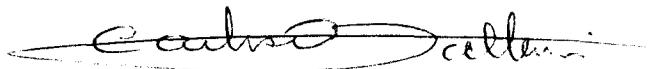


METODOLOGIA PARA A OTIMIZAÇÃO DA MANUTENÇÃO DE EQUIPAMENTOS E SISTEMAS

Este exemplar corresponde a redação final da tese devidamente corrigida e defendida pelo Sr. Ismar Simões dos Santos e aprovada pela Comissão Julgadora.

Campinas, 21 de junho de 1996.

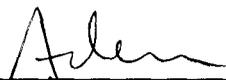


Prof. Dr. Carlos Amadeu Pallerosi
Orientador

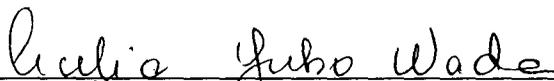
Dissertação apresentada ao Instituto de Matemática, Estatística e Ciência da Computação, UNICAMP, como requisito parcial para a obtenção do Título de MESTRE em QUALIDADE.

Tese defendida e aprovada em 21 de junho de 1996

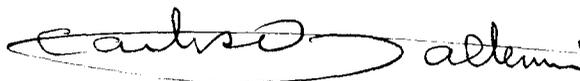
Pela Banca Examinadora composta pelos Profs. Drs.



Prof (a). Dr (a). ADEMIR JOSÉ PETENATE



Prof (a). Dr (a). CÍRCIA YUKO WADA



Prof (a). Dr (a). CARLOS AMADEU PALLEROSI

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Prof. Dr. Carlos Amadeu Pallerosi pelas suas diretrizes, sugestões e permanente incentivo.

Agradecimento especial à PETROBRAS pela oportunidade oferecida para cursar o Mestrado em Qualidade e desenvolver este trabalho.

Ao Eng^o Rogério Daisson, pelo incentivo e ajuda para desenvolver o trabalho junto à atividade de manutenção de instrumentos, e ao Eng^o Eduardo Melloni, pelas suas valiosas sugestões.

A minha esposa Cristina pelo estímulo e compreensão ao longo do mestrado e do desenvolvimento deste trabalho.

E finalmente a todos que de alguma forma colaboraram para a conclusão desta missão.

SUMÁRIO

Lista de Figuras	
Lista de Abreviaturas	
Lista de Símbolos	
Resumo	
1. INTRODUÇÃO	1
1.1- Objetivos da Metodologia Proposta	1
1.2- Sistema 7123 de Gerenciamento da Manutenção	1
1.3- Programas de Gerenciamento da Manutenção	2
2. TENDÊNCIAS E DIFICULDADES DA ATIVIDADE DE MANUTENÇÃO.	4
2.1- Objetivos Básicos da Manutenção	4
2.2- Manutenção Centrada na Confiabilidade (RCM)	5
2.3- Manutenção para Produtividade Total (TPM)	7
2.4- Dificuldades da Atividade de Manutenção	10
3. CONFIABILIDADE E MANTENABILIDADE	12
3.1- Conceito de Confiabilidade.	12
3.2- Aspectos históricos	13
3.3- Vantagens do Estudo da confiabilidade	14
3.4- Análise da Confiabilidade de Componentes	14
3.5- Distribuições de Vida de Componentes	15
3.6- A Distribuição de Weibull	20
3.7- Manutenibilidade	22
4. DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE UMA DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL	25
4.1- Método Gráfico para Estimação dos Parâmetros da Weibull	25
4.2- Análise de Dados com Censura Múltipla	27
5. SISTEMAS EM SÉRIE	30
6. MÉTODO DO SUCESSO	31

7. FALHAS OCULTAS	33
7.1- Testes Periódicos Ideais	33
7.2- Testes Periódicos Reais	35
7.3- Determinação dos Tempos até Falha	36
7.4- Influência do Parâmetro de Forma no Intervalo entre Testes	37
8. INFLUÊNCIA DA MANUTENÇÃO PREVENTIVA NA CONFIABILIDADE E NA DISPONIBILIDADE	39
8.1- Influência da Manutenção Preventiva na Confiabilidade	39
8.2- Influência da Manutenção Preventiva na Disponibilidade	43
8.3- Decisão Baseada nos Custos de Manutenção	49
9. POLÍTICA DE MANUTENÇÃO DE INSTRUMENTOS ATUAL	52
10. POLÍTICA DE MANUTENÇÃO PROPOSTA	54
10.1- Aumentar a Disponibilidade das Unidades	54
10.2- Aplicação de uma Política de Manutenção Preventiva	60
11. APLICAÇÃO DO MODELO DE POLÍTICA DE MANUTENÇÃO PROPOSTO	63
12. CONCLUSÕES.	73
13. SUGESTÕES PARA FUTUROS DESENVOLVIMENTOS	75
14. BIBLIOGRAFIA	76
14.1- Referências Bibliográficas	76
14.2- Bibliografia Recomendada	77

