) é obtido através do custo médio percentual de manutenção nos períodos. Nesta aplicação, o custo médio percentual de manutenção no primeiro período foi escolhido como sendo 4.4%. Assim, na equação que se segue o valor de vas é dado por

$$(((4.4) \cdot 100) \cdot fva) + vas_{i-1} = 400 . \quad (9.19)$$

Por sua vez, o custo operacional é dado pela equação (9.13) onde,

$$Ro = 400 \cdot (1.1) + (23000 \cdot 0.15 \cdot (1 + 0.1)^1) = 4235 . \quad (9.20)$$

Assim, o custo total é a soma dos custos de capital e operacional, resultando

$$Rt = 6900 + 4235 = 11135 . \quad (9.21)$$

Finalmente, na tabela (9.1), pode-se encontrar o valor do período relacionando com o valor da idade cronológica do equipamento encontrado na tabela (8.1). Desta forma faz-se com que o valor da idade cronológica seja considerado em intervalos de 6000 horas (correspondentes a um ano fiscal).

### O efeito MPC

No final do sexto e no início do décimo períodos são efetuadas missões MPC segundo critérios técnicos já apresentados no capítulo anterior. Neste primeiro caso, por exemplo, o valor de revenda do equipamento é elevado a uma condição intermediária entre bom como novo e tão ruim quanto a antiga ("same-as-new" e "same-as-old"). Este valor intermediário do equipamento reconicionado é especificado como sendo de 85% do valor original, evidentemente este valor foi considerado no tempo de forma que:

$$L = (23000 \cdot (1 + 0.1)^7) \cdot 0.85 = 38097.41 . \quad (9.22)$$

1	2	3	4	5	6	7	8	9
FRC	valor de revenda	custo do capital	fator corr. valor atual	vas	custo operac.	custo total	per	
1.1	21505	3795	0.909090	400	4235	8030	1	
0.576190	17204	5060	0.8264	800	4635.452	9695.45	2	
0.402114	13763	5090.58	0.751314	1240	5090.572	10181.15	3	
0.315470	11010.56	4883.37	0.683013	1680	5581.135	10464.51	4	
0.263797	8808.45	4624.54	0.620921	2186	6132.92	10757.46	5	
0.263797	8808.45	4624.54	0.620921	2186	6132.92	10757.46	5	
0.263797	8808.45	4624.54	0.620921	2186	6132.92	10757.46	5	
0.263797	8808.45	4624.54	0.620921	2186	6132.92	10757.46	5	
0.229607	7046.76	4367.65	0.564473	2692	6729.988	11097.65	6	
0.229607	7046.76	4367.65	0.564473	2692	6729.988	11097.65	6	
0.229607	7046.76	4367.65	0.564473	2692	6729.988	11097.65	6	
0.229607	7046.76	4367.65	0.564473	3628.1	6944.923	11312.58	6	MPC
0.205405	38097.41	6910.834	0.513158	4245.1	7595.040	14505.88	7	
0.187444	30477.93	4449.487	0.466507	5053.1	8342.554	12792.04	8	
0.173640	24382.34	2678.266	0.424097	5861.1	9152.664	11830.91	9	
0.162745	19505.87	2519.24	0.385543	7009.1	10089.11	12608.35	10	
0.162745	19505.87	2519.24	0.385543	7009.1	10089.11	12608.35	10	
0.162745	19505.87	2519.24	0.385543	7009.1	10089.11	12608.35	10	
0.162745	19505.87	2519.24	0.385543	7009.1	10089.11	12608.35	10	
0.162745	19505.87	2519.24	0.385543	7009.1	10089.11	12608.35	10	
0.162745	19505.87	2519.24	0.385543	9132.9	10434.74	12953.99	10	MPC
0.146763	61356.27	11764.92	0.318630	10911.9	12429.04	24193.97	12	
0.140778	49085.01	8580.71	0.289664	12690.9	13696.94	22277.65	13	
0.140778	49085.01	8580.71	0.289664	12690.9	13696.94	22277.65	13	
0.135746	39268.01	6135.12	0.263331	15715.9	15234.74	21369.87	14	
0.135746	39268.01	6135.12	0.263331	15715.9	15234.74	21369.87	14	
0.135746	39268.01	6135.12	0.263331	15715.9	15234.74	21369.87	14	
0.135746	39268.01	6135.12	0.263331	15715.9	15234.74	21369.87	14	

Tabela 9.1: Resultados obtidos

Da mesma forma altera-se o valor do custo do capital, de modo que:

$$Rc = (\text{abs}(23000 - 38097) \cdot 0.205405) + (38097 \cdot 0.1) = 6910.83 \cdot (9.23)$$

Os resultados obtidos por esta sequência de aplicação podem ser vistos na tabela (9.1). Estes valores de custos foram plotados na figura (9.2) onde pode-se observar a influência das missões MPC.

### As receitas operacionais

Diferentemente de Thompson [95], o ativo produz a uma taxa constante, isto é, não há uma diminuição nem aumento da produção no tempo dentro do horizonte finito de decisão  $Z$ . Por outro lado, um equipamento pode ser comparado com um mais moderno e eficiente (em termos de qualidade, energia, etc) em qualquer tempo dentro do horizonte de decisão.

