Thiago Almeida Franco

Projeto para Mantenabilidade de Máquinas Automáticas

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

São Paulo
2007

Projeto para Mantenabilidade de Máquinas Automáticas

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração:
Engenharia Mecatrônica

Orientador:
Prof. Dr. Gilberto Francisco Martha de Souza

São Paulo
2007

Dedicatória

Dedico este trabalho à minha família, que são as pessoas com quem sempre posso contar, inclusive nos momentos mais difíceis.

Agradecimentos

Ao meu pai, que me ensinou que a honestidade neste país ainda é uma virtude.

À minha mãe, que nunca deixou que eu desistisse em nenhum momento na minha vida e me mostrou como lutar pelos meus ideais.

Aos meus avós, que são e foram pessoas muito importantes na minha vida.

Ao meu orientador e amigo Professor Dr. Gilberto Francisco Martha de Souza pela oportunidade, confiança e atenção ao longo deste trabalho.

A todos que ajudaram de maneira direta e indireta, a conclusão deste trabalho.

Sumário

LISTA DE FIGURAS 1

LISTA DE TABELAS 2

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS 3

LISTA DE SÍMBOLOS 4

RESUMO 7

ABSTRACT 8

1 INTRODUÇÃO 9

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS 9
1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO 11

2 MANUTENÇÃO 12

2.1 FALHAS DO SISTEMA: 12
2.1.1 Origem e classificação das falhas: *12*
2.1.2 Medição do Tempo para Ocorrência de Falhas: *14*
2.1.3 Prevenção e Recuperação de Falhas *20*
2.1.4 Método de Maxer: *21*
2.1.5 Análise de Modos e Efeitos das Falhas (FMEA, do inglês "failure modes and effects analysis"): 21
2.1.6 Melhorando a confiabilidade das máquinas *26*
2.2 MANUTENÇÃO 29
2.2.1 Três abordagens básicas para a manutenção *30*
2.2.2 Metodologias de organização da manutenção *35*
2.2.3 Definição dos tempos de manutenção *41*
2.2.4 Controle do estoque para a manutenção *43*
2.2.5 Métodos para análise da manutenção *44*
2.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS 47

3 PROJETO PARA MANTENABILIDADE 49

3.1 DEFINIÇÃO 49
3.2 PRIMEIROS PRINCÍPIOS DE MANTENABILIDADE 52
3.3 VANTAGENS DE UMA MANTENABILIDADE BEM PLANEJADA 53
3.4 APLICANDO O CONCEITO DE MANTENABILIDADE EM MÁQUINAS 54
3.4.1 Unitização, modularização e padronização *54*
3.4.2 Leiaute, montagem e configuração *56*
3.4.3 Acessibilidade *59*
3.4.4 Projeto de "rack" e gaveta *61*
3.4.5 Pontos de teste e serviço *63*
3.4.6 Projeto de equipamentos de teste *65*
3.5 ALOCAÇÃO DA MANTENABILIDADE 67
3.6 PREVISÃO DA MANTENABILIDADE 69
3.7 DEMONSTRAÇÃO DA MANTENABILIDADE 71

TEM UMA DISTRIBUIÇÃO-T COM N-1 GRAUS DE LIBERDADE. COMO A DISTRIBUIÇÃO-T É SIMÉTRICA EM RELAÇÃO AO ZERO, ... 72

3.8 CONSIDERAÇÕES FINAIS 73

4 METODOLOGIA PARA MODERNIZAÇÃO DAS MÁQUINAS AUTOMÁTICAS 75

4.1 INTRODUÇÃO 75
4.2 METODOLOGIA 76
4.2.1 Definir claramente os subsistemas *76*
4.2.2 Coletar dados *77*
4.2.3 Preparar a análise FMEA *78*
4.2.4 Aumentar a disponibilidade dos subsistemas *78*

4.2.5 Decidir entre aumentar o MTBF ou diminuir o MTTR *85*
4.2.6 Testar os resultados obtidos *88*
4.2.7 Resumo da metodologia *90*

5 CASO EXEMPLO: APLICAÇÃO DA METODOLOGIA EM UMA MÁQUINA DE ALUGAR DVDS **93**

5.1 INTRODUÇÃO 93
5.2 METODOLOGIA 96
5.2.1 Definir claramente os subsistemas *96*
5.2.2 Coletar dados *97*
5.2.3 Preparar a análise FMEA *100*
5.2.4 Aumentar a disponibilidade dos subsistemas *105*
5.2.5 Decidir entre aumentar o MTBF ou diminuir o MTTR *115*
5.2.6 Testar os resultados obtidos *125*
5.3 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS 127

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS **133**

6.1 CONCLUSÕES 133
6.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 136

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS **138**

Lista de Figuras

FIGURA 2-1 – CURVA DA TAXA DE FALHA 16
FIGURA 2-2- GRÁFICO DA CONFIABILIDADE 19
FIGURA 2-3 – AS TRÊS TAREFAS DE PREVENÇÃO E RECUPERAÇÃO DE FALHAS 20
FIGURA 2-4 – MODELO DE CUSTOS ASSOCIADO COM MANUTENÇÃO (SLACK; CHAMBERS; JOHNSTON, 2001). 32
FIGURA 2-5 - CURVAS DE FALHAS PARA DUAS MÁQUINAS, A E B. 33
FIGURA 2-6 – COMBINAÇÃO DE ABORDAGENS DE MANUTENÇÃO PARA UM AUTOMÓVEL (SLACK; CHAMBERS; JOHNSTON, 2001) 34
FIGURA 2-7 – TEMPOS DE MANUTENÇÃO 41
FIGURA 2-8 – ANÁLISE DE ÁRVORE DE FALHAS PARA REFEIÇÃO FRIA SERVIDA AOS CLIENTES (SLACK; CHAMBERS; JOHNSTON, 2001) 46
FIGURA 3-1 – GRÁFICO DOS MOTIVOS DAS POLÍTICAS DE MANUTENÇÃO, DHILLON E ALEEM (2000) 51
FIGURA 3-2 – INDEPENDÊNCIA FUNCIONAL DE UNIDADES EM UM EQUIPAMENTO, U.S. DEPARTMENT OF ENERGY (2001). 55
FIGURA 3-3 – EXEMPLO DE SUPERFÍCIE INCLINÁVEL (U.S DEPARTMENT OF ENERGY, 2001). 58
FIGURA 3-4 – DESIGN LIVRE DE ERROS (U.S DEPARTMENT OF ENERGY, 2001) 59
FIGURA 3-5 – POSIÇÕES DE TRABALHO DESCONFORTÁVEIS QUE DEVEM SER EVITADAS, ... 60
FIGURA 3-6 – EXEMPLOS DE PROJETOS DE "RACK" E GAVETAS (U.S DEPARTMENT OF ENERGY, 2001). 62
FIGURA 3-7 – AGRUPAMENTO DOS PONTOS DE TESTE, U.S DEPARTMENT OF ENERGY (2001) 64
FIGURA 3-8 - NÍVEIS DE MONTAGEM 67
FIGURA 3-9 - ALOCAÇÃO DA MANTENABILIDADE. 69
FIGURA 4-1 – SUBSISTEMAS EM UMA MÁQUINA DE REFRIGERANTE 77
FIGURA 4-2– RESUMO DA METODOLOGIA - CONTINUA 91
FIGURA 5-1-FLUXOGRAMA DO MODO DE FUNCIONAMENTO DA MÁQUINA ATUAL 95
FIGURA 5-2 – SUBSISTEMAS DA MÁQUINA DE DVDS 97
FIGURA 5-3 – ANÁLISE DE PARETO DAS FALHAS POR SUBSISTEMA 99
FIGURA 5-4 – ANÁLISE DE PARETO DO CUSTO MÉDIO POR SUBSISTEMA 100
FIGURA 5-5 – GRÁFICO DA DISPONIBILIDADE ORIGINAL DO SISTEMA E DOS SUBSISTEMAS 111
FIGURA 5-6 – GRÁFICO DO MTBF ORIGINAL DO SISTEMA E DOS SUBSISTEMAS 111
FIGURA 5-7 – GRÁFICO DO MTTR ORIGINAL DO SISTEMA E DOS SUBSISTEMAS 112
FIGURA 5-8 – GRÁFICO DA NOVA DISPONIBILIDADE DO SISTEMA E DOS SUBSISTEMAS 115
FIGURA 5-9 – FOTO DA MÁQUINA DE REVELAÇÃO DE FOTOGRAFIAS 119
FIGURA 5-10 – GRÁFICO DO NOVO MTBF DO SISTEMA E DOS SUBSISTEMAS 124
FIGURA 5-11 – GRÁFICO DO NOVO MTTR DO SISTEMA E DOS SUBSISTEMAS 125
FIGURA 5-12 – GRÁFICO DE COMPARAÇÃO DA DISPONIBILIDADE ANTES E DEPOIS DA APLICAÇÃO DA METODOLOGIA 128
FIGURA 5-13 – GRÁFICO DE COMPARAÇÃO DO MTBF ANTES E DEPOIS DA APLICAÇÃO DA METODOLOGIA.... 129
FIGURA 5-14 – GRÁFICO DE COMPARAÇÃO DO MTTR ANTES E DEPOIS DA APLICAÇÃO DA METODOLOGIA ... 130
FIGURA 5-15 – GRÁFICO DA MANTENABILIDADE DO PC MESTRE ANTES E DEPOIS DA APLICAÇÃO DA METODOLOGIA 131
FIGURA 5-16 – GRÁFICO DA MANTENABILIDADE DO GRUPO PINÇA ANTES E DEPOIS DA APLICAÇÃO DA METODOLOGIA 131
FIGURA 5-17 – GRÁFICO DA MANTENABILIDADE DO SISTEMA ANTES E DEPOIS DA APLICAÇÃO DA METODOLOGIA 132

Lista de Tabelas

TABELA 2-1 – FMEA COMPLETO (DEPARTMENT OF DEFENSE (1980)) 25
TABELA 2-2 –EXEMPLO DE FMEA SIMPLIFICADO , ADAPTADO DE SUNDARARAJAN (1991). 25
TABELA 3-1 – VANTAGENS E DESVANTAGENS DOS MÓDULOS DESCARTÁVEIS, U.S DEPARTMENT OF ENERGY (2001). 56
TABELA 3-2 - PREVISÃO DA MANTENABILIDADE, EBELING (1997). 71
TABELA 5-1 – RESUMO DOS RELATÓRIOS DE FALHAS DA MÁQUINA DE DVDS. 98
TABELA 5-2 – ESCALA DE SEVERIDADE PARA A ANÁLISE FMEA 101
TABELA 5-3 - FMEA PARA O PC MESTRE E O PC ESCRAVO. 102
TABELA 5-4 – MTTR, MTBF E D DO GRUPO PINÇA 105
TABELA 5-5 – MTTR, MTBF E D DO LEITOR DE CARTÕES 106
TABELA 5-6 – MTTR, MTBF E D DO LEITOR DE NOTAS 106
TABELA 5-7 – MTTR, MTBF E D DA PARTE ELÉTRICA 107
TABELA 5-8 – MTTR, MTBF E D DA PARTE MECÂNICA 107
TABELA 5-9 – MTTR, MTBF E D DO PC ADMINISTRADOR 108
TABELA 5-10 – MTTR, MTBF E D DO PC ESCRAVO 108
TABELA 5-11 – MTTR, MTBF E D DO PC MESTRE 109
TABELA 5-12– MTTR, MTBF E D DO SOFTWARE 109
TABELA 5-13– MTTR, MTBF E D DO TECLADO 110
TABELA 5-14 – MTTR, MTBF E D DO SISTEMA. 110
TABELA 5-15 – ESCALA PARA OS VALORES DE SAI, SBI E SCI. 113
TABELA 5-16 – VALORES DE SIGNIFICÂNCIA. 113
TABELA 5-17 – NOVAS DISPONIBILIDADES DOS SUBSISTEMAS. 114
TABELA 5-18 – TEMPOS DE REPARO DO PC MESTRE 118
TABELA 5-19 – TEMPOS DE REPARO DO GRUPO PINÇA. 121
TABELA 5-20 – TEMPOS DE REPARO DA PARTE MECÂNICA. 123
TABELA 5-21– MEDIDAS PARA DETERMINAR O MTTR DO PC MESTRE (EM HORAS). 126
TABELA 5-22 – RESULTADOS DOS VALORES CALCULADOS DOS TRÊS SUBSISTEMAS ALTERADOS. 127
TABELA 5-23 – VALORES PARA OS DEMAIS SUBSISTEMAS. 127

Lista de Abreviaturas e Siglas

FMEA	Análise de modos e efeitos das falhas (do inglês "failure modes and effects analysis").
JIT	No momento exato (do inglês "just in time").
MAT	Tempo médio administrativo (do inglês "mean administrative time").
MDT	Tempo médio de indisponibilidade (do inglês "mean down-time").
MLT	Tempo médio logístico (do inglês "mean logistic time").
MPT	Manutenção produtiva total.
MTBF	Tempo médio entre falhas (do inglês "mean time between failures").
MTTF	Tempo médio até a falha (do inglês "mean time to failure").
MTTR	Tempo médio para o reparo (do inglês "mean time to repair").
MWT	Tempo médio de espera (do inglês "mean waiting time").
PC	Computador (do inglês "personal computer").
PM	Prevenção da manutenção.
R&M	Confiabilidade e mantenabilidade (do inglês "reliability and maintainability").
RCM	Manutenção centrada em confiabilidade (do ingles "reliability centered maintenance").

Lista de Símbolos

α	Grau de confiança.
λ	Taxa de falhas.
λ_1	Taxa de falhas do componente 1.
λ_2	Taxa de falhas do componente 2.
μ	Taxa média de reparo.
A	Preço de aquisição do equipamento.
a	Coeficiente de transformação.
C_f	Custo fixo da falha.
C_m	Custo total médio por unidade de tempo.
C_u	Custo total do subsistema.
C_v	Custo variável por hora parada.
C_x	Custo total após um período x anos.
D	Disponibilidade.
D_i	Disponibilidade do subsistema i.
$D_i(\max)$	Maior disponibilidade encontrada nos subsistemas.
$D_i(o)$	Disponibilidade original do subsistema i.
$D_S(o)$	Disponibilidade original do sistema.
D_u	Disponibilidade uniforme.
f_i	Número esperado de falhas para o subsistema i.
i	Número do componente ou subsistema.
k	Número de subsistemas que terão sua disponibilidade modificada.

$M(t)$	Função mantenabilidade do sistema.
$MTBF_i$	MTBF do subsistema i.
$MTBF_i(o)$	MTBF original do subsistema i.
$MTBF_S$	MTBF do sistema.
$MTTR_{iest}$	Estimativa do MTTR do subsistema i.
$MTTR_G$	Meta da mantenabilidade.
$MTTR_i$	MTTR do subsistema i.
$MTTR_i(o)$	MTTR original do subsistema i.
$MTTR_S$	MTTR do sistema.
$MTTR_U$	MTTR calculado pela equação 3.9.
n	Número total de subsistemas.
N_{Falhas}	Número de falhas da máquina.
$N_{Operações}$	Número de operações da máquina.
N_R	Número de reparos.
q_i	Número de subsistemas idênticos ao subsistema i.
R	Confiabilidade dos componentes idênticos.
R_1	Confiabilidade do componente 1 sozinho.
R_2	Confiabilidade do componente 2 sozinho.
$R(S)$	Confiabilidade do sistema.
$R(t)$	Confiabilidade do equipamento no tempo t.
R_i	Confiabilidade do componente i sozinho.
R_n	Confiabilidade do componente n sozinho.

R_y	Custo de revenda do equipamento após um período y anos.
S	Desvio padrão.
S^2	Variância.
S_{ai}	Valor de significância da possibilidade ou facilidade para o subsistema i.
S_{bi}	Valor de significância do custo para o subsistema i.
S_{ci}	Valor de significância do impacto para o subsistema i.
S_i	Soma dos Valores de significância para o subsistema i.
$S_i(\max)$	Maior valor de significância dos subsistemas.
t	Tempo.
$\bar{t}$	Tempo médio.
$t_1, t_2, .. t_n$	Tempos de reparo observados.
$t_{\alpha,n-1}$	Coeficiente obtido pela tabela da distribuição-t.
t_d	Tempo de vida útil do equipamento em horas.
T_{Rj}	Tempo de reparo da falha j.
$U(t)$	Probabilidade da primeira falha ocorrer.
w_i	Peso em relação à disponibilidade do subsistema i.
x	Período em anos.

Resumo

Falar em mantenabilidade é essencialmente falar em um reparo eficiente de máquinas e equipamentos. Reparar uma máquina de maneira eficiente não é apenas realizar sua manutenção corretiva e preventiva, é uma preocupação que deve partir desde o projeto, melhorando os acessos ao equipamento e diminuindo o tempo necessário para o isolamento das falhas.

O principal objetivo do trabalho será apresentar os conceitos de mantenabilidade e aplicá-los para melhorar o projeto de uma máquina de locação de dvds, visando a diminuição do MTTR dos seus subsistemas. Para isso serão utilizados os relatórios de manutenção desse tipo de máquina, recolhidos ao longo de um período de dois anos. É importante destacar que se a mantenabilidade do sistema for aprimorada, com a diminuição do MTTR, e a confiabilidade for mantida (mesmo MTBF), haverá também um aumento da disponibilidade do sistema, ou seja, do tempo em que a máquina estará apta a realizar o seu trabalho. Portanto, a aplicação dos conceitos de mantenabilidade isoladamente não garante o funcionamento eficiente do sistema. Este conceito deve ser aplicado em conjunto com a confiabilidade, resultando em um conceito bem mais abrangente, a confiabilidade e mantenabilidade (R&M, do inglês "reliability and maintainability").

Para fundamentar o trabalho, serão introduzidos conceitos importantes como falhas, manutenção, confiabilidade, mantenabilidade e disponibilidade, entre outros tópicos importantes.

Abstract

Maintainability is essentially an efficient repair of machines and equipment. To repair a machine efficiently is not only to perform its corrective and preventive maintenance, it is a concern that must come since the project, improving the accesses to the equipment and decreasing the necessary time to isolate the failures.

The main objective of the work will be to introduce maintainability concepts and use them to upgrade the design of a DVD's rental machine aiming at the reduction of the MTTR of its subsystems, using the maintenance's reports of these machines, collected throughout a period of two years. If the system maintainability increases, decreasing its MTTR, with the same reliability (same MTBF), the system availability will increase too. Therefore, the application of the maintainability's concepts separately does not guarantee the efficient functioning of the system. This concept and the concept of reliability must be applied together, resulting in a concept well more including, the reliability and maintainability (R&M).

To complement the work, will be introduced the concepts of failures, maintenance, reliability, maintainability and availability, among others topics of great importance.

1 Introdução

1.1 Considerações Iniciais

Mantenabilidade é sempre confundida com manutenção. Manutenção pode ser definida como a atividade responsável por manter ou retornar equipamentos às suas condições normais de operação, como citado por **BELHOT e CARDOSO (1994)**. Estas ações podem incluir a prestação de um serviço, a resolução de um problema, inspeção, ajuste, remoção, recolocação e reparo no local, de sistemas ou componentes em uma máquina. Manutenção preventiva refere-se às ações tomadas para eliminar ou reduzir as probabilidades de falhas, realizando a manutenção em intervalos de tempo pré-planejados e consistem principalmente em limpeza, lubrificação, substituição e verificação das instalações. Manutenção corretiva é o trabalho de manutenção realizado após alguma falha ter ocorrido e manutenção preditiva é a manutenção realizada tomando-se a decisão sobre a necessidade de intervenção na máquina baseada na resposta de equipamentos de monitoração.

Mas como se pode definir mantenabilidade? De acordo com **NATIONAL INSTITUTE FOR OCCUPATIONAL SAFETY AND HEALTH (1993)**, a mais simples definição é: "A facilidade com que você recupera um equipamento com segurança, no menor tempo possível". De forma qualitativa, pode-se definir mantenabilidade como uma característica de projeto que dá ao equipamento a possibilidade de ter uma manutenção em menor tempo e de maneira simplificada, podendo ser realizada com mão-de-obra menos especializada, com menor número

de ferramentas e com custo reduzido. É a medida da velocidade com que você pode recuperar uma máquina ao seu estado operacional, depois de uma falha ter ocorrido. Portanto, a diferença entre mantenabilidade e manutenção é que a mantenabilidade é um parâmetro do projeto e a manutenção é uma exigência que surge como conseqüência do projeto **(BLANCHARD; VERMA; PETERSON, 1995)**.

Estudando as práticas de manutenção, junto com as práticas de mantenabilidade, este trabalho visa aplicar estes conceitos para aprimorar o projeto de uma máquina de venda automática ("Vending machine"), tornando-a mais segura, mais confiável e fazendo com que sua manutenção corretiva seja mais rápida, menos freqüente e com um custo reduzido.

A escolha deste tipo de máquina deve-se ao fato dessas máquinas terem se popularizado bastante e de não existir ainda uma política de manutenção e mantenabilidade bem desenvolvidas para as mesmas.

Quando se fala em manutenção de máquinas automáticas, existem dois casos principais: a prestação de serviço e o reparo. A prestação de serviço visa coletar dinheiro, repor as mercadorias, trocar etiquetas que indicam novos produtos e manter as máquinas sempre limpas e com boa aparência. O reparo consiste em garantir que a máquina funcione corretamente, consertando teclados, dispensadores, motores e outros sistemas quando necessário. Este trabalho visa elaborar procedimentos de mantenabilidade para o projeto de uma máquina automática, visando principalmente o reparo.

1.2 Objetivos do trabalho

O objetivo deste trabalho é estudar os princípios de mantenabilidade e aplicá-los em uma máquina de locação de Dvds para mostrar como estes princípios podem simplificar e diminuir os custos referentes à manutenção.

Aplicando os conceitos de mantenabilidade, não apenas simplifica-se e diminuí-se o custo da manutenção, como também a torna mais segura, não só por evitar intervenções desnecessárias, mas também por ser mais rápida e eficiente.

Para decidir qual parte da máquina deve ser aprimorada, serão analisados todos os subsistemas separadamente, seus modos de falhas e a conseqüência de cada falha para o cliente. Com base nestes dados, serão levantadas propostas de melhoria, visando principalmente o aumento da disponibilidade do sistema.

É interessante ressaltar que cada componente do sistema ("rack", leitor de notas, computador, entre outros), admite soluções diferentes, por isso, serão apresentadas diferentes soluções para diferentes subsistemas independentes.

O principal objetivo ao desenvolver este projeto é facilitar o trabalho de manutenção, possibilitando que pessoas menos especializadas possam realizá-lo de maneira simples, utilizando componentes mais baratos, menor número de ferramentas, com um acesso facilitado e seguro. Deve-se também aumentar a confiabilidade do equipamento, fazendo-se com que menos ações de manutenção sejam necessárias.

2 Manutenção

2.1 Falhas do sistema:

De acordo com a **ASSOCIAÇÂO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1994)**, falha pode ser definida como o término da capacidade de um item desempenhar a função requerida.

Ao projetar e manufaturar um produto é natural que alguns problemas possam acontecer. Aceitar que as falhas ocorram é bem diferente de ignorá-las. O objetivo das equipes de projeto é tentar minimizá-las, levando em consideração que pode haver mais tolerância com relação a alguns tipos e alguns níveis de falhas do que com relação a outros. Portanto, é preciso discriminar as diferentes falhas e prestar atenção especial àquelas que são críticas (afetam seriamente o desempenho da máquina).

2.1.1 Origem e classificação das falhas:

O equipamento está sempre sujeito à esforços, estando ou não em operação. Estes esforços incluem esforços operacionais (mecânicos e elétricos) que são aplicados durante a operação da máquina ou esforços que são aplicados pelo ambiente (temperatura, umidade, vibração, poeira), que atuam mesmo que a máquina não esteja exercitando qualquer tarefa, ou seja, quando está no estado de prontidão para a operação. Quando as solicitações, expressas na forma de tensões,

associadas a estes esforços, superam o limite de resistência do material, a falha ocorre.

Em outras palavras, falhas são causadas por resistência mecânica insuficiente do material, deterioração da resistência em função de ações ambientais e atuação de esforços com magnitude superior ao valor previsto como carregamento de projeto. Como causa destas falhas, cinco fatores podem ser citados: Insuficiência de condições básicas (ambiente inadequado) para a utilização da máquina, não observação das condições de uso, falha para retificar a deterioração, falta de habilidade do operador das máquinas e deficiência no projeto. Estas são todas falhas humanas e para alcançar "falhas zero", é necessário mudar o modo de pensar e de agir dos funcionários **(JAPAN INSTITUTE OF PLANT MAINTENANCE, 1996).**

As falhas podem ser classificadas quanto à dificuldade associada à execução do reparo, podendo ser falhas simples (deslocamento de sensores, por exemplo) e falhas de maior grau de dificuldade para o reparo (ruptura das engrenagens, por exemplo). Segundo o **JAPAN INSTITUTE OF PLANT MAINTENANCE (1996),** pesquisas sobre as falhas das máquinas indicaram que 70% das falhas eram falhas simples e 30% eram falhas difíceis. Portanto, é muito importante que as falhas simples sejam eliminadas para que os profissionais da manutenção tenham tempo livre para realizar a manutenção quando as falhas mais complexas ocorrerem . Estas falhas simples podem, inclusive, ser reparadas pelos próprios operadores, de acordo com o conceito de manutenção produtiva total, que será apresentado na seção 2.2.2.

2.1.2 Medição do Tempo para Ocorrência de Falhas:

Existem diversas formas de se medir o tempo para ocorrência das falhas, tais como:

a) MTTF (tempo médio até a falha, do inglês "Mean time to failure"): É o tempo que um componente leva até sua primeira falha **(VILLEMEUR, 1991)**. O MTTF pode ser definido por:

$$MTTF = \int_0^{\infty} tU(t)dt \tag{2.1}$$

Onde:

$U(t)$ é a probabilidade de a primeira falha ocorrer.

t é o tempo.

b) MTTR (tempo médio de reparo, do inglês "Mean time to repair"): Pode ser definido por:

$$MTTR = \frac{\sum_{i=1}^{N_R} T_{Rj}}{N_R} \tag{2.2}$$

Onde:

T_{Rj} é o tempo de reparo da falha j.

N_R é o número de reparos.

c) MTBF (tempo médio entre falhas, do inglês "Mean time between failures"): Pode ser definido como:

$$MTBF = \frac{Horas_Operação}{Numero_Falhas} \tag{2.3}$$

d) Freqüência de falhas: É calculada pelo número de falhas em um período de tempo. Pode ser definida como:

$$FF = \frac{N_{Falhas}}{N_{Operações}} X\,100 \tag{2.4}$$

Onde:

N_{Falhas}=Número total de falhas ocorridas durante certa operação.

$N_{Operações}$=Número de vezes que a máquina realizou esta operação.

Ou

$$FF = \frac{N_{Falhas}}{TempoOperação} X\,100 \tag{2.5}$$

e) Falha no tempo – a curva da taxa de falha: Para a maioria das partes de uma máquina, a freqüência de ocorrência das falhas é uma função do tempo. Em diferentes etapas da vida útil de qualquer produto, a probabilidade de que este falhe será diferente. A curva que descreve a taxa de falha condicional, ou seja, a probabilidade de que um componente que opera até um instante de tempo venha a falhar no próximo intervalo de operação, é chamada de curva da taxa de falha, como na figura 2.1.

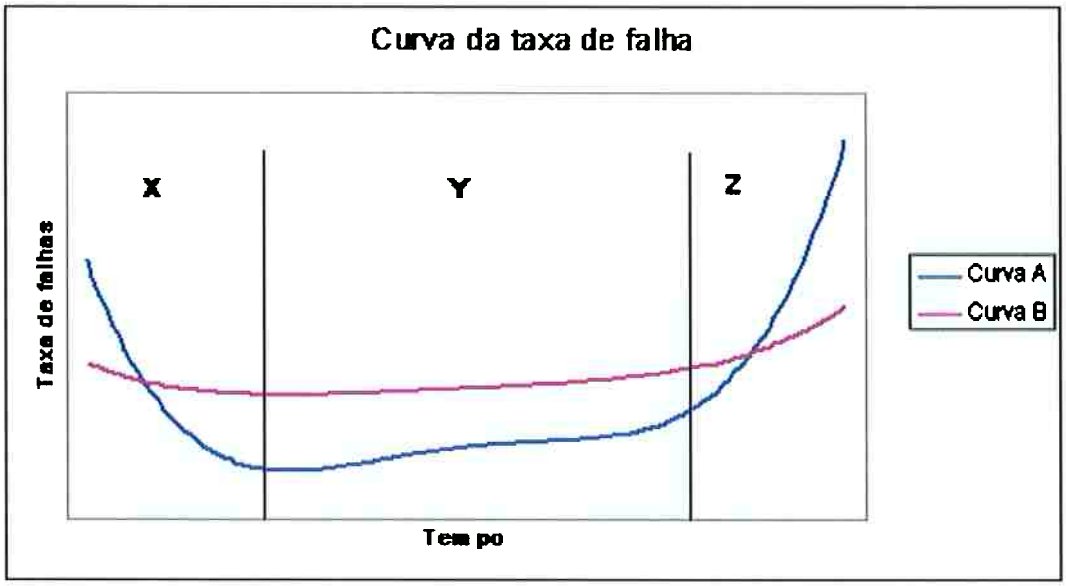

Figura 2-1 – Curva da taxa de falha

De acordo com **LYONNET (1991)**, esta curva compreende três etapas distintas:

A mortalidade "infantil" ou etapa de "vida inicial", indicada pela região "X" da curva da banheira, quando falhas iniciais ocorrem por causa da presença de peças defeituosas ou uso inadequado. É normalmente descrita pela distribuição de Weilbull. A presença de peças defeituosas está associada com o uso de um material fora da especificação ou a introdução de defeitos durante o processo de fabricação que reduzem a resistência mecânica das peças. Estes fatos devem ser considerados esporádicos e entendidos como falha do processo de manufatura. A utilização de sistemas de controle da qualidade tem por objetivo minimizar a ocorrência destes problemas, reduzindo a magnitude da taxa de falhas na região "X" da curva da banheira.

A etapa de "vida normal", indicada pela região "Y" da curva da banheira, quando a taxa de falhas é normalmente baixa, razoavelmente constante e causada

por fatores aleatórios, como sobrecarregamento inesperado. É a fase mais útil do equipamento e a distribuição exponencial é a distribuição mais indicada para representar esta fase **(SOUZA, 2006).**

A etapa de "desgaste", indicada pela região "Z" da curva da banheira, quando a taxa de falhas aumenta à medida que a peça se aproxima do final de sua vida útil e as falhas são causadas por desgaste e deterioração das peças, conforme previsto no projeto do produto. É descrita pela distribuição normal ou pela distribuição de Weilbull.

Pode-se basear nesta curva para criar uma política de manutenção. Pode-se perceber que no período inicial, a taxa de falhas decresce com o tempo, devido à falha de fabricação de alguns componentes. Pode-se reduzir isto de várias maneiras: usando os componentes por certo tempo antes de entregá-los aos clientes, aplicando testes mais severos após a fabricação de forma a rejeitar os componentes com menor resistência mecânica, realizando um projeto adequado, com a utilização de um plano de qualidade de projeto e de um plano de qualidade para fabricação.