LISTA DE FIGURAS

3.1- a) freqüências relativas. b) freqüências acumuladas.	16
3.2- Histograma da distribuição de falhas e ajuste para uma função contínua.	17
3.3- Função densidade de probabilidade de uma distribuição de Weibull para $\gamma = 0$, $\alpha = 1$ e $\beta = 0,5$; 1; 2 e 4.	21
4.1- Determinação gráfica dos parâmetros da distribuição de Weibull para 5 valores obtidos a partir de um teste até falha.	27
4.2- Dados com censura múltipla, com tempos até falha (F) e tempos até suspensão (S).	28
7.1- Disponibilidade para testes periódicos ideais, com falhas ocultas.	34
7.2- Disponibilidade para testes periódicos reais para falhas ocultas.	35
7.3- Disponibilidade para testes periódicos reais para $\beta = 1, 2$ e 3 e considerando, TMAF = 500 dias; $T_t = 0,1$ dias e TMAR = 1 dia.	38
8.1- Efeito da manutenção preventiva na confiabilidade para $\lambda_0 = 0,002$; $\beta = 3$ e intervalo entre MP's de 300 dias e sem manutenção preventiva.	41
8.2- Efeito da manutenção preventiva na confiabilidade para $\lambda_0 = 0,002$; $\beta = 1, 2$ e 3 e intervalo entre MP = 100 dias.	42
8.3- Influência da manutenção preventiva na disponibilidade para $TMAR_F = 30$ dias; $TMAR_P = 0, 10$ e 30 dias; $\lambda_0 = 0,002$ e $\beta = 1$	46
8.4- Influência da manutenção preventiva na disponibilidade para $TMAR_F = 30$ dias; $TMAR_P = 10$ e 30 dias; $\lambda_0 = 0,002$ e $\beta = 1$ e 3	47
8.5- Influência da manutenção preventiva na disponibilidade para $TMAR_F = 30$ dias; $TMAR_P = 0$ (manutenção preventiva fora do período de produção); $\lambda_0 = 0,002$; $\beta = 1, 2$ e 3	48
8.6- Custo de manutenção unitário em função do intervalo de tempo entre manutenções preventivas T, para $C_F = 10C_P$ e para $\lambda_0 = 0,002$; $\beta = 1, 2$ e 3 e tempo total de operação $T_T = 3000$ dias.	50

8.7- Custo de manutenção unitário em função do intervalo de tempo entre manutenções preventivas, para $C_F = 10C_P$; $C_F = 50C_P$ e para $\lambda_0 = 0,002$; $\beta = 2$ e 3 e tempo total de operação $t_T = 3000$ dias..	51
9.1 - Fluxograma lógico da aplicação dos quatro tipos de manutenção previstos no Sistema 7123.	53
10.1- Fluxograma lógico para solucionar os problemas de disponibilidade dos sistemas, equipamentos e componentes.	55
10.2- Fluxograma lógico para determinar o tipo de manutenção e a sua periodicidade.	62
11.1- Dados com censura múltipla, para os tempos até falha (F) e suspensão (S) dos analisadores de oxigênio.	65
11.2- Gráfico de desconfiabilidade traçado pelo programa RAMP a partir do histórico de manutenção dos analisadores de oxigênio.	66
11.3- Gráfico da confiabilidade dos analisadores de oxigênio.	66
11.4- Diagrama de Pareto dos sintomas das falhas.	67
11.5- Diagrama de Pareto das causas das falhas.	68
11.6- Dados com censura múltipla considerando apenas como falha a causa, sujeira nas tomadas dos instrumentos e suspensões para as demais causas.	69
11.7- Influência dos custos da MP e da manutenção corretiva no intervalo entre limpeza em dias, para $\lambda_0 = 0,0014$; $\beta = 1,64$; $C_F = \text{US\$ } 4000$; $C_P = \text{US\$ } 200$ e tempo total da análise de custos 1095 dias..	71
11.8- Intervalo ótimo entre aferições/calibrações para obter a máxima disponibilidade.	72

LISTA DE ABREVIATURAS

FMEA	Failure Modes and Effects Analysis
FTA	Fault Tree Analysis
HAZOP	Hazards and Operability Study
MP	Manutenção Preventiva
RAMP	Reliability, Availability and Maintainability Program
RCM	Reliability Centered Maintenance
TAF	Tempo Até Falha
TAR	Tempo Até Recolocação
TMAF	Tempo Médio Até Falha
TMAR	Tempo Médio Até Recolocação
TMAR _F	Tempo Médio Até Recolocação na manutenção corretiva
TMAR _P	Tempo Médio Até Recolocação na manutenção preventiva
TMEF	Tempo Médio Entre Falhas
TMEM	Tempo Médio Entre Manutenções
TPM	Total Productive Maintenance
7123	Sistema 7123 de Gerenciamento da Manutenção

LISTA DE SÍMBOLOS

t	variavel tempo
$f(t)$	função densidade de probabilidade de falhas
$F(t)$	função Desconfiabilidade ou função de distribuição acumulada
$R(t)$	função Confiabilidade
$\lambda(t)$	taxa instantânea de falha ou taxa de falha
$H(t)$	taxa de falha acumulada
λ	taxa de falha constante
β	parâmetro de forma da Weibull
α	parâmetro de escala ou vida característica da Weibull
δ	vida inicial ou parâmetro de posição da Weibull
$M(t)$	função manutenibilidade
$N(t)$	função não-mantenibilidade
$g(t)$	função densidade de probabilidade de recolocação em serviço
Δt	intervalo de tempo
$\mu(t)$	taxa instantânea de recolocação em serviço
μ	taxa de recolocação constante
γ	parâmetro de forma da Weibull para a manutenibilidade
\ln	logarítmo neperiano
μ_0	taxa de recolocação característica
λ_0	taxa de falha característica
F	falha
S	suspensão
$F'(t_i)$	grau médio para o número de ordem i
r	coeficiente de correlação
x	variavel aleatória
C	nível de condiança desejado
R	confiabilidade
k	número de sucessos
χ^2	distribuição qui-quadrado
ν	graus de liberdade da distribuição qui-quadrado
$D(t)$	função disponibilidade instantânea
T	intervalo de tempo entre testes
T_t	tempo de teste
$R_M(t)$	confiabilidade de sistema com MP sistemáticas
t_T	somatória dos tempos de operação efetiva
T	intervalo de tempo entre MP sistemáticas
D	disponibilidade média
N	número total de paradas para manutenção
N_F	número de paradas para manutenção corretiva
N_P	número de paradas para manutenção preventiva