O modelo já descrito de Kamien e Schwartz [48] também adota a hipótese de que  $R$  (produção) é constante. A abordagem adotada, no entanto, diferencia-se deste modelo porque não se considera o valor da produção do equipamento para a definição de uma metodologia ótima de manutenção.

Considerou-se que os custos operacionais e os de capital são os mais importantes na esfera de decisão sobre possíveis metodologias de manutenção já que, independentemente do valor de produção de cada equipamento, este deverá sofrer missões de manutenção de acordo com os critérios de confiabilidade, custo e segurança adotados pelo decisor e particularmente privilegiados no presente trabalho.

Por outro lado, diferentes valores de produção para um mesmo equipamento estão normalmente associados a novas tecnologias. O salto tecnológico que pode apresentar alguns equipamentos deve ser analisado como um fator a mais a ser considerado pelo decisor no descarte e substituição de ativos e, voltando-se à manutenção, determinar estudos de sensibilidade sobre capital e custos operacionais para definir otimização de metodologias e sobre a oportunidade do investimento a ser feito. Tais preocupações aparecem nos trabalhos de Hopp e Wu [40], Lefrancois e Montreuil [55], Brown [18], Agogino et alli. [3] e Greenwood et alli. [34].

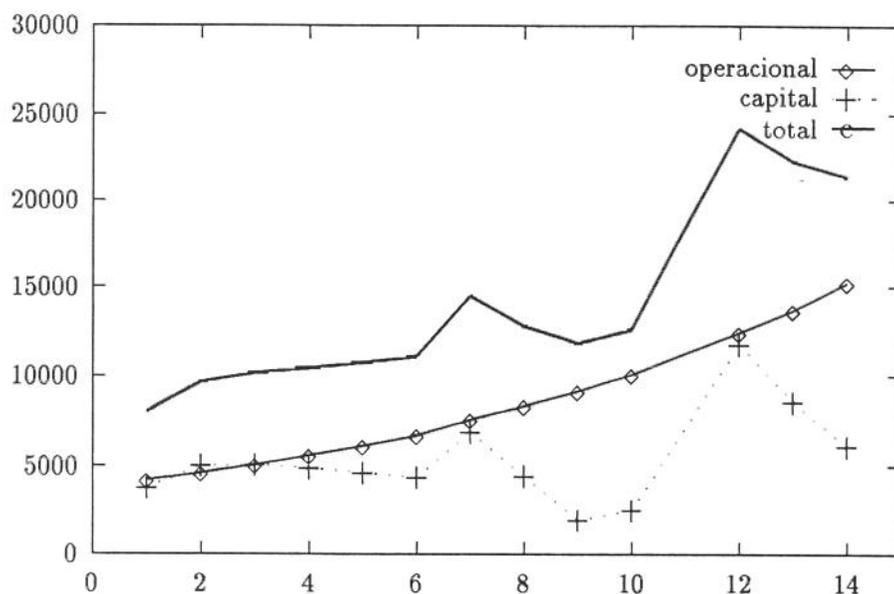


Figura 9.2: A descontinuidade da função de custos

## 9.5 Influência da taxa de juros

A análise de sensibilidade de custos em relação à variação da taxa de juros foi feita para valores variando entre 8 %, 10 % e 12 %. A figura (9.3) apresenta a sensibilidade do custo do capital à variação da taxa de juros enquanto que a figura (9.4) mostra a sensibilidade do custo total, também em relação à variação da taxa de juros.

Os resultados mostram que pequenas variações na taxa de juros podem significar perdas (ou ganhos) consideráveis em relação à determinação dos momentos em que as missões de manutenção são colocadas em prática.

Por outro lado, o decisor pode prever, com certa margem, os custos e o comportamento da taxa de juros, em um horizonte finito de tempo, e decidir sobre o destino do equipamento (recondicionamento, descarte, manter em funcionamento, etc) ou ainda estipular valores de redução de custos para as equipes de manutenção.