Na terceira etapa, a taxa de falha é crescente, portanto, manutenção preditiva ou preventiva podem ser implementadas, de forma a antecipar a ocorrência da falha.

f) Confiabilidade: Segundo **KUMAR, MARKESET e KUMAR (2004)**, confiabilidade é a medida da freqüência que o sistema falha e é influenciada pela qualidade dos componentes, tolerâncias, tensão e carga, ambiente, montagem e configuração do sistema, manejo e outras características. Uma confiabilidade reduzida geralmente reflete em uma maior probabilidade de alta taxa de falhas do sistema. Isto leva a um maior número de reparos não planejados e redução da disponibilidade. Como, em certas condições, as falhas ocorrem aleatoriamente, a

distribuição exponencial é a mais utilizada para descrever o processo, embora existam modelos com a utilização das distribuições normal, Weilbull, gama, assim como outras distribuições discretas. Desta forma, a confiabilidade de um componente é dada pela equação 2.6.

$$R(t) = e^{-\lambda t} \tag{2.6}$$

Onde λ é a taxa de falhas do componente., considerando que a sua confiabilidade possa ser modelada por uma distribuição exponencial, ou seja, está sendo modelada a região "Y" da curva da banheira.

Se os componentes de um sistema forem todos interdependentes, ou seja, todos participam de sua operação, uma falha em um componente individual causa a falha em todo o sistema. Portanto, um sistema com n componentes, cada qual com sua própria confiabilidade R_1, $R_2, \ldots R_n$, terá uma confiabilidade dada por **(VIRTANEN, 1998):**

$$R(S) = R_1 \times R_2 \times R_3 \times \ldots\ldots R_n = \prod_{i=1}^{n} R_i \tag{2.7}$$

Onde:

$R(S)$ =Confiabilidade do sistema.

R_i =confiabilidade do componente i.

Portanto, em um sistema interdependente com configuração em série, quanto maior o número de componentes, menor será sua confiabilidade, como se pode ver na figura 2.2 **(SLACK; CHAMBERS; JOHNSTON, 2001):**

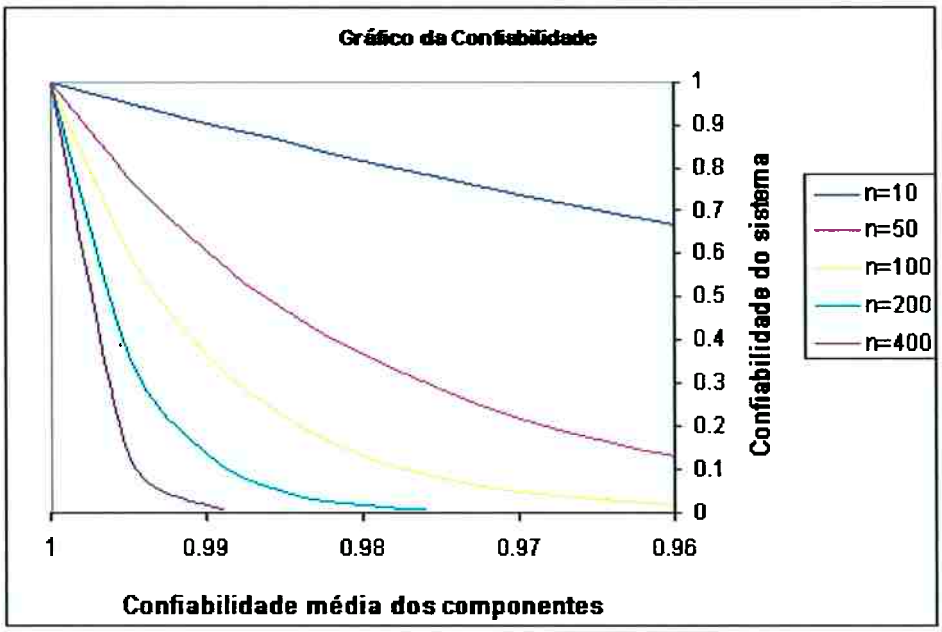

Figura 2-2- Gráfico da confiabilidade

g) Disponibilidade: É a possibilidade de um componente estar em condições de executar uma dada função, com uma dada condição em um dado tempo. Pode ser definida como **(OLIVETO, 1999)**, **(VINTR; HOLUB, 2001):**

$$D = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \tag{2.8}$$

Segundo **EBELING (1997)**, alguns equipamentos, quando são reparados, retornam à sua condição original, ou "tão bom quanto novos", o que significa que a sua taxa de falhas antes e depois do reparo é aproximadamente constante. Para esses equipamentos, a disponibilidade pode ser calculada pela equação (2.9).

$$D = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR} \tag{2.9}$$

2.1.3 *Prevenção e Recuperação de Falhas*

Existem conjuntos de atividades que se relacionam à falhas. O primeiro diz respeito à compreensão de quais falhas estão ocorrendo nas máquinas e por que ocorrem. Uma vez entendida a natureza de todas as falhas, a segunda tarefa é analisar as formas de reduzir a probabilidade de ocorrência das falhas ou minimizar as ocorrências das mesmas. A terceira tarefa é elaborar políticas e procedimentos que ajudem a equipe de manutenção a recuperar as falhas quando estas ocorrerem. A figura 2.3 ilustra estas três tarefas:

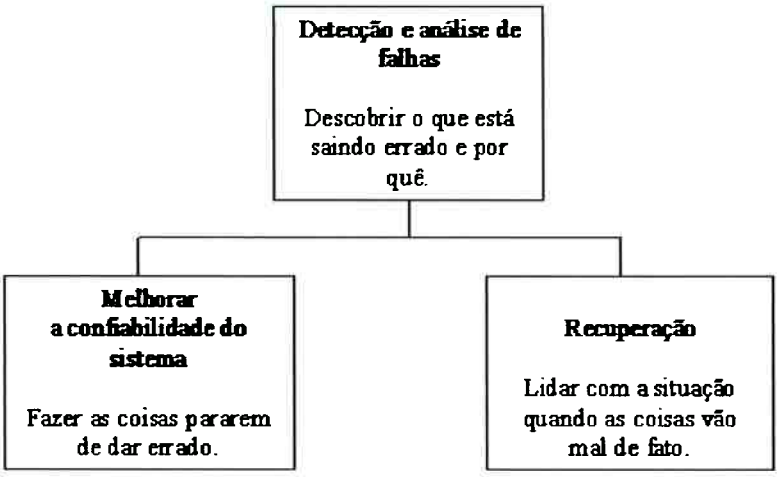

Figura 2-3 – As três tarefas de prevenção e recuperação de falhas

Dado que as falhas ocorrem, deve-se contar com mecanismos para perceber rapidamente que uma falha ocorreu e, segundo, ter um procedimento que analise a falha e descubra sua causa mais fundamental, para que esta falha possa ser evitada futuramente.

2.1.4 Método de Maxer:

Segundo **LYONNET (1991)**, o método de Maxer ajuda a garantir que a falha não se repita, seguindo uma série de procedimentos:

a) Estudar profundamente a situação;

b) Se possível, fazer uma previsão do diagnóstico;

c) Decidir a causa mais provável;

d) Verificar se esta foi realmente a causa;

e) Reparar a falha;

f) Verificar se o reparo removeu a falha;

g) Olhar as causas iniciais e corrigi-las;

h) Verificar as descobertas com equipamentos similares;

i) Fazer um relatório sobre todos os acontecimentos;

2.1.5 Análise de Modos e Efeitos das Falhas (FMEA, do inglês "failure modes and effects analysis"):

Segundo **SUNDARARAJAN (1991),** a análise do tipo FMEA é um procedimento qualitativo que identifica as falhas potenciais de um componente e indica seus efeitos no sistema. É um método empregado na melhoria de projeto de sistemas, no projeto de linhas de produção e no planejamento da manutenção baseando-se na determinação dos pontos vulneráveis do projeto, sob o ponto de vista da severidade do efeito da falha de um componente sobre a condição operacional de um sistema. Sua origem remonta ao meio militar, sendo freqüente a referência à norma MIL-STD-1629A (**DEPARTMENT OF DEFENSE (1980)**).

As diretrizes gerais para a elaboração do FMEA se baseiam na resposta a cinco perguntas fundamentais , segundo **SUNDARARAJAN (1991):**

a) Como o componente pode falhar?

b) Quais são as conseqüências (efeitos) da falha?

c) Quão crítica é a falha?

d) Como a falha é detectada?

e) Quais são as proteções contra a falha?

Os principais objetivos desejados ao responder estas perguntas são:

a) Todos os modos de falhas e seus efeitos sejam entendidos.

b) Pontos vulneráveis no projeto sejam identificados.

c) Seja desenvolvida uma base para recomendações de melhoramentos no projeto.

d) Seja desenvolvida uma base para prioridade de ações corretivas.

e) Seja desenvolvida uma base para recomendação de programas de testes.

f) Facilite a resolução de problemas em sistemas defeituosos.

A análise de modos e efeitos das falhas pode ser feita em diversos estágios do projeto, como a fase conceitual, preliminar, ou em estágios mais avançados, na fase de projeto executivo e de elaboração de procedimentos de ensaios de protótipos. Também pode ser usada para identificar causas de falhas em sistemas já existentes com problemas operacionais. Caso esta análise tenha sido feita durante o projeto do sistema, estes dados podem ser usados e atualizados.

A análise de modos e efeitos das falhas baseia-se em quatro passos:

a) Estabelecimento do escopo da análise: Definem-se claramente os limites do sistema de forma que todos os componentes sejam considerados. Define-se também o conteúdo da análise, especificando as causas de falhas, possíveis efeitos das falhas, como ela é detectada, quais as proteções contra estas falhas, a freqüência da falha, entre outras informações.

b) Coleta de dados: Coletam-se todos os tipos de documentos relacionados à configuração da máquina, projeto, especificações e procedimentos para operação. Pessoas relacionadas ao projeto, operação, venda, teste e manutenção devem ser entrevistadas para que a maior quantidade de informação possível seja reunida.

c) Preparação da lista de componentes: Prepara-se uma lista com todos os componentes do sistema. Deve-se colocar nesta lista dados como a função do componente, condições de operação, e condições do ambiente.

d) Preparação dos FMEAs: Todos os dados retirados da análise de modos e efeitos das falhas devem ser colocados no FMEA. De acordo com a norma MIL-STD-1629A (**DEPARTMENT OF DEFENSE (1980)**), o FMEA deve conter 10 itens, como indicado na tabela 2.1. Estes itens são:

Número de identificação: Um número de série ou outra referência que é aplicado para facilitar o rastreamento do item.

Nomenclatura: O nome ou nomenclatura do item ou sistema cuja falha será analisada.

Função: Uma descrição concisa da função a ser executada pelo item.

Causas/ modos de falhas:Todas as falhas previsíveis para cada item devem ser identificadas e descritas.

Fase/ modo de operação: Uma descrição concisa da fase/ modo de operação em que a falha ocorreu.

Efeito da falha: As conseqüências de cada modo de falha relatadas anteriormente devem ser identificadas, avaliadas e descritas.

Local: Concentra-se especificamente no impacto ocorrido no próprio nível do item descrito. A figura 3.8 descreve os diferentes níveis das máquinas.

Próximo nível: Concentra-se no impacto ocorrido no nível acima do item descrito.

Níveis finais: Avalie e define o efeito completo que uma falha causa na operação, funcionamento ou estado do nível mais alto (sistema).

Métodos de detecção da falha: Uma descrição do método utilizado pelo operador para detectar a ocorrência de um modo de falha.

Medidas preventivas/corretivas: As medidas preventivas, que são medidas de projeto ou ações do operador, para cessar ou diminuir o efeito da falha devem ser identificadas e descritas.

Severidade: Uma classificação da severidade das falhas deve ser feita para cada modo de falha de acordo com o efeito que esta falha causa ao sistema. Para os

FMEAs apresentados durante este trabalho, os valores irão variar de 1 (severidade pequena) até 10 (severidade catastrófica).

Comentários: Qualquer comentário pertinente que esclareça algum dado apresentado em uma das colunas ou que seja importante deve ser descrito.

Tabela 2-1 – FMEA completo (DEPARTMENT OF DEFENSE (1980)).

Numero de identificação	Nomen-clatura	Função	Causas /modos de falhas	Fase/ modo de operação	Efeitos			Método de detecção da falha	Medidas preventivas /corretivas	Seve-ridade	Obser-vações
					Locais	Próximo nível	Níveis finais				

A tabela 2.2 apresenta um exemplo de FMEA simplificado para um equipamento.

Tabela 2-2 –Exemplo de FMEA simplificado , adaptado de SUNDARARAJAN (1991).

Nomen-clatura	Função	Causas/ modos de falhas	Efeitos	Método de detecção da falha	Medidas preventivas /corretivas	Severidade	Comen-tários
Válvula de parada	Controlar o fluxo de gás	Falha ao fechar	Aumento anormal na pressão e temperatura da água	(i)Temperatura da água muito alta (ii)abertura da válvula de alívio	Válvula de alívio abre e exerce pressão no tanque de água	6	Nenhum
Válvula de parada	Controlar o fluxo de gás	Falha ao abrir	Falha para produzir água quente	Temperatura da água muito baixa	Nenhum	5	Nenhum

2.1.6 Melhorando a confiabilidade das máquinas

Uma vez que se tenha uma compreensão das causas e efeitos das falhas, deve-se procurar eliminá-las e/ou prevenir sua ocorrência. Segundo **SLACK, CHAMBERS e JOHNSTON (2001)**, pode-se fazer isto de diversas formas:

a) Eliminando, no projeto, os pontos de falhas potenciais na máquina.

b) Construindo subsistemas com recursos críticos redundantes (em duplicidade).

c) Tornando a máquina à "prova de falhas", com dispositivos para prevenir falhas.

d) Fazendo a manutenção das máquinas.

<u>Eliminação, no projeto, de pontos de falhas potenciais:</u>

Devem-se marcar todos os subsistemas da máquina que são especialmente sujeitos a falhas. Posteriormente, o pessoal que projeta o sistema analisa e discute quais os pontos que possuem maior probabilidade de falhas, até que seja encontrada uma forma de melhorar cada um deles, eliminando esses pontos do projeto. A equipe de projeto deve ser treinada para realizar esta análise, pois a mesma envolve uma crítica ao próprio projeto realizado.

Redundância:

Segundo **LYONNET (1991)**, introduzir redundância significa ter sistemas ou componentes de reserva em caso de falhas. Pode ser uma solução cara e deve ser usada quando a interrupção do funcionamento pode ter um impacto crítico. Como exemplo tem-se os geradores de energia utilizados em usinas nucleares e hospitais.

Segundo **EBELING (1997),** a confiabilidade para n componentes independentes e paralelos é dada por 1 menos a probabilidade de todos os componentes falharem ao mesmo tempo, ou seja, é a probabilidade de que pelo menos um deles não falhe. Portanto:

$$R(t) = 1 - (1 - R_1)(1 - R_2)...(1 - R_i)...(1 - R_n)$$

onde:

$R_1, R_2, R_i\ R_n$, são as confiabilidades dos componentes 1, 2, i e n, respectivamente.

$R(t)$ é a confiabilidade dos componentes em paralelo.

ou simplificando:

$$R(t) = 1 - \prod_{i=1}^{n} [1 - R_i(t)] \qquad (2.10)$$

Uma generalização ocorre quando existe um requisito para que k de n componentes idênticos independentes funcionem ao mesmo tempo para que o sistema também funcione. Se k for igual a 1, ocorre o caso citado anteriormente, e se $k = n$, o sistema funciona como um sistema em série. Obviamente, $k \leq n$. A

confiabilidade do sistema é obtida da distribuição de probabilidade binomial, dada pela equação (2.11).

$$R(t) = \sum_{x=k}^{n} \binom{n}{x} R^{x} (1-R)^{n-x} \tag{2.11}$$

Onde R é a confiabilidade dos componentes idênticos.

Dispositivos para Prevenir Falhas:

O conceito de prevenção de falhas surgiu com a introdução dos métodos japoneses de melhoria da produção. Chamados de "poka-yoke" (prevenir erros de desatenção), estes métodos são bastante utilizados em sistemas produtivos e estão baseados no princípio de que os erros humanos são inevitáveis até certo grau. São dispositivos ou sistemas simples incorporados em máquinas para prevenir erros por falta de atenção dos operadores e muito comuns também em sistemas automáticos.

Como exemplo, pode-se citar:

a) Sensores e interruptores em máquinas, que só permitem sua operação se a peça for colocada corretamente.

b) Gabaritos instalados em máquinas, evitando que a peça seja colocada na orientação incorreta.

2.2 Manutenção

A manutenção tem por função manter ou retornar os equipamentos às suas condições específicas de operação **(NEPOMUCENO, 1989)**. A manutenção pode ter diferentes objetivos a serem alcançados. Estes objetivos podem ser relativos ao desempenho do equipamento (uma preocupação econômica), com a disponibilidade do equipamento (como por exemplo, nas forças armadas e hospitais), ou garantir a segurança **(CARDOSO, 2000).**

A manutenção pode ser feita pela inspeção e substituição de itens, mas a pesquisa das causa dos problemas, e não só os seus sintomas, também são considerados atividades de manutenção. A esta pesquisa dá-se o nome de diagnose. Uma diagnose facilitada resulta em menor tempo para a descoberta da causa da falha, que pode ser resultado de vários fatores diferentes contribuindo juntos ou isoladamente **(CARDOSO, 2000).**

A manutenção é uma parte muito importante de qualquer máquina por uma série de motivos. Máquinas que recebem manutenção regularmente têm menor probabilidade de se comportar de forma não previsível ou não padronizada, ou falhar totalmente, e podendo apresentar riscos para o pessoal associado com a sua operação. Também conduz a menor tempo perdido com consertos, menos interrupções das atividades normais, menor variação das características do produto gerado (o que significa maior qualidade). Isso garante uma disponibilidade aumentada, gerando custos de operação mais baixos. Cuidado regular, limpeza e lubrificação podem prolongar a vida efetiva das máquinas, reduzindo os pequenos problemas na operação, cujo efeito cumulativo causa desgaste ou deterioração.

Além disso, essas máquinas são geralmente mais fáceis de vender no mercado de segunda mão.

2.2.1 Três abordagens básicas para a manutenção

Segundo **LYONNET (1991)**, as atividades de manutenção consistem em uma combinação de três abordagens básicas, que são: manutenção preditiva, corretiva e preventiva.

A manutenção preditiva permite predizer, com elevada margem de probabilidade, até quando um componente resistirá aos esforços a que está sujeito, assim como qual será a época aproximada de sua substituição **(NEPOMUCENO, 1989)**. Para isso, se ocupa em estimar o estado de funcionamento do sistema pela medição de parâmetros vitais para sua operação como temperatura, vibração em eixos e mecanismos, intensidade de correntes elétricas, emissão acústica, análise de presença de partículas e verificação da composição química em óleos lubrificantes e isolantes. Pode-se ainda dizer que a manutenção preditiva acompanha o desenvolvimento da falha, apontando o melhor momento para a intervenção. A grosso modo, isto quer dizer dilatar conscientemente a utilização dos componentes, o que se traduz em economia **(CARDOSO, 2000)**.

A Manutenção corretiva é realizada somente após a falha ter ocorrido. Em geral, há a imobilização do equipamento ou na melhor das hipóteses, um sensível decréscimo em seu desempenho. Este tipo de manutenção só deve ser adotado se as falhas não forem catastróficas nem tão freqüentes, de maneira que não são necessárias verificações regulares do estado das instalações **(SLACK; CHAMBERS; JOHNSTON, 2001)**. Como a falha já terá ocorrido, o equipamento

estará propenso a causar toda sorte de danos, inclusive ao ambiente onde está inserido. Por este motivo, este tipo de manutenção causa grande aversão nos profissionais de manutenção e alguns chegam a classificá-la como medida do nível de incompetência do setor em lidar com as falhas , segundo **CARDOSO (2000)**.

A manutenção preventiva se dá pela intervenção nas máquinas em períodos pré-determinados, e consiste principalmente em limpeza, lubrificação, substituição e verificação das instalações. São obrigatórias em casos em que a falha no equipamento em serviço acarreta conseqüências graves, como em um avião, por exemplo, **SLACK, CHAMBERS e JOHNSTON (2001)**. É uma prática muito adotada em razão de se antecipar à falha. É uma característica que à primeira vista a torna muito cômoda e segura. Mas deve-se observar que a manutenção preventiva possibilita aumentar a vida do sistema, não possibilita que o mesmo possa operar indefinidamente. Espera-se que devido às solicitações habituais sofridas pelo componente durante a operação, o mesmo atinja a deterioração, usualmente devido aos mecanismos de fadiga e desgaste, determinando o fim da vida do sistema do qual faz parte. Além disso, com o passar do tempo os intervalos entre manutenções programadas podem diminuir e o número de componentes substituídos nestas manutenções pode ser cada vez maior ou, como é freqüente, os dois eventos ocorrerem simultaneamente, tornando a operação do equipamento economicamente inviável **(CARDOSO, 2000)**.

O equilíbrio entre manutenção corretiva e manutenção preventiva é estabelecido para minimizar o custo total das paradas. Pode-se diminuir o custo diminuindo-se a quantidade de interrupções para atividades de manutenção preventiva, mas esta ação resultará em alta probabilidade de manutenção corretiva, que é geralmente mais cara. A solução é encontrar um ponto ótimo de manutenção

preventiva, indicado pelo ponto x no gráfico de manutenção da figura 2.4, minimizando os gastos. Este ponto ótimo envolve a definição da freqüência com que serão executadas as intervenções preventivas bem como as tarefas a serem realizadas nestas intervenções.

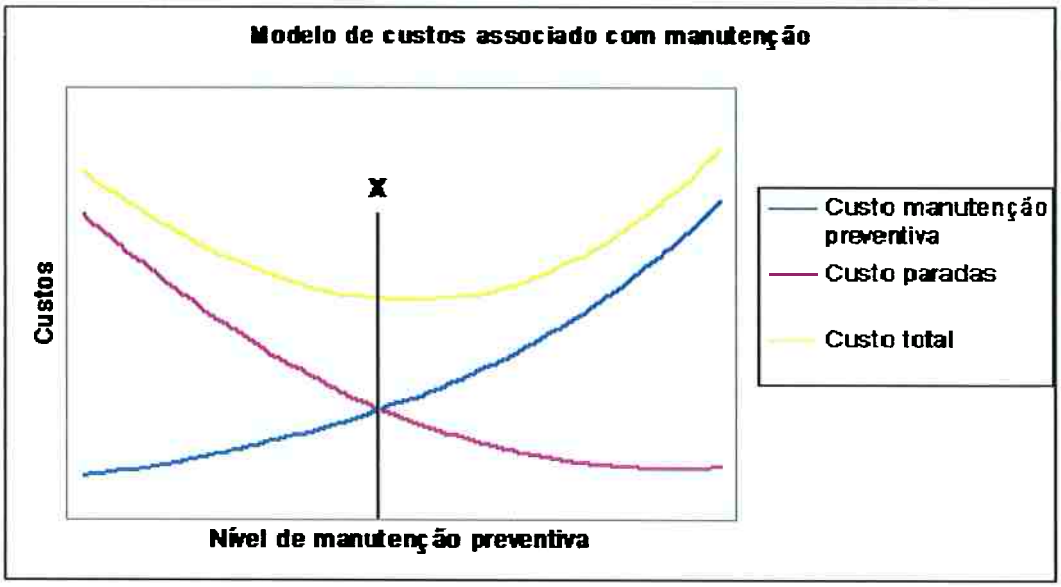

Figura 2-4 – Modelo de custos associado com manutenção (SLACK; CHAMBERS; JOHNSTON, 2001).

A forma da distribuição de probabilidade de falhas de uma máquina também terá efeito sobre os benefícios da manutenção preventiva. A figura 2.5 demonstra a distribuição de probabilidade de falhas para duas máquinas diferentes, a máquina A e a máquina B.

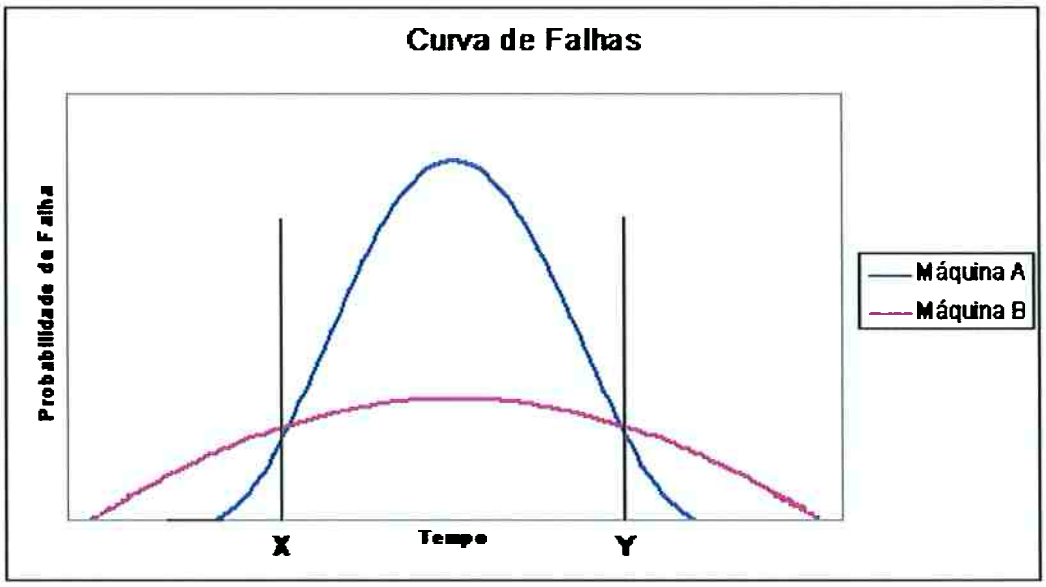

Figura 2-5 - curvas de falhas para duas máquinas, A e B.

Para a máquina A, a probabilidade de falha antes do tempo x é relativamente baixa. Se a manutenção preventiva estiver programada para ocorrer exatamente antes deste ponto, reduziria a probabilidade de falha repentina, que resulta em manutenção corretiva. A máquina B, ao contrário, tem probabilidade alta de quebra mesmo no período de tempo que antecede x. Isso significa que utilizar manutenção preventiva no momento antes do ponto x (ou qualquer outro momento), poderia não trazer uma redução conveniente nas paradas. Portanto, deve-se utilizar manutenção preventiva quando períodos com muitas paradas forem razoavelmente previsíveis. Quando estes períodos acontecerem de forma muito aleatória, a manutenção preventiva tem pouco efeito.

De forma geral, a manutenção corretiva é usada com freqüência nos casos em que o conserto é fácil, quando a manutenção preventiva é dispendiosa ou quando a falha não é previsível de nenhuma forma. A manutenção preventiva é usada quando o custo da falha não planejada é alto, e quando a falha não é

totalmente aleatória. Pode-se, desta maneira, planejar a manutenção para momentos anteriores aos momentos em que a falha se torne mais provável. A manutenção preditiva é usada quando se pode ter efeitos claros da manifestação dos modos de falhas.

A maior parte das operações produtivas adota uma combinação destas abordagens, porque diferentes elementos de suas instalações têm diferentes características, segundo **SLACK, CHAMBERS e JOHNSTON (2001),** conforme indicado na figura 2.6.

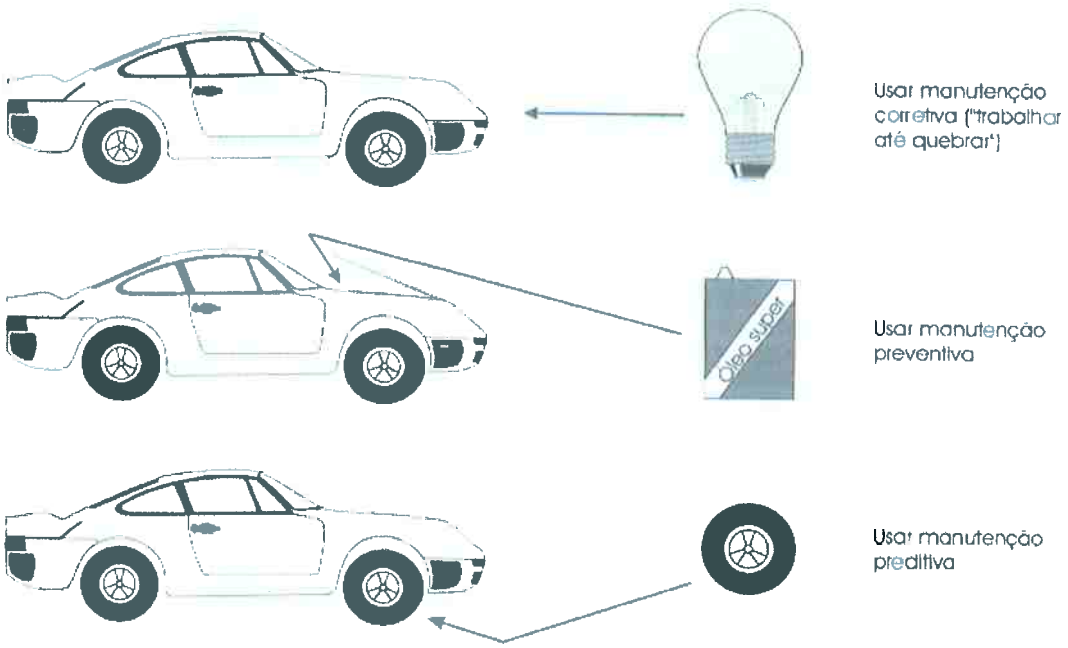

Figura 2-6 – Combinação de abordagens de manutenção para um automóvel (SLACK; CHAMBERS; JOHNSTON, 2001)

No exemplo da figura 2.6, tem-se as três abordagens de manutenção. Quando troca-se o óleo para não danificar o motor, está se utilizando manutenção

preventiva. Quando troca-se uma lâmpada que queimou, manutenção corretiva, e quando se mede a profundidade do sulco do pneu para checar sua condição, manutenção preditiva.

2.2.2 *Metodologias de organização da manutenção*

Além das práticas fundamentais de manutenção, existem algumas metodologias de organização da manutenção ou gestões de manutenção cujo objetivo comum é utilizar o equipamento com segurança pelo maior tempo possível, tendo ênfases diferentes. Duas que se destacam (não são as únicas) são a manutenção produtiva total (MPT) e a manutenção centrada em confiabilidade (RCM, do inglês "Reliability centered maintenance").

A manutenção produtiva total, segundo **SOUZA (2006)**, é uma estratégia de gestão de equipamentos concebida para alcançar a máxima eficiência com o total envolvimento dos seus operadores. É uma idéia que teve origem a partir da manutenção preventiva desenvolvida no período pós-guerra nos Estados Unidos. Foi um movimento de busca da qualidade e produtividade que os japoneses desenvolveram e aperfeiçoaram, e ao longo dos anos vem evoluindo para um completo sistema de gestão empresarial.

O conceito de desenvolvimento da MPT é baseado na capacitação do homem, dando ao pessoal de operação a habilidade de monitorar o seu equipamento utilizando os cinco sentidos e realizar pequenas intervenções assim como possibilita o responsável pela manutenção analisar as causas das falhas e garantir a qualidade dos equipamentos.

Os objetivos da MPT estão relacionados com a melhoria da estrutura da empresa em termos materiais (máquinas, equipamentos, ferramentas, matéria-prima, produtos, entre outros) e em termos humanos, com o aprimoramento das capacitações dos profissionais, envolvendo conhecimentos, habilidades e atitudes. Outro objetivo é o de alcançar um nível excelente do rendimento operacional global (OEE, do inglês "overall equipment efficiency"), que é um indicador global de eficiência com que uma unidade produtiva é utilizada. Para uma maior eficiência do método MPT é essencial a eliminação das 6 grandes perdas, segundo **SOUZA (2006)** :

Perdas por quebras: São paradas para manutenção corretivas em emergências. Deve ser combatida com uma manutenção preventiva eficaz.

Perdas por ajustes: **são as demoras por trocas de ferramentas e ajustes.** Deve ser combatida com técnicas de redução de "set-up".

Perdas em pequenas paradas: **São os tempos de espera e retomada de** operação.

Perdas por baixa velocidade: São as perdas por operação em velocidade reduzida em relação ao padrão normal.