t_F	tempo de falha entre duas MP
C	custo operacional do equipamento
C_F	custo da manutenção corretiva
C_P	custo da manutenção preventiva
λ_m	taxa de falha média
r	quantidade de falhas
t_m	tempo médio entre suspensões
t_i	tempo de cada iésima suspensão
$\hat{\lambda}_0$	estimativa da taxa de falha característica
$\hat{\beta}$	estimativa do parâmetro de forma da Weibull
$\hat{\mu}_0$	estimativa da taxa de recolocação característica
$\hat{\gamma}$	estimativa do parâmetro de forma da Weibull para a mantenabilidade

RESUMO

A maioria dos programas computacionais de gerenciamento da manutenção possuem um módulo com os dados históricos de manutenção dos equipamentos, mas não calculam a disponibilidade, confiabilidade e manutenibilidade destes equipamentos. Com o objetivo de criar um método para a otimização da manutenção, tendo como base os dados históricos dos equipamentos, o Sistema 7123 de Gerenciamento da Manutenção foi modificado para permitir o cálculo direto das estimativas dos parâmetros das distribuições dos tempos até falha e dos tempos até recolocação em serviço, através do programa computacional RAMP.

O RAMP calcula a disponibilidade, confiabilidade e manutenibilidade dos sistemas, equipamentos e componentes. Com estes resultados e utilizando-se árvores lógicas de decisões, baseadas em conceitos confiabilísticos, pode-se manter ou melhorar a disponibilidade das plantas de processo, fazendo melhorias nas instalações e estabelecendo a frequência e o tipo de manutenção (preventiva sistemática, preventiva preditiva, testes periódicos para detecção de falhas ocultas ou corretiva), mais econômicos e efetivos a serem aplicados.

A manutenção preventiva sistemática, prática comum na atividade de manutenção para aumentar a confiabilidade e a disponibilidade dos equipamentos, somente em alguns casos específicos satisfaz este objetivo. A manutenção preventiva sistemática só aumenta a disponibilidade significativamente quando as taxas de falha são crescentes e o tempo médio até recolocação em serviço da manutenção preventiva é muito menor que o tempo médio até recolocação em serviço da manutenção corretiva. Uma forma mais abrangente de considerar a questão, quando a falha não tem efeito na segurança das operações, é considerar o custo operacional do equipamento. Neste caso a prática da manutenção preventiva sistemática tem se mostrado mais econômica quando as taxas de falha são crescentes e o custo da manutenção corretiva é muito maior que o custo da manutenção preventiva sistemática. Quando uma falha pode comprometer a segurança operacional, o prazo de manutenção preventiva deve ser em função da desconfiabilidade máxima que se pretende assumir.

1. INTRODUÇÃO

1.1- Objetivos da Metodologia Proposta

O principal objetivo é criar uma metodologia para otimização da manutenção tendo como base os dados históricos de um programa de gerenciamento da manutenção. A otimização da manutenção está centrada em: definir objetivos técnico-econômicos que levam a um aumento da disponibilidade e da segurança das unidades de produção; qual é o tipo de manutenção que deve ser adotada (corretiva, preventiva sistemática, preventiva preditiva, inspeções periódicas ou testes periódicos para detecção de falhas ocultas) e qual deve ser a periodicidade das manutenções.

Para elaborar este estudo, os dados históricos das intervenções de manutenção foram extraídos do módulo histórico do Sistema de Gerenciamento da Manutenção 7123¹.

O estudo foi fundamentado nos conceitos de confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade. Para determinar os parâmetros das distribuições dos tempos até falha e dos tempos até recolocação em operação, dos equipamentos e componentes, foi utilizado o programa computacional RAMP², que aplica o método gráfico para determinar os parâmetros de uma distribuição de Weibull. Nos casos em que os equipamentos não possuem dados históricos suficientes para aplicar o método gráfico utiliza-se o método do sucesso (GUIDO, 1995).

Nos equipamentos que possuem vários componentes, que a falha de um componente pode levar à falha do equipamento, eles foram tratados pela teoria dos sistemas em série.

Por último, existem vários equipamentos em que é difícil identificar o momento em que eles passam para o estado de falha. Estes equipamentos operam eventualmente e passam a maior parte do tempo em uma condição de espera para operar “stand-by”. Nestes casos adotou-se a técnica de testes periódicos para aumentar a disponibilidade destes equipamentos.

Os capítulos 3 a 8 apresentam todo o embasamento teórico para sustentar a proposta da política de manutenção (capítulo 10), e o capítulo 11 descreve, passo a passo, um exemplo da aplicação do modelo proposto.