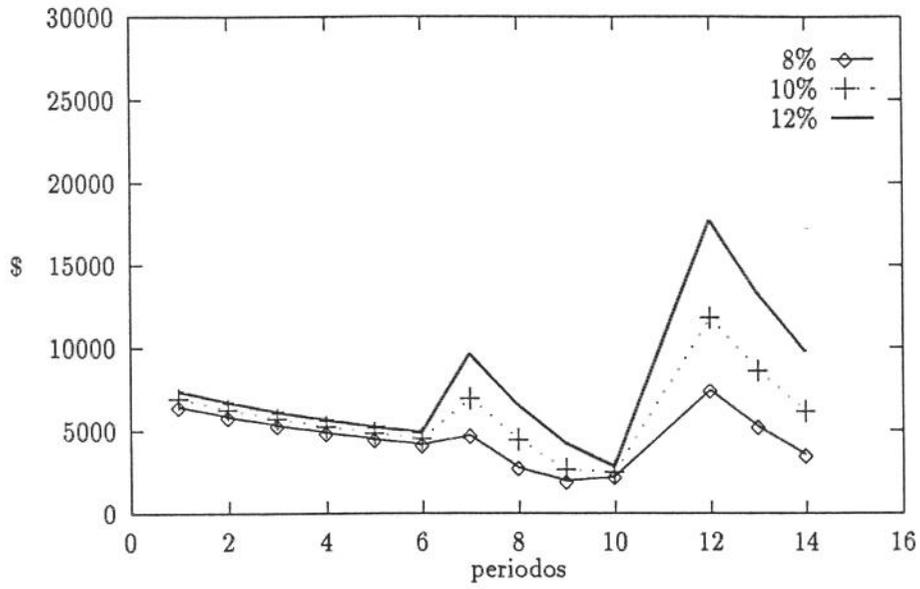


Figura 9.3: Sensibilidade do custo do capital à taxa de juros

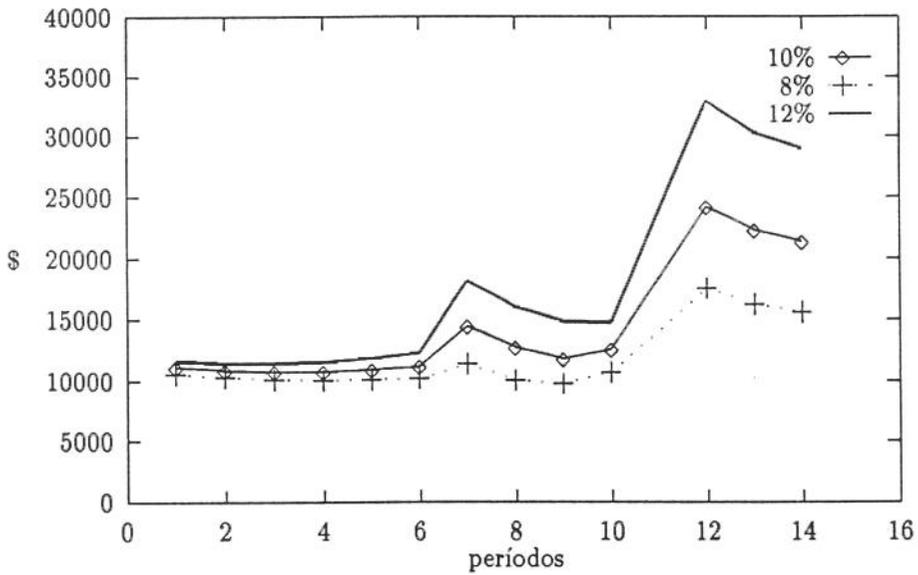


Figura 9.4: Sensibilidade do custo total à taxa de juros

## 9.6 Comentários

Neste capítulo pretendeu-se mostrar que a função de custos apresenta saltos devido à consideração do recondicionamento do equipamento. Com isso, o modelo econômico tradicional de somatório de custos operacionais continuamente crescentes e custo de capital decrescente não se aplica quando, através da atividade da manutenção, o valor do equipamento e o nível de reparos a serem efetivados no período seguinte são alterados.

O efetivo melhoramento propiciado pelas missões de manutenção, previstas ou não por uma metodologia preditiva confere ao sistema qualidades tais que necessitam ser melhor avaliadas para a sustentação dos sistemas de contabilidade e a correta alocação de recursos no ambiente interno da empresa.

A adoção destes melhoramentos e o crescente entendimento da função econômica no processo decisório da alocação de recursos na atividade da manutenção faz com que além de se aumentar as competências econômicas dos agentes, se permita o acúmulo de informações econômicas e o conseqüente refinamento da resposta ao problema da determinação de critérios para a escolha de metodologias de manutenção.

## Capítulo 10

# Conclusões e sugestões para próximos trabalhos

Na introdução deste trabalho foi dito que o problema da definição de critérios para a escolha de metodologias de manutenção é tratado, muitas vezes, como um exercício matemático com diversas restrições para a aplicação práticas destes modelos. Uma abordagem que é proposta, então, é a definição da atividade de manutenção como uma potencial determinante de uma vantagem competitiva sustentável. Ao fazer isso, coloca-se a necessidade de se entender as diversas esferas de decisão que permeiam a atividade da manutenção.

Desta forma, para se obter o domínio tecnológico da atividade da manutenção e colocá-la em um nível tal que permita sua condição de sustentação de uma vantagem competitiva, é preciso entender as esferas de decisão da manutenção e suas interfaces.

Por sua vez, as esferas de decisão da atividade da manutenção foram apresentadas ao longo deste trabalho.

Inicialmente, no entanto, foram apresentados os conceitos básicos envolvidos nos modelos de manutenção no que se refere às inspeções de sistemas reparáveis. A seguir, no capítulo 3, foi apresentada a evolução das metodologias de manutenção e ressaltou-se que a manutenção sistêmica deve englobar, em seu planejamento, todas as diferentes metodologias, embora em diferentes

níveis de utilização.

No capítulo 4 pretendeu-se mostrar que a atividade da manutenção deve se adequar ao nível de desenvolvimento do processo produtivo e suas condicionantes. Assim, por exemplo, uma empresa que esteja em um processo de formação de células de manufatura, através de Tecnologia de Grupo tem, normalmente, o cronograma de manutenção como parte de seu ciclo de produção e, além disso, a função manutenção é considerada no planejamento estratégico da empresa. Outras empresas, em diferentes estágios ou configurações estão, da mesma forma, em diferentes níveis na adoção de tecnologia para a manutenção devido a restrições ou condicionantes de seus respectivos estágios de desenvolvimento.