Perdas por qualidade insatisfatória: **São as perdas decorrentes de peças** defeituosas ou fora do padrão estabelecido pelo cliente.

Perdas com "start-up": São as perdas ocorridas no início da operação das máquinas.

A MPT tem sua sustentação no conceito de oito pilares, e envolvem toda a empresa em busca de suas metas, tais como "defeito zero", "falhas zero", aumento da disponibilidade dos equipamentos, produtividade e lucratividade **(SOUZA, 2006).**

O primeiro pilar é a manutenção autônoma e espontânea, que tem como objetivo eliminar as grandes perdas e elevar a eficácia geral dos equipamentos e também prover ao operador conhecimentos e habilidades relativas ao seu equipamento. As atividades na manutenção autônoma compreendem a limpeza, lubrificação, apertos, inspeção diária periódica, relatórios das anormalidades, pequenos reparos, entre outros.

O segundo pilar é o planejamento da manutenção. O dimensionamento deste planejamento depende diretamente do nível de produtividade ou disponibilidade que se queira atingir, do número de equipamentos da empresa e do número de profissionais no departamento de manutenção.

O terceiro pilar são as melhorias individuais e específicas que têm como objetivo eliminar as grandes perdas e elevar a eficácia geral dos equipamentos.

O quarto pilar é a educação, treinamento, integração e reciclagem que tem como objetivo fornecer recursos e subsídios para que as áreas possam desenvolver, qualificar e certificar seus profissionais. Funcionários qualificados poderão antever problemas utilizando a inspeção sistêmica, poderão diferenciar uma situação de operação normal de uma operação anormal e propor melhorias para ganhos de rendimentos e produtividade.

O quinto pilar é a engenharia e controle na aquisição e manutenção dos ativos que tem como objetivo elaborar a especificação técnica das máquinas e equipamentos observando requisitos e especificações e ser o mediador das necessidades dos demais pilares do programa, levando aos fornecedores suas necessidades em termos de especificação de componentes e melhorias de acesso para limpeza, inspeção e reparo.

O sexto pilar é a manutenção da qualidade e confiabilidade que tem como objetivo dar suporte às áreas, para que possam produzir peças com qualidade em maior número possível, "quebra zero" no equipamento e "zero defeito" no produto. A participação deste pilar não se restringe apenas em colaborar com os demais pilares mas sim atuar na área produtiva auxiliando na solução de problemas de qualidade dos produtos ou processos e sua concretização se dá com uma aplicação adequada dos estudos de confiabilidade.

O sétimo pilar é o meio ambiente, higiene e segurança que tem como objetivo implementar os princípios de gestão ambiental na fábrica, controlando os aspectos ambientais, minimizando os impactos e promovendo melhorias no meio ambiente, eliminando desperdícios.

O oitavo pilar é a manutenção nos escritórios que tem como objetivo eliminar perdas oriundas de processos administrativos, gestão de estoques e logísticas, apurar os ganhos financeiros ou reduções de custo face os aumentos de rendimentos dos equipamentos e máquinas.

Como os conceitos iniciais da metodologia foram originados no Japão, muito da cultura empresarial e dos costumes orientais foram levados em consideração, como o "5s" e o "JIT" (do inglês "just in time").

Segundo **BHUIYAN e BAGHEL (2006)**, o processo "5s" é um método para organizar e manter um local de trabalho. Consiste de cinco passos fundamentais. O primeiro passo, ordenar ("sort"), consiste em dar uma volta no local de trabalho e marcar os itens em excesso, itens fora do lugar ou que não esteja envolvido na manutenção da máquina. Uma vez que os itens estejam identificados e revisados, eles são colocados no seu respectivo lugar ou removidos, caso não sejam necessários. O segundo passo, reforçar ("straighten"), consiste em estabelecer um

local para cada item baseado no seu uso, e manter tudo no seu lugar correto, ou então organizar os equipamento e produtos de maneira que seja fácil localizá-los e usa-los quando requisitados. Isto pode ser feito com o uso de etiquetas e arranjando os produtos e equipamentos de forma que ofereçam uma boa identificação visual. O terceiro passo, limpar ("sweep"), consiste em limpar o local de trabalho e o equipamento, removendo toda a poeira, sujeira e contaminação. Enquanto o local de trabalho e o equipamento são limpos, o trabalho de manutenção pode ser executado para evitar futuras quebras. O quarto passo, padronizar ("standardize") significa manter e monitorar os três primeiros S's. A integração de ordenar, reforçar e limpar resulta em uma padronização bem sucedida e leva a um aumento de velocidade, qualidade e segurança na área de trabalho. O quinto e último passo, sustentar ("sustain"), significa sustentar as regras anteriores por um grande período de tempo, sendo necessária a conscientização dos funcionários e gerentes. A idéia é fazer do 5S um modo de vida. Eles devem ser repetidos na mesma ordem para garantir os benefícios.

A filosofia Just In Time (no momento exato, do inglês "Just In Time") recomenda que o pedido de materiais seja feito à medida que forem necessários. Isto ajuda muito na diminuição de gastos com estoque. Evidentemente, devem-se manter alguns materiais necessários para o reparo das máquinas em estoque, mas materiais para uso comum podem ser comprados conforme o planejado. Segundo **MADU (2005)**, quando uma empresa adota uma filosofia JIT, é óbvio que ela não pode permitir que haja gargalos. Se eles existem, a cadeia inteira pode ser atingida se o sistema ficar indisponível ou não tiver uma alta confiabilidade.

Outra metodologia de organização da manutenção atualmente muito difundida é a Manutenção Centrada em Confiabilidade (RCM, do inglês "reliability

centered maintenance") que, segundo **EL-HARAM e HORNER (2002)**, é uma abordagem sistemática para identificar as tarefas de manutenção mais aplicáveis e mais efetivas para um elemento, serviço e equipamento e para uma análise rigorosa das conseqüências das falhas. Ela busca identificar os fatores que levam um equipamento a falhar, requerendo estudos sobre as solicitações impostas ao mesmo, condições operacionais e um profundo conhecimento sobre o equipamento: seus componentes, a relação entre os mesmos, comportamento à falha e característica de projeto **(CARDOSO, 2000)**. Para um processo ser considerado RCM, sete perguntas devem ser respondidas:

a) Quais as funções e padrões de desempenho do ativo associados, desejados, na(s) função(ões) operacional(is) em seu contexto atual?

b) De que forma ele pode falhar ao deixar de cumprir suas funções (falha funcional)?

c) O que causa cada falha funcional (modos de falha)?

d) O que acontece quando ocorre cada falha (efeitos da falha)?

e) Qual é a importância de cada falha (conseqüências da falha)?

f) O que deve ser feito para predizer ou prevenir cada falha (tarefas pró-ativas e intervalos das tarefas)?

g) O que deve ser feito caso uma tarefa pró-ativa adequada não possa ser encontrada (ações padrão)?

Fica claro, ao se analisar os sete tópicos acima que, pelo menos as cinco primeiras questões podem ser tratadas em um estudo FMEA padrão. Percebe-se, portanto, que o RCM é uma forma mais aprofundada de estudo FMEA, voltada para a manutenção, que busca classificar de forma mais sistemática as conseqüências de falhas e especifica as ações de manutenção necessárias para reduzir a freqüência

de ocorrência das falhas. Mais especificamente, classifica todas as tarefas de manutenção necessárias para a composição de um plano de manutenção **(CORNET ,2005)**.

2.2.3 Definição dos tempos de manutenção

Dois elementos básicos de tempo são utilizados para descrever ou medir as características da manutenção do sistema: o tempo de parada (tempo que o equipamento não está em condição de executar suas tarefas) e tempo de funcionamento (tempo em que o equipamento está operando ou está em condições de operar). A figura 2.7 mostra a relação entre os vários elementos do tempo parado **(KOWALSKI, 1996)**.

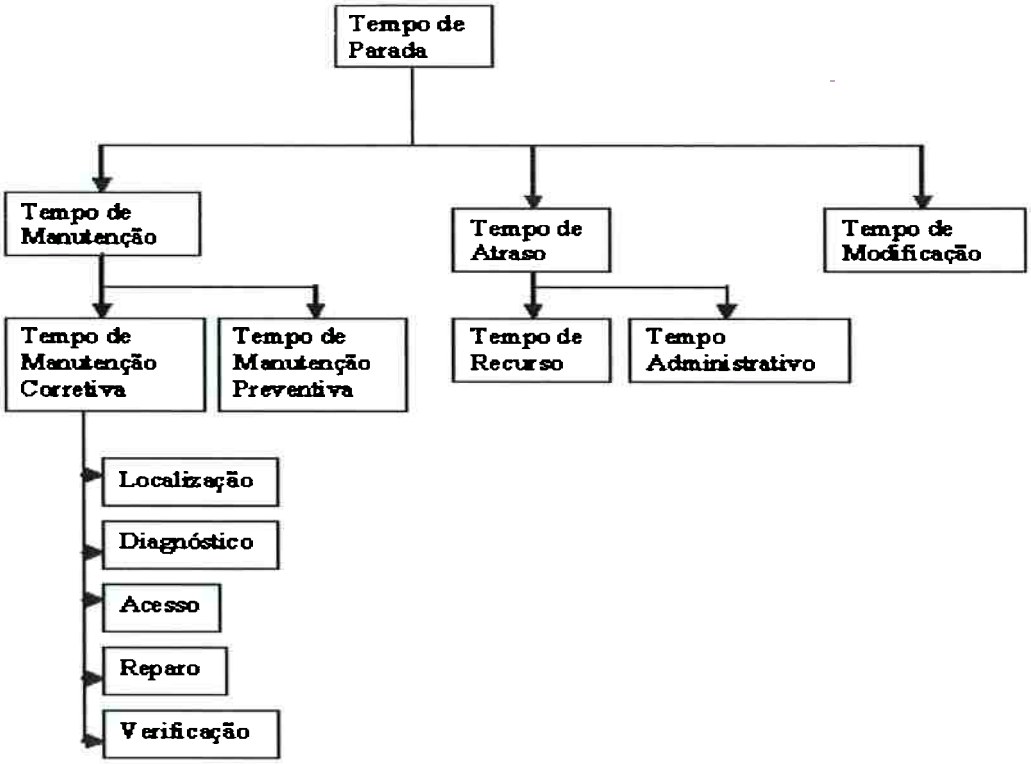

Figura 2-7 – Tempos de Manutenção

O tempo de manutenção consiste no tempo de manutenção preventiva e tempo de manutenção corretiva. O tempo de manutenção preventiva inclui todas as ações executadas para manter um item em uma condição específica, fornecendo inspeções sistemáticas, detecção e prevenção de falhas que estão no começo. O tempo de manutenção corretiva inclui todas as ações executadas após uma falha ter ocorrido, com a intenção de recuperar o item. O tempo de manutenção corretiva resulta da soma de outros 5 tempos, segundo **EBELING (1997)** e **DEPARTMENT OF DEFENSE (1966)**. O tempo de localização, que é o tempo necessário para determinar o local aproximado da falha. O tempo de diagnóstico ou tempo de isolamento, que é o tempo necessário para determinar a causa da falha. O tempo de acesso, que é o tempo necessário para se ter acesso ao componente com a falha, incluindo os tempos de montagens e desmontagens que devem ser executadas. O tempo de reparo ou substituição, que é o tempo utilizado para completar a restauração do sistema depois que o mesmo foi identificado e o acesso foi obtido.O tempo de alinhamento ou verificação é o tempo necessário para validar a restauração e garantir que a unidade tenha retornado para uma condição operacional.

O tempo de atraso da manutenção é o tempo em que nenhuma manutenção está sendo executada. O tempo de recurso é o tempo gasto na espera por um item de reposição. O tempo administrativo é o tempo de atraso não relacionado ao atraso dos recursos. Este tempo inclui o tempo necessário para a equipe de manutenção chegar até o local do equipamento e o tempo gasto na documentação ou procura de informações.

O tempo de modificação é o tempo necessário para introduzir mudanças que melhorem o sistema ou adicionem novas características.

2.2.4 Controle do estoque para a manutenção

Quando o tipo de gestão de manutenção necessitar de estoques, deve-se ser capaz de prever a quantidade e a data de pedido das peças de reposição. Isto deve ser feito de maneira que minimize os custos totais de operação, que pode ser dividido em três partes , segundo **SLACK, CHAMBERS e JOHNSTON (2001)** : o custo de aquisição, que é o custo para gerenciar o pedido; o custo de compra, que é a quantia a ser paga pelos itens e o Custo de propriedade, que são os custos de estoque, seguro e custo de oportunidade.

Para gerenciar o estoque, podem-se utilizar diversas técnicas. Pode-se fazer o pedido por um baixo número de peças. Determinando-se um número de peças mínimo, e sempre que for atingido este número, faz-se um novo pedido. Isto aumenta o custo do gerenciamento de compra e controle de qualidade. Pode-se também fazer um pedido por tempo fixo. Aqui, as datas dos pedidos são fixadas com antecedência mas as quantidades pedidas variam de acordo com a necessidade. A vantagem é que simplifica a compra, o gerenciamento da compra, o controle de qualidade e a estocagem. A desvantagem é que a empresa pode ficar sem estoque em caso de um crescimento inesperado de demanda. Um outro tipo de pedido pode ser o pedido agendado fixo. Aqui a data e a quantidade do pedido são pré-determinadas. Neste caso corre-se o risco de ficar sem estoque, caso o intervalo entre pedidos seja grande, ou com excesso, em caso de intervalo pequeno.

A respeito da reposição de um equipamento, por quanto tempo deve-se manter uma máquina antiga quando os custos com manutenção estão crescendo continuamente? Assumindo que se pode substituir uma máquina ou outro equipamento por um idêntico, tem-se **(LYONNET, 1991)**:

$$C_m = \frac{A + \sum C_x - R_y}{x} \tag{2.12}$$

Onde:

A = preço de aquisição do equipamento.

C_x =Custo total após período x anos, custo de operação + manutenção + custos de tempo parado.

R_y =Custo de revenda do equipamento após um período y anos.

C_m =Custo total médio por unidade de tempo.

x =Períodos em anos.

Para se encontrar o melhor momento para a venda, é necessário elaborar uma tabela com os valores R_y e C_x para cada período. Com estes dados, pode-se calcular o custo para cada período utilizando-se a equação (2.12). O período ideal de venda é o que apresentar o menor valor C_m calculado.

2.2.5 Métodos para análise da manutenção

Análise da árvore de falhas

Segundo **KUMAMOTO e HENLEY (1996)**, os principais objetivos da árvore de falhas são:

a) Direcionar a análise para eliminar as falhas.

b) Apontar os aspectos do sistema importantes para evitar cada modo de falha.

c) Fornecer um auxílio gráfico para dar maior visibilidade às falhas.

d) Fornecer opções para uma análise quantitativa e qualitativa do sistema.

e) Permitir que o analista se concentre em uma falha de cada vez.

f) Fornecer uma visão detalhada do comportamento do sistema.

Esse é um procedimento lógico que começa com uma falha ou uma falha em potencial e trabalha "para trás", com a finalidade de identificar todas as possíveis causas e, portanto, as origens desta falha.

Segundo **LYONNET (1991)**, a árvore de falhas aplicada à manutenção facilita o aperfeiçoamento do projeto, oferece um diagnóstico rápido e estabelece uma logística melhorada. Pode-se utilizar a análise de modos e efeitos das falhas para auxiliar na elaboração da árvore de falhas. A principal vantagem desse método em relação ao FMEA, segundo **KUMAMOTO e HENLEY (1996)**, é que essa análise se restringe somente à identificação das causas que levam a uma determinada falha, possibilitando aos funcionários um entendimento rápido e fácil das causas que levam a cada modo de falhas.

A árvore de falhas é um tipo de análise dedutivo, cuja aplicação requer profundo conhecimento nos diferentes modos de falha de cada componente.

Ela é constituída de ramificações conectadas por dois tipos de nós: nós **E** e nós **OU**. As ramificações abaixo de um nó **E** precisam ocorrer simultaneamente para que o evento acima do nó ocorra. Somente uma das ramificações abaixo de um nó **OU** precisa ocorrer para que o evento acima do nó ocorra. A figura 2.8 é um exemplo da árvore de falhas.

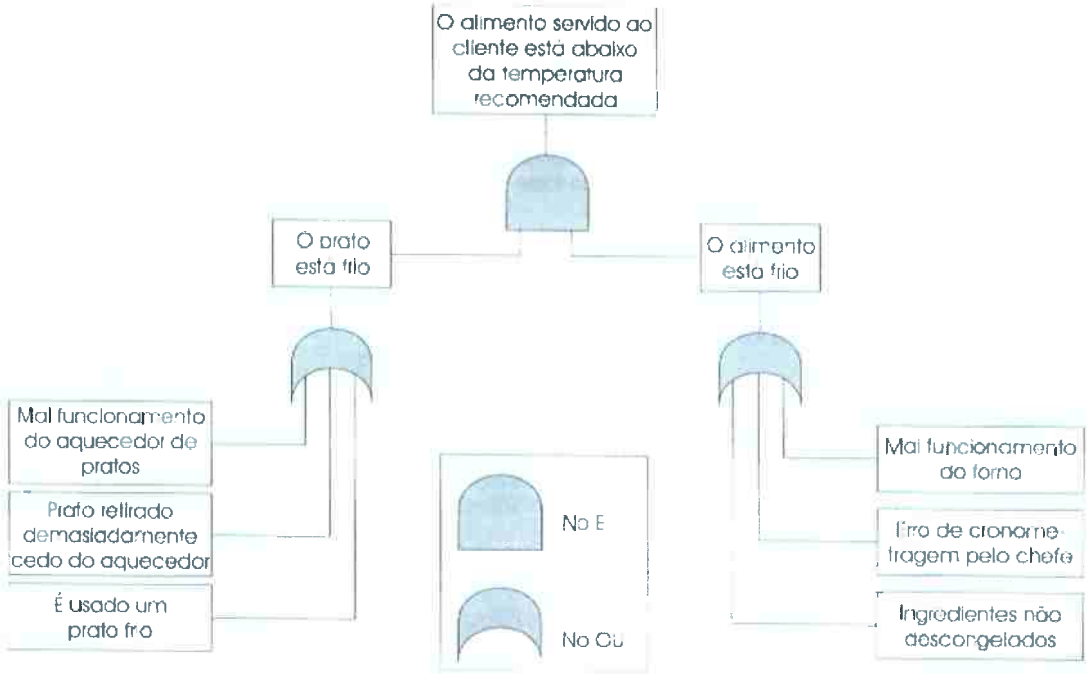

Figura 2-8 – Análise de árvore de falhas para refeição fria servida aos clientes (SLACK; CHAMBERS; JOHNSTON, 2001)

Análise ABC

Este tipo de análise é uma ferramenta para garantir que a manutenção seja feita da maneira mais eficiente possível **(SLACK; CHAMBERS; JOHNSTON, 2001)** . Esta análise classifica as falhas em termos de custo, criando uma ordem de prioridade para as ações a serem tomadas. Este método consiste em fazer uma lista dos equipamentos da máquina em ordem decrescente de custo da manutenção, com o número de falhas de cada um, e criar uma soma cumulativa dos custos de cada falha. A seguir, os dados podem ser colocados em uma tabela de 7 colunas, com os seguintes dados: número da peça (i), custo da falha (C_i), custo acumulado das falhas ($soma(C_i)$), custo acumulado em relação ao custo total ($\frac{soma(C_i)}{C_t}$),

número de falhas(f_i), número acumulado de falhas($soma(f_i)$), número acumulado de falhas em relação às falhas totais($\frac{soma(f_i)}{f_t}$). Desta forma, é possível saber quais falhas devem ser priorizadas e em quantos porcento a eliminação destas falhas reduziria o custo de parada.

2.3 Considerações finais

Nesse capítulo foram apresentados diversos conceitos importantes relacionados à falhas e à manutenção. Alguns desses conceitos, como os métodos para a análise da manutenção, não serão utilizados na aplicação da metodologia de análise de máquinas automáticas mas foram incluídos no trabalho devido à sua importância nessa área. Da mesma forma foram acrescentados alguns conceitos como as três abordagens básicas para a manutenção e a metodologia de organização da manutenção, que demonstra a evolução da manutenção com a aplicação dos métodos japoneses de gerenciamento.

Os conceitos mais utilizados no decorrer do trabalho foram descritos nesse capítulo, que são o MTTF, MTTR, MTBF, disponibilidade e confiabilidade. São esses os parâmetros que poderão quantificar as melhorias aplicadas em cada máquina e comparar os resultados obtidos com a alteração do projeto, visando a mantenabilidade, com os dados relacionados à concepção anterior ("antiga") da máquina.

Um outro conceito que irá auxiliar bastante o trabalho, porém de forma qualitativa, será a análise do tipo FMEA, que apresentará os principais modos de

falhas de cada subsistema e suas causas. Esse método será muito importante no capítulo 5, no momento de decidir o que será melhorado em cada subsistema da máquina automatizada para locação de DVDs.

Por fim, um outro conceito que será utilizado no capítulo 5 serão os tempos de manutenção, que irão auxiliar na previsão do MTTR dos subsistemas a serem modernizados.

3 Projeto para Mantenabilidade

3.1 Definição

O conceito de mantenabilidade foi desenvolvido logo no início da revolução industrial, quando se procurava manter o maquinário trabalhando de forma ininterrupta (como ocorre nos dias de hoje). A mantenabilidade iniciou-se como uma série de regras e linhas de ação, desenvolvidas em resposta às exigências das equipes que executavam a manutenção dos produtos que haviam sido projetados e fabricados e que já estavam em operação e necessitavam ser submetidos à ações de manutenção.

Normalmente, pode-se definir a mantenabilidade da seguinte forma: a mantenabilidade é uma característica inerente do projeto do sistema ou produto que está relacionada à facilidade, precisão, segurança e economia na execução das ações da manutenção **(BLANCHARD; VERMA; PETERSON, 1995).** Um conceito mais completo foi introduzido por **GOLDMAN e SLATTERY (1964)**: mantenabilidade é a combinação das características qualitativas e quantitativas do projeto e instalação, que permitem que os objetivos operacionais sejam cumpridos com o mínimo de gastos, incluindo mão-de-obra (número e especialização), equipamentos de teste, dados técnicos e estrutura, em condições normais de operação na qual a manutenção planejada e não planejada será executada. Diversos outros conceitos similares foram introduzidos por **JONES (1988)**, **NATIONAL INSTITUTE FOR OCCUPATIONAL SAFETY AND HEALTH (1993)** e **MIRSHAWKA e OLMEDO (1993)**; mas de forma simplificada, mantenabilidade é uma característica de projeto

que dá ao equipamento a possibilidade de ter uma manutenção em menos tempo e de maneira simplificada, podendo ser realizada com mão-de-obra menos especializada, com menos ferramentas e com custo reduzido. O projeto ideal é o que considera tanto os custos de manufatura quanto os custos de operação, minimizando o custo do ciclo de vida do equipamento (**BRALLA, 1996**). O conceito de projeto para mantenabilidade é uma tentativa para garantir que a preocupação com a mantenabilidade se inicie nos primeiros estágios de desenvolvimento e que estas características desejadas sejam incluídas já no projeto do sistema, segundo **JIANPING e YONGLI (1998)**.

A equação (3.1) é a equação da mantenabilidade para uma distribuição de probabilidades exponencial, e indica a probabilidade do sistema ser restaurado em um tempo t, **ROLIM (1997)** e **KIM et al (2002)**.

$$M(t) = 1 - e^{-\mu t} \tag{3.1}$$

Onde μ é a taxa média de reparo e é dada pela equação (3.2).

$$\mu = \frac{1}{MTTR} \tag{3.2}$$

A combinação da confiabilidade do equipamento, ou o tempo que ele leva para falhar, e a sua mantenabilidade, ou quanto tempo leva para ele ser reparado, estão diretamente ligados ao tempo que o equipamento poderá ser capaz de executar seu serviço. Por isso, não é incomum ver esses dois tópicos sendo tratados em conjunto - Confiabilidade e Mantenabilidade (R&M). De acordo com **MADU (2005)**, o gerenciamento da confiabilidade e da mantenabilidade está atraindo o interesse no mundo corporativo. A busca por continuar competitivo, fornecer serviços

rápidos e precisos, e a conexão eficiente com todos os membros da cadeia de fornecimento é em parte responsável por este interesse. Uma empresa não pode adotar uma estratégia de resposta rápida se seu sistema está indisponível ou possui uma baixa confiabilidade. Além disso, como muitas empresas lutam para eliminar os grandes custos de inventários e permanecerem enxutas no sistema de produção, existe uma necessidade crescente em garantir que o equipamento esteja com sua manutenção correta e altamente confiável. Segundo uma pesquisa realizada por **DHILLON e ALEEM (2000)** entre empresas canadenses, mais de 60% das empresas afirmaram ter implantado alguma medida de R&M e a figura 3.1 indica os motivos que levaram essas empresas a tomar essa decisão.

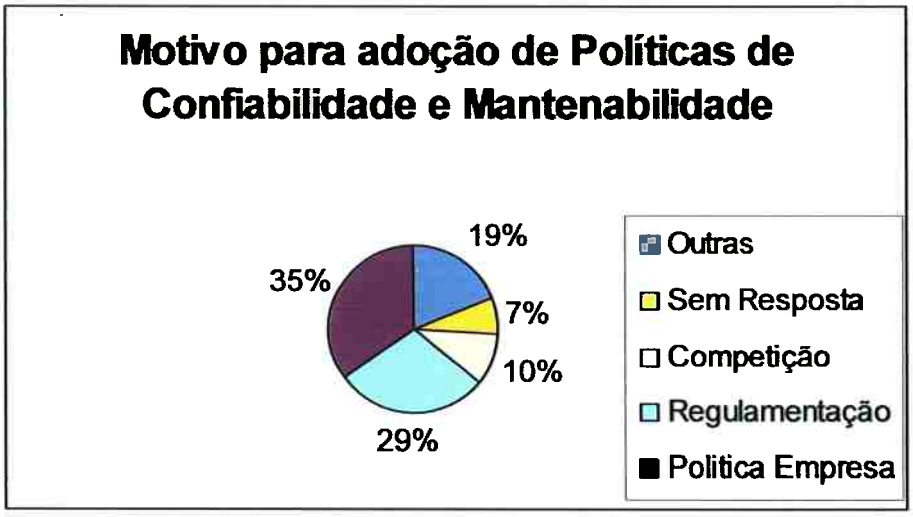

Figura 3-1 – Gráfico dos motivos das políticas de manutenção, **DHILLON e ALEEM (2000)**.

3.2 Primeiros princípios de Mantenabilidade

Os seguintes princípios de mantenabilidade foram introduzidos por **NIOSH (199-)** e **BRALLA (1996)**.

a) Deve ser uma característica do projeto e não uma opção adicionada.

b) Uma boa política de manutenção não resolve totalmente o problema quando o sistema é mal projetado.

c) Para a manutenção, é sempre melhor projetar um sistema simples.

d) Qualquer ponto onde haja ligação entre componentes, é um possível ponto de manutenção.

e) Todo ponto de manutenção deve ser visível diretamente (menos de 90 cm de distância dos olhos, não deve ser colocado atrás de componentes e não deve demandar esforço para ser visto), e totalmente acessível (ao alcance do braço de uma pessoa).

f) Todas as partes e componentes precisam ser repostas algum dia, o projeto deve ser feito levando isto em consideração.

g) Deve-se desenvolver procedimentos para a manutenção e resolução dos problemas, fornecendo indicadores específicos para cada tipo de erro do equipamento.

h) As instruções de manutenção devem ser escritas na própria máquina, para que o técnico se lembre e possa tomar decisões durante a manutenção. Componentes chave devem ser nomeados, o fluxo do processo deve ser mostrado, e todas as informações que sejam relevantes devem ser fornecidas.

i) Interfaces devem ser desenvolvidas para garantir que o componente só possa ser colocado da maneira correta. É importante que esta interface aceite componentes alternativos que desempenhem a mesma função.

j) O sistema deve suportar cargas inesperadas (mecânicas, elétricas, hidráulicas e pneumáticas), sem a ocorrência de falhas, perda de performance ou consequências negativas.

k) Quando um dos sistemas falhar, não deve provocar falha nos outros sistemas e não deve oferecer risco ao operador.

l) As falhas devem ser reconhecidas de maneira óbvia.

m) A manutenção deve ser feita apenas com ferramentas simples.

n) Modularização de componentes reduz o tempo para encontrar o erro, portanto, reduz o tempo de manutenção.

o) Como os usuários algumas vezes causam as falhas das máquinas, a máquina deve ser "à prova de usuários".

p) Tarefas de manutenção que confie aos técnicos o levantamento ou manuseio dos componentes pesados devem ser evitadas.

3.3 Vantagens de uma mantenabilidade bem planejada

A função da mantenabilidade é aumentar a eficiência e a segurança e reduzir o custo de manutenção. Embora não elimine a necessidade da manutenção, a mantenabilidade oferece as seguintes vantagens, segundo **NATIONAL INSTITUTE FOR OCCUPATIONAL SAFETY AND HEALTH (1993)**:

a) Redução do tempo necessário para a manutenção planejada e não planejada.

b) Minimizar a proporção da manutenção não planejada e oferecer acesso para inspeção dos equipamentos.

c) Redução dos erros de manutenção e instalações incorretas de equipamento.

d) Melhoramento da inspeção pós-manutenção.

e) Redução dos ferimentos provocados durante a manutenção.

f) Menor treinamento necessário para realizar a manutenção, devido à uma simplificação do processo.

3.4 Aplicando o conceito de mantenabilidade em máquinas

A seguir, serão apresentados os critérios utilizados para projetar sistemas, subsistemas, equipamentos e máquinas, visando garantir uma manutenção simples, eficiente e segura.

3.4.1 Unitização, modularização e padronização

Segundo o **U.S DEPARTMENT OF ENERGY (2001)**, unitização significa separar os equipamentos em unidades fisicamente e funcionalmente distintas, para permitir fácil remoção e recolocoção. Isso possibilita a divisão de responsabilidades na manutenção em diversos níveis. Modularização significa desenvolver

equipamentos em módulos que podem ser removidos ou inseridos facilmente em uma unidade.

Quando se unitiza ou modulariza um equipamento, procura-se obter como resultado o aumento da eficiência na recolocação dos equipamentos; a possibilidade de executar testes e verificação para cada unidade, facilitando a identificação das unidades com defeito; reduzir o tempo de parada; fornecer fácil acesso aos componentes; permitir um alto grau de padronização; e simplificar o projeto de novos equipamentos, utilizando componentes já desenvolvidos.

Deve-se dividir o equipamento em módulos uniformes e que possuam uma funcionalidade comum. Desta forma, tem-se um uso eficiente do espaço e menor interação entre as unidades. Com isso, as unidades podem ser removidas independentemente, o que garante uma rápida e segura remoção e recolocação. Também é importante que os módulos sejam pequenos e leves, desta forma todo o trabalho pode ser feito por apenas um técnico. Um exemplo desta divisão pode ser visto na figura 3.2.

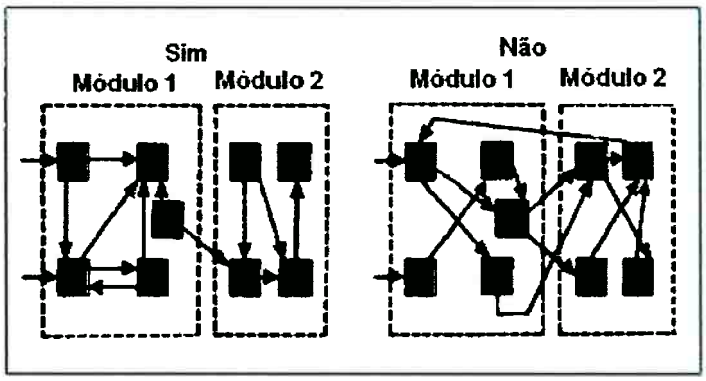

Figura 3-2 – Independência funcional de unidades em um equipamento, U.S. DEPARTMENT OF ENERGY (2001).