1.2- Sistema 7123 de Gerenciamento da Manutenção

O estudo utilizou os dados históricos do Sistema 7123. Este programa foi criado para gerenciar a atividade de manutenção de instrumentação do Departamento Industrial da PETROBRAS. Embora o Sistema 7123 foi desenvol-

¹ Sistema 7123, versão MICRO, *Manutenção Preventiva de Instrumentos*, PETROBRAS/DEPIN, 1992.

² RAMP, Reliability, Availability and Maintainability Program, DUPONT/UNICAMP, Fagundes, H. C., Guido, Pallerosi, Cascone.

vido especialmente para a manutenção de instrumentos, ele pode ser utilizado para outras atividades de manutenção, com algumas modificações.

A opção de usar o Sistema 7123 como base deste trabalho deve-se principalmente ao longo tempo que ele está em utilização. Logo, possui registros históricos das intervenções dos equipamentos de vários anos.

A instrumentação industrial de uma refinaria de petróleo tem como finalidade a medição, o controle e a monitoração das variáveis do processo. Do funcionamento correto dos instrumentos dependem a segurança dos equipamentos e a especificação correta dos produtos finais. Portanto, a manutenção dos instrumentos é muito importante, devendo ser planejada e executada dentro de padrões pré-estabelecidos.

O Sistema de Gerenciamento da Manutenção 7123, programa as manutenções preventivas dos instrumentos da refinaria. O sistema dispõe de controles internos que fazem ajustes empíricos nos intervalos de manutenção preventiva, em função do estado físico dos instrumentos na última manutenção.

O Sistema 7123 possui basicamente os seguintes objetivos:

- fornecer a programação semanal da manutenção preventiva e a programação para as paradas das unidades;
- manter um registro histórico dos serviços de manutenção executados;
- fornecer relatórios estatísticos e de controle;
- transferir informações para outros sistemas de gerenciamento da manutenção e de controle de estoques;
- catalogar as malhas de instrumentos, elemento por elemento, com todos os dados referentes ao processo e os parâmetros usados para a programação da manutenção preventiva e, opcionalmente, relacionar os instrumentos por fabricante, modelo e número de série.

O Sistema 7123 possui dois módulos para análise dos registros históricos dos instrumentos: módulo de **consultas seletivas** e módulo **histórico e estatístico**. Apesar do grande número de consultas que podem ser feitas e de cruzamentos de dados possíveis, é muito difícil tirar conclusões rápidas e de forma estruturada para obter-se melhorias na disponibilidade dos equipamentos.

1.3- Programas de Gerenciamento da Manutenção

Dentre os programas de gerenciamento da manutenção desenvolvidos nas empresas e os comercializados no mercado, que foram analisados, todos tem

características básicas semelhantes e as mesmas limitações para fazer análises confiabilísticas. Foram analisados quatro programas desenvolvidos por empresas, e quatro programas disponíveis no mercado. Nenhum deles possibilita um tratamento confiabilístico para os dados históricos de manutenção. Alguns destes programas calculam o tempo médio entre falhas (TMEF), que tem pouco valor para tirar conclusões mais apuradas sobre a confiabilidade e a disponibilidade dos equipamentos. Nenhum dos programas permite calcular o tempo médio até recolocação em serviço de um equipamento (TMAR).

O Sistema 7123, assim como outros programas, registra no módulo histórico todas as datas de início das intervenções e as datas de recolocações em serviço. Também possui uma codificação para o sintoma, a causa e a solução de cada falha ocorrida. No módulo de consultas seletivas pode-se fazer vários cruzamentos de dados, como por exemplo: por tipo de equipamento; por fabricante; por causa de falha; etc., permitindo tirar muitas conclusões, mas todas de forma empírica. Este estudo aproveita os dados históricos e o módulo de pesquisa seletiva do Sistema 7123, com algumas modificações, para permitir uma análise de confiabilidade e de manutenibilidade dos dados, através do programa RAMP.

2. TENDÊNCIAS E DIFICULDADES DA ATIVIDADE DE MANUTENÇÃO

2.1- Objetivos Básicos da Manutenção

Os principais objetivos corporativos de uma indústria de processamento contínuo visam otimizar o desempenho da planta, controlar e reduzir os custos de produção. Para atingir este objetivo, o engenheiro de manutenção deve trabalhar para aumentar a disponibilidade das unidades de produção. A atividade de manutenção tem como objetivo fundamental apresentar resultados quanto à disponibilidade das unidades. Sem esta visão, os resultados da atividade de manutenção ficam restritos ao desempenho de seus elementos individuais.

LAMB (1993) considera que a disponibilidade constitui a essência para os resultados do negócio. Segundo LAMB (1993), o êxito do negócio é função de quatro subsistemas integrados para obtenção de receita:

- linha de produtos, sua adequação ao uso e sua produtividade;
- disponibilidade física eficaz, baseada na lucratividade da planta;
- produtividade do ciclo de produção;
- êxito nas vendas, baseadas na capacidade produtiva e na distribuição de produtos.

Consequentemente, as atividades de manutenção são de importância estratégica para melhorar os resultados de cada unidade produtiva. Resumindo, o principal objetivo da manutenção é aumentar a disponibilidade das unidades de processo a um custo otimizado. Como custo otimizado entende-se a melhor alternativa de custo, considerando os custos de manutenção, custos devido as falhas, perda de imagem e mercado, custo do capital para investir no aumento de produção etc..

Para conseguir este objetivo, a atividade de manutenção deve aumentar a confiabilidade dos equipamentos, diminuir o tempo e o custo de recolocação em serviço dos equipamentos. Uma boa política de manutenção tem como objetivo a implantação de ações diretas sobre a confiabilidade e a manutenibilidade dos equipamentos.