O capítulo 5 tentou demonstrar a importância do elemento humano nas considerações sobre a determinação de critérios para a escolha de metodologias de manutenção. Saindo da área da Sociologia, poucos trabalhos técnicos enfatizam apropriadamente a importância dos recursos humanos nas atividades produtivas. Na prática da manutenção, no entanto, concluí-se que sua importância é fundamental pois é a equipe de manutenção que, em última análise, levanta os dados de falha, de tempos dispendidos nas missões e os custos associados. Ainda neste capítulo, ficou clara a interdependência entre as competências técnicas e econômicas necessárias, ao tomador de decisão, no que se refere aos processos produtivos envolvendo alocação de recursos. Desta forma, enfatiza-se a necessidade de que o pessoal técnico da manutenção seja aprimorado no que se refere à administração de custos e estudos econômicos, para a melhoria contínua da prática da manutenção de uma dada metodologia escolhida.

A análise de segurança foi apresentada de uma forma bastante sucinta no capítulo 6, e, pode-se concluir, é na esfera de decisão da segurança que a interface da Confiabilidade se faz mais presente. Novamente esclareceu-se que não se pretende diminuir a importância do estudo da Disponibilidade e da Manutenibilidade dos equipamentos e sistemas, outrossim, são aspectos fundamentais do gerenciamento otimizado da produção mas, no que se refere à segurança, os estudos confiabilísticos tomam lugar especial nos critérios a

serem definidos, para a determinação de metodologias de manutenção. Como argüiu-se, o jogo entre custos e a necessidade de segurança, para determinadas empresas que têm aí o seu gargalo produtivo, é o fiel da balança que determinará as práticas de manutenção e os critérios para a escolha entre as suas diferentes metodologias.

O capítulo 7 apresentou os modelos de manutenção propostos por Kamien e Schwartz, Thompson, Lie e Chun e outros. Percorreu-se por estes modelos apresentando uma lógica que permite concluir que a abordagem gráfica feita com base de dados heurísticos levantados da prática diária é superior, no que se refere à qualidade da resposta gerencial, da velocidade e utilidade efetiva para o tomador de decisão, aos modelos restritos numéricos de resposta analítica e considerações de continuidade da função obsolescência e custos. Essa superioridade se apresenta notadamente nos aspectos que circunscrevem as práticas de manutenção enfatizadas neste trabalho.

O capítulo 8 privilegia a Confiabilidade como a interface das esferas de manutenção até então apresentadas. Além disso, defende-se que a adoção de missões de recondicionamento podem retornar a condição do equipamento a uma condição intermediária. Isto é, o equipamento é melhorado, porém, não se torna bom como novo. Esta suposição dificulta sobremaneira a análise numérica e, indicou-se que a abordagem gráfica se apresenta como uma solução viável e interativa. Concluiu-se que a adoção de diferentes metodologias em função de diferentes critérios selecionados pelo tomador de decisão podem ser visualizados no que se refere ao comportamento da taxa de falha e em função dos melhoramentos propiciados pelas próprias missões de manutenção. Cabe ao decisor, de posse destes dados e/ou suposições estudar os possíveis cenários tecnológicos, econômicos, humanos e mercadológicos para, desta forma, tomar a decisão sobre as atividades concernentes ao seu processo produtivo. No caso especial da manutenção, a que se propôs destacar, a evolução da taxa de falha deve ser observada ao lado do desenvolvimento de alternativas tecnológicas, da necessidade de níveis de segurança compatíveis com a atividade industrial relacionada, do potencial e das restrições oferecidas pelos recursos humanos que o decisor dispõe e, por fim, mas não menos importante, com a necessidade

da alocação consciente de recursos entre as diferentes e competitivas atividades internas de uma empresa.

O capítulo 9 refere-se, em um sentido mais amplo, ao estudo do desenvolvimento dos custos na atividade da manutenção. Mais especificamente, tomou-se do capítulo anterior a influência da missões de recondicionamento e das missões preventivas e concluiu-se que existe meios de se integrar os dados de custos da manutenção com os oriundos da atividade técnica. Desta forma, mostrou-se que a influência do recondicionamento eleva, efetivamente, o valor de revenda dos ativos. Este é um aspecto que ainda não é considerado pela prática da contabilidade nas plantas industriais em todo o mundo. Assim, a análise econômica deve ser feita conjuntamente com a análise técnica no que se refere ao comportamento da taxa de falha, na efetividade das missões de manutenção, no desempenho dos mantenedores, etc. É o conjunto destas duas análises, ou seja, a união das competências técnica e econômica centralizadas no tomador de decisão que irá determinar, dentro das especificidades de cada atividade industrial, os critérios para a escolha de metodologias de manutenção.

### **Pesquisas futuras**

Sugere-se para pesquisas futuras a utilização de módulos geo-referenciados como o IDRISI e o REGIS na delimitação dos equipamentos (objetos) e suas diversas características. O IDRISI, por exemplo, permite que se atribua valores para cada objeto. Assim, um equipamento pode ser caracterizado por sua confiabilidade, taxa de falha, custo operacional, índice de segurança, influência no processo e outras tantas variáveis desejadas. Segundo algum critério, o IDRISI pode somar, multiplicar, trabalhar com valores lógicos e hierarquizar os diferentes equipamentos de uma planta. O sistema é compatível com a linguagem PASCAL e possui um módulo gráfico de alta resolução e pode ser associado a bancos de dados do tipo DBASE.