Outra característica importante é em relação aos testes, deve-se projetar de forma que o teste operacional de cada módulo possa ser feito de forma independente, sem a necessidade de calibração após a recolocação.

De acordo com o **U.S DEPARTMENT OF ENERGY (2001)**, deve-se considerar o uso de módulos descartáveis quando a manutenção não é possível ou quando o custo da manutenção supera o próprio custo do módulo. Deve-se analisar as vantagens e desvantagens para escolher a melhor solução, de acordo com a tabela 3.1.

Tabela 3-1 – Vantagens e desvantagens dos módulos descartáveis, U.S DEPARTMENT OF ENERGY (2001).

Vantagens:	Desvantagens:
1-Economizar tempo de reparo, ferramenta, estrutura e mão-de-obra.	1-Aumento dos módulos de reposição, que precisam sempre estar à mão.
2-Projeto mais confiável, durável, menor, mais simples, mais leve.	2-Menos dados gerados pela manutenção, para ajudar no melhoramento do projeto.
3-Menor número de peças reserva.	3-Problemas para alterar o projeto, porque estes módulos não podem ser modificados.
4-Resolução de problemas se torna mais concisa e menos difícil.	4-Performance e confiabilidade reduzida devido aos esforços da produção para manter os módulos com baixo custo, para justificar a disposição dos mesmos.
5-Uso de técnicas de isolamento do sistema que o torna mais confiável.	
6-Aumento de padronização e permutabilidade dos módulos e montagens.	

3.4.2 Leiaute, montagem e configuração

O leiaute, a montagem e a configuração devem ser projetados para aumentar a mantenabilidade do equipamento e do sistema, segundo **NATIONAL INSTITUTE FOR OCCUPATIONAL SAFETY AND HEALTH (1993)**.

O leiaute se refere ao arranjo geral e à colocação das unidades e componentes em um sistema. Montagem se refere ao modo de anexar e posicionar os componentes. Configuração é o método usado para colocar sistematicamente unidades ou componentes.

Devem satisfazer a unitização e a modularização, minimizar a movimentação durante a verificação e ser organizado de maneira que a manutenção não necessite da remoção de equipamentos. Os componentes devem ser colocados de maneira a minimizar a possibilidade de danos ao equipamento e ferimento aos técnicos. Deve ser configurado com espaço interno suficiente e limpo para que os técnicos não se machuquem e os componentes não estraguem durante a inspeção, manutenção, remoção e recolocação. Os técnicos devem ser protegidos de equipamentos que geram calor, dispositivos de alta corrente. do potencial elétrico e do calor e frio excessivos. Deve ser fornecido um local para colocação de equipamento de segurança na máquina. O equipamento deve ser projetado "à prova de falhas". Pontos de checagem, ajuste de cabos de conexões, etiquetas e ferramentas necessárias devem ser colocadas em pontos ao alcance e na vista dos técnicos. Em áreas de acesso frontal e traseiro, ou superior e inferior, devem ser utilizadas superfícies inclináveis, como indicado na figura 3.3.

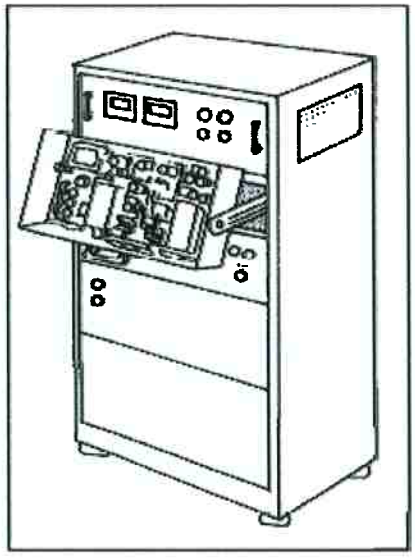

Figura 3-3 – Exemplo de superfície inclinável (U.S DEPARTMENT OF ENERGY, 2001).

Devem ser levados em consideração para a escolha da montagem dos componentes a frequência que serão removidos para manutenção ou recolocação, a acessibilidade aos outros componentes que possam ser afetados, o tamanho e o peso dos componentes a serem montados, quanto espaço será necessário para o acesso, remoção e recolocação dos componentes ou para uso de equipamentos de teste e ferramentas, e a manutenção preventiva para os componentes instalados.

Deve-se projetar de maneira a evitar que componentes sejam acidentalmente invertidos, mal colocados ou mal alinhados durante reparo ou instalação. O projeto deve tornar os erros fisicamente impossíveis, codificando, nomeando ou assinalando a orientação dos componentes para montagem correta, fornecendo suportes assimétricos, para evitar montagem incorreta, fornecendo suportes laterais que permitam a montagem em uma unica posição, fornecendo furos ou pinos de alinhamento assimétricos, para evitar a montagem incorreta, como indicado na figura 3.4.

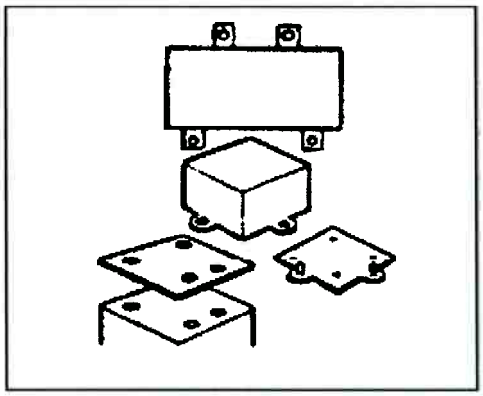

Figura 3-4 – Design livre de erros (U.S DEPARTMENT OF ENERGY, 2001).

Na relação entre os componentes, componentes similares devem ser agrupados ou aproximados no arranjo. Deve-se garantir que todos os componentes similares sejam localizados em um único local do equipamento. Partes que são prováveis de requerer manutenção ao mesmo tempo devem ser agrupadas em um mesmo local e os componentes devem ser agrupados de acordo com o tipo de manutenção requerido (limpeza por vapor, solvente, troca).

3.4.3 Acessibilidade

Acessibilidade se refere à facilidade com que um equipamento ou montagem pode ser alcançado para reparo, colocoção ou retirada. Acesso inclui portas de entrada, aberturas, janela para inspeção e lubrificação, pontos de serviço hidráulico e pneumático. Ou seja, o acesso deve ser fornecido para todos os pontos que possam requisitar teste, serviço, ajuste, remoção, colocação ou reparo.

O acesso deve ser projetado para possiblitar um reparo ou serviço simples. Portanto, deve fornecer espaço suficiente para o uso de ferramentas, para remoção e colocação dos componentes e exposição visual adequada à area de trabalho. Componentes críticos para o desempenho do sistema e segurança, que requerem manutenção rápida e também os que requerem maior número de acessos, devem ter prioridade. Membros estruturais e equipamentos permanentes não devem obstruir visualmente ou fisicamente o ajuste, serviço, remoção ou colocação de equipamentos ou outras tarefas de manutenção e uma área livre deve ser fornecida ao redor dos principais componentes do sistema. Os sistemas devem ser projetados de forma que os técnicos possam se mover livremente ao redor deles e assumir posições confortáveis de trabalho. Algumas posições, como as indicadas na figura 3.5, devem ser evitadas.

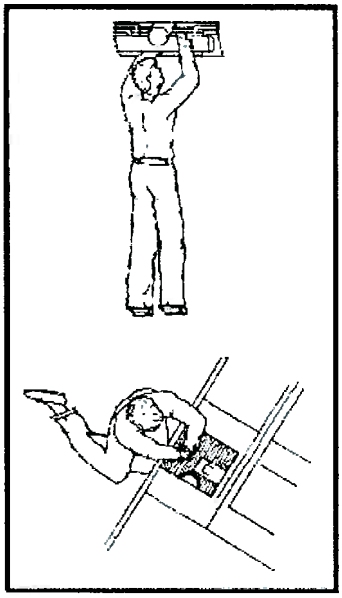

Figura 3-5 – Posições de trabalho desconfortáveis que devem ser evitadas, U.S DEPARTMENT OF ENERGY (2001).

Os equipamentos devem ser expostos (sem cobertura ou tampa) para manutenção sempre que permitido pela estrutura, pelo ambiente, pela operação e por questões de segurança. Isto se aplica principalmente a pontos de teste e de serviço, controles de manutenção e "displays", e "racks" montados.

Para determinar o tipo, forma, localização e o tamanho dos acessos vários fatores devem ser levados em consideração, como o local de operação e ambiente de trabalho, a frequência em que o acesso precisa ser usado, o tipo de manutenção que deve ser executado através deste acesso, o tempo requerido para a execução, os tipos de ferramentas e acessórios requeridos, a distância que o técnico tem que alcançar para a manutenção, a visão requerida para o técnico executar a ação e o perigo envolvido ou relacionado ao acesso.

3.4.4 Projeto de "rack" e gaveta

"Racks" e gavetas referem-se a saída, giro, deslizamento ou equipamentos com dobradiças projetados para otimizar o espaço de trabalho, ter uma área livre para uso de ferramentas e acessibilidade ao equipamento, reduzir a necessidade do técnico de manusear itens frágeis ou sensíveis, facilitar o manuseio ou posicionamento de itens pesados e facilitar a manutenção de itens que devem ser movidos frequentemente da posição de instalação para verificação, serviço ou reparo. Na figura 3.6 são apresentados alguns exemplos de "racks" e gavetas.

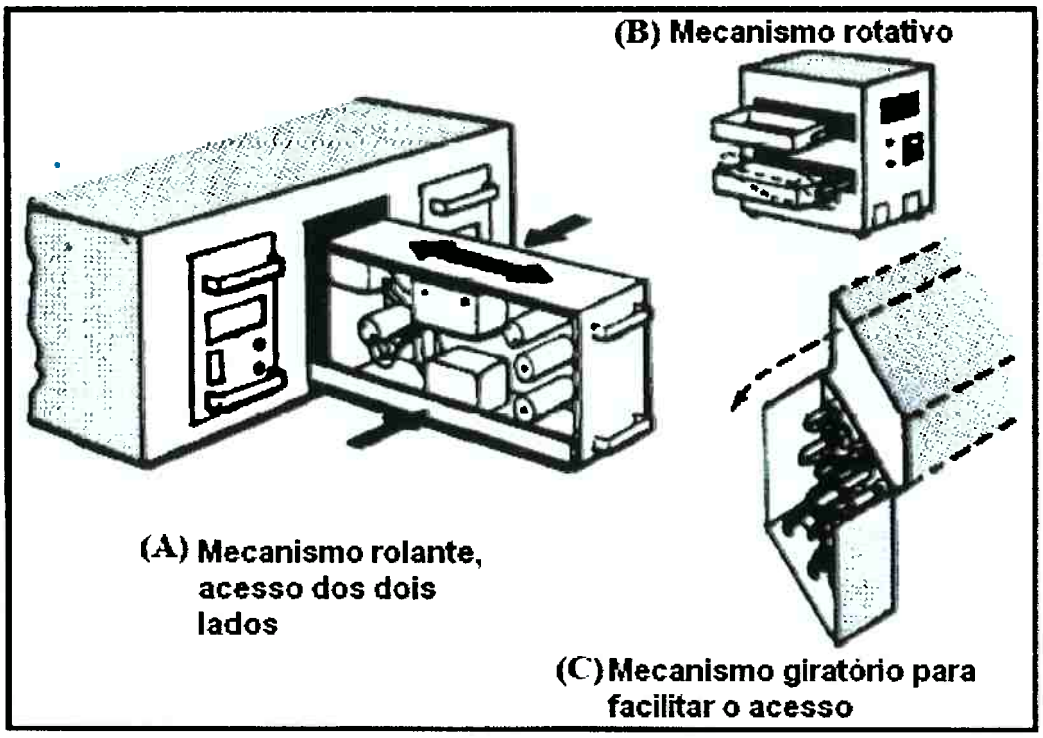

Figura 3-6 – Exemplos de projetos de "rack" e gavetas (U.S DEPARTMENT OF ENERGY, 2001).

Gavetas e "racks" devem exigir um número mínimo de operações para a abertura ou liberação e uma força pequena deve ser suficiente para abri-las. Uma montagem com rolamentos deve ser feita sempre que necessário e não devem alterar o centro de gravidade da máquina de maneira a tornar o console instável.

Onde o travamento for necessário, "racks" e gavetas devem travar automaticamente tanto no modo de operação quanto no modo de manutenção. O destravamento destes dispositivos de auto-travamento deve poder ser feito com apenas uma das mãos e o estado da gaveta ou do "rack" deve ficar óbvio na inspeção visual, se ele está travado ou destravado. Pode-se fornecer dobradiças, alças e trincos às gavetas e "racks", para facilitar a operação e o manuseio.

Descansos, limites, resguardos e mecanismos de retenção devem ser fornecidos como uma parte básica do chassis. Eles devem evitar que cargas pesadas inclinem o equipamento, permitir remoção completa e conveniente do equipamento e permitir que a montagem abra totalmente e permaneça aberta sem a necessidade de apoio externo. Além disso, para evitar um possível dano às partes sensíveis durante o movimento dos racks e gavetas, deve-se colocar resguardos e proteções onde for necessário. Coberturas, guarnições e protetores devem ser projetados para que os operadores não se machuquem por causa da alta temperatura, alta voltagem, alta corrente, pontas e partes rotativas ou outros perigos.

3.4.5 Pontos de teste e serviço

Os pontos de teste fornecem um meio conveniente e seguro de determinar o estado operacional do equipamento e de isolar os defeitos. Pontos de teste colocados estrategicamente fornecem sinais aos técnicos para checagem, ajuste ou solução de problemas.

Pontos de serviço fornecem um meio para lubrificação, drenagem, recarga e outros serviços essenciais para o funcionamento do equipamento.

Os pontos de teste e serviço devem ser projetados para serem compatíveis com verificação e procedimentos de serviço/teste. A necessidade de equipamentos de teste, acessórios, excaixes, conectores, ou outroscomponentes deve ser minimizada, e periódicos ou repetitivos testes dos componentes devem ser evitadas sempre que possível, **U.S DEPARTMENT OF ENERGY (2001)**. No grau possível, pontos de serviço e ajuste devem ser padronizados para reduzir a

diversidade de materiais de suporte e a possibilidade de que o material ou dispositivo errado seja usado erroneamente. Pontos de teste e serviço devem estar ao alcance e facilmente observável, ser conveniente para o uso com equipamentos de suporte de manutenção e compatíveis, em termos de espaço e liberdade, com o uso destes equipamentos. Não devem estar escondidos ou obstruidos por anteparos, suportes, outras unidades, de forma que a desmontagem, remoção ou suporte das outras unidades, fios, ou outros componentes no teste e serviço não seja necessária. Ferramentas especiais não devem ser necessárias para o teste. Devem ser fornecidas janelas para inspeção visual.

Os pontos de teste devem ser fornecidos de forma que não seja necessário remover as submontagens para verificação e diagnóstico. Quando equipamentos de teste externos são usados, a acessibilidade e a comodidade são as considerações principais. Os pontos de testes devem ser trazidos para a parte de trás, para que se possa fazer uma total indicação para cada ponto, marcando-os, sem que estas marcas atrapalhem a visão dos pontos. Devem ser agrupados em um painel central para facilitar a verificação, ser agrupados conforme as letras ou números que são usados para indicar o teste e devem ser localizados de forma que ofereçam uma checagem sequencial conveniente, como na figura 3.7.

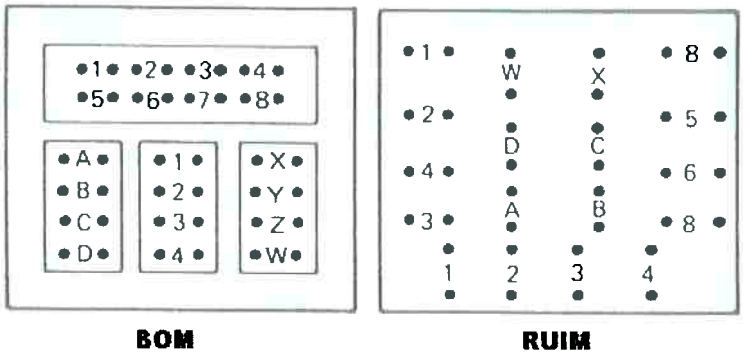

Figura 3-7 – Agrupamento dos pontos de teste, U.S DEPARTMENT OF ENERGY (2001)

Pontos de lubrificação devem ser projetados com um reservatório para que a frequência de lubrificação possa ser reduzida. Os mesmos combustíveis e lubrificantes devem ser usados nos componentes montados ou auxiliares e nos componentes principais. Se a lubrificação for necessária, pontos de lubrificação devem ser oferecidos, ao invés de desmontagem do equipamento. Se os pontos não forem possíveis, deve-se fornecer um fácil acesso para o equipamento. Para reduzir o número de pontos de teste e serviço devem ser usados indicadores embutidos, medidores de pressão, medidores diretos de nível de fluido, para checagem rápida sem a necessidade de equipamento complementar. Medidores de leitura direta são preferíveis a varetas de nível ou outros métodos de indicação. Um relatório e instruções para lubrificação devem ser incluídos quando possível. A necessidade de remoção de tampas, coberturas ou outras peças para obter acesso para pontos de lubrificação devem ser evitados. Drenos devem ser fornecidos em todos os tanques de fluido e sistemas, compartimento de fluidos ou caldeiras, sistemas de filtro, câmaras flutuantes ou outros itens que sejam projetados para conter fluidos, que de outra forma seriam de difícil remoção.

3.4.6 Projeto de equipamentos de teste

Quatro tipos de equipamentos de teste são usados durante a tarefa de manutenção, **U.S DEPARTMENT OF ENERGY (2001)**.

Equipamentos embutidos de teste, são uma parte integral do equipamento principal. Podem ser um complexo equipamento de verificação ou um simples voltímetro com pontas de prova externas. Suas principais vantagens são que eles minimizam o tempo de parada necessário para verificação, diminuem as

falhas ocasionadas pelo serviço e os possíveis danos ao mantenedor por permitir o isolamento sem a necessidade de pontas de prova no interior do equipamento. Suas principais desvantagens são que eles adicionam peso, preenchem espaços, são relativamente inflexíveis e podem aumentar o nível de manutenção requerida para o sistema.

Equipamentos de teste "go, no-go", fornecem apenas uma de duas alternativas para uma pergunta. Só dizem se um dado sinal está ou não dentro da tolerância. Suas principais vantagens são que eles fornecem uma informação clara e sem ambiguidade e sua leitura é usualmente fácil. As principais desvantagens são que requerem um circuito único para cada sinal a ser tratado, aumentando o número e a complexidade dos circuitos. Além disso, não oferecem muitas informações para a checagem de tensão e formas de onda.

Equipamentos de teste automático que verificam dois ou mais sinais em sequência sem a intervenção do técnico. O teste geralmente termina quando o primeiro sinal fora da tolerância é detectado. A principal vantagem é que eles podem fazer uma sequência de checagens com pouca ou nenhuma chance de omitir uma etapa. As desvantagens são que o custo, tamanho, peso e necessidade de manutenção são altos. Além disso, este tipo de equipamento é muito especializado, com pouca versatilidade.

Equipamentos de teste agrupados com uma única resposta. Por exemplo, uma luz pode ser acesa somente se um número diferente de sinais estão na tolerância. A principal vantagem é que reduz o número de "displays" que o técnico precisa ler, reduzindo assim os tempos de verificação e provavelmente reduzindo erros. A principal desvantagem é que não oferecem muitas informações para a verificação de tensão e formas de onda.Equipamentos de teste agrupados devem

indicar não somente se todos os sinais estão ou não dentro da tolerância. Também devem fornecer uma indicação de qual sinal está fora da tolerância.

3.5 Alocação da Mantenabilidade

A alocação da mantenabilidade é o processo para distribuir o nível de requisitos da mantenabilidade aos níveis mais baixos da montagem, ou seja, distribuídos do sistema para os subsistemas, de cada subsistema para seus componentes e finalmente, de cada componente para seus módulos, como na figura 3.8, **DEPARTMENT OF DEFENSE (1997)**.

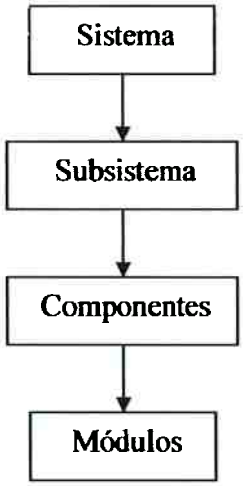

Figura 3-8 - Níveis de Montagem

De acordo com **DEPARTMENT OF DEFENSE (1997),** sistema é um grupo de subsistemas que é capaz de operar de maneira totalmente auto-suficiente no seu ambiente operacional, realizando um determinado conjunto de operações. Subsistema é um conjunto ou grupo de componentes que executa uma operação específica que independe dos outros subsistemas. Componente é uma parte ou item do subsistema que atua em conjunto com outros componentes para executar essa operação específica (a operação do subsistema) e módulo, ou montagem modular, são as partes pertencentes aos componentes que podem ser removidas sem a utilização de ferramentas.

A alocação da mantenabilidade é usada para auxiliar o aperfeiçoamento do sistema visando o cumprimento da meta da mantenabilidade. Este método é um método iterativo de gerenciamento, os valores obtidos devem ser avaliados e, caso não sejam razoáveis, a alocação deve ser revisada. Ao utilizar a alocação da mantenabilidade, duas hipóteses devem ser assumidas: Que a taxa de falhas seja constante ao longo do tempo e que todos os subsistemas e componentes estejam em série. A figura 3.9 é um exemplo de alocação da mantenabilidade. A meta do MTTR para o sistema é conhecida e os MTTRs dos subsistemas são estimados de forma que a sua soma resulte nesta meta. Depois, esta alocação é repetida dos subsistemas para os componentes, e dos componentes para os módulos até que todos os MTTRs sejam estimados. É óbvio que esta estimativa deve ser coerente com o tempo de reparo, ou seja, subsistemas com maior tempo de reparo devem ter um MTTR estimado maior.

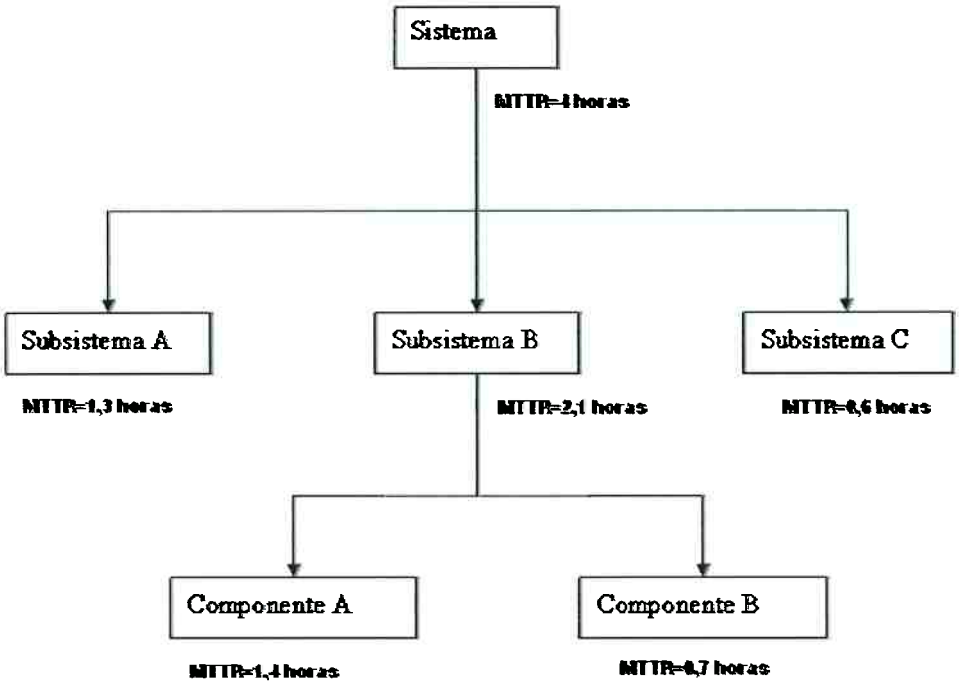

Figura 3-9 - Alocação da Mantenabilidade.

3.6 Previsão da Mantenabilidade

As previsões da mantenabilidade são usadas para auxiliar um projeto proposto a alcançar os requisitos da alocação da mantenabilidade e para avaliar o impacto da manutenção em diversas alternativas de projeto. Previsões também fornecem um método para medir o progresso do projeto em direção à sua meta e para identificar oportunidades para aumentar a mantenabilidade característica do projeto, segundo **KOWALSKI (1996)**.

Para prever a mantenabilidade, uma análise de baixo para cima deve ser usada, e esta análise consiste em estimar, no nível mais baixo, o componente, a parte ou a medida do modo de falhas e então combinar estes valores para obter

valores melhores para as montagens e para o sistema. Se a medida principal utilizada for o MTTR do sistema, a equação (3.3) pode ser utilizada para determinar o MTTR para o nível mais alto das montagens ou para o sistema.

$$MTTR_s = \frac{\sum_{i=1}^{n} q_i f_i MTTR_i}{\sum_{i=1}^{n} q_i f_i} \tag{3.3}$$

Onde:

q_i é o número de subsistemas idênticos.

f_i é o número esperado de falhas para o subsistema i.

$MTTR_s$ é o MTTR do sistema.

$MTTR_i$ é o MTTR do subsistema i.

Para estimar os MTTRs dos componentes, deve-se separar os tempos de manutenção de acordo com os tempos definidos anteriormente no item 2.2.3. Estes tempos podem ser estimados diretamente, previstos de acordo com experiências anteriores ou obtidos de banco de dados publicados e trabalhos padronizados. Esses números podem ser encontrados por exemplo em **DEPARTMENT OF DEFENSE (1966)**. A tabela 3.2 representa a previsão da mantenabilidade para um componente que possui 2 módulos. Pode-se verificar que foram colhidos alguns dados como modo de falha, taxa de falha e número de componentes para cada módulo. Em seguida, foi estimado cada um dos 5 tempos de manutenção (localização, diagnóstico, acesso, reparo e verificação). A soma destes tempos resultou no MTTR de cada módulo. Depois, utilizando os valores da tabela foi calculada a previsão do MTTR pela equação (3.3).

Tabela 3-2 - Previsão da Mantenabilidade, EBELING (1997).

	Modo de Falha	Taxa de Falha (10^{-6})	Numero Qi	Localização (horas)	Diagnóstico (horas)	Acesso (horas)	Reparo (horas)	Verificação (horas)	MTTRi (horas)	Taxa de Falha*qi *MTTRi (10^{-6})
Módulo1			2							
	A	0.121		0.20	0.30	0.20	2.20	0.03	2.93	0.71
	B	0.023		0.25	0.35	0.30	0.10	0.53	1.53	0.07
	C	0.008		0.20	0.80	0.30	0.41	0.05	1.76	0.03
	D	0.21		0.10	0.30	0.20	1.10	0.33	2.03	0.85
Subtotal		0.362								1.66
Módulo2			3							
	E	0.301		0.20	0.60	0.31	0.30	0.50	1.91	1.72
	F	0.0076		0.10	0.50	0.11	1.33	0.25	2.29	0.52
	G	0.045		0.25	0.50	0.05	1.50	0.20	2.50	0.34
Subtotal		0.422								2.58
Total		0.0784								4.24
			Qi*taxa_de_Falha=(2*0.362)+(3*0.422)=1.99					MTTR=4.24/1.99=2.13 horas		

3.7 Demonstração da Mantenabilidade

A demonstração da mantenabilidade é conduzida para verificar se as metas estabelecidas estão sendo atingidas. Esta demonstração deve ser conduzida em condições de operação e de ambiente similares às encontradas quando a máquina está sendo operada. Este teste consiste em simular falhas no sistema e executar a sua manutenção corretiva, anotando os dados principais, como tempo de manutenção e dificuldades encontradas durante o reparo, segundo **EBELING (1997)** e **DEPARTMENT OF DEFENSE (1973).**

Para encontrar um limite superior de $100(1-\alpha)\%$ para o MTTR, onde α é o grau de confiança desejado, deve-se encontrar um $MTTR_U$ tal que:

$$\Pr\{MTTR \leq MTTR_U\} = 1 - \alpha \tag{3.4}$$

Onde:

$MTTR_U$ é o valor a ser calculado pela equação 3.9.

Se $t_1, t_2, \ldots t_n$ são os tempos de reparo observados, então:

$$\bar{t} = \frac{\sum_{i=1}^{n} t_i}{n} \text{ e } s^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n} (t_i - \bar{t})^2}{n-1} \tag{3.5}$$

São respectivamente o tempo médio de reparo ($\bar{t}$) e a variância (S^2). Portanto, a estatística

$$t = \frac{\bar{t} - MTTR}{s/\sqrt{n}} \tag{3.6}$$

tem uma distribuição-t com n-1 graus de liberdade. Como a distribuição-t é simétrica em relação ao zero,

$$\Pr\{t < t_{\alpha,n-1}\} = \Pr\{t > -t_{\alpha,n-1}\} = 1 - \alpha \tag{3.7}$$

Onde $t_{\alpha,n-1}$ é obtido da tabela da distribuição-t.

Substituindo,

$$\Pr\left\{\frac{\bar{t} - MTTR}{s/\sqrt{n}} > -t_{\alpha,n-1}\right\} = 1 - \alpha \tag{3.8}$$

E rearranjando os termos,

$$\Pr\left\{MTTR < \bar{t} + \frac{s}{\sqrt{n}} t_{\alpha,n-1}\right\} = 1 - \alpha \tag{3.9}$$

Portanto, $MTTR_U = \bar{t} + \frac{s}{\sqrt{n}} t_{\alpha,n-1}$ fornece uma porcentagem de $100(1-\alpha)\%$ de limite superior para o MTTR. Se $MTTR_G$ é a meta da mantenabilidade , então a meta está sendo cumprida se $MTTR_U \leq MTTR_G$. Para obter uma boa aproximação, é necessária uma amostra de 20 a 30 tempos de reparo.

3.8 Considerações finais

Nesse capítulo foram vistos conceitos importantes como mantenabilidade, equação da mantenabilidade, seus primeiros princípios e quais as vantagens de sua aplicação.

A parte mais importante do capítulo foi a aplicação do conceito de mantenabilidade em máquinas, que fornece uma série de critérios utilizados para projetar sistemas e que será muito útil no capítulo 5, no levantamento de sugestões para o melhoramento da máquina. Dentre todos esses conceitos apresentados, as principais sugestões que foram aproveitadas para a máquina, conforme descrito no capítulo 5, foram a utilização de uma gaveta para melhorar o acesso, a utilização de um mecanismo rotativo e utilização de equipamentos embutidos de teste.

Em seguida, foi apresentado o conceito de alocação da mantenabilidade que, apesar de não ser utilizado diretamente na metodologia, é muito semelhante ao método utilizado para aumentar a disponibilidade do sistema.

Em seguida, foi apresentado o conceito de previsão da mantenabilidade, que foi utilizado no capítulo 5 para demonstrar quais dos tempos de manutenção eram os mais críticos para cada subsistema e também para prever o MTTR dos novos subsistemas, antes mesmo do protótipo ser construído.

Por fim, foi apresentado o conceito de demonstração da mantenabilidade, que também foi utilizado no capítulo 5 e cuja função é verificar, no protótipo, se o MTTR obtido após as mudanças serem aplicadas, está dentro do intervalo previamente estipulado no projeto.