PRADHAN (1994), afirma que na sua estratégia para aumentar a disponibilidade, as empresas devem adotar rapidamente práticas de manutenção preventiva e preditiva, Manutenção para a Produtividade Total (TPM) e Manutenção Centrada na Confiabilidade (RCM).

2.2- Manutenção Centrada na Confiabilidade (RCM)

Segundo SMITH (1989), a RCM (Reliability Centered Maintenance) ou a Manutenção Centrada na Confiabilidade é uma metodologia de manutenção desenvolvida pela indústria de aviação civil no final da década de 60, que nos últimos anos tornou-se parte importante dos programas de manutenção de aviões, de navios militares e de algumas usinas nucleares (CRELIN, 1986; VASEDEVAN, 1985 e HOOK, 1987).

Com os jatos de fuselagem larga, um consórcio de companhias aéreas investigou a Manutenção Preventiva (MP), porque ela deveria ser feita, e como definir um plano economicamente viável. O resultado foi a RCM.

No início dos anos 70, a marinha americana adotou a técnica para aviões e navios de superfície, seguida pelo exército e a força aérea americana. Em junho de 1983, a gerência do EPRI (Electric Power Research Institute) recomendou que a RCM fosse avaliada de forma piloto em sistemas de usinas nucleares de energia.

Apesar da RCM ser ainda pouco utilizada na indústria de processamento contínuo, ela tem um grande potencial de ganho e alguns trabalhos já estão sendo publicados (PRADHAM, 1993 e CARVALHO, 1994).

Segundo SMITH (1989), a metodologia RCM pode ser descrita pela observação de quatro características, que a distingue da política de MP tradicional:

- I. **O objetivo fundamental da RCM é preservar a função do sistema, ao contrário da abordagem atual que é preservar a operação do equipamento.**
- II. Uma vez que deseja-se preservar a função, deve-se identificar os modos de falha dominantes que podem causar falhas nestas funções. Os modos de falha dominantes são modos de falha com uma frequência de falhas alta ou modos de falha que não podem ocorrer porque põem em risco as pessoas e o patrimônio. Para determinar os modos de falha dominantes utiliza-se os dados históricos de manutenção dos equipamentos, análise por árvore de falhas e FMEA (Failure Modes and Effects Analysis). A análise por árvore de falhas define como um sistema pode falhar. A FMEA é utilizada para equipamentos críticos, sendo uma metodologia estruturada para levantar e examinar os modos de falha potenciais e determinar o seu efeito no sistema.
- III. Priorizar as funções necessárias através dos modos de falha dominantes, de modo que os recursos, geralmente limitados, possam ser orientados para preservar as funções mais críticas. Isto é feito pela análise dos modos de falha dominantes, através de uma árvore de decisões, para verificar as consequências de cada modo de falha e como evitá-los.

IV. Selecionar apenas atividades de MP que efetivamente reduzam a possibilidade de falha ou perda da função, e que seja o caminho mais barato para atingir este objetivo. Um risco potencial de segurança é a única situação onde as considerações de custo são ignoradas. Comumente, estes programas envolvem quatro níveis de manutenção:

a) **definido pela falha** - em algumas situações a decisão mais econômica é deixar a falha ocorrer. Esta decisão aparece quando os recursos de MP são limitados, a MP não reduz a possibilidade de falha ou tem um custo maior que o custo da falha.

b) **definido pelo tempo** - a substituição ou recuperação de um componente ocorre em períodos pré fixados. Este tipo de MP é especificada quando se conhece bem a relação tempo-falha envolvida.

c) **definido pela condição** - quando o desempenho ou a condição de operação do componente é periodicamente mensurado (continuamente ou em intervalos regulares). Quando um limite é atingido, a intervenção é feita antes de ocorrer uma falha completa.

d) **descoberta de falhas ocultas** - a RCM atribui às funções ocultas maior prioridade que para os outros tipos de falhas (MOUBRAY, 1988). Nos dispositivos de proteção (válvulas de segurança, relés, etc.), como não operam continuamente, os mesmos podem estar em estado de falha e não serem detectados nesta condição, pela operação. Se não é possível encontrar tarefas preventivas aplicáveis e efetivas para falhas ocultas é preciso executar testes periódicos nestes dispositivos para saber se a função oculta está operacional. As consequências de uma falha em um dispositivo de proteção são normalmente sérias, provavelmente levando a danos materiais, e em alguns casos humanos.

A RCM estipula a MP compulsória quando há consequências de segurança. Se não houver um tipo de MP que reduza o nível de falha para uma condição aceitável, o item precisa ser reprojetoado.

A metodologia RCM é melhor conduzida por uma equipe multi-disciplinar, liderada por um facilitador independente. A equipe é responsável pela condução da análise e pelas recomendações. A abordagem é muito parecida com um HAZOP (Hazards and Operability Study), exceto que a focalização é mais nos equipamentos que no sistema.