Embora estas aplicações tenham resultados práticos reportados, construir modelos de VIM (Modelos de Visualização Interativa) não é uma tarefa

fácil. Estes modelos são feitos normalmente usando pacotes especiais para a simulação como os citados, na maioria das vezes orientados ao objeto, e um tempo bastante considerável é requerido para se desenvolver um programa como este. Além disso, a interface com o usuário final é bastante complicada e necessita de estudos mais profundos.

Por outro lado, a abordagem orientada a objeto que reúna o conhecimento do chão de fábrica e o teórico sobre o comportamento das variáveis tecnológicas deve ser, em nossa opinião, agregadas à análise econômica. Desta forma, a atualização e consistência do banco de dados que inclua tais variáveis e dimensões é uma questão importante a ser desenvolvida.

Finalmente, a simulação do comportamento dos equipamentos frente a diferentes metodologias de manutenção deve ser otimizada. Entretanto, programas interativos como os orientados a objeto que se norteiam no processo de simulação otimizada estão em seus primeiros passos no campo da ciência da decisão [34]. Assim, espera-se que este trabalho possa contribuir de alguma forma neste sentido.

# Bibliografia

- [1] AAKER, D. A. -*Developing Business Strategies*. New York: John Wiley, 1992, 328p.
- [2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro. NBR-5462, Confiabilidade - Terminologia, Rio de Janeiro,1981.
- [3] AGOGINO, A. M.; NOUR-OMID, O.; IMAINO W. ; WANG,S. S. - Decision-Analytic Methodology for Cost-Benefit Evaluation of Diagnostic Testers.*IIE Transactions*, vol. 24, n.1, p.39-54 , 1992.
- [4] ANTUNES, C. H. ; CLIMACO, J. - Decision aid for discrete alternative multiple criteria problems: A visual interactive approach. *Information and decision technologies*, North-Holland, vol. 19, n.3 ,1993.
- [5] ASCHER, H. - Discussion of Statistical Methods in Reliability. *Technometrics*, vol.25, n.4, p.320-326, 1983.
- [6] BACHSCHIMD, N - Rotordynamics and Diagnostics of Rotating Machinery. In: SHORT COURSE ON ROTORDYNAMICS AND DIAGNOSTICS, 1994, *proceedings*, Unicamp, 1994.
- [7] BATTACHARYYA, G. K. ; JOHNSON, R. A. -*Statistical Concepts and Methods*. New York: John Wiley, 1977, 730p.
- [8] BELL, P. C. - Visual Interactive Modelling in 86. - *Recent Developments in OR*, Pergamon Press, Oxford, 1986.
- [9] BERGMAN, B. ; KLEFSJÖ, B. - TTT Transforms and Age Replacements with Discounted Costs. *Naval Res. Log.*, vol. 30, p. 631-639 ,1983.

- [10] BERGMAN, B. ; KLEFSJÖ, B. - A Graphical Method Applicable to Age Replacement Problems. *IEEE Trans. Reliability*, vol. 31, p.478-481, 1992.
- [11] BERLINER, C.; BRIMSOM, J. A. - *Gerenciamento de Custos em Industrias Avançadas*. São Paulo: T.A. Queiroz ed., 1992, 265p.
- [12] BILLINTON R.; ALLAN , R. N. - *Reliability Evaluation of Engineering Systems: concepts and techniques*. New York: Plenum Press, 1983, 349p.
- [13] BLOCK, H. W. ; BORGES, W. S.; SAVITS, T. H. - Age Dependent Minimal Repair. *Journal of Applied Probability*, 22, p.370-385, 1985.
- [14] BLUMENTHAL, S.; GREENWOOD, J. A. ; HERBACH, L. H. - A Comparison of the Bad-as-Old and Superimposed Renewal Models. *Management Science*, 23, p. 280-285, 1976.
- [15] BORGES, R. F. - *Transferência tecnológica e processo de trabalho na siderurgia mineira: um estudo de caso*. Mimeo. Belo Horizonte, UFMG, 1983.
- [16] BRAWLEY, G. H. - Diagnostic Health Condition Performance Monitoring (Does this make sense?). In: I International MACHINERY MONITORING AND DIAGNOSTICS CONFERENCE. *proceedings*. Union College, Las Vegas, 1989.
- [17] BROWN, M. ; PROSCHAN, F. - Imperfect Repair. *Journal of Applied Probability*, vol.20, p.851-859, 1983.
- [18] BROWN, E. W. - Probabilistic Optimization of Machinery Policies and Strategies. In: I International MACHINERY MONITORING AND DIAGNOSTICS CONFERENCE. *proceedings*. Union College, Las Vegas, 1989.
- [19] BYLKA, S. ; SETHI, S. ; SORGER, G. - Minimal Forecast Horizons in Equipment Replacement Models with Multiple Technologies and General Switching Costs. *Naval Res. Log.*, vol. 39, p. 487-507, 1992.