4 Metodologia para Modernização das Máquinas Automáticas

4.1 Introdução

A metodologia a ser apresentada visa aumentar a disponibilidade do sistema como um todo. Para isto, o impacto que a disponibilidade de cada subsistema impõe ao sistema será estudado. Sabendo o impacto que cada uma das disponibilidades impõe ao sistema, será possível isolar os subsistemas que têm o maior potencial de ganho e escolhê-los para a modernização, ou seja, escolhê-los para que sejam alterados visando o aumento de sua disponibilidade. É importante salientar que a disponibilidade escolhida para o estudo é a disponibilidade inerente. Esta disponibilidade só leva em consideração o MTBF e o MTTR do sistema, desconsiderando os tempos de atraso logísticos, de espera, e de administração. Porém, para que a disponibilidade operacional seja avaliada, ao invés da disponibilidade inerente, basta substituir o MTTR por MDT nas equações que serão apresentadas na seção 4.2.4, sendo que o MDT, segundo **OLIVETO (1999)**, é dado por:

$$MDT = MTTR + MWT + MLT + MAT \tag{4.1}$$

Onde:

MDT = Tempo médio de indisponibilidade ("Mean Down-Time").

MWT =Tempo de espera médio ("Mean waiting time").

MLT = Tempo logístico médio ("Mean logistic time").

MAT = Tempo administrativo médio ("Mean administrative time").

O motivo de ter se escolhido a disponibilidade inerente é que a intenção é focar principalmente no melhoramento do MTTR, deixando os demais tempos em segundo plano.

4.2 Metodologia

A metodologia proposta é constituída por 6 passos, descritos na seqüência deste texto.

4.2.1 Definir claramente os subsistemas

O primeiro passo para analisar o sistema é definir claramente os subsistemas que serão analisados, de forma que parâmetros como MTBF, MTTR, Disponibilidade e outros dados importantes possam ser avaliados. Este passo é muito importante para que o sistema possa ser aprimorado, alterando apenas os subsistemas menos eficientes do ponto de vista da manutenção. Embora o método possa ser aplicado para partes mais simples que os subsistemas (como componentes e módulos), os resultados e o acompanhamento se tornam demasiadamente complicados. Portanto, os sistemas devem ser escolhidos como na figura 4.1, onde estão sendo mostrados os subsistemas de uma máquina de refrigerantes.

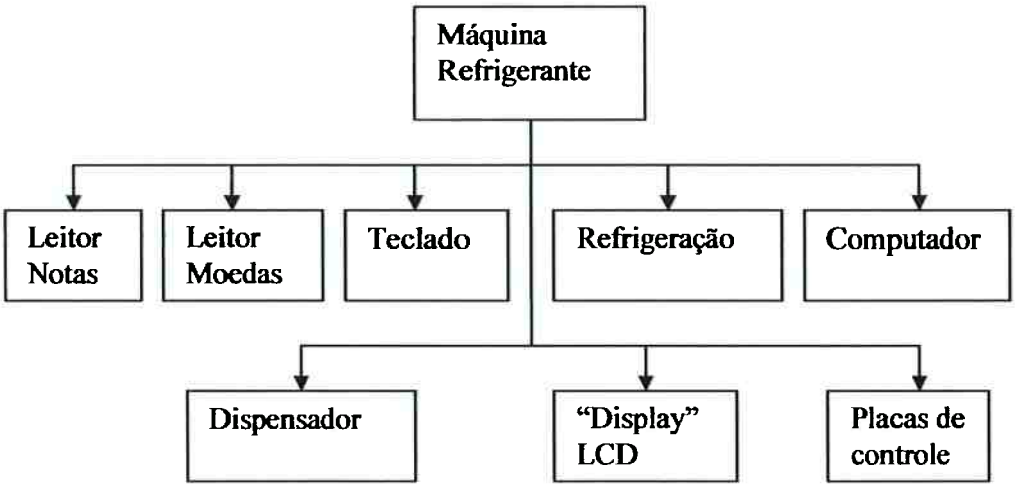

Figura 4-1 – Subsistemas em uma máquina de refrigerante

4.2.2 Coletar dados

A seguir, deve ser feita uma coleta de dados, reunindo o maior número de informações possíveis, com relatórios de manutenção, especificações da máquina e procedimentos para operação. Esta é a parte mais importante para a aplicação da metodologia porque se dados relevantes não forem levantados, ou forem levantados de maneira incorreta, todos os resultados a seguir ficarão comprometidos, incluindo o FMEA e os cálculos para os subsistemas. Informações de outras máquinas semelhantes podem ser aproveitadas em caso de falta de dados.

4.2.3 Preparar a análise FMEA

Para facilitar os passos seguintes, deve-se preparar também o FMEA para cada um dos subsistemas com seus principais modos de falhas. O FMEA é muito importante porque permite definir o efeito da ocorrência de uma falha sobre a operação do sistema, o qual pode continuar a operar mesmo com a degradação de sua situação ideal, segundo **CARDOSO (2000)**.

4.2.4 Aumentar a disponibilidade dos subsistemas

O principal objetivo deste método é a alocação dos requisitos de forma a garantir um aumento da disponibilidade do sistema para um nível desejado, com o mínimo de mudanças. A base deste método é um modelo matemático descrevendo as dependências entre a disponibilidade do sistema como um todo e a disponibilidade dos subsistemas separadamente. Este modelo permite testar a resposta do sistema para mudanças na disponibilidade dos subsistemas, fornecendo desta forma, quais os subsistemas mais indicados para o aprimoramento. Para este modelo foram feitas as seguintes considerações **(VINTR; HOLUB, 2001)**: o sistema proposto consiste de n subsistemas mutuamente independentes, todos os subsistemas são colocados em uma estrutura serial, a distribuição de probabilidades assumida é a de Poisson (utilizada em sistemas complexos e de alta confiabilidade), atrasos logísticos e manutenção preventiva não são considerados e os requisitos de disponibilidade estão claramente definidos.

A disponibilidade é descrita pela equação (2.8). Esta equação pode ser transformada para:

$$D = \left(1 + \frac{MTTR_S}{MTBF_S}\right)^{-1} \tag{4.2}$$

Onde $MTBF_S$ é o MTBF do sistema e $MTTR_S$ é o MTTR do sistema.

O próximo passo consiste em obter uma relação entre os parâmetros de confiabilidade do sistema e dos subsistemas. O MTBF do sistema pode ser calculado pela equação (4.3).

$$MTBF_S = \frac{1}{\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{MTBF_i}} \tag{4.3}$$

Onde $MTBF_i$ é o MTBF do subsistema i.

E o MTTR do sistema por:

$$MTTR_S = \frac{\sum_{i=1}^{n} \frac{MTTR_i}{MTBF_i}}{\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{MTBF_i}} \tag{4.4}$$

Onde $MTTR_i$ é o MTTR do subsistema i.

Desta forma, a relação entre a disponibilidade e os parâmetros dos subsistemas pode ser obtida pela substituição das equações (4.3) e (4.4) em (4.2).

$$D = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^{n} \frac{MTTR_i}{MTBF_i}} \tag{4.5}$$

A equação (4.5) pode ser transformada para:

$$D = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{MTTR_i}{MTBF_i} - 1 + 1 \right)} \tag{4.6}$$

E retirando o valor -1 do somatório, tem-se:

$$D = \frac{1}{1 - n + \sum_{i=1}^{n} \left(1 + \frac{MTTR_i}{MTBF_i} \right)} \tag{4.7}$$

Onde n é o número de subsistemas.

Agora, se os termos em parênteses da equação (4.2) forem chamados de D_i^{-1}, segue que, conforme a equação (4.8),

$$1 + \frac{MTTR_i}{MTBF_i} = D_i^{-1} \tag{4.8}$$

Onde D_i é a disponibilidade do subsistema i.

Então, a equação (4.7) pode ser transformada em:

$$D = \frac{1}{1 - n + \sum_{i=1}^{n} D_i^{-1}} \tag{4.9}$$

A equação (4.9) expressa a disponibilidade do sistema em função das disponibilidades dos subsistemas. Para o próximo passo, deve-se expressar a disponibilidade uniforme dos subsistemas. A disponibilidade uniforme pode ser considerada como o valor que satisfaz a equação (4.9), no caso específico em que todos os subsistemas possuem a mesma disponibilidade. Nesse caso, a equação (4.9) poderia ser escrita da seguinte forma:

$$D = \frac{1}{1 - n + \frac{n}{D_u}} \tag{4.10}$$

Onde D_u é a disponibilidade uniforme.

E isolando D_u, tem-se:

$$D_u = \frac{n.D}{1 + D(n-1)} \tag{4.11}$$

A equação (4.10) leva em consideração que todos os subsistemas possuem a mesma disponibilidade. Para uma solução mais complexa, devem ser utilizados pesos diferentes para cada subsistema:

$$w_i = \frac{D_i}{D_u} \tag{4.12}$$

Onde w_i é o peso em relação à disponibilidade de cada subsistema.

Se a disponibilidade do subsistema for expressa pela equação (4.12) e substituída na equação (4.9), então:

$$D = \frac{1}{1 - n + D_u^{-1} \sum_{i=1}^{n} w_i^{-1}} \tag{4.13}$$

Comparando as equações (4.10) e (4.13), pode-se encontrar uma relação entre os pesos e o número de subsistemas:

$$n = \sum_{i=1}^{n} w_i^{-1} \tag{4.14}$$

Os pesos também devem satisfazer a seguinte equação:

$$0 \leq w_i \leq \frac{D_i(\max)}{D_u} \tag{4.15}$$

Onde $D_i(\max)$ é a maior disponibilidade encontrada nos subsistemas.

Os valores dos pesos w_i devem ser atribuídos de forma que satisfaçam as equações (4.14) e (4.15). Existe uma forma mais simples de atribuir valores para os pesos, que é determinando a significância de cada subsistema. Para isto deve-se utilizar algum critério para atribuir valores de significância levando em consideração fatores como a complexidade do subsistema, o custo associado ao aumento da confiabilidade, a tecnologia utilizada e diversos outros. Levando em conta as máquinas automáticas, o critério escolhido leva em consideração três fatores: o primeiro é o fator S_{ai}, que indica a facilidade ou possibilidade: se é possível alterar a disponibilidade do subsistema e quanto mais fácil esta alteração, maior deve ser a pontuação deste item. O segundo é o fator S_{bi}, que indica o custo: quanto mais baixo o custo da alteração, maior deve ser a pontuação deste item. O terceiro é o

fator S_{ci}, que indica o impacto: subsistemas com disponibilidade menor terão um impacto maior no sistema, pois poderão ter um aumento maior nesta disponibilidade. Portanto, quanto menor sua disponibilidade original, maior deve ser a pontuação deste item.

Os três valores acima devem ser avaliados, com valores entre 0 e 10, e depois somados. O resultado desta soma será o valor de significância S_i, para cada subsistema. Com este valor, será possível calcular o peso w_i, pela equação (4.16).

$$w_i = \frac{S_i + a}{n} \sum_{i=1}^{n} (S_i + a)^{-1} \tag{4.16}$$

Onde a é um coeficiente de transformação que garante que a condição expressa pela equação (4.15) seja confirmada. O valor deste coeficiente pode ser determinado pela equação (4.17):

$$\frac{D_i(\max)}{D_u} = \frac{S_i(\max) + a}{n} \sum_{i=1}^{n} (S_i + a)^{-1} \tag{4.17}$$

Onde $S_i(\max)$ é o valor de significância mais alto e $D_i(\max)$ é o valor mais alto da disponibilidade dos subsistemas.

Infelizmente, a equação (4.17) não pode ser resolvida em todos os casos (ela depende do valor de n). Caso ela não ofereça uma solução, os pesos devem ser obtidos diretamente pela escolha de valores que satisfaçam as equações (4.14) e (4.15), simultaneamente.

A solução indicada anteriormente se aplica no caso em que a disponibilidade de todos os subsistemas será alterada. No caso em que a disponibilidade de alguns subsistemas se mantenha no seu estado original e em

outros ela seja modificada, tem-se da equação (4.9), onde o sistema consiste de n subsistemas onde somente k subsistemas terão sua disponibilidade modificada, que:

$$D = \frac{1}{1 - n + \sum_{i=1}^{k} D_i^{-1} \sum_{i=k+1}^{n} D_i^{-1}(o)} \tag{4.18}$$

Onde $D_i(o)$ é a disponibilidade original do subsistema i.

De acordo com esta mudança, a equação (4.11) para disponibilidade uniforme fica:

$$D_u = \frac{k.D}{1 + D(n - \sum_{i=k+1}^{n} D_i^{-1}(o) - 1)} \tag{4.19}$$

E a relação entre os pesos e o número de subsistemas modificados será:

$$k = \sum_{i=1}^{k} w_i^{-1} \tag{4.20}$$

E as equações (4.16) e (4.17) devem ser substituídas por:

$$w_i = \frac{S_i + a}{k} \sum_{i=1}^{k} (S_i + a)^{-1} \tag{4.21}$$

$$\frac{D_i(\max)}{D_u} = \frac{S_i(\max) + a}{k} \sum_{i=1}^{k} (S_i + a)^{-1} \tag{4.22}$$

Com estas equações será possível determinar os valores desejados da disponibilidade de cada subsistema que deve ser aprimorado, partindo do valor desejado da disponibilidade do sistema.

4.2.5 Decidir entre aumentar o MTBF ou diminuir o MTTR

Após o cálculo da disponibilidade ideal de cada subsistema, o objetivo do trabalho deve ser alcançar esta disponibilidade, alterando o projeto da máquina. Para alcançá-la, pode-se agir de duas formas, segundo **KNEZEVIC (1999)**: A primeira é aumentando o MTBF do sistema, ou seja, projetando sistemas que sejam extremamente confiáveis. Como explicado anteriormente, isto pode ser feito de diversas maneiras, como por exemplo, utilizando componentes com alta confiabilidade ou utilizando redundância. A segunda é diminuindo o MTTR, ou seja, projetando sistemas que, quando falhem, sejam rápidos para reparar. Várias medidas podem ser tomadas durante o projeto para alcançar este objetivo, algumas delas descritas na seção 3.4.

Com a intenção de facilitar o processo e diminuir o custo e o esforço, apenas uma das duas soluções será adotada. Para escolher a solução mais vantajosa, **EBELING (1997)**, elaborou a equação (4.23).

$$Custo = C_u + \frac{t_d}{MTBF}(C_f + C_v MTTR) \tag{4.23}$$

Onde:

C_u = Custo total do subsistema

t_d = Tempo de vida útil do equipamento em horas

C_f = Custo fixo da falha (como componentes extras)

C_v = Custo variável por hora parada (como custo de mão de obra)

Para descobrir qual parâmetro deve ser alterado, deve-se calcular o novo MTBF pela equação (4.24).

$$MTBF_i = MTTR_i(o)\left(\frac{D_i}{1-D_i}\right) \tag{4.24}$$

Onde $MTTR_i(o)$ é o MTTR original do subsistema i, e utilizar o valor encontrado na equação (4.23), substituindo o valor de MTTR por $MTTR_i(o)$ e o valor de MTBF por $MTBF_i$ calculado na equação (4.24).

Em seguida, deve-se calcular o novo MTTR pela equação:

$$MTTR_i = MTBF_i(o)\left(\frac{1-D_i}{D_i}\right) \tag{4.25}$$

Onde $MTBF_i(o)$ é o MTBF original do subsistema i, e utilizar o valor encontrado na equação (4.23), substituindo o valor de MTBF por $MTBF_i(o)$ e o valor de MTTR por $MTTR_i$ calculado na equação (4.25).

O valor a ser alterado deve ser o valor que apresentar o menor custo (Deve-se utilizar o MTBF se o primeiro custo for menor e o MTTR se o segundo for menor).

Esta solução garante que seja escolhida a opção que gera o menor custo para o aprimoramento. Caso a solução escolhida seja diminuir o MTTR, pode-se utilizar um método para garantir que o resultado se aproxime do esperado. Após a escolha das medidas a serem tomadas para diminuir o MTTR do subsistema, devem-se estimar os novos tempos de reparo da máquina (com as melhorias), divididos de acordo com a seção 2.2.3: Localização, Diagnóstico, Acesso, Reparo e Verificação. Deve-se montar uma tabela igual à tabela 3.2. A estimativa do MTTR do subsistema ($MTTR_{iest}$) será a soma destes cinco tempos. Ao estimar o MTTR diretamente, um erro grande pode ocorrer, porque a manutenção de uma máquina pode ser um processo complexo. Ao separar o MTTR em cinco tempos diferentes, os tempos a serem estimados são os tempos para realizar uma tarefa simples, o que geralmente diminui os erros encontrados. Além disso, os dados de tempo mais simples podem ser obtidos de outros equipamentos semelhantes, como outras máquinas existentes, ou pelo de banco de dados de manutenção. Outra vantagem é que será possível verificar quais as tarefas que exigem mais tempo e centralizar os esforços para diminuir o tempo desta tarefa, fazendo com que o MTTR desejado ($MTTR_i$) seja alcançado mais facilmente. Depois, o MTTR estimado por este método ($MTTR_{iest}$) deve ser comparado com o MTTR desejado para atingir a disponibilidade calculada. Se $MTTR_{iest} < MTTR_i$, a disponibilidade será provavelmente alcançada, e quanto melhor for a estimativa, menor a diferença entre a disponibilidade desejada e a disponibilidade realmente alcançada. Esta é uma poderosa ferramenta para projetar os subsistemas. Para que o valor desejado do MTTR ($MTTR_i$) seja alcançado, devem ser propostas soluções para diminuir cada um dos tempos perdidos em cada uma das tarefas. Desta forma, pode-se garantir que o subsistema terá um MTTR menor, e consequentemente, uma maior disponibilidade.

4.2.6 Testar os resultados obtidos

Após a realização dos passos 4.2.4 e 4.2.5, as mudanças propostas deverão ser implantadas. Então, o próximo passo será testar um protótipo para verificar se os objetivos foram alcançados para cada subsistema (esta análise deve ser feita somente para os subsistemas onde o MTTR for alterado). Isto deve ser feito com a demonstração da mantenabilidade, como foi explicado no item 3.7. Os erros devem ser simulados com uma amostra de no mínimo 20 tempos de reparo. Depois, deve-se garantir que o limite superior do MTTR não ultrapasse a meta do MTTR, utilizando a equação (22), para um α escolhido. Caso contrário, deve-se voltar aos passos 4.2.4 e 4.2.5 e aprimorar novamente os subsistemas.

As técnicas atuais usadas para demonstração da mantenabilidade são geralmente selecionadas dos métodos apresentados por **DEPARTMENT OF DEFENSE (1973)**. Geralmente, o número e o tipo de simulação a ser executada são calculados pelo apêndice A, e a manipulação matemática dos dados para aceitar ou rejeitar, está contida no apêndice B deste mesmo manual, **DEPARTMENT OF DEFENSE (1973)**.

Segundo **DAVEAU (1969)**, existem alguns problemas com as simulações das demonstrações da mantenabilidade: O primeiro é que o pessoal que gera os erros a serem simulados possui muito tempo para se comunicar com o pessoal de manutenção que irá executar o teste. O segundo é que o nível do pessoal de manutenção que executa o teste está bem acima do nível do pessoal que realmente fará a manutenção da máquina. O terceiro é que quando o pessoal de manutenção é de alta performance e esta com um local e em uma situação privilegiada, os reparos são feitos rapidamente e o último é que o pessoal da empresa contratada é que

seleciona a simulação da falha. Por isso, geralmente são escolhidas falhas óbvias e seguras, que são facilmente isoladas.

Portanto, o mesmo autor propõe três recomendações para melhorar o teste: coletar os MTTRs em campo quando o equipamento possuir um MTBF pequeno, executar o teste por funcionários de fora da empresa contratada (funcionários terceirizados) e reunir engenheiros de outras empresas para trabalhar em conjunto com engenheiros da empresa contratada na escolha das falhas a serem incluídas na demonstração.

Outras dificuldades ao se executar o teste foram levantadas por **BALABAN (1973)**. Segundo ele, uma grande dificuldade estava na diferença entre os ambientes de teste e os ambientes de campo. Como os requisitos do teste de demonstração da mantenabilidade são estabelecidos bem no começo do programa de desenvolvimento, a melhor maneira de se obter realismo é avaliar a performance dos subsistemas existentes utilizando dados de sistemas semelhantes já existentes. Segundo um estudo realizado por **COPPOLA e DEVEAU (1967)**, comparações de valores de MTTR de campo e MTTR de testes para sete sistemas revelaram grandes discrepâncias e os MTTRs de campo foram sempre melhores. Como principio geral, os valores especificados baseados nas metas operacionais e nas condições atuais devem ser corretamente ajustados para refletir o ambiente de manutenção em que a demonstração está ocorrendo.

4.2.7 Resumo da metodologia

O fluxograma da figura 4.2 representa um resumo da metodologia proposta na seção 4.2. Inicialmente é preciso definir todos os subsistemas da máquina, depois coletar os dados referentes a cada um deles. Com estes dados, deve ser executada a análise FMEA para cada subsistema, para auxiliar nas etapas seguintes. Com a intenção de aumentar a disponibilidade devem ser definidos os subsistemas mais críticos, que deverão ser alterados. Após calcular o valor desejado da disponibilidade dos subsistemas críticos, é preciso escolher de que forma essa disponibilidade será alcançada (aumentando o MTBF ou diminuindo o MTTR). Por último, caso a escolha seja para diminuir o MTTR, deve-se prever o novo MTTR pelo método da previsão da mantenabilidade e finalmente, verificar se esse valor foi obtido no protótipo, utilizando o método de demonstração da mantenabilidade.

Figura 4-2– Resumo da metodologia - Continua

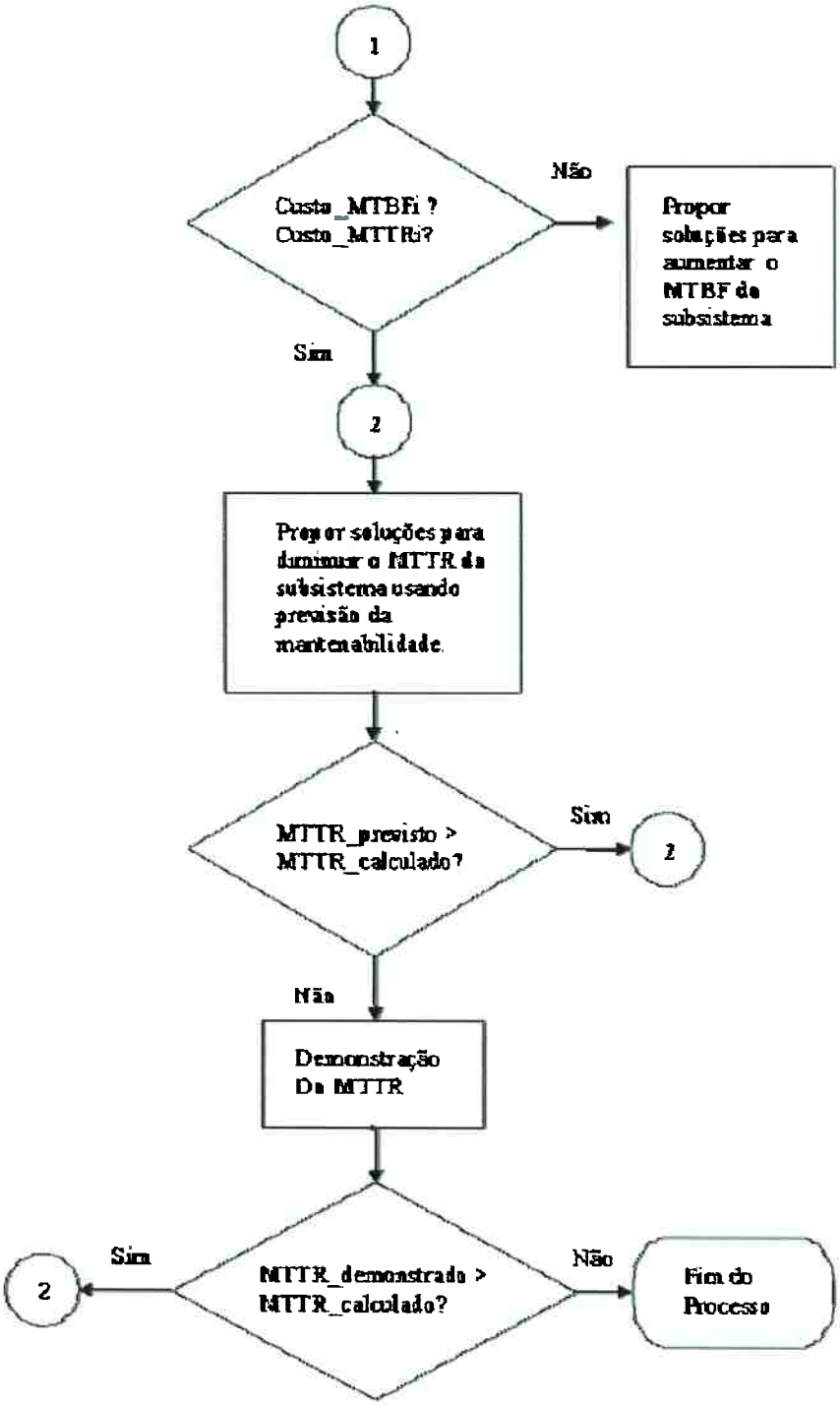

Figura 4.2 – Resumo da metodologia - Conclusão

5 Caso Exemplo: Aplicação da metodologia em uma máquina de alugar Dvds

5.1 Introdução

Antes de aplicar a metodologia desenvolvida para a máquina estudada neste texto, será apresentada uma pequena explicação sobre o seu funcionamento.

A máquina consiste numa máquina de locação e venda automática de DVDs, onde o cliente possui um cartão magnético para efetuar o aluguel, dispensando a necessidade de um atendente. O cliente insere o cartão, e escolhe o filme por uma tela de computador, e, caso o filme esteja disponível, o retira logo em seguida. Na devolução, ele recoloca o cartão e abrirá uma porta onde o filme deve ser devolvido. Os seguintes componentes fazem parte da máquina:

a) Leitor de notas: Para o cliente recarregar seu cartão quando o crédito tiver acabado. Atualiza automaticamente o banco de dados com o saldo do cliente.

b) Leitor de código de barras: Para garantir que o filme devolvido foi o correto. A caixa do Dvd possui um furo circular possibilitando a leitura do código de barras, que é colado no centro do dvd.

c) Teclado antivandalismo: Possibilita a navegação do cliente entre as telas do programa para a escolha do filme.

d) Leitor de cartões magnéticos: Possibilita o reconhecimento do cliente na máquina.

e) Estoque: Guarda os Dvds na máquina. Está localizado na parte inferior da máquina, tanto na parte da frente como na parte de trás. Capacidade total para 1428 Dvds.

f) Parte Mecânica: É a parte responsável pela busca do Dvd no estoque. É caracterizada por um sistema de busca Horizontal/Vertical com uma garra. Possui diversos sensores para localização do Dvd e para reconhecer o zero da máquina. Possui também uma esteira, por onde o cliente insere o filme devolvido e ele é entregue ao sistema mecânico para armazenagem.

g) Parte Elétrica: Consiste de 6 motores para a movimentação da parte mecânica, para a esteira e para a abertura da porta da esteira. Consiste também de "drivers" para estes motores, placas que se comunicam com os sensores e para comunicação com os computadores.

h) Computadores: Esta máquina possui dois computadores que rodam o software para os clientes escolherem o filme a ser alugado. Estes computadores se comunicam com todos os equipamentos descritos anteriormente. Possui também um computador para o dono da máquina administrar o negócio (fora da máquina).

O funcionamento da máquina é descrito no fluxograma apresentado na figura 5.1.

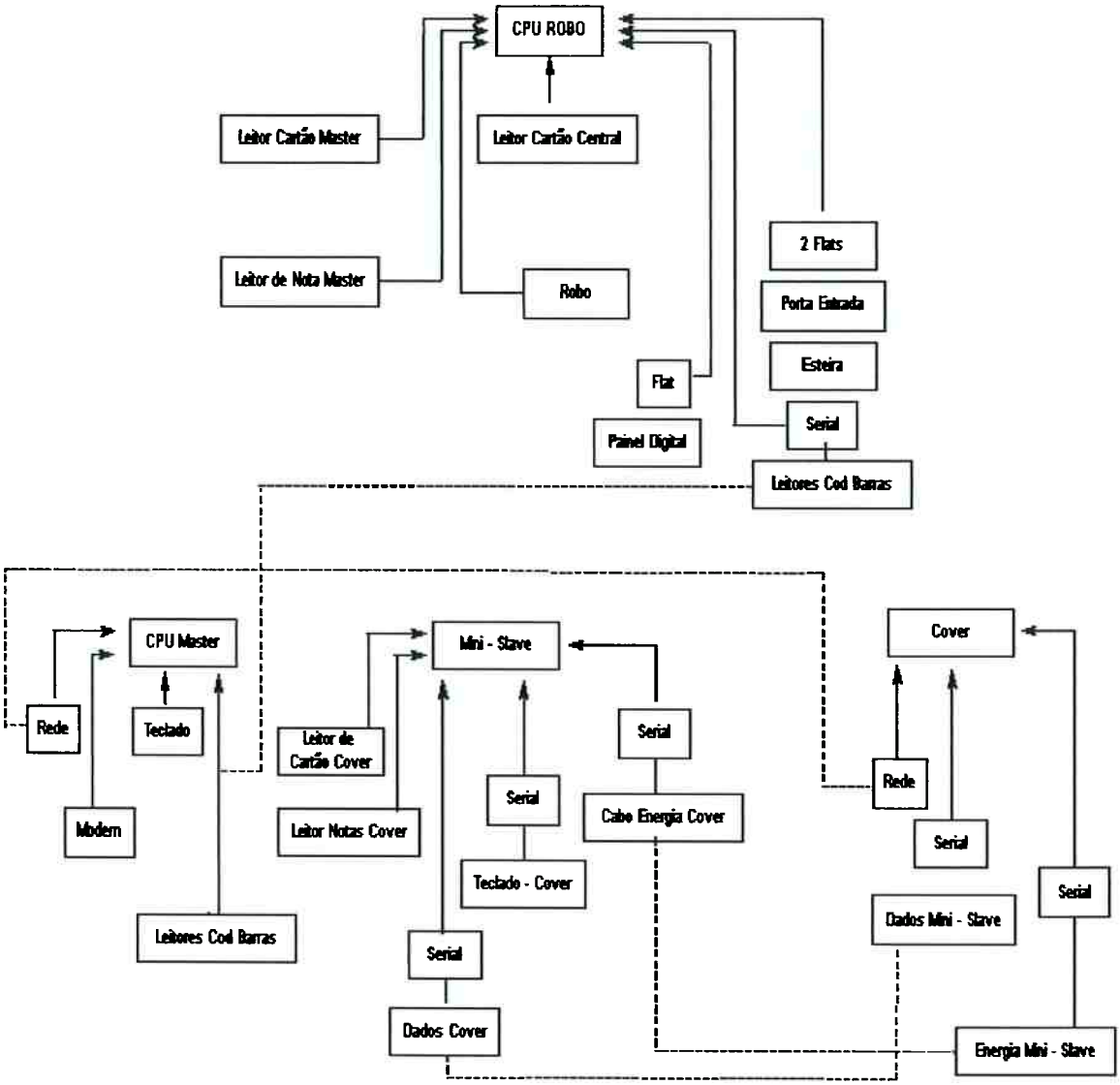

Figura 5-1-Fluxograma do modo de funcionamento da máquina atual

5.2 Metodologia

A metodologia aplicada para a máquina segue rigorosamente os seis passos descritos na seção 4.2. Para a definição dos subsistemas, coleta de dados, preparação do FMEA e levantamento de novas soluções, foram organizadas diversas reuniões entre a equipe de projeto. Essa equipe de projeto foi composta pelos técnicos Carlos Assunção e Hélio Ayuoki, que trabalham na empresa Amega com a assistência técnica deste tipo de máquina e pelo engenheiro Thiago Almeida Franco, autor do texto. As reuniões aconteceram na própria Amega e os pontos importantes foram discutidos e mostrados no laboratório, onde a empresa possui uma dessas máquinas. Além disso, os relatórios de manutenção foram discutidos detalhadamente para se chegar ao resultado demonstrado.