2.3 - Manutenção para Produtividade Total (TPM)

A TPM (Total Productive Maintenance) deve ser realizada com a participação de todos os elementos da organização. TPM segundo NAKAJIMA (1988), é definida como:

- um sistema que busca a maximização do rendimento operacional global dos equipamentos;
- um enfoque sistêmico e integrado, onde se considera o ciclo de vida do próprio equipamento, através de um programa de prevenção de manutenção (incorporação no projeto a não-necessidade de manutenção), manutenção com introdução de melhorias e MP, o que proporciona, em síntese, um incremento na produtividade operacional;
- participação de todos os departamentos envolvidos como: programação de produção, produção e manutenção;
- envolvimento e participação de todos, desde a alta administração até o pessoal da linha de produção, consolidando o sistema de manutenção espontânea, ou seja, não ser necessária uma ordem para a realização da manutenção, bem como a vigência do estado de espírito, “da minha máquina cuido eu”;
- colaboração das atividades voluntárias de pequenos grupos, através de um sistema apropriado de sugestões.

Um dos principais objetivos da TPM é a melhoria da estrutura orgânica da empresa através da melhoria das pessoas e dos equipamentos, ou seja preparar e desenvolver as pessoas para conduzir as fábricas do futuro dotadas de automação, pelos seguintes principais procedimentos:

- capacitação dos operadores para executar as atividades de manutenção de forma espontânea;
- capacitação para executar atividades de manutenção em equipamentos baseados na mecatrônica (mecânica mais eletrônica);
- capacitação dos engenheiros para planejar, projetar e desenvolver equipamentos que não exijam intervenções de manutenção.

Depois do desenvolvimento das pessoas, o próximo passo é a melhoria dos equipamentos, onde se espera uma melhoria do desempenho dos equipamentos existentes, através de melhorias e projetos de novos equipamentos, considerando-

se os parâmetros relativos ao seu ciclo de vida e a velocidade de sua entrada em produção.

Para maximizar o rendimento operacional global deve-se eliminar as “6 grandes perdas” apontadas pelo TPM, que são:

- perda por quebra de equipamento, que pode ser uma quebra repentina ou uma quebra precedida de uma degeneração gradativa do desempenho do equipamento;
- perda devido a mudança de linha de produção e preparação/regulagem para produzir um novo produto;
- perda por parada temporária, sem ocorrência de falha (quebra), por tratar-se de uma interrupção momentânea devido a um problema qualquer;
- perda por redução de velocidade de produção, decorrente de fatores inicialmente não considerados, tais como problemas relativos à qualidade do produto, problemas mecânicos, etc.;
- perda por operação relativa a retrabalho ou eliminação de produtos defeituosos;
- perda até o equipamento entrar em regime de produção, devido à instabilidade da própria operação, ferramentas inadequadas, problemas de domínio técnico por parte do operador e outros.

Estas perdas em geral são significativas, muito superiores ao que podemos imaginar. Esta é a razão porque muitos destes fatores permanecem ocultos e passam despercebidos.

A quebra do equipamento é o fator que mais prejudica o rendimento operacional. Segundo NAKAJIMA (1988), as máquinas foram concebidas para trabalhar com “defeito zero”. As quebras são resultantes do manuseio imposto pelo próprio homem. As máquinas quebram devido a nossa incapacidade em perceber as falhas ou causas que influem na sua degradação, perceptível somente após a sua ocorrência. Estas falhas são denominadas **falhas inconscientes**. É importante externá-las, torná-las visíveis, para possibilitar as medidas preventivas. As principais falhas inconscientes ou ocultas são: sujeira, atritos, desgastes, corrosão, riscos, temperatura, barulho, detritos, folgas, vazamentos, deformações, trincas, vibrações, etc.. Enfim, falhas as quais geralmente não se atribui importância e que conseqüentemente são negligenciadas.

As **falhas inconscientes** podem ainda ser classificadas em dois tipos: falhas inconscientes **físicas** e falhas inconscientes **psicológicas**.

As **falhas inconscientes físicas** são falhas não visíveis e que passam despercebidas, tais como: falhas internas detectadas somente abrindo-se o

equipamento ou quando submetido a diagnóstico específico, falhas em locais de difícil acesso e portanto de difícil visualização, e falhas invisíveis devido a detritos e sujeira.

As **falhas inconscientes psicológicas** são falhas devidas a falta de capacitação ou conscientização, tanto dos operadores quanto dos elementos de manutenção.

Para a obtenção da “quebra zero”, devemos adotar 5 procedimentos:

- estruturar as condições básicas para operação promovendo a limpeza da área e dos equipamentos, manter o asseio, lubrificação e ordem;
- obedecer às condições de uso operando os equipamentos dentro dos limites definidos no projeto;
- inspecionar e monitorar permanentemente e de forma criteriosa, inclusive nos detalhes, e capacitar as pessoas para recuperar os equipamentos;
- sanear os pontos falhos do projeto. A maioria das falhas são decorrentes da falta de capacitação técnica na fase de projeto ou de fabricação do equipamento. Estes pontos deverão ser levantados e sanados;
- incrementar a capacitação técnica treinando e capacitando tanto os operadores dos equipamentos como os elementos da manutenção, proporcionando-lhes conhecimento técnico e treinamento especializado.