- [20] CAMPOS, V. F. - *Padronização de Empresas* Belo Horizonte: Fundação Christiano Ottoni, 1992, 122p.
- [21] CAMPOS, V. F. - *TQC Controle da Qualidade Total* Belo Horizonte: Fundação Christiano Ottoni, 1992, 220p.
- [22] CHARNET, E. M. R. - *Estatística Industrial. notas de aula*, UNICAMP, IMECC, 1994.
- [23] CHAU, P. Y. K. - Decision support using traditional simulation and visual interactive simulation. *Information and decision technologies*, North-Holland, vol. 19, n.1, 1993.
- [24] CORIAT, B. - Transfert de técnicas, division du travail et politique de main-d'oeuvre: une étude de cas dans l'industrie brésilienne. *Critiques de L'Économie Politique*, n. 14, jan-mar 1981.
- [25] CORIAT, B. - *Automação, Competitividade e Trabalho: a Experiência Internacional*. São Paulo: - Hucitec, 1988, 284p. , Cap. 1: Automação Programável: Novas Formas e Conceitos de Organização da Produção, p. .
- [26] DAVIDOW, W. H. - *Marketing High Technology* New York: Free Press, 1986, 240p.
- [27] DERMAN, C. - Optimal Replacement and Maintenance under Markovian Deterioration with Probability Bounds on Failure. *Management Science*, vol. 9, p. 478-481, 1963.
- [28] DIANA G. et alli. - Diagnostic Techniques in Condition Monitoring. In: SHORT COURSE ON ROTORDYNAMICS AND DIAGNOSTICS, 1994, *proceedings*, Unicamp, 1994.
- [29] DOSI, G. ; ORSENIGO, L. - *Technical Change and Economic Theory*. London, Pinter Publ., 1988. Cap. 2: Coordination and Transformation: an overview of structures, behaviours and change in evolutionary environments, p. 13-37.

- [30] EDQUIST, C. - *Flexible Automation (The Global Diffusion of New Technology in Engineering Industry)*. Oxford: Basil Blackwell, 1988, 227p.
- [31] FRANKEL, E. G. - *Systems Reliability and Risk Analysis*. Dordrecht: Kluwer Ac. Publ., 2nd ed., 1988, 429p.
- [32] GAFFARD, J. - Marchés et organisation dans les stratégies technologiques des firmes industrielles. *Revue D'Économie Industrielle*, n 48, p. 35-51, 1989.
- [33] GITMAN, L.J. - *Princípios de Administração Financeira*. São Paulo: Harbra, 1987, 781p.
- [34] GREENWOOD, A. G.; REES, L. P.; CROUCH, I. W. M. - Separating the Art and Science of Simulation Optimization: A Knowledge-Based Architecture Providing for Machine Learning. *IEE Transactions* vol. 25, n.6, p.70-83, 1993.
- [35] GUPTA, A. D.; MAJUMDAR, P. K. - Overhaul and Replacement Decisions for Capital Equipment: A case. *IJQRM*, vol 6, n.4, p.8-18, 1992.
- [36] HALLINAN, A. J. - A Review of the Weibull Distribution. *Journal of Quality Technology*, vol.25, p.85-93, 1993.
- [37] HEINER, R. A. - *Technical Change and Economic Theory*. London: Pinter Publ., 1988. Cap. 7: Imperfect decisions and routinized production: implications for evolutionary modelling and inertial change. p.147-169.
- [38] HEINRICH, G. ; JENSEN, U. - Optimal Replacement Rules Based on Different Information Levels. *Naval Res. Log.*, vol.39, p.937-955, 1992.
- [39] HESS, G.; MARQUES, J. L.; PAES, L.C.R.; PUCCINI, A. *Engenharia Economica* Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1988, 268p.
- [40] HOPP, W. J.; WU, S. Machine Maintenance with Multiple Maintenance Actions. *IIE Transactions*, vol. 22, n.3 , p.226-232, 1990.

- [41] JARDINE, A. K. S. - *Maintenance, Replacement and Reliability* - London: Pitman Publications, 1973.
- [42] JARDINE, A. K. S.; BUZACOTT, J. A. - Equipment reliability and maintenance. *European Journal of Operational Research*, vol.19, p.285-296, 1985.
- [43] JAYABALAN, V. ; CHAUDHURI, D. - Optimal Maintenance and Replacement Policy for a Deteriorating System with Increased Mean Downtime. *Naval Res. Log.*, vol.39, p.67-78, 1992.
- [44] JAYABALAN, V.; CHAUDHURI, D.- Cost Optimization of Maintenance Scheduling for a System with Assured Reliability. *IEEE Trans. on Reliability*, april 1992.
- [45] JONES, P. C. ; ZYDIKAK, J. L. ; HOPP, W. J. - Parallel Machine Replacement. *Naval Res. Log.*, vol.38, p.351-365, 1991.
- [46] KADI, D. A. ; CLÉROUX, R. ; BEAUCAIRE, C. - A Periodic Maintenance Model with Used Equipment and Random Minimal Repair. *Naval Res. Log.*, vol.37, p.855-865 ,1990.
- [47] KAIINEMAN, D., LOVALLO, D. - Timid Choices and Bold Forecasts: A Cognitive Perspective on Risk Taking. *Management Science*, vol. 39, n.1, p. 17-31, 1993.
- [48] KAMIEN, M. I. ; SCHWARTZ, N. L. - Optimal Maintenance and Sale Age for a Machine Subject to Failure. *Management Science*, vol. 17, n.8, p. 495-504, 1971.
- [49] KARABAKAL, N., LOHMANN, J. R. , BEAN, J. C.- Parallel Replacement under Capital Rationing Constraints. *Management Science*, vol. 40, n.3, p. 305-319, 1994.
- [50] KARAMUDDIN, A. G. ; TAZA, Z. ; MAJID, M. A. - An Expert System on Machine Tools Replacement. In: I International MACHINERY MONI-

TORING AND DIAGNOSTICS CONFERENCE. *proceedings*. Union College, Las Vegas, 1989.