5.2.1 Definir claramente os subsistemas

A máquina deve ser dividida em subsistemas de maneira que se possam obter dados de manutenção sobre cada um deles. Para a máquina de Dvd, portanto, os subsistemas estão todos em série e são dados por: Pc mestre, Pc escravo, Pc administrador, Parte mecânica, software, parte elétrica, pinça, teclado, leitor de cartões e leitor de notas, tal como indicado na figura 5.2.

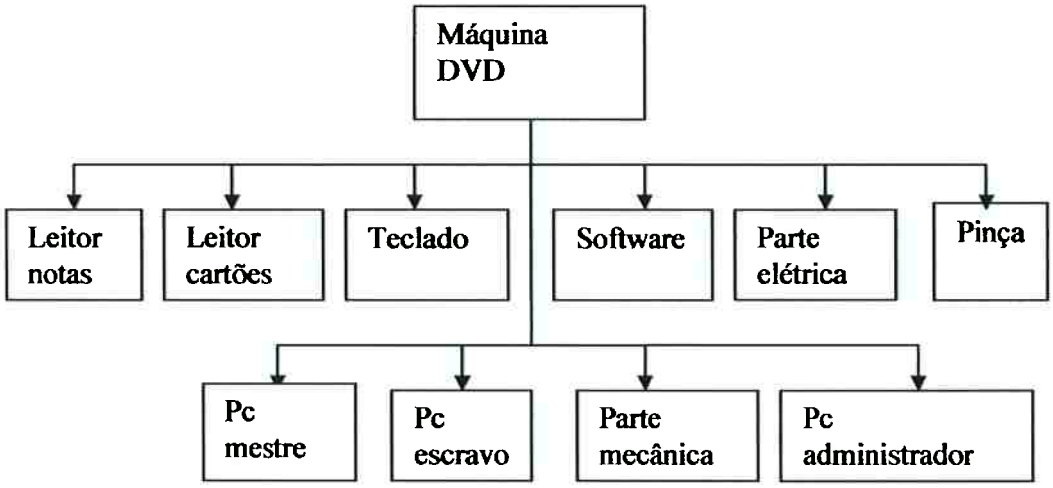

Figura 5-2 – Subsistemas da máquina de Dvds

5.2.2 *Coletar dados*

Foram coletados mais de 50 relatórios de manutenção em 14 máquinas nos últimos dois anos, estas informações foram compiladas para a determinação do FMEA e cálculo dos demais dados necessários. A tabela 5.1 apresenta o resumo dos relatórios de falhas.

Tabela 5-1 – Resumo dos relatórios de falhas da máquina de dvds.

Máquina	Tempo Operação(h)	Data Falha	TTR(h)	Equipamento	Técnico	Custo total
1	3600	05/09/05	3	Pc escravo	1	R$ 131.50
1		27/05/05	1.5	Pc mestre	1	R$ 67.00
1		27/05/05	1.5	Pc escravo	1	R$ 67.00
2	8640	02/05/06	1	Pc mestre	1	R$ 52.80
2		04/05/06	3	Pc mestre	2	R$ 242.80
2		03/07/06	3	Pc mestre	1	R$ 515.60
3	4320	25/05/05	1	Pc mestre	1	R$ 6.40
4	4320	07/09/06	1	Teclado	2	R$ 106.40
4		09/10/06	5	Parte Mecânica	2	R$ 426.40
4		10/10/06	6.4	Parte Mecânica	2	R$ 538.40
4		11/10/06	3.5	Parte Mecânica	2	R$ 306.40
4		12/10/06	8.5	Parte Mecânica	2	R$ 706.40
4		19/09/06	1.5	Parte Mecânica	2	R$ 146.40
5	2880	01/11/05	1	Leitor Cartões	1	R$ 62.40
5		28/12/05	1	Leitor Cartões	1	R$ 102.40
5		09/01/06	1	Leitor Cartões	1	R$ 1,374.40
5		29/10/05	1	Parte Elétrica	1	R$ 168.00
6	5760	25/08/05	0.5	Pc mestre	1	R$ 87.20
6		25/08/05	0.5	Pc Administrador	1	R$ 185.00
6		02/08/05	3	Pc mestre	1	R$ 514.40
6		02/06/05	0.3	Pc mestre	1	R$ 14.40
6		02/06/05	2	Parte Mecânica	1	R$ 82.40
6		03/10/05	1	Pc mestre	1	R$ 47.20
6		04/10/05	1	Pc mestre	1	R$ 47.20
6		05/10/05	1	Pc mestre	1	R$ 47.20
6		15/08/05	1	Pc mestre	1	R$ 47.20
6		16/05/05	1	Pc mestre	1	R$ 42.40
6		16/05/05	1	Pc escravo	1	R$ 42.40
6		16/07/05	3	Grupo Pinça	1	R$ 1,261.49
6		19/05/05	2	Parte Elétrica	2	R$ 2,532.58
6		19/08/05	1	Pc Administrador	1	R$ 47.20
6		22/12/05	1.5	Parte Mecânica	1	R$ 61.40
6		22/12/05	0.5	Pc mestre	1	R$ 22.00
6		25/08/05	1	Pc mestre	1	R$ 47.20
6		18/04/05	1	Parte Mecânica	1	R$ 47.20
7	4320	08/06/05	1	Software	1	R$ 64.00
7		14/05/05	3	Software	1	R$ 204.00
8	2160	06/06/05	1.5	Grupo Pinça	1	R$ 139.20
8		06/06/05	0.5	Leitor Cartões	1	R$ 46.40
9	3600	03/11/05	5	Grupo Pinça	1	R$ 166.00
9		05/07/05	5	Grupo Pinça	1	R$ 174.00
10	3600	22/09/06	1	Grupo Pinça	2	R$ 96.80
10		22/05/06	2	Pc escravo	2	R$ 608.60
11	4320	05/06/06	1	Software	1	R$ 24.00
11		14/08/06	2	Software	1	R$ 144.00
11		05/09/06	0.5	Software	1	R$ 24.00
11		05/10/06	0.5	Software	1	R$ 24.00
12	5040	01/06/06	1	Leitor Notas	1	R$ 104.00
12		09/05/06	2	Pc escravo	1	R$ 348.00
12		15/09/06	1.5	Teclado	2	R$ 150.00
12		15/09/06	1	Leitor Notas	2	R$ 74.80

Máquina	Tempo Operação	Data Falha	TTR	Equipamento	Técnico	Custo total
12	5040	18/05/06	1	Leitor Notas	2	R$ 24.00
12		06/06/06	1	Leitor Notas	2	R$ 24.00
12		26/07/06	1	Pc mestre	2	R$ 200.00
13	2160	17/05/05	5	Parte Mecânica	1	R$ 424.00
13		18/07/2005	3	Pc escravo	1	R$ 599.00
13		26/06/05	3	Pc mestre	1	R$ 264.00
14	13680	17/05/05	1	Software	1	R$ 48.80
14		24/05/05	1	Software	1	R$ 48.80
14		28/05/05	4	Software	1	R$ 168.80
14		30/06/05	1	Software	1	R$ 48.80
14		30/06/05	1	Parte Mecânica	1	R$ 48.80
14		04/10/06	2	Grupo Pinça	1	R$ 1,019.00
14		11/05/06	3	Leitor Cartões	1	R$ 796.40
14		11/10/06	1	Grupo Pinça	2	R$ 48.80
14		12/10/06	1.15	Parte Mecânica	2	R$ 54.80
14		13/10/06	3	Parte Mecânica	2	R$ 88.80
14		08/11/06	4	Grupo Pinça	2	R$ 1,385.00
14		08/11/06	3	Parte Mecânica	2	R$ 254.41
14		08/11/06	3	Pc mestre	2	R$ 335.00

A figura 5.3 representa a análise de Pareto dos dados da tabela, em relação ao número de falhas e a figura 5.4 representa a análise de Pareto em relação ao custo médio de cada falha.

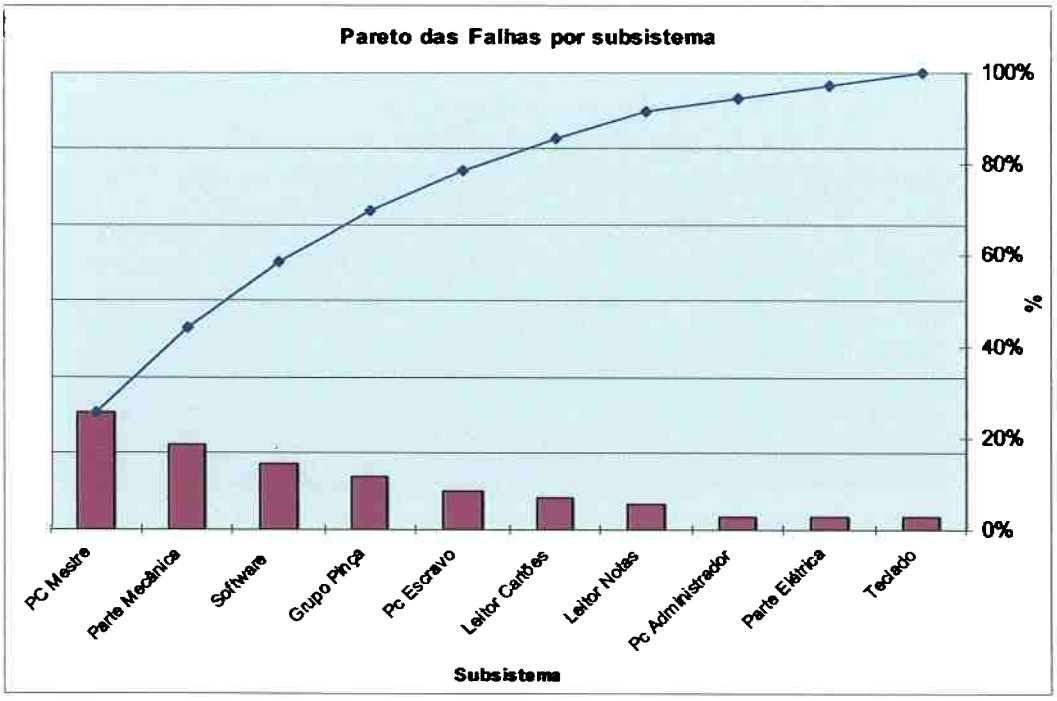

Figura 5-3 – Análise de Pareto das falhas por subsistema

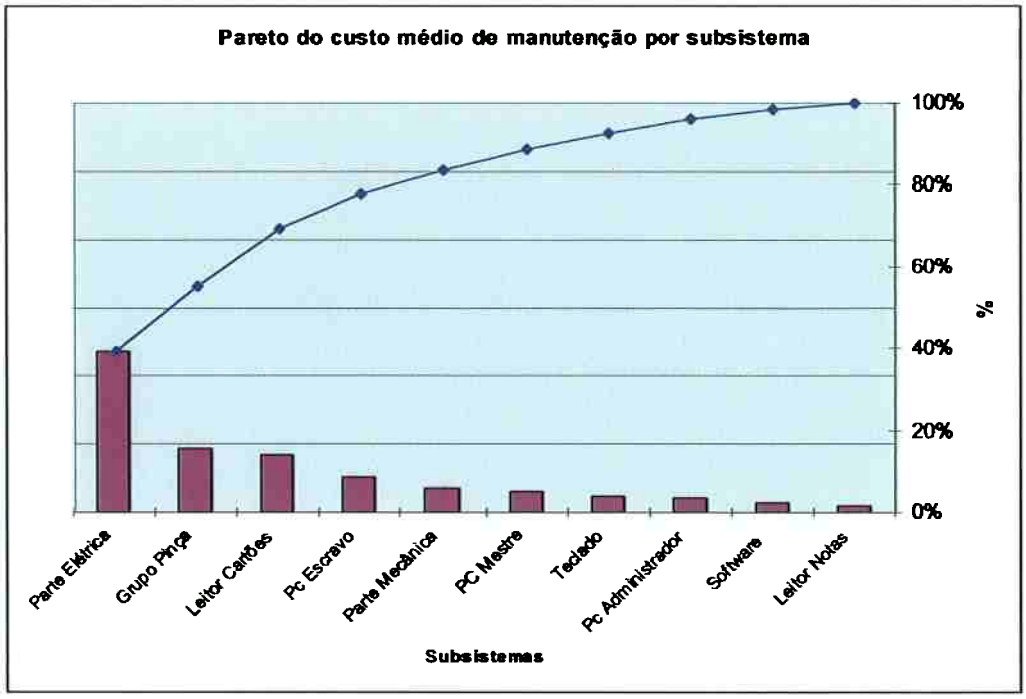

Figura 5-4 – Análise de Pareto do custo médio por subsistema

5.2.3 Preparar a análise FMEA

De acordo com a seção 4.2.3, após a coleta dos dados de manutenção, deve ser feita a análise FMEA para cada subsistema. Desta forma, a equipe de projeto pode se aproveitar das informações contidas na análise FMEA como fonte de dados para as próximas etapas da metodologia, como elaborar novas soluções para o aprimoramento do projeto e também para focar nos subsistemas mais críticos para o funcionamento da máquina (os subsistemas que possuem os efeitos mais importantes ou que possuem a maior freqüência de falha). Para a análise FMEA de máquinas automáticas foi utilizada uma escala de severidade de acordo com a tabela 5.2.

Tabela 5-2 – Escala de severidade para a análise FMEA

Severidade	Categoria	Descrição
1	Severidade pequena	Uma falha muito pequena que dificilmente seria percebida pelos clientes.
2	Severidade baixa	Uma falha muito pequena que não teria efeito importante no sistema.
3	Severidade pouco importante	Uma falha que teria algum efeito no sistema mas não chegaria a causar aborrecimento nos clientes.
4	Severidade moderada	Uma falha que causaria um pequeno descontentamento nos clientes.
5	Severidade importante	Uma falha que causaria um descontentamento considerável nos clientes.
6	Severidade muito importante	Uma falha que causaria muito descontentamento nos clientes.
7	Severidade alta	Uma falha que causaria uma grande deterioração no desempenho do sistema.
8	Severidade muito alta	Uma falha que afetaria a segurança, podendo causar ferimentos leves.
9	Severidade crítica	Uma falha que poderia causar ferimentos graves.
10	Severidade catastrófica	Uma falha que pode causar a morte.

A tabela 5.3 apresenta a análise FMEA para cada subsistema da máquina em estudo. Com esta tabela, pode-se perceber que os subsistemas mais críticos são os PCs, que possuem uma alta freqüência de falhas e seus efeitos também tem uma

grande importância. Desta forma, a equipe de projeto já sabe antecipadamente que terá que ter uma atenção especial com estes subsistemas.

Tabela 5-3 - FMEA para o PC mestre e o PC escravo.

Nomen-clatura	Função	Causas/Modos de Falhas	Efeitos	Método de Detecção das Falhas	Medidas preventivas/ corretivas	Severidade	Comentários
PC Mestre, PC Escravo e PC Administrador.	Rodar o software de locação (PC Mestre e Escravo) e o software de gerenciamento (PC administrador).	Queima da Fonte.	Corta a energia da máquina.	Máquina fica desligada.	Nenhuma.	6	O reparo deve ser feito imediatamente, pois a máquina não consegue executar nenhuma função.
PC Mestre, PC Escravo e PC Administrador.	Rodar o software de locação (PC Mestre e Escravo) e o software de gerenciamento (PC administrador).	Queima da placa mãe.	O PC para de funcionar.	Monitor fica desligado.	Nenhuma.	5	Caso a placa mãe do Pc mestre (escravo) queime, a máquina ainda funciona com o Pc escravo (mestre).
Leitor de Notas	Recarregar o crédito no cartão do sócio	Não reconhece as notas	A nota não é aceita	O cliente não consegue recarregar o cartão	Dispositivos anti pull back que evitam que as notas sejam retiradas de dentro da máquina	3	A máquina continua a executar normalmente as outras funções, portanto, essa não é uma falha muito importante.

Nomen-clatura	Função	Causas/Modos de Falhas	Efeitos	Método de Detecção das Falhas	Medidas preventivas/ corretivas	Severidade	Comentários
Leitor de Cartões	Identificar o cliente e o crédito deste cliente	Falha dos motores ou sensores	A máquina engole o cartão	O cliente não consegue inserir um novo cartão na máquina	Nenhuma.	6	Sem inserir o cartão, o cliente não consegue utilizar nenhum serviço da máquina.
Grupo Pinça	Pegar o Dvd no estoque e entregar para a esteira	Falha ao abrir/ fechar a pinça devido à quebra da engrenagem do minimotor.	O sistema não consegue retirar/colocar o Dvd no estoque	O Cliente não consegue retirar nem devolver o filme	Nenhuma.	7	Quando esta falha ocorre, a utilização da máquina pode danificar outros componentes.
Parte Mecânica	Realizar o movimento vertical e horizontal	Perda da posição de referência	A máquina perde a referência e não consegue chegar na posição correta.	A máquina não consegue pegar o Dvd e ele não é entregue ao cliente	Nenhuma.	6	Choques ou grandes movimentações da máquina fazem o sistema perder a referência de posicionamento.

Nomen-clatura	Função	Causas/Modos de Falhas	Efeitos	Método de Detecção das Falhas	Medidas preventivas/ corretivas	Severidade	Comentários
Software	Fornecer a interface ao cliente para a escolha dos filmes, e controlar os dispositivos da máquina	Falha na atualização do banco de dados	A máquina considera alguns filmes alugados como presentes ou alguns filmes presentes como alugados	O cliente não consegue alugar ou devolver o filme	Backup do banco de dados	7	Conforme o banco de dados vai aumentando, o número de problemas aumenta exponencialmente, por isso, é preciso fazer um "backup" e reiniciar o banco de dados regularmente.
Teclado antivandalismo	Possibilitar a interação entre o cliente e o software	Falha ao apertar o botão	Impossibilita a interação com o cliente	A máquina não responde quando o botão é apertado pelo cliente	Nenhuma.	4	O teclado pode falhar completamente ou a falha pode acontecer em apenas um dos botões.
Parte Elétrica	Controlar motores, sensores e outros dispositivos	Falha na placa eletrônica	Interrupção dos movimentos dos motores, falha na detecção por parte dos sensores	O Dvd não é entregue ao cliente	Nenhuma.	7	O reparo deve ser feito rapidamente para que a falha em uma placa não danifique outras placas em funcionamento.

5.2.4 Aumentar a disponibilidade dos subsistemas

Os dados encontrados nos relatórios de manutenção foram utilizados para calcular os valores necessários para dar seqüência à metodologia, de acordo com a seção 4.2.4. Nas tabelas 5.4 a 5.13 , os dados estão classificados por componente e o $MTTR_i$ de cada subsistema foi calculado pela equação (2.2), o $MTBF_i$ pela equação (2.3), para um tempo de operação de 68400 horas (soma das horas de operação do conjunto de 14 máquinas) e a disponibilidade original de cada subsistema ($D_i(o)$) pela equação (2.8).

Tabela 5-4 – MTTR, MTBF e D do Grupo Pinça

Máquina	Data Falha	TTR	Equipamento	Custo Manutenção
6	7/16/2005	3	Grupo Pinça	R$ 1,261.49
8	6/6/2005	1.5	Grupo Pinça	R$ 139.20
10	7/5/2005	5	Grupo Pinça	R$ 174.00
10	11/3/2005	5	Grupo Pinça	R$ 166.00
11	9/22/2006	1	Grupo Pinça	R$ 96.80
15	10/4/2006	2	Grupo Pinça	R$ 1,019.00
15	10/11/2006	1	Grupo Pinça	R$ 48.80
15	11/8/2006	4	Grupo Pinça	R$ 1,385.00

$$MTBF = \frac{Horas_Operação}{Numero_Falhas} \quad (2.3) \qquad MTBF_1 = \frac{68400}{8} = 8550h$$

$$MTTR = \frac{\sum_{i=1}^{n} T_{Ri}}{N} \quad (2.2) \qquad MTTR_1 = \frac{3+1.5+5+5+1+2+1+4}{8} = 2.81h$$

$$D = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (2.8) \qquad D_1(o) = \frac{8550}{8550+2.81} = 0.99967$$

Tabela 5-5 – MTTR, MTBF e D do Leitor de Cartões

Máquina	Data Falha	TTR	Equipamento	Custo Manutenção
5	11/1/2005	1	Leitor Cartões	R$ 62.40
5	12/28/2005	1	Leitor Cartões	R$ 102.40
5	1/9/2006	1	Leitor Cartões	R$ 1,374.40
8	6/6/2005	0.5	Leitor Cartões	R$ 46.40
15	5/11/2006	3	Leitor Cartões	R$ 796.40

$$MTBF = \frac{Horas_Operação}{Numero_Falhas} \quad (2.3) \qquad MTBF_2 = \frac{3 \times 68400}{5} = 41040h$$

Observação:As horas de operação foram multiplicadas por 3 porque a máquina possui 3 leitores de cartões.

$$MTTR = \frac{\sum_{i=1}^{n} T_{Ri}}{N} \quad (2.2) \qquad MTTR_2 = \frac{1+1+1+0.5+3}{5} = 1.3h$$

$$D = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (2.8) \qquad D_2(o) = \frac{41040}{41040+1.3} = 0.99997$$

Tabela 5-6 – MTTR. MTBF e D do Leitor de Notas

Máquina	Data Falha	TTR	Equipamento	Custo Manutenção
13	5/18/2006	1	Leitor Notas	R$ 24.00
13	6/1/2006	1	Leitor Notas	R$ 104.00
13	6/6/2006	1	Leitor Notas	R$ 24.00
13	9/15/2006	1	Leitor Notas	R$ 74.80

$$MTBF = \frac{Horas_Operação}{Numero_Falhas} \quad (2.3) \qquad MTBF_3 = \frac{2 \times 68400}{4} = 34200h$$

Observação:As horas de operação foram multiplicadas por 2 porque a máquina possui 2 leitores de notas.

$$MTTR = \frac{\sum_{i=1}^{n} T_{Ri}}{N} \quad (2.2) \qquad MTTR_3 = \frac{1+1+1+1}{4} = 1h$$

$$D = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (2.8) \qquad D_3(o) = \frac{34200}{34200+1} = 0.99997$$

Tabela 5-7 – MTTR, MTBF e D da Parte Elétrica

Máquina	Data Falha	TTR	Equipamento	Custo Manutenção
5	10/29/2005	1	Parte Elétrica	R$ 168.00
6	5/19/2005	2	Parte Elétrica	R$ 2,532.58

$$MTBF = \frac{Horas_Operação}{Numero_Falhas} \quad (2.3) \qquad MTBF_4 = \frac{68400}{2} = 34200h$$

$$MTTR = \frac{\sum_{i=1}^{n} T_{Ri}}{N} \quad (2.2) \qquad MTTR_4 = \frac{1+2}{2} = 1.5h$$

$$D = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (2.8) \qquad D_4(o) = \frac{34200}{34200+1.5} = 0.99996$$

Tabela 5-8 – MTTR, MTBF e D da Parte Mecânica

Máquina	Data Falha	TTR	Equipamento	Custo Manutenção
4	9/19/2006	1.5	Parte Mecânica	R$ 42.40
4	10/9/2006	5	Parte Mecânica	R$ 14.40
4	10/10/2006	6.4	Parte Mecânica	R$ 514.40
4	10/11/2006	3.5	Parte Mecânica	R$ 306.40
4	10/12/2006	8.5	Parte Mecânica	R$ 706.40
6	4/18/2005	1	Parte Mecânica	R$ 47.20
6	6/2/2005	2	Parte Mecânica	R$ 82.40
6	12/22/2005	1.5	Parte Mecânica	R$ 61.40
14	5/17/2005	5	Parte Mecânica	R$ 424.00
15	6/30/2005	1	Parte Mecânica	R$ 48.80
15	10/12/2006	1.15	Parte Mecânica	R$ 54.80
15	10/13/2006	3	Parte Mecânica	R$ 88.80
15	11/8/2006	3	Parte Mecânica	R$ 254.41

$$MTBF = \frac{Horas_Operação}{Numero_Falhas} \quad (2.3) \qquad MTBF_5 = \frac{68400}{13} = 5261.5h$$

$$MTTR = \frac{\sum_{i=1}^{n} T_{Ri}}{N} \quad (2.2) \qquad MTTR_5 = \frac{42.55}{13} = 3.27h$$

$$D = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (2.8) \qquad D_5(o) = \frac{5261.5}{5261.5+3.27} = 0.99938$$

Tabela 5-9 – MTTR, MTBF e D do Pc Administrador

Máquina	Data Falha	TTR	Equipamento	Custo Manutenção
6	8/19/2005	1	Pc Administardor	R$ 47.20
6	8/25/2005	0.5	Pc Administardor	R$ 185.00

$$MTBF = \frac{Horas_Operação}{Numero_Falhas} \quad (2.3) \qquad MTBF_6 = \frac{68400}{2} = 34200h$$

$$MTTR = \frac{\sum_{i=1}^{n} T_{Ri}}{N} \quad (2.2) \qquad MTTR_6 = \frac{1+0.5}{2} = 0.75h$$

$$D = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (2.8) \qquad D_6(o) = \frac{34200}{34200+0.75} = 0.99998$$

Tabela 5-10 – MTTR. MTBF e D do Pc escravo

Máquina	Data Falha	TTR	Equipamento	Custo Manutenção
1	5/27/2005	1.5	Pc escravo	R$ 67.00
1	9/5/2005	3	Pc escravo	R$ 131.50
6	5/16/2005	1	Pc escravo	R$ 42.40
11	5/22/2006	2	Pc escravo	R$ 608.60
13	5/9/2006	2	Pc escravo	R$ 348.00
14	18/07/2005	3	Pc escravo	R$ 599.00

$$MTBF = \frac{Horas_Operação}{Numero_Falhas} \quad (2.3) \qquad MTBF_7 = \frac{68400}{6} = 11400h$$

$$MTTR = \frac{\sum_{i=1}^{n} T_{Ri}}{N} \quad (2.2) \qquad MTTR_7 = \frac{1.5+3+1+2+2+3}{6} = 2.08h$$

$$D = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (2.8) \qquad D_7(o) = \frac{11400}{11400+2.08} = 0.99982$$

Tabela 5-11 – MTTR, MTBF e D do Pc mestre

Máquina	Data Falha	TTR	Equipamento	Custo Manutenção
1	5/27/2005	1.5	Pc mestre	R$ 67.00
2	5/2/2006	1	Pc mestre	R$ 52.80
2	5/4/2006	3	Pc mestre	R$ 242.80
2	7/3/2006	3	Pc mestre	R$ 515.60
3	5/25/2005	1	Pc mestre	R$ 6.40
6	5/16/2005	1	Pc mestre	R$ 47.20
6	6/2/2005	0.3	Pc mestre	R$ 87.20
6	8/2/2005	3	Pc mestre	R$ 47.20
6	8/15/2005	1	Pc mestre	R$ 47.20
6	8/25/2005	0.5	Pc mestre	R$ 47.20
6	8/25/2005	1	Pc mestre	R$ 47.20
6	10/3/2005	1	Pc mestre	R$ 22.00
6	10/4/2005	1	Pc mestre	R$ 200.00
6	10/5/2005	1	Pc mestre	R$ 264.00
6	12/22/2005	0.5	Pc mestre	R$ 335.00
13	7/26/2006	1	Pc mestre	R$ 146.40
14	6/26/2005	3	Pc mestre	R$ 426.40
15	11/8/2006	3	Pc mestre	R$ 538.40

$$MTBF = \frac{Horas_Operação}{Numero_Falhas} \quad (2.3) \qquad MTBF_8 = \frac{68400}{18} = 3800h$$

$$MTTR = \frac{\sum_{i=1}^{n} T_{Ri}}{N} \quad (2.2) \qquad MTTR_8 = \frac{26.8}{18} = 1.49h$$

$$D = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (2.8) \qquad D_8(o) = \frac{3800}{3800 + 1.49} = 0.99961$$

Tabela 5-12– MTTR. MTBF e D do Software

Máquina	Data Falha	TTR	Equipamento	Custo Manutenção
7	5/14/2005	3	Software	R$ 204.00
7	6/8/2005	1	Software	R$ 64.00
12	6/5/2006	1	Software	R$ 24.00
12	8/14/2006	2	Software	R$ 144.00
12	9/5/2006	0.5	Software	R$ 24.00
12	10/5/2006	0.5	Software	R$ 24.00
15	5/17/2005	1	Software	R$ 48.80
15	5/24/2005	1	Software	R$ 48.80
15	5/28/2005	4	Software	R$ 168.80
15	6/30/2005	1	Software	R$ 48.80

$$MTBF = \frac{Horas_Operação}{Numero_Falhas} \quad (2.3) \qquad MTBF_9 = \frac{68400}{10} = 6840h$$

$$MTTR = \frac{\sum_{i=1}^{n} T_{Ri}}{N} \quad (2.2) \qquad MTTR_9 = \frac{3+1+1+2+0.5+0.5+1+1+4+1}{10} = 1.5h$$

$$D = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (2.8) \qquad D_9(o) = \frac{6840}{6840+1.5} = 0.99978$$

Tabela 5-13– MTTR, MTBF e D do Teclado

Máquina	Data Falha	TTR	Equipamento	Custo Manutenção
4	9/7/2006	1	Teclado	R$ 106.40
13	9/15/2006	1.5	Teclado	R$ 150.00

$$MTBF = \frac{Horas_Operação}{Numero_Falhas} \quad (2.3) \qquad MTBF_{10} = \frac{68400}{2} = 34200h$$

$$MTTR = \frac{\sum_{i=1}^{n} T_{Ri}}{N} \quad (2.2) \qquad MTTR_{10} = \frac{1+1.5}{2} = 1.25h$$

$$D = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (2.8) \qquad D_{10}(o) = \frac{34200}{34200+1.25} = 0.99996$$

Utilizando os valores das tabelas 5.4 a 5.13 é possível calcular o valor os valores do MTBF do sistema pela equação (4.3) e o MTTR do sistema pela equação (4.4). Com estes dois valores, também foi possível calcular o valor da disponibilidade original do Sistema ($D_S(o)$), pela equação (2.8). Estes valores são mostrados na tabela 5.14.

Tabela 5-14 – MTTR, MTBF e D do sistema.