A realização da manutenção espontânea pelos próprios operadores é uma característica original da TPM. Os operadores estão perto dos equipamentos, portanto eles podem atuar como sensores, prevendo a grande maioria das falhas antes que elas ocorram. O objetivo é disseminar o conceito “da minha máquina, cuidado eu”, ou seja, do senso de responsabilidade para a execução da manutenção espontânea em todos os níveis. Portanto, é preciso realizar programas de treinamento e de educação de forma gradativa e constante. Para implantar a manutenção espontânea devem ser vencidos as seguintes etapas:

- incentivar a limpeza dos equipamentos para os operadores descobrirem os pontos de falhas potenciais;
- introduzir melhorias para facilitar a limpeza e lubrificação nos pontos de difícil acesso;
- elaborar procedimentos de limpeza e de lubrificação;
- promover treinamento e educação para a execução das inspeções;

- elaborar um programa de inspeções espontâneas e promover a sua execução;
- efetivar a padronização dos diversos parâmetros necessários à gestão, como, fluxo de material, registro dos dados, etc.;
- promover a análise e a melhoria dos equipamentos, baseados nos dados e análises como as do TMEF (Tempo Médio Entre Falhas).

2.4- Dificuldades da Atividade de Manutenção

Apesar dos avanços conseguidos nos últimos anos na atividade de manutenção, com as metodologias, como a RCM e TPM, esta ainda é vista como um mal necessário, ao invés de um instrumento de vantagem competitiva, em muitas empresas. Entre os vários problemas que afetam a atividade de manutenção, destacam-se os seguintes:

- muitos setores de manutenção ainda dão uma grande ênfase na execução da manutenção e dedicam pouco tempo no estudo das causas das falhas dos equipamentos;
- em muitas empresas a manutenção preventiva, quando adotada, passa a ser executada mecanicamente, em prazos fixos, que raramente são reavaliados, e quando isto ocorre, geralmente é devida às necessidades de redução de custos ou de pessoal;
- crença entre muitos gerentes e supervisores de manutenção que, quanto mais manutenção preventiva maior a confiabilidade dos equipamentos;
- dificuldade para formar técnicos com bom conhecimento prático e teórico, em parte devido ao pouco interesse gerencial pela atividade;
- com a prática indiscriminada da terceirização, o corpo técnico da manutenção passa a atuar quase que exclusivamente como fiscal, reduzindo o tempo dedicado ao planejamento da manutenção e quase nada para a prevenção de falhas;
- as técnicas estatísticas e de confiabilidade começam a ser aplicadas de forma tímida e apenas para alguns trabalhos específicos;
- dificuldade para registrar corretamente todos os eventos da manutenção, resultando em arquivos históricos da manutenção incompletos e com muitos erros;

- pouca preocupação com os indicadores de desempenho da manutenção;
- dificuldade em apurar os custos de manutenção corretiva e preventiva devido a carência de uma gestão de custos.

3. CONFIABILIDADE E MANTENABILIDADE

3.1- Conceitos Básicos

No conceito popular, a confiabilidade de um produto está associada com o funcionamento bem sucedido ao longo da vida útil, sem ocorrência de quebras ou falhas. Entretanto, este conceito de confiabilidade não é adequado sob o ponto de vista de uma análise de engenharia. Para isto, é necessário definir a confiabilidade quantitativamente como uma probabilidade. A seguinte definição é mais apropriada para a análise de engenharia:

“Confiabilidade é a probabilidade de um equipamento, componente ou sistema desempenhar corretamente suas funções previstas, por um período de tempo estabelecido e sob condições operacionais e ambientais especificadas”.

A definição de confiabilidade explicita quatro aspectos muito importantes: sua natureza probabilística; a dependência do tempo; necessidade de definir o que significa desempenhar corretamente suas funções previstas e especificar as condições de uso.

O conceito de probabilidade pode ser compreendido como a chance de um determinado evento ocorrer, como a falha de uma bomba centrífuga devido a quebra de um rolamento. A probabilidade de que um determinado evento ocorra é representada por um número que varia de zero a um. Para quantificar a confiabilidade, utiliza-se a teoria das probabilidades e a estatística. A confiabilidade trabalha com a incerteza e uma das principais tarefas dos engenheiros de confiabilidade é reduzir as incertezas, aumentando a confiabilidade.

Neste trabalho, como estamos tratando com sistemas, equipamentos e componentes reparáveis, é necessário introduzir dois conceitos adicionais: manutenibilidade e disponibilidade.

“Manutenibilidade é a probabilidade de recolocar em serviço (em operação), um equipamento, componente ou sistema, em um dado tempo, sob condições de manutenção especificadas”.

Existe uma perfeita analogia entre as probabilidades de falhar (confiabilidade) e de manter (manutenibilidade), ambas referidas a uma mesma variável aleatória, no nosso caso o tempo.

Uma das principais atribuições da equipe de manutenção de uma empresa é aumentar a disponibilidade dos sistemas dentro de um custo total otimizado. Podemos definir disponibilidade como sendo a probabilidade de um equipamento, componente ou sistema de:

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

É importante ressaltar que um sistema pode apresentar uma excelente disponibilidade, embora apresente confiabilidade relativamente baixa. Este aparente paradoxo é devido principalmente ao uso de redundâncias, na qual a falha de um componente não implica na falha do sistema e tem uma recolocação em serviço rápida e eficaz (PALLEROSI, 1994).

3.2- Aspectos Históricos

KUMAMOTO (1981), relata que os primeiros estudos para quantificar a confiabilidade ocorreram na indústria aeronáutica. Depois da Primeira Guerra Mundial, com o aumento do tráfego aéreo e dos desastres, houve a necessidade de aumentar os níveis de segurança e de confiabilidade das aeronaves.