- [51] KELLE, P. ; SILVER, E. ; MURPHY, G. F. - Cost Analysis and Extension of a Simple Scheduling Heuristic. *Naval Res. Log.*, vol. 41, p.945-958, 1994.
- [52] KREYZIG, E. - *Advanced Engineering Mathematics*. New York: John Wiley , 1962, 857 p.
- [53] LABINI, P. S. - *Oligopólio e Progresso Técnico*. São Paulo: EDUSP, 1980, 306p.
- [54] LEAKE Jr., W. H. - Managing a Predictive Maintenance Program. In: I International MACHINERY MONITORING AND DIAGNOSTICS CONFERENCE. *proceedings*. Union College, Las Vegas, 1989.
- [55] LEFRANÇOIS P.; MONTREUIL, B. - An Object-Oriented Knowledge Representation for Intelligent Control of Manufacturing Workstations. *IIE Transactions*, vol.26, n.1, p. 11-26, 1994.
- [56] LEWIS, E. E. - *Introduction to Reliability Engineering*. New York: John Wiley, 1987, 400p.
- [57] LIE, C. H. ; CHUN, Y. H. - An Algorithm for Preventive Maintenance Policy. *IEEE Trans. Reliability* , vol R35 , n.1 , p. 71-75, april 1986.
- [58] LUSS, H. - Inspection Policies for a System which is Inoperative During Inspection Periods. *AIEE Transactions*, vol. 9, p.189-194, 1977.
- [59] MADU, C. N. - A Quality Confidence Procedure for GDSS Application in Multicriteria Decision Making. *IIE Transactions*, vol. 26, n.3, p. 31-39, 1994.
- [60] MALIK, M. A. - Reliable Preventive Maintenance Scheduling. *AIEE Transactions*. vol. 11 , sept. 1979.

- [61] MASSON, M.; MALAISE, N. ; HOUSIAUX, A. ; DE KEYSER, V. - Organizational change and human expertise in nuclear power plants: some implications for training and error prevention. *Nuclear Engineering and Design*, vol. 144, n.2, p. 361-373, 1993.
- [62] MILLER, J. G.; ROTH, A. V. - A Taxonomy of Manufacturing Strategies. *Management Science*, vol. 40, n.3, p. 285-304, 1994.
- [63] MUNFORD, A. G. - Comparision Among Certain Inspection Policies. *Management Science*, vol.27, p. 260-267, 1981.
- [64] NAKAGAWA, T. - Optimal Policies when Preventive Maintenance is Imperfect. *IEEE Transactions of Reliability*, vol R28, oct 1979.
- [65] NAKAGAWA, T. ; YASUI, K. - Approximate Calculation of Optimal Inspection Times. *Journal of Operational Research Society*, vol.31, p. 851-853, 1980.
- [66] NAKAGAWA, T.; KOWADA, M. - Analysis of a system with minimal repair and its application to replacement policy. *European Journal of Operational Research*, vol. 12, p. 176-182, 1983.
- [67] NANDAKUMAR, P.; DATAR, S. M.; AKELLA, R. - Models for Measuring and Accounting for Cost of Conformance Quality. *Management Science*, vol. 39, n.1, p. 1-31, 1993.
- [68] NELSON, W. - *Applied Life Data Analysis*. New York: John Wiley, 1982, 634p.
- [69] NICHOLAS Jr., J. R. - Successfull Predictive Maintenance Management. In: I International MACHINERY MONITORING AND DIAGNOSTICS CONFERENCE. *proceedings*. Union College, Las Vegas, 1989.
- [70] NOURANI, Farid - *Tratamento de Restrições de Consistência em Sistemas de Banco de Dados para Aplicações de Projeto*. Campinas: DCA, Faculdade de Engenharia Elétrica, UNICAMP, 1992, p. Dissertação (Mestrado).

- [71] NOVEMBER, A. - *Nouvelles technologies et mutations socio-économiques*. Genebra: Institut International d'Études Sociales, 1990, 209p.
- [72] OLORUNNIWO, F.O.; IZUCHUKWU, A. - Scheduling Imperfect Preventive and Overhaul Maintenance. *International Journal of Quality & Reliability Management*, vol. 8, n.4, p. 67-79, 1991.
- [73] OLORUNNIWO, F. O. - Life-cycle Cost Policy when Equipment Maintenance is Imperfect. *IJQRM*, vol. 9, n. 6 , p. 52-71, 1992.
- [74] OSTRENGA, M. R. et alli - *Guia Ernst & Young para a Gestão Total de Custos* São Paulo: John Wiley, 1992, p
- [75] PALLEROSI, C. A. - Confiabilidade, Manutenibilidade, Disponibilidade de Componentes e Sistemas. *Apostila do curso Confiabilidade de Sistemas Mecânicos*, Unicamp, 1993.
- [76] PASTRE, O. - *L'Informatisation et L'emploi*. Paris: La Découverte, 1983, 127p.
- [77] PATRICK, G. B. ; JONES, M. - Maintenance as a Profit Center. In: *International MACHINERY MONITORING AND DIAGNOSTICS CONFERENCE. proceedings*. Union College, Las Vegas, 1989.
- [78] PAU, L. F. - Survey of Expert Systems for Fault Detection, Test Generation and Maintenance . *Engineering Risk and Hazard Assessment*, vol. II, p. 117-134, 1988.
- [79] PELIKAN, P. - *Technical Change and Economic Theory*. London: Inter Publ., 1988. Cap. 18: Can the imperfect innovation systems of capitalism be outperformed? p. 370-398.
- [80] PIERSKALLA, W. P. ; VOELKER, J. A. - A Survey of Maintenance Models: The Control and Surveillance of Deteriorating Systems. *Naval Research Logistics Quarterly*, vol.23, p. 353-388, 1976.