MTBFs	MTTRs	Ds(o)
1057.73196	2.01830	0.99810

No gráfico da figura 5.5, estão os valores originais da disponibilidade do sistema e de seus subsistemas:

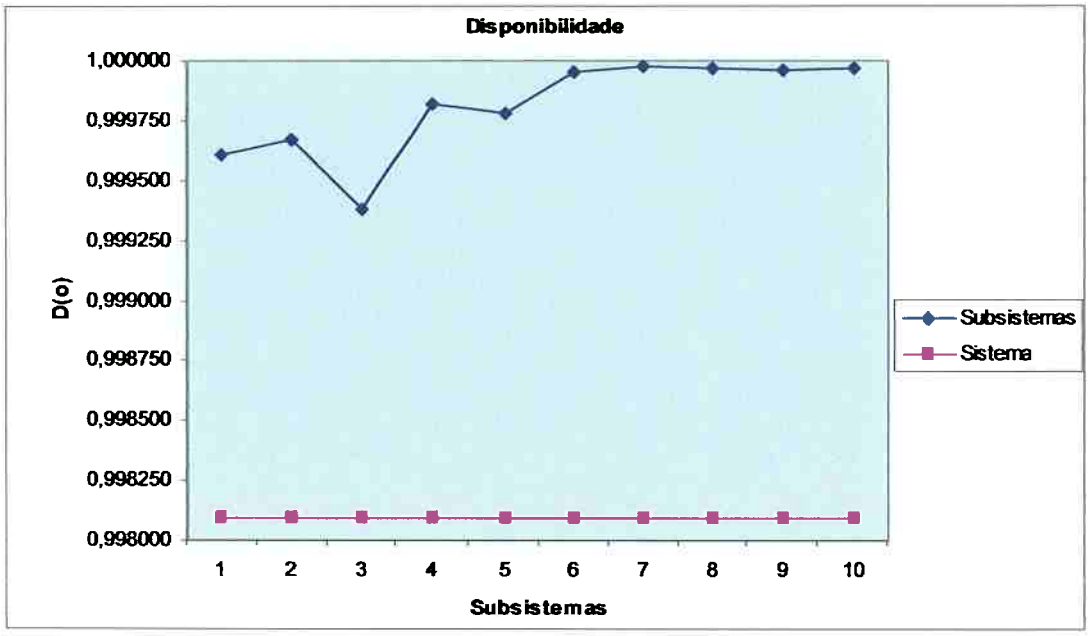

Figura 5-5 – Gráfico da Disponibilidade Original do sistema e dos subsistemas

O gráfico da figura 5.6 representa os valores originais do MTBF:

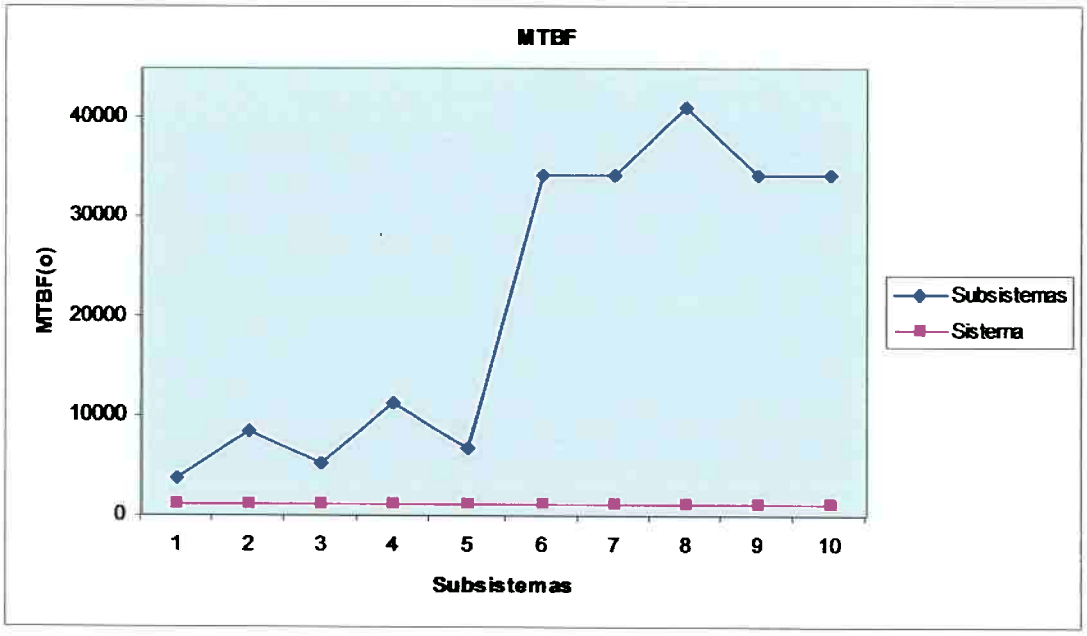

Figura 5-6 – Gráfico do MTBF original do sistema e dos subsistemas

O gráfico da figura 5.7 representa os valores originais do MTTR:

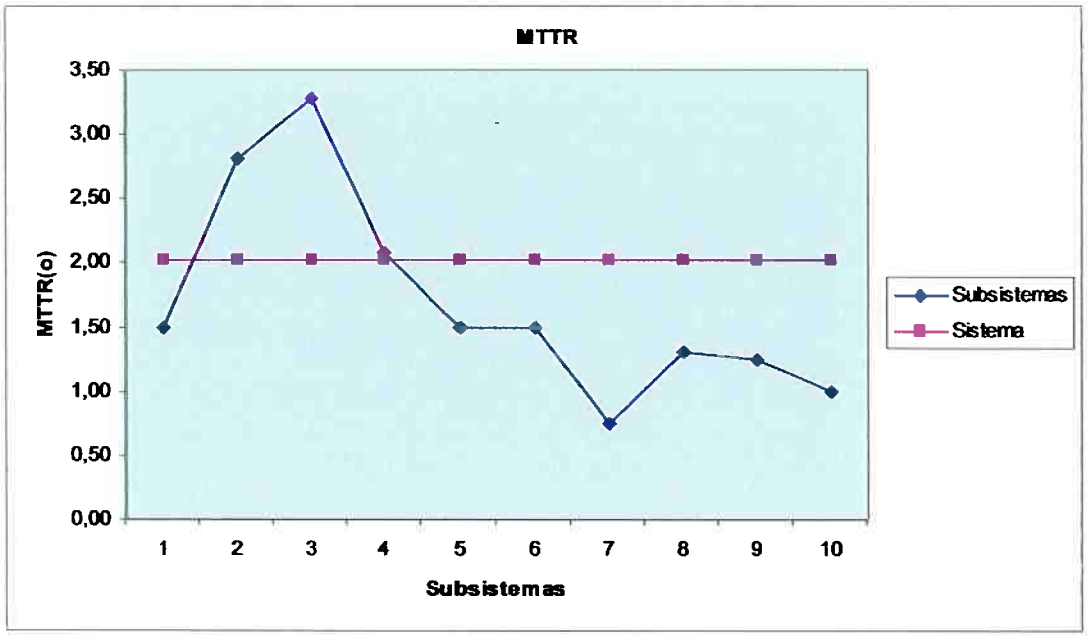

Figura 5-7 – Gráfico do MTTR Original do sistema e dos subsistemas

O próximo passo é escolher o valor desejado da nova disponibilidade da máquina. É importante ressaltar que o aumento deste valor é o motivo da implementação da metodologia e representa o tempo que a máquina estará disponível para o cliente. Devido a limitações financeiras, o valor escolhido foi 0,9985, apenas um pouco maior do que a disponibilidade original (0,9981), mas suficiente para demonstrar a aplicação da metodologia. Como a disponibilidade encontrada para a máquina foi muito alta, um pequeno aumento nesse valor gera um grande custo de implementação. O próximo passo foi determinar o número de subsistemas que serão alterados. Quanto maior o número de subsistemas escolhidos para a alteração, maior o gasto e o tempo de projeto. Quanto menor este número, menor o aumento da disponibilidade do sistema. Levando isto em consideração, o número escolhido foi 3 (k=3). A seguir, foram definidos os valores

de significância Sai, Sbi e Sci, de acordo com a tabela 5.15 . Estes valores foram somados para se obter o valor Si de cada subsistema.

Tabela 5-15 – Escala para os valores de Sai, Sbi e Sci.

Índice:	Valores:	Descrição:
Sai	8 a 10	Fácil alteração, produto bastante customizado.
Sbi		Custo baixo para alteração.
Sci		Baixa disponibilidade relativa do subsistema.
Sai	5 a 7	Dificuldade média, produto é pouco customizado.
Sbi		Custo médio para alteração.
Sci		Média disponibilidade relativa do subsistema.
Sai	1 a 4	Alteração difícil, produto muito padronizado.
Sbi		Alto custo para alteração.
Sci		Alta disponibilidade relativa do subsistema.

Os três subsistemas que tiverem os maiores valores de Si serão os subsistemas a serem alterados (o PC mestre, o grupo pinça e a parte mecânica). A tabela 5.16 mostra estes valores.

Tabela 5-16 – Valores de significância.

Equipamento	MTBF(horas)	MTTR(horas)	Disponibilidade(D°)	Sai	Sbi	Sci	Si
Pc Mestre	3800	1.49	0.999608	9	9	8	26
Grupo Pinça	8550	2.81	0.999671	9	8	8	25
Parte Mecânica	5261.5385	3.27	0.999378	8	6	10	24
Pc escravo	11400	2.08	0.999817	9	9	4	22
Software	6840	1.50	0.999781	8	7	5	20
Parte Elétrica	34200	1.50	0.999956	9	8	3	20
Pc Administrador	34200	0.75	0.999978	9	9	2	20
Leitor Cartões	41040	1.30	0.999968	3	9	3	15
Teclado	34200	1.25	0.999963	3	9	3	15
Leitor Notas	34200	1.00	0.999971	4	8	2	14

Definido o valor de k, é possível calcular o valor de D_u utilizando a equação (4.19). O valor encontrado para D_u foi 0.99968.

Em seguida, pode-se calcular o valor de a utilizando a equação (4.22), encontrando o valor 3423. Este alto valor de a encontrado se deve à alta disponibilidade do sistema. Com este valor, o valor do número de subsistemas a serem alterados ($k = 3$) e o valor de significância S_i para cada subsistema, é possível calcular os valores w_i, que representam os pesos em relação à disponibilidade dos subsistemas, pela equação (4.21). Finalmente, com os valores obtidos, pode-se calcular a nova disponibilidade de cada subsistema pela equação (4.12). Todos estes valores estão na tabela 5.17.

Tabela 5-17 – novas disponibilidades dos subsistemas.

Equipamento	Di(o)	Sai	Sbi	Sci	Si	Wi	Di
Pc mestre	0.999608	9	9	8	26	1.00029005	0.999978
Grupo Pinça	0.999671	9	8	8	25	1.00000006	0.999688
Parte Mecânica	0.999378	8	6	10	24	0.99971006	0.999398
Pc escravo	0.999817	9	9	4	22		
Software	0.999781	8	7	5	20		
Parte Elétrica	0.999956	9	8	3	20		
Pc Administrador	0.999978	9	9	2	20		
Leitor Cartões	0.999968	3	9	3	15		
Teclado	0.999963	3	9	3	15		

O gráfico 5.8 representa os novos valores da disponibilidade do sistema e dos subsistemas:

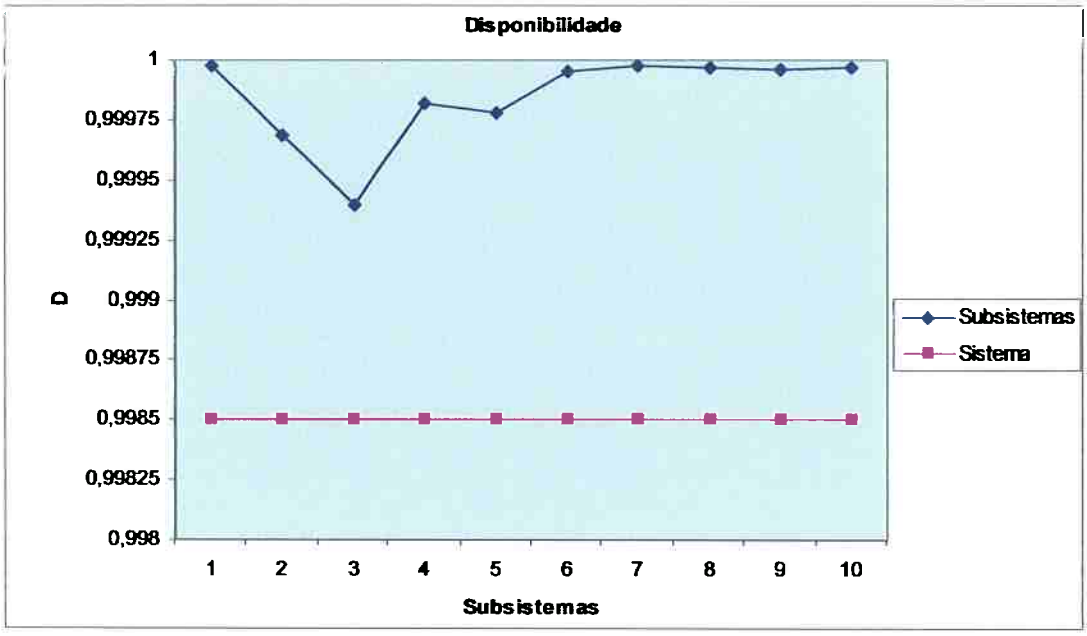

Figura 5-8 – Gráfico da nova Disponibilidade do sistema e dos subsistemas

5.2.5 Decidir entre aumentar o MTBF ou diminuir o MTTR

Após o cálculo da disponibilidade necessária de cada subsistema, é necessário um levantamento de dados, propondo novas soluções para o aprimoramento do sistema. Essas soluções devem apresentar melhorias tanto para o MTBF quanto para o MTTR, embora apenas um deles será alterado. Os custos e os novos MTTRs e MTBFs devem ser estimados para que seja decidido qual dos tempos deve ser melhorado. Para estimar estes valores, podem ser utilizados dados de máquinas semelhantes ou a própria experiência dos responsáveis pela manutenção das máquinas. Os resultados obtidos devem ser armazenados em um banco de dados, facilitando a obtenção de dados no futuro e aprimorando os novos projetos. Isto garantirá que o sistema cumpra os requisitos de disponibilidade com um custo e esforço reduzido.

Após o levantamento destas possíveis soluções para o MTBF e para o MTTR do sistema, junto com os custos de cada uma delas, pode-se decidir qual dos tempos deve ser melhorado, utilizando a equação (4.23) e levando em conta os custos do projeto. Os valores de C_f (150, 540 e 245), foram levantados utilizando uma média, com dados oferecidos pela empresa AMEGA. Estes dados podem ser encontrados nas tabelas 5.4 a 5.13.

Pc Mestre

O Pc mestre é o Pc responsável pelo controle da máquina e de seus principais dispositivos, além do controle do Pc escravo.

MTBF: Para aumentar o MTBF do PC mestre, existem duas possibilidades: comprar PCs com confiabilidade maior ou utilizar redundância. A melhor solução é a utilização de redundância, pois neste caso, o aumento do MTBF seria maior para um aumento de custo semelhante. A redundância será aplicada com o emprego de um "cluster". Segundo **PITANGA (2003),** "cluster" é um sistema que compreende dois ou mais computadores ou sistemas (denominados nodos) que trabalham em conjunto para executar aplicações ou realizar outras tarefas, de tal forma que os usuários que o utilizem tenham a impressão que somente um único sistema é o responsável pela execução, criando assim uma ilusão de recurso único. Como características fundamentais para a construção dessas plataformas inclui-se elevação da confiança, distribuição de carga e performance. O tipo de "cluster" aplicado é o de alta disponibilidade, que são construídos para prover uma disponibilidade de serviços e recursos de forma ininterrupta com o uso de

redundâncias implícitas ao sistema. Caso um nó do "cluster" vier a falhar, aplicações ou serviços estarão disponíveis em outro nó.

Portanto, de acordo com a equação (2.10), considerando a distribuição exponencial (função de taxa de falha constante), o novo MTBF será:

$$R(t) = 1 - \prod_{i=1}^{n} [1 - e^{-\lambda_i t}]$$

Para n=2 (2 elementos em paralelo):

$$R(t) = 1 - (1 - e^{-\lambda_1 t})(1 - e^{-\lambda_2 t}) = 1 - 1 + e^{-\lambda_1 t} + e^{-\lambda_2 t} - e^{-(\lambda_1 + \lambda_2)t}$$

$$MTTF = \int_0^\infty R(t)dt = \int_0^\infty (e^{-\lambda_1 t} + e^{-\lambda_2 t} - e^{-(\lambda_1+\lambda_2)t})dt = \frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2}$$

Como $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda = \frac{1}{MTBF} = \frac{1}{3800} = 2{,}6316x\,10^{-4}$,

$$MTTF = \frac{2}{\lambda} - \frac{1}{2\lambda} = \frac{3}{2\lambda} = 5700h$$

$$MTBF = MTTF + MTTR = 5700 + 1.5 = 5701.5h$$

O custo acrescentado ao processo será o custo de um PC extra, praticamente. Portanto o custo do subsistema será o custo do PC e do PC extra. Portanto, C_u =R$4000.

Pode-se notar que o novo MTBF encontrado (5701.5) é muito menor que o MTBF necessário (67673) . Portanto, esta solução não satisfaz os requisitos de projeto e deve ser descartada.

MTTR: O MTTR necessário deve ser menor que 0,0836 (5 minutos). Deve ser encontrada uma solução que satisfaça todos os cinco tempos de reparo em menos de 5 minutos. A única forma disto ocorrer, será substituir o computador com problemas por um novo assim que detectada a falha. Desta forma, os tempos de localização, diagnóstico, reparo e verificação serão iguais a zero, pois o conserto, que será feito em outro local, não interromperá o funcionamento da máquina. Este novo computador já deve estar com os programas instalados e o banco de dados deve ser duplicado, de forma que ao instalar o novo computador, os dados possam ser extraídos do PC escravo. A distribuição dos tempos ficará como na tabela 5.18.

Tabela 5-18 – Tempos de reparo do pc mestre.

Localização(h)	Diagnóstico(h)	Acesso(h)	Reparo(h)	Verificação(h)	MTTR(h)
0	0	0,0836	0	0	0,0836

É importante que os acessos sejam melhorados para que o tempo de retirada e recolocação dos computadores não ultrapasse o tempo estipulado. Uma boa solução é a utilização de um mecanismo com guias, que possibilita a fácil movimentação do computador sem necessidade de remoção de portas e parafusos

(semelhante a uma gaveta) . Essa solução é utilizada em uma máquina de revelação de fotografias, como na figura 5.9. Essa máquina possui um computador e uma impressora onde as fotos podem ser reveladas. Basta para isso inserir um cd, um disquete ou uma memória que possua as imagens digitalizadas a serem impressas, escolher o tipo de impressão, o número de cópias e outros detalhes pelo monitor "touch- screen" e as fotos saem impressas. Essa máquina apresenta medidas importantes visando a mantenabilidade. As duas principais são a utilização desse mecanismo com guias para a movimentação do teclado e da impressora e a utilização de dobradiças para facilitar a abertura e fechamento da porta da máquina (para melhorar o acesso).

Figura 5-9 – Foto da máquina de revelação de fotografias

Para aplicar esta solução, também será necessário um computador extra, e aproximadamente 500 reais para modificar o acesso. Custo total de 4500 reais para o subsistema.

Substituindo os valores na equação (4.23), para um custo do subsistema de 4000 reais, tempo de vida do equipamento de 87600 horas, novo MTBF de 5701.5 horas, custo fixo da falha de 150 reais, custo variável de 60 reais por hora (mão de obra) e MTTR original de 1,49 horas, obtém-se o custo do subsistema quando o MTBF é modificado:

$$Custo_MTBF = 4000 + \frac{87600}{5701.5}(150 + 60 \times 1{,}49) = 7678{,}25 \text{ reais}$$

Ainda utilizando a equação (4.23) mas agora com o valor do MTBF original de 3800 horas e o novo valor do MTTR de 0,0836 horas, tem-se o custo do subsistema quando o MTTR é alterado:

$$Custo_MTTR = 4500 + \frac{87600}{3800}(150 + 60 \times 0{,}0836) = 8073{,}53 \text{ reais}$$

De acordo com os valores encontrados, a melhor solução seria aumentar o MTBF para 5701,5 horas. Porém, com este MTBF, a disponibilidade requerida não seria alcançada. Portanto, a solução escolhida será diminuir o MTTR para 0,0836, aplicando as modificações explicadas anteriormente.

Grupo Pinça:

O grupo pinça é um mecanismo que coloca e retira o Dvd no estoque. Possui 2 motores e sensores para detectar a presença das caixas de dvd.

MTBF: Para aumentar o MTBF do sistema será necessário trocar os motores e sensores por outros com maior confiabilidade. De acordo com os dados obtidos com a Empresa AMEGA, é possível aumentar o MTBF do equipamento para 10000 horas e o custo do subsistema será de 5500 reais.

MTTR: O maior problema para a manutenção deste equipamento é o difícil acesso. O espaço é muito pequeno e existem muitos outros componentes obstruindo a visão e o alcance dos técnicos. A melhor solução é um mecanismo rotativo que ofereça acesso dos dois lados, como na figura (3.6-A). Para a localização e diagnóstico dos problemas, a sugestão é a utilização de equipamentos embutidos de teste. Segundo **O'CONNOR (1985)**, estes dispositivos consistem de "hardware" e "software" adicionais que são usados para realizar testes no sistema, e podem ser muito eficientes para aumentar a disponibilidade e a confiança do usuário. Podem ser equipamentos complexos de verificação automática ou simples voltímetros com pontas de prova externas. Os tempos de reparo estimados para o novo equipamento encontram-se na tabela 5.19.

Tabela 5-19 – Tempos de reparo do grupo pinça.

Localização(h)	Diagnóstico(h)	Acesso(h)	Reparo(h)	Verificação(h)	MTTR(h)
0,2	0,5	0,7	1,1	0,1	2,6

Pode-se notar que a localização do defeito é bem rápida porque este subsistema possui poucos componentes. Já o acesso é bem mais demorado porque o subsistema é muito pequeno e não está bem localizado (acesso obstruído).

O custo para se implementar esta solução é de 500 reais para o acesso e 1000 reais para o equipamento embutido. Somando com o valor original do equipamento, o custo do subsistema é de 4500 reais.

Utilizando-se novamente a equação (4.23) para a comparação dos custos:

$$Custo_MTBF = 5500 + \frac{87600}{10000}(540 + 60 \times 2{,}81) = 11707 \text{ reais}$$

$$Custo_MTTR = 4500 + \frac{87600}{8550}(540 + 60 \times 2{,}667) = 11672 \text{ reais}$$

Portanto, comparando as duas soluções, a melhor opção é diminuir o MTTR do sistema para 2,667 horas.

Parte Mecânica

A parte mecânica é responsável pelo movimento vertical e horizontal do grupo pinça. Possui dois motores e dois sensores para indicar o zero da máquina.

MTBF: Para aumentar o MTBF da parte mecânica, podem-se trocar os sensores e motores por outros mais confiáveis. Isto acarretaria um custo de 15 mil reais. Com isto, pode-se chegar a um MTBF de 9500 horas, aproximadamente, segundo a empresa AMEGA.

MTTR: Apesar de a parte mecânica possuir um bom acesso, a grande dificuldade está na troca dos motores e sensores e no posicionamento da pinça em relação ao estoque. Este é um dos grandes problemas encontrados na máquina atual. Toda vez que a máquina é removida de um lugar para outro, o estoque sofre pequenos deslocamentos que são, algumas vezes, suficientes para fazer com que a

pinça não pegue o Dvd, devido à necessidade de uma precisão milimétrica. Quando isto acontece, a máquina precisa ser posicionada novamente.

Como solução para os sensores, podem-se utilizar placas descartáveis, que seriam inutilizadas após a falha. É necessário que estas placas tenham um encaixe simples, e de forma única. Para isto, podem ser utilizados encaixes padronizados de computadores, como exemplo tem-se os encaixes utilizados nas unidades de disquete que são conectados nos cabos "flat" para ligar o dispositivo à placa mãe. Estes conectores só possibilitam uma forma de encaixe.

Para os motores, a única opção é melhorar ainda mais o acesso.

Atualmente, para posicionar a pinça em relação ao estoque, é necessário inserir uma série de comandos no teclado, que representam as coordenadas, até que seja feito o posicionamento correto (isto leva muito tempo). Uma maneira de diminuir o tempo para esse posicionamento seria criar uma Interface Homem Máquina no software com comandos no "mouse" ou na própria tela (como um "joystick" virtual) ou utilizar sensores que fariam este posicionamento de maneira automática.

O aumento dos custos relacionado à troca dos sensores é de 100 reais. Para facilitar o acesso, mais 800 reais e para o software não há custo extra. O custo total do subsistema será de 12900 reais.

Os tempos estimados de reparo para os sensores estão na tabela 5.20.

Tabela 5-20 – Tempos de reparo da parte mecânica.

Localização(h)	Diagnóstico(h)	Acesso(h)	Reparo(h)	Verificação(h)	MTTR(h)
0,3	0,5	0,9	0	0,8	2,9

Pode-se notar que o tempo de verificação é maior do que nos outros subsistemas devido à necessidade do alinhamento da máquina. A localização e o diagnóstico são rápidos porque este subsistema não possui muitos componentes e o tempo de reparo será zero porque os sensores e motores serão descartados após a ocorrência de uma falha.

Comparação dos custos:

$$Custo_MTBF = 15000 + \frac{87600}{9500}(245 + 60 \times 3{,}27) = 19068 \text{ reais}$$

$$Custo_MTTR = 12900 + \frac{87600}{5261{,}53}(245 + 60 \times 2{,}9) = 19876 \text{ reais}$$

Portanto, a melhor solução é aumentar o MTBF para 9500 horas.

O gráfico da figura 5.10 representa os novos valores do MTBF do sistema e dos subsistemas. Quanto maior o número de subsistemas, menor o MTBF do sistema, que é calculado pela equação (4.3).

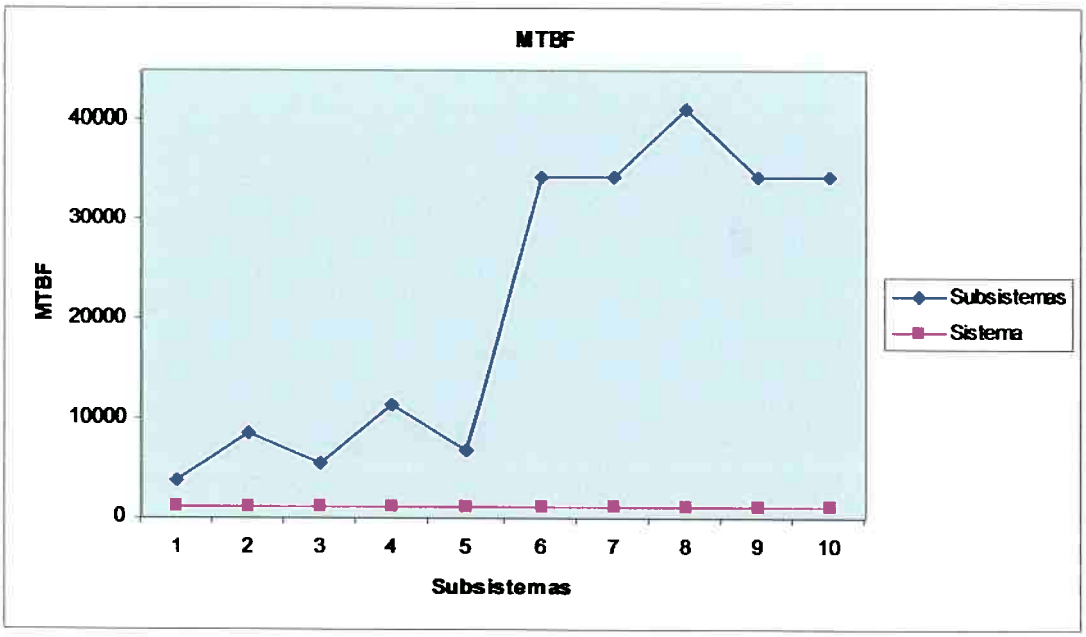

Figura 5-10 – Gráfico do novo MTBF do sistema e dos subsistemas

O gráfico da figura 5.11 representa os novos valores do MTTR dos subsistemas e do sistema, que é calculado pela equação (4.4):

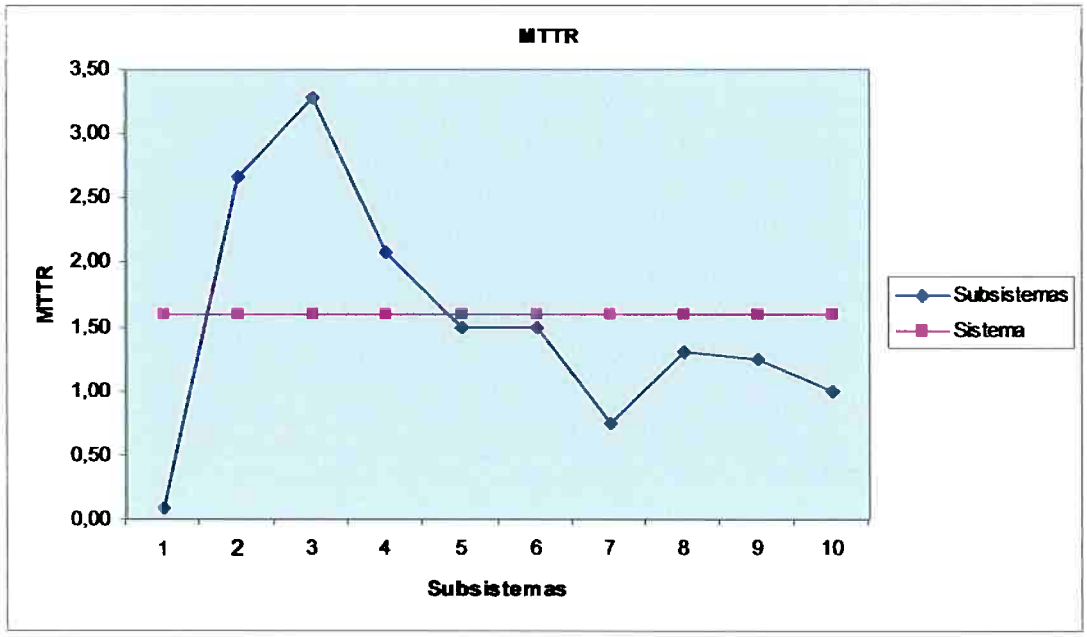

Figura 5-11 – Gráfico do novo MTTR do sistema e dos subsistemas

5.2.6 Testar os resultados obtidos

Até este ponto da metodologia, tudo que foi feito se relacionava ao projeto do sistema. Foram definidos vários parâmetros, como disponibilidade do sistema e dos subsistemas, quais subsistemas deveriam ser alterados e que mudanças deveriam ocorrer. Neste momento, estas mudanças devem ser aplicadas em um protótipo, para depois o resultado ser analisado e demonstrado. Como dito anteriormente, a demonstração do MTBF é muito complicada pois necessita de um longo tempo para coleta de dados, mas a demonstração do MTTR pode ser feita, simulando erros comuns no equipamento e medindo o tempo de reparo.

Pc Mestre:

Para calcular o MTTR do Pc mestre, foi construído um protótipo, adaptando uma gaveta dentro de uma máquina e foi medido o tempo de troca dos computadores, conexão e desconexão de cabos e abertura da máquina. Estes tempos estão na tabela 5.21:

Tabela 5-21– Medidas para determinar o MTTR do pc mestre (em horas).

0,082	0,057	0,065	0,095	0,070	0,063	0,065	0,072	0,085	0,075
0,077	0,073	0,072	0,063	0,068	0,073	0,078	0,081	0,083	0,087
0,087	0,080	0,075	0,072	0,065	0,077	0,082	0,085	0,063	0,075

Para estes valores, tem-se $\bar{t} = 0{,}075h$ e $s^2 = 7{,}9040 \times 10^{-5}$. Portanto, o desvio padrão $s = 0{,}0089$

Portanto, o limite superior do MTTR com 95% é, de acordo com a equação (3.9):

$$MTTR = 0{,}075 + \frac{0{,}089}{\sqrt{30}} t_{0.05,29} = 0{,}075 + \frac{0{,}089}{\sqrt{30}} \times 1{,}699 = 0{,}078h$$

Portanto, como 0,078< 0,084, pode-se garantir com 95% de certeza que o novo MTTR é menor que o MTTR desejado e, consequentemente, o subsistema atingirá a meta da disponibilidade.

Grupo Pinça

A tomada de tempo do MTTR do novo grupo pinça ainda não foi feita pois a empresa AMEGA está em fase de desenvolvimento do novo equipamento e não existe nenhum semelhante para a retirada do tempo.

5.3 Comparação dos resultados

Um resumo dos resultados encontrados para os três subsistemas que tiveram a sua disponibilidade alterada está na tabela 5.22, junto com as soluções propostas para o aprimoramento de cada um deles.