- [81] POSSAS, M. L. - *Estruturas de Mercado em Oligopólio*. São Paulo: Hucitec, 1985, 202 p.
- [82] RAO, B. K. N. - Condition Monitoring & Diagnostic Engineering Management. In: I International MACHINERY MONITORING AND DIAGNOSTICS CONFERENCE. *proceedings*. Union College, Las Vegas, 1989.
- [83] RIGDON, S. E.; BASU, A. P. - The Power Law Process: A Model for the Reliability of Repairable Systems. *Journal of Quality Technology*, vol. 21, n. 4, p. 251-260, 1989.
- [84] ROMEI, S. F. et ali. - Exact determination and sensitivity analysis of a risk measure of extreme events. *Information and decision technologies*, vol. 18, n.4, 1992.
- [85] SAGE, A. P. - Object oriented methodologies in decision and information technology. *Information and decision technologies*, vol. 19, n.1, 1993.
- [86] SCHMITZ, H.(org) - *Automação, Competitividade e Trabalho: a Experiência Internacional*. São Paulo: Hucitec, 1988. Cap. 3: Automação microeletrônica e trabalho: a experiência internacional.
- [87] SENGUPTA, B. - Maintenance policies under imperfect information. *European Journal of Operational Research*, vol. 5, p. 198-204, 1980.
- [88] SHEU, S. ; GRIFFITH, W. S. - Multivariate Age-Dependent Imperfect Repair. *Naval Res. Log.*, vol. 38, p. 839-850, 1991.
- [89] MONTGOMERY, D. C. ; KEATS, J.B. ; RUNGER, G.C. ; MESSINA, W. - Integrating Statistical Process Control and Engineering Process Control. *Journal of Quality Technology*, vol.26, n.2, p. 79-87, abril 1994.
- [90] SERRIDGE, M. - Ten Crucial Concepts Behind Trustworthy Fault Detection in Machine Condition Monitoring. In: I International MACHINERY MONITORING AND DIAGNOSTICS CONFERENCE. *proceedings*. Union College, Las Vegas, 1989.

- [91] STEVEN, H. ; LAI, Y. - KBDEM, A Knowledge-Based Engine Diagnosis and Maintenance System. In: I International MACHINERY MONITORING AND DIAGNOSTICS CONFERENCE. *proceedings*. Union College, Las Vegas, 1989.
- [92] TAPIERO, C. S. - Continuous Quality Production and Machine Maintenance. *Nav. Res. Log. Quat.*, vol. 23, p. 489-499, 1986.
- [93] TAPIERO, C. S. - *Applied Stochastic Models and Control in Management*. Amsterdam: Elsevier, 1988, 326p.
- [94] TAVARES, M. C. - *Planejamento Estratégico: a opção entre sucesso e fracasso empresarial*. São Paulo, Harbra, 1991, 199p.
- [95] THOMPSON, G. L. - Optimal Maintenance Policy and Sale Date of a Machine. *Management Science*, vol. 14, n.9, p. 543-550, 1968.
- [96] TRANTER, J. - The Fundamentals of, and Application of Computers to, Condition Monitoring and Predictive Maintenance. In: I International MACHINERY MONITORING AND DIAGNOSTICS CONFERENCE. *proceedings*. Union College, Las Vegas, 1989.
- [97] USHER, J. S.; WHITFIELD, G. M. - Evaluation of Used-System Life Cycle Costs Using Fuzzy Set Theory. *IIE Transactions*, vol. 25, n.6, p. 84-88, 1993.
- [98] VALDEZ-FLORES, C. ; FELDMAN, R. M. - A Survey of Preventive Maintenance Models for Stochastically Deteriorating Single-Unit Systems. *Naval Res. Log.*, vol. 36, p. 419-446, 1989.
- [99] VALDEZ-FLORES, C. ; FELDMAN, R. M. - An Improved Policy Iteration Algorithm for Semi Markov Maintenance Problems. *IIE Transactions*, vol. 24, n.1, p. 55-63, 1992.
- [100] VANDERPLAATS, G. N. - *Numerical Optimization Techniques for Engineering Design*. New York: McGraw-Hill, 1984, 333p.

- [101] VESELEY, W. E. - Utilizing Probabilistic Risk Analysis (PRAS) in Decision Support Systems. *Eng. Risk and Haz. Ass.* , vol. II, p. 101-116, 1988.
- [102] WHITE, D. J. - A survey of applications of Markov decision processes. *Journal of the Operational Research Society*, vol. 44, n. 11, p. 1073-1096, 1993.
- [103] WHITTLE, P. - *Optimization Over Time Dynamic Programming and Stochastic Control*. Chichester: John Wiley, vol. 1, 1982, 317p.