Tabela 5-22 – Resultados dos valores calculados dos três subsistemas alterados.

Subsistema/Variáveis	Pc Mestre	Grupo Pinça	Parte Mecânica
MTTRi(o)	1.49	2.81	3.27
MTBFi(o)	3800	8550	5261.538
Di(o)	0.99960834	0.999671161	0.999378
Sai	9	9	8
Sbi	9	8	6
Sci	8	8	10
Si	26	25	24
Wi	1.00029005	1.000000056	0.99971
Di	0.999978	0.999688098	0.999398
Cf	150	540	245
MTTRi	0.08360395	2.66759438	3.27
MTBFi	3800	8550	5435.502
Soluções propostas:	1-Melhorar acessos 2-Substituir computador inteiro	1-Equipamentos embutidos de teste 2-Mecanismo rotativo de acesso	1-Trocar sensores 2-Trocar Motores

E os subsistemas que não tiveram sua disponibilidade alterada, continuam com os mesmos valores, na tabela 5.23.

Tabela 5-23 – Valores para os demais subsistemas.

Subsistema/ Variáveis	Pc Escravo	Software	Parte Elétrica	Pc Administrador	Leitor Cartões	Teclado	Leitor Notas
MTTRi(o)	2.08	1.50	1.50	0.75	1.30	1.25	1.00
MTBFi(o)	11400	6840	34200	34200	41040	34200	34200
Di(o)	0.999817	0.999781	0.999956	0.999978071	0.999968	0.999963	0.999971
Sai	9	8	9	9	3	3	4
Sbi	9	7	8	9	9	9	8
Sci	4	5	3	2	3	3	2
Si	22	20	20	20	15	15	14

O gráfico da figura 5.12 é uma comparação dos valores da disponibilidade antes e depois da aplicação da metodologia, tanto para os subsistemas quanto para o sistema.

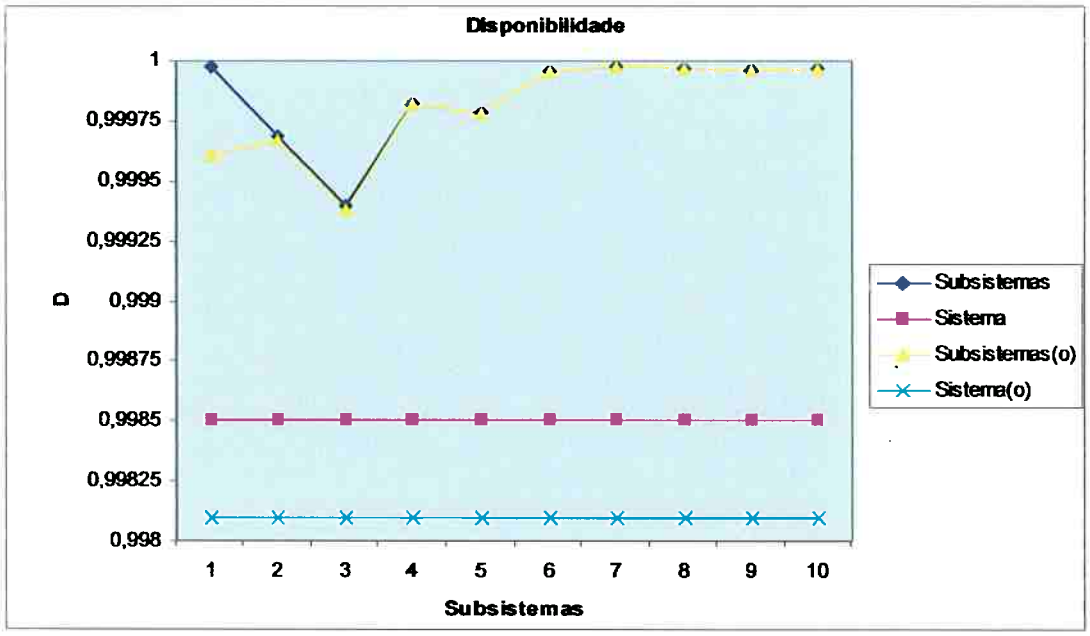

Figura 5-12 – Gráfico de comparação da Disponibilidade antes e depois da aplicação da metodologia

Pelo gráfico, pode-se notar que a disponibilidade do subsistema 1 obteve a maior variação (de 0.999608 para 0.999978). Os subsistemas 2 (de 0.999671 para 0.999688) e 3 (de 0.999378 para 0.999398) tiveram uma pequena variação de disponibilidade e as disponibilidades dos demais não foram alteradas. Isto ocorreu porque o subsistema 1 foi considerado um subsistema crítico (o peso do subsistema foi elevado). Com essas alterações de valores, o sistema obteve uma variação na sua disponibilidade (de 0,9981 para 0,9985). Este valor (0,9985) foi o valor estipulado para a nova disponibilidade do sistema.

O gráfico da figura 5.13 é uma comparação dos valores do MTBF antes e depois da aplicação da metodologia, tanto para os subsistemas quanto para o sistema :

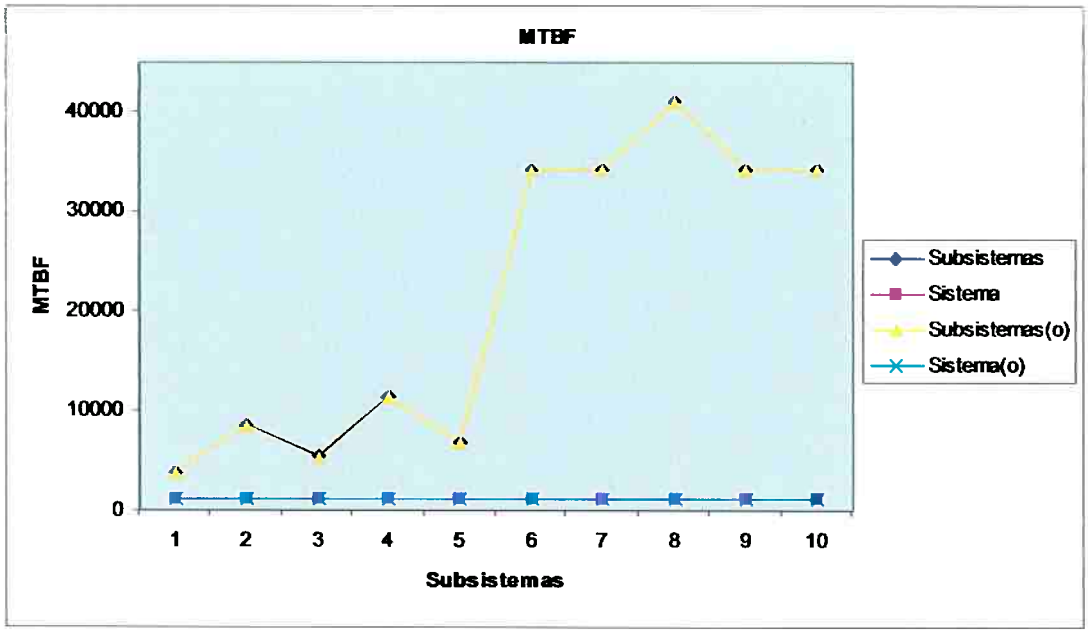

Figura 5-13 – Gráfico de comparação do MTBF antes e depois da aplicação da metodologia

Pode-se notar que os valores são praticamente idênticos. O motivo é que o único subsistema em que a mudança do MTBF se mostrou vantajosa foi o subsistema 3. Como a diferença das disponibilidades antes e depois é muito pequena para este subsistema, esta diferença de MTBF também é pequena.

O gráfico da figura 5.14 é uma comparação dos valores do MTTR antes e depois da aplicação da metodologia, tanto para os subsistemas quanto para o sistema:

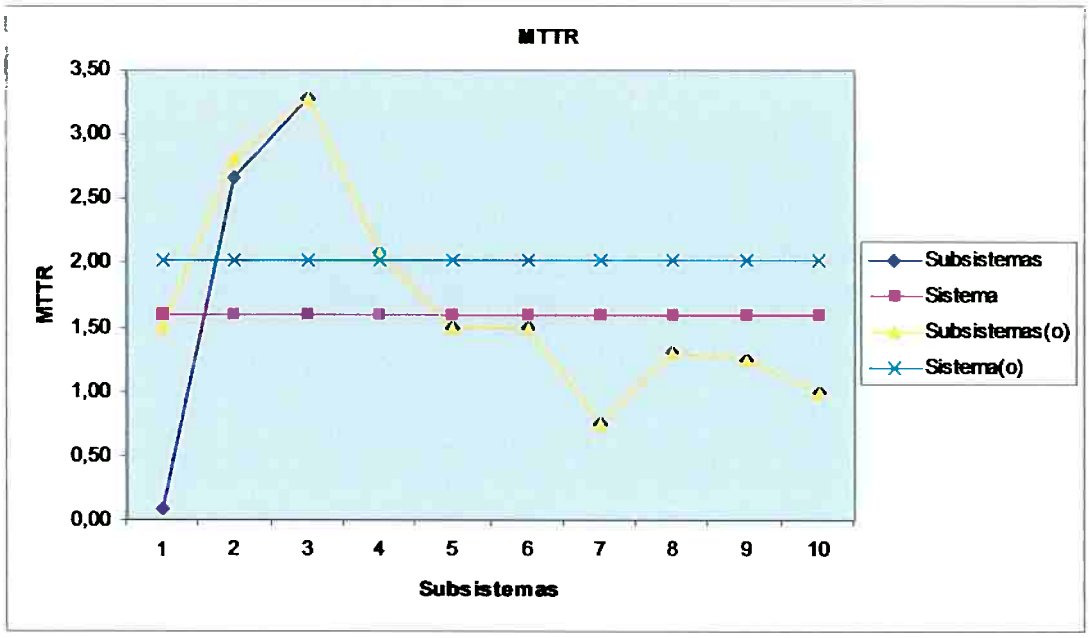

Figura 5-14 – Gráfico de comparação do MTTR antes e depois da aplicação da metodologia

Pode-se notar uma diferença considerável para o MTTR nos subsistemas 1 e 2. Estes subsistemas foram os escolhidos para a diminuição do MTTR. Isto influiu diretamente no sistema, causando uma diminuição do seu MTTR. As figuras 5.15 e 5.16 representam os gráficos da mantenabilidade do Pc mestre e do grupo pinça, respectivamente. Pode-se observar que para um mesmo tempo t, a probabilidade dos novos subsistemas serem restaurados é muito maior do que anteriormente, o que significa que houve um significante aumento das suas mantenabilidades. Consequentemente, houve também um aumento da mantenabilidade do sistema, de acordo com a figura 5.17.

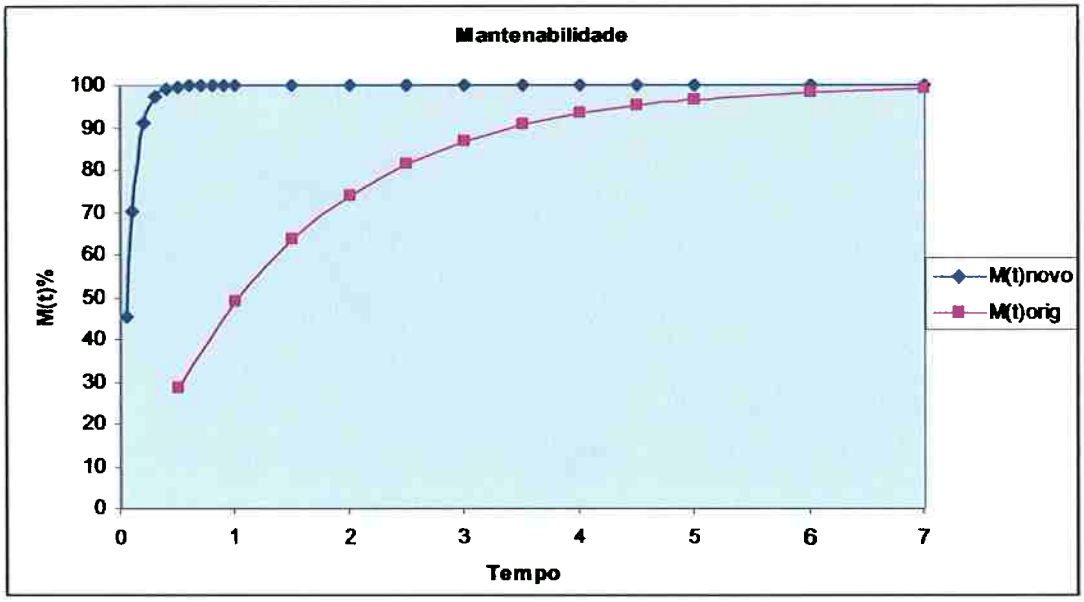

Figura 5-15 – Gráfico da mantenabilidade do Pc mestre antes e depois da aplicação da metodologia

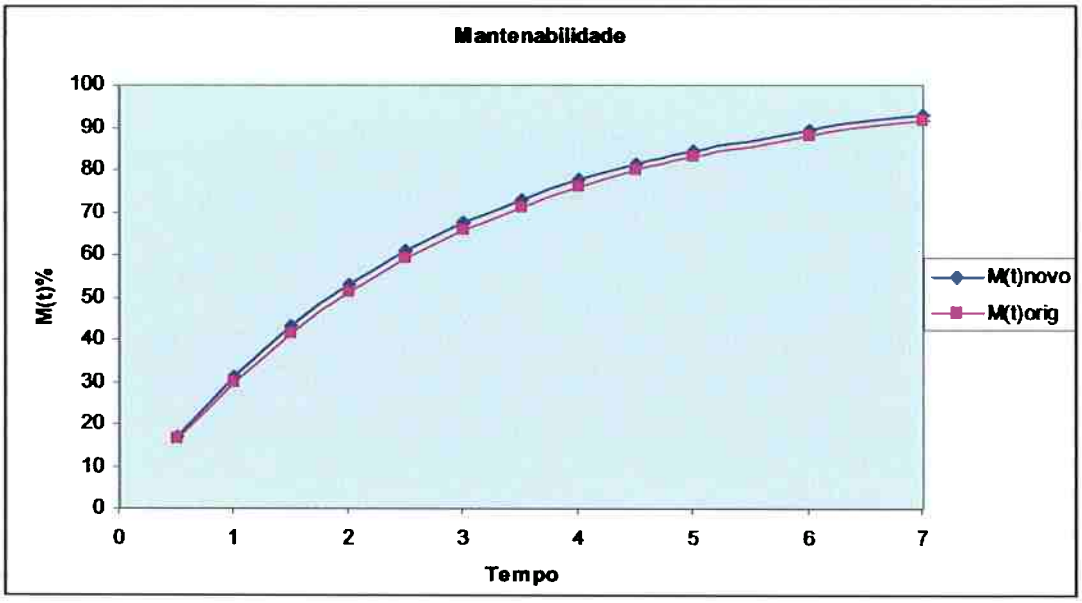

Figura 5-16 – Gráfico da mantenabilidade do Grupo pinça antes e depois da aplicação da metodologia

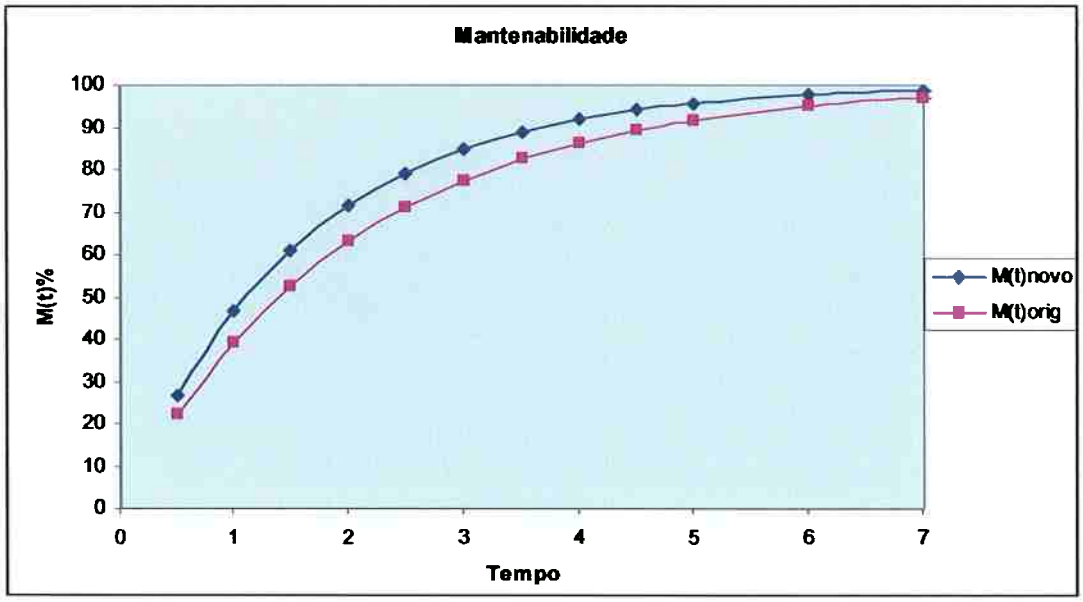

Figura 5-17 – Gráfico da mantenabilidade do Sistema antes e depois da aplicação da metodologia

6 Conclusões e Recomendações para Trabalhos Futuros

6.1 Conclusões

Sempre quando se fala em manutenção, diversos aspectos podem ser considerados. Manutenção preventiva, preditiva e corretiva são sempre levadas em consideração. O conceito de confiabilidade também é bastante difundido. Mas pode-se dizer que a confiabilidade é uma medida incompleta da disponibilidade, porque no caso das máquinas automáticas, o que realmente importa é a quantidade de tempo que o equipamento está disponível para o uso. Para se tornar uma medida completa, deve-se relacionar a confiabilidade (que indica o tempo de que o equipamento funciona sem apresentar uma falha) e a mantenabilidade (que indica o tempo em que o equipamento será reparado). Estes dois tópicos deveriam sempre ser tratados em conjunto, confiabilidade e mantenabilidade (R&M). Apesar de também discutir a confiabilidade, o foco do trabalho é a mantenabilidade, visando o aumento da disponibilidade de uma máquina. Diversos outros trabalhos discutem a confiabilidade mais a fundo, como **CARDOSO (2000)** e **RODRIGUEZ (2004)**.

A metodologia aplicada não só se mostrou eficiente para o aprimoramento do sistema como também se preocupou em manter o custo deste aprimoramento baixo. A principal vantagem do método é que foi possível aumentar a disponibilidade do sistema alterando apenas os subsistemas mais críticos (com menor disponibilidade ou que oferecessem o menor custo para o aprimoramento). Isto tornou o processo muito mais simples, rápido e com menor custo. Uma outra vantagem é que foram desenvolvidos subsistemas com altas disponibilidades que

podem ser aproveitados em projetos futuros de outros tipos de máquinas. Além disso, a metodologia forçou os projetistas e técnicos a manter um banco de dados de manutenção sempre completo e atualizado. Porém, também existem desvantagens. A principal é que para aprimorar os subsistemas é necessário alterar o projeto da máquina. Isto geralmente apresenta um custo de projeto e de implementação que podem ser altos. Além disso, é preciso estimar uma série de valores para atingir a disponibilidade ideal. No início, o método tende a oferecer resultados menos satisfatórios, os valores estimados tendem a ser bem diferentes dos valores reais. Porém, conforme a experiência dos técnicos aumenta e o banco de dados da manutenção vai aumentando, a metodologia poderá ser aplicada com valores iniciais mais satisfatórios e, consequentemente, os resultados se aproximarão cada vez mais dos valores reais medidos. O principal requisito para conseguir bons resultados é fazer uma boa coleta de dados, reunindo vários relatórios de manutenção, especificações da máquina e procedimentos para a operação. Uma boa estratégia para o início do processo é aplicar dados medidos em máquinas de funcionamento semelhante, que oferecem dados muito mais realistas do que os valores estimados. Com uma boa coleta de dados é possível preparar uma análise FMEA mais precisa, e isto se mostrou muito importante no decorrer da metodologia, para apresentar novas soluções para cada subsistema.

Apesar dos resultados da metodologia terem sido bastante coerentes, a metodologia demonstrada não é aconselhada para sistemas que possuam disponibilidade maior que 0,99. Quando este valor é ultrapassado, as disponibilidades dos subsistemas crescem muito, atingindo valores difíceis de serem implementados e com custo muito alto. Portanto, no caso das máquinas de alta disponibilidade, esta nova disponibilidade não pode ser muito maior do que a

original. Isto faz com que o aperfeiçoamento do sistema não seja significativo. Com estes dados, é possível concluir que o aumento de disponibilidade de um sistema que já possua este valor muito alto, traz mais custos do que benefícios e este tipo de solução deve ser descartada. Já para sistemas que apresentem baixa disponibilidade, o método fornece muito mais vantagens, diminuindo o tempo parado das máquinas e, consequentemente, os gastos com manutenção. O método também pode ser aplicado em casos que a disponibilidade da máquina é alta, mas precisa ser ainda maior, devido a fatores de segurança. Neste caso, apesar do aumento dos custos, este aumento seria compensado por um aumento na segurança. **MURTY e NAIKAN (1995)** elaboraram uma equação para calcular a disponibilidade ótima de um sistema baseando-se no impacto que esta nova disponibilidade acarretará nos custos. Com isto, foi possível calcular se o aprimoramento da máquina será rentável ou não. **CASTRO e CAVALCA (2003)**, concordam que obter alta disponibilidade implica em um grande aumento de custo e oferecem métodos de otimização que ajudam a obter custos razoáveis com altos níveis de disponibilidade. Portanto, é aconselhável que antes da aplicação desta metodologia, seja feito um estudo de viabilidade para se ter certeza de que a aplicação destes conceitos seja viável.

Esta metodologia pode ser estendida a outros tipos de máquinas e equipamentos, oferecendo resultados semelhantes, mas, da mesma forma, deve ser implementada no projeto do sistema e não durante o ciclo de vida do mesmo.

6.2 Recomendações para trabalhos futuros

Foi visto ao longo de todo trabalho que a diminuição do custo e tempo de manutenção gera uma preocupação crescente na área de engenharia. Relacionada às máquinas, este tempo de manutenção pode ser dividido em prestação de serviço e reparo. A prestação de serviços se refere a repor as mercadorias e coletar dinheiro. Hoje em dia isto pode ser feito remotamente, o técnico responsável recebe a informação pela internet sempre que um produto é vendido. Desta forma, ele consegue saber com precisão quando a máquina precisa ser reposta. Isto diminui a necessidade de periódicas visitas à máquina, muitas vezes desnecessárias. Porém, isto não acaba com a necessidade dessas visitas, devido à necessidade do técnico de checar constantemente se a máquina está funcionando corretamente ou se necessita de algum reparo.

Durante o trabalho, foi discutido sobre os equipamentos embutidos de teste. Estes dispositivos podem fornecer um diagnóstico completo do equipamento, e até mesmo prever erros que ainda não aconteceram. Porém, eles necessitam ser checados na própria máquina,de forma que as visitas constantes continuam sendo necessárias.

Em trabalhos futuros, os equipamentos embutidos de teste poderiam ser anexados a sistemas de comunicação de forma que pudessem ser transmitidos pela da internet ou diretamente para outros computadores. Dessa forma, as máquinas poderiam ser diagnosticadas remotamente. Com isto, os técnicos saberiam com antecedência quando um erro ocorrer, como este erro deve ser tratado e que tipo de ferramenta seria necessária para o conserto. Juntamente com a metodologia apresentada neste trabalho, isto poderá diminuir o MTTR para um valor mínimo,

fazendo com que os tempos de localização e diagnóstico sejam iguais a zero, dessa forma economizando com mão-de-obra, visitas e transporte de materiais desnecessários.

7 Referências Bibliográficas

ASSOCIAÇÂO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT-5462: **Confiabilidade e mantenabilidade**, 1994. 37p.

BALABAN, H. Specifying Maintainability-Demonstrations-Test Parameters. **ANNUAL RELIABILITY AND MAINTAINABILITY SYMPOSIUM,** 1973. P.341-346.

BELHOT, R. V; CARDOSO, I.A; Reflexos da manutenção no contexto global da organização. **Metalurgia & Materiais,** São Paulo, v.50, n.432, p.766-9, ago. 1994.

BHUIYAN, N.; BAGHEL, A. A sustainable continuous improvement methodology at an aerospace company. **INTERNATIONAL JOURNAL OF PRODUCTIVITY AND PERFORMANCE MANAGEMENT**, Vol. 55 No. 8, 2006. p.671-687.

BLANCHARD, B. S. An enhanced approach for implement total productive maintenance in the manufacturing environment. **JOURNAL OF QUALITY IN MAINTENANCE ENGINEERING**, Vol. 03 No 2, 1997. p.69-80.

BLANCHARD, B. S; VERMA, D; PETERSON, E. L. **Maintainability:** A key to effective serviceability and maintenance management . New York: John Wiley & sons, 1995.

BRALLA, J. **Design for excellence.** New York : Mcgraw-Hill, 1996. 326p.

CARDOSO, I. A. P. **Elaboração de políticas de manutenção :** uma abordagem voltada à análise de confiabilidade. 2000. 189f. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2000.

CASTRO, H.F.; CAVALCA, K. L Availability optimization with genetic algorithm. **INTERNATIONAL JOURNAL OF QUALITY & RELIABILITY MANAGEMENT**, Vol. 20 No 7, 2003. p.847-863.

COPPOLA, A.; DEVEAU, J. **ANNUALS OF RELIABILITY AND MAINTAINABILITY**, Vol. 6. 1967. p.582-586.

CORNET, B.J.J. **Análise crítica da aplicação da manutenção centrada em confiabilidade e em risco**. 2004. 110f. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2004.

DAVEAU, J. E. Suggested Improvements for Maintainability Demonstrations. **ANNUAL RELIABILITY AND MAINTAINABILITY SYMPOSIUM**, 1969. p.572-579.

DEPARTMENT OF DEFENSE, MIL-HDBK-470A: **Designing and Developing Maintainable Products and Systems.** 1V, 1997. 719p.

DEPARTMENT OF DEFENSE, MIL-HDBK-472: **Maintainability Prediction.** 1966. 176p.

DEPARTMENT OF DEFENSE, MIL-STD-471A: **Maintainability verification/Demonstration/Evaluation.** 1973. 64p.

DEPARTMENT OF DEFENSE, MIL-STD-1629A: **Procedures For Performing A Failure Mode, Effects And Criticality Analysis.** 1980. 54p.

DHILLON, B.S.; ALEEM, M. A. A report on robot reliability and safety in Canada: a survey of robot users. **JOURNAL OF QUALITY IN MAINTENANCE ENGINEERING**, Vol. 06 No 1, 2000. p.61-74.

EBELiNG, C. E. **An Introduction to reliability and maintainability engineering**. New York : Mcgraw-Hill, 1997. 486p.

EL-HARAM, M.A.; HORNER, M. W. Practical Application of RCM to local authority housing: A Pilot Study. **JOURNAL OF QUALITY IN MAINTENANCE ENGINEERING**, Vol. 08 No 2, 2002. p.135-143.

GOLDMAN, A; SLATTERY, T. **Maintainability:** a major element of system effectiveness. New York : J. Wiley, 1964.

HAWKINS, B. The many faces of Lean Maintenance. **Plant Engineering, n. 9** p. 63-5, 09/2005.

KOWALSKI, R. Maintainability and Reliability **IN** IRESON, W. G.; COOMBS, C. F.; MOSS, R. Y. **Handbook of reliability Engineering and Management**. New York : Mcgraw-Hill, 1996. Cap 15.

JAPAN INSTITUTE OF PLANT MAINTENANCE. **TPM: New Implementation Program in Fabrication and Assembly Industries.** 1996. 562p.

JIANPING, H; YONGLI, Y. Computer-aided Maintainability in China. **ANNUAL RELIABILITY AND MAINTAINABILITY SYMPOSIUM**, 1998. p.274-278.

JONES, J. **Engineering design:** reliability, maintainability, and testability. Blue Ridge Summit, PA: TAB Professional and Reference Books, 1988. 334p.

KIM, H. et al. The Design and Evaluation of All Voting Triple Modular. **ANNUAL RELIABILITY AND MAINTAINABILITY SYMPOSIUM**, 2002. p.439-444.

KNEZEVIC, J. Chief Mechanic: The new approach to aircraft maintenance by Boeing. **JOURNAL OF QUALITY IN MAINTENANCE ENGINEERING**, Vol. 05 No 4, 1999. p.314-324.

KUMAMOTO, H; HENLEY, E. J. **Probabilistic Risk Assesment and Management for Engineers and Scientists**. IEE Press, 1996. 597p.

KUMAR, R.; MARKESET, T.; KUMAR, U. Maintenance of machinery. **INTERNATIONAL JOURNAL OF SERVICE INDUSTRY MANAGEMENT**, Vol. 15 No. 4, 2004. p.400-413.

LYONNET, P. **Maintenance planning:** methods and mathematics. New York: Chapman and Hall, 1991. 224p.

MADU, C. N. Strategic value of Reliability and Maintainability management. **INTERNATIONAL JOURNAL OF QUALITY & RELIABILITY MANAGEMENT**, Vol. 22 No 3, 2005. p.317-328.

MIRSHAWKA, V; OLMEDO, N. **Manutenção:** combate aos custos da não-eficacia. São Paulo : Makron Books, 1993. 373p.

MURTY, A. S. R.; NAIKAN, V.N.A. Availability and Maintenance cost Optimization of a product Plant. **INTERNATIONAL JOURNAL OF QUALITY & RELIABILITY MANAGEMENT**, Vol. 12 No 2, 1995. p.28-35.

NEPOMUCENO, L. **Técnicas de manutenção preditiva.** São Paulo: Edgard Blucher, 1989.

NIOSHI(National Institute for Occupational Safety and Health) , **Maintainability. 199- . Disponivel em:** <http://www.cdc.gov/niosh/mining/topics/machinesafety/equipmentdsgn/maintainability/maintainabilty.htm>. **Acesso em: 23/04/2006.**

OLIVETO, F. E. An Algorithm to Partition the Operational Availability Parts of an Optimal Provisioning Strategy. **ANNUAL RELIABILITY AND MAINTAINABILITY SYMPOSIUM**, 1999. p.310-316.

O'CONNOR, P.D.T. **Practical Reliability Engineering.** Suffolk,John Wiley & Sons, 1985.

PITANGA, M. **Computação em cluster.** 2003. **Disponivel em:** <http://www.clubedohardware.com.br/artigos/153>. **Acesso em: 20/04/2007.**

RODRIGUEZ, C. E. P. **Confiabilidade aplicada ao processo de manufatura de sistemas mecânicos.** 2004. 156f. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2004.

ROLIM, R. L. . **Análise de confiabilidade para gerenciamento operacional de sistemas automatizados de pesagem rodo-ferroviária** . 180f. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1997.

SLACK, N.; CHAMBERS, S.; JOHNSTON, R. **Administração da Produção.** São Paulo: Atlas S.A, 2002. 747p.

SOUZA, V. C. **Organização e Gerência da Manutenção.** All Print Editora, 2006.

SUNDARARAJAN, C. **Guide to reliability engineering:** data, analysis, applications, implementation, and management. New York: Van Nostrand, 1991. 414 p.

U.S DEPARTMENT OF ENERGY, **Humans factor/ Ergonomic Handbook for the design for ease of maintenance**, Washington D.C, fevereiro 2001. 218p.

VILLEMEUR, A. **Reliability, availability, maintainability and safety assessment.** Wiley, 1991. 363p.

VINTR, Z.; HOLUB, R. R&M Requirements Allocation in Upgrading a System. **ANNUAL RELIABILITY AND MAINTAINABILITY SYMPOSIUM**, 2001. p.258-263.

VIRTANEN, S. Reliability in Product Design- Specification of dependability requirements. **ANNUAL RELIABILITY AND MAINTAINABILITY SYMPOSIUM**, 1998. p.82-88.