O desenvolvimento dos primeiros modelos matemáticos de confiabilidade começaram durante a Segunda Guerra Mundial na Alemanha, onde um grupo, liderado por Wernher Von Braun pediu para o matemático Robert Lusser, resolver os problemas de falta de confiabilidade dos foguetes V1. A primeira série de 10 foguetes, foram totalmente sem confiabilidade. Alguns foguetes explodiram nas rampas de lançamento e os outros caíram no Canal da Mancha. O resultado foi que Lusser desenvolveu a equação da confiabilidade para componentes em série:

$$R_s = R_1.R_2.R_3...R_n \text{ ou } R_s = \prod_{i=1}^n R_i . \quad (3.1)$$

Nos Estados Unidos durante os anos 40, houve um esforço na melhoria da qualidade para aumentar a confiabilidade, através de melhores projetos, materiais mais resistentes, endurecimento de superfícies, melhoria dos instrumentos de inspeção, utilização de planos de amostragem, cartas de controle, etc..

A engenharia da confiabilidade, como disciplina, teve origem nos anos 50 nos Estados Unidos, com o aumento da complexidade dos sistemas eletrônicos militares, cujas falhas reduziam muito a disponibilidade e aumentavam os custos. Durante a Guerra da Coréia, o Departamento de Defesa dos Estados Unidos

descobriu que a falta de confiabilidade provocava um grande gasto de manutenção. O custo por ano para manter cada dólar investido em equipamentos eletrônicos era de dois dólares.

Nos anos 60 surgiram as novas técnicas de confiabilidade e uma grande variedade de aplicações. A era dos mísseis balísticos e foguetes, desenvolveu muito a confiabilidade. Nesta época foram criadas as primeiras normas MIL-STD, exigindo estudos sistemáticos de segurança e testes de confiabilidade.

Em 1961, o conceito de análise por árvore de falhas foi introduzido por H. A. Watson, dos Laboratórios Bell.

Em 1966, o Departamento de Defesa dos EE.UU. adotou os “Air Force Standards” e começou a exigir estudos de segurança de sistemas para todos os contratos e em todas as fases do desenvolvimento de sistemas.

Nos anos 70, com o aumento das usinas nucleares, o surgimento de grupos ambientalistas, acidentes industriais sérios como os de Flixborough na Inglaterra e Cervesa na Itália, houve um grande número de leis exigindo estudos de risco antes da construção de novas plantas.

3.3- Vantagens do Estudo da Confiabilidade

Todas as plantas industriais, equipamentos e componentes têm uma vida finita. O custo de uma falha pode ser muito alto, principalmente se a falha for inesperada, imprevista, e resultar em um longo tempo de indisponibilidade do equipamento, até trocar as partes que falharam. Além dos custos diretos resultantes da indisponibilidade, também ocorrem perdas de imagem da empresa e de mercado. Uma falha também pode trazer consequências para as instalações, as pessoas e para o meio ambiente. Nestes casos, os custos podem ser infinitamente maiores.

Através da análise de confiabilidade pode-se avaliar as probabilidades de falha dos componentes, identificando-se entre todos os componentes do sistema, quais os que contribuem para a falha, e assim aumentar a confiabilidade do sistema. A análise de confiabilidade também vai fornecer importantes subsídios para a análise de risco dos sistemas, que tem como objetivo calcular a frequência esperada das ocorrências de falha e as suas consequências.

3.4- Análise de Confiabilidade da Componentes

É necessário definir o conceito de componente e sistema reparável. Geralmente um sistema reparável é formado por vários componentes. Um componente é um item que pode falhar apenas uma vez e um sistema reparável é aquele que pode ser reparado através da troca do componente que falhou.

A troca do componente deve restabelecer o sistema à condição original, “tão bom quanto novo”. A hipótese que o sistema será restabelecido na condição de “tão bom quanto novo”, é muito importante na análise de confiabilidade. Outra

hipótese importante é que todas as observações são para sistemas, equipamentos ou componentes do mesmo tipo, do ponto de vista estatístico, isto é, os tempos de vida são independentes e igualmente distribuídos. No caso de dados censurados, também utilizados para determinar a distribuição da vida de um componente, é assumido que a distribuição da vida das unidades censuradas é igual à distribuição da vida dos componentes que não foram retirados de serviço antes de falhar. Esta suposição não é satisfeita se o componente retirado de operação apresentar sintomas de que está prestes a falhar. Estas hipóteses nem sempre podem ser assumidas nos estudos de manutenção. Entretanto, o não atendimento completo das hipóteses, não invalida a aplicação da teoria, desde que se saiba as suas conseqüências.

3.5- Distribuições de Vida de Componentes

Considera-se a hipótese de que um componente só tem dois estados possíveis, em funcionamento ou em falha, e que a falha é irreversível. A “vida” de um componente segue então um esquema muito simples: o componente novo é colocado em serviço, funciona por um certo tempo e depois “morre”.

Para analisar a “vida” de um grande número de componentes utiliza-se um método clássico da estatística descritiva. Conhecendo-se a amplitude dos tempos até falha, esta pode ser dividida em um determinado número N de intervalos, e para cada intervalo de tempo t , determina-se o número de componentes que falharam em t , $t+1$,...etc.. O resultado das observações pode ser apresentado em um histograma mostrando as frequências relativas (fig. 3.1a). Também pode-se traçar um histograma acumulado (fig. 3.1b), que indica em cada tempo t , a proporção de componentes que falharam no intervalo $0,t$. O complemento deste histograma está apresentado na fig. 3.2, na forma de uma curva contínua, ajustada, para a frequência acumulada, que tem o nome de curva de mortalidade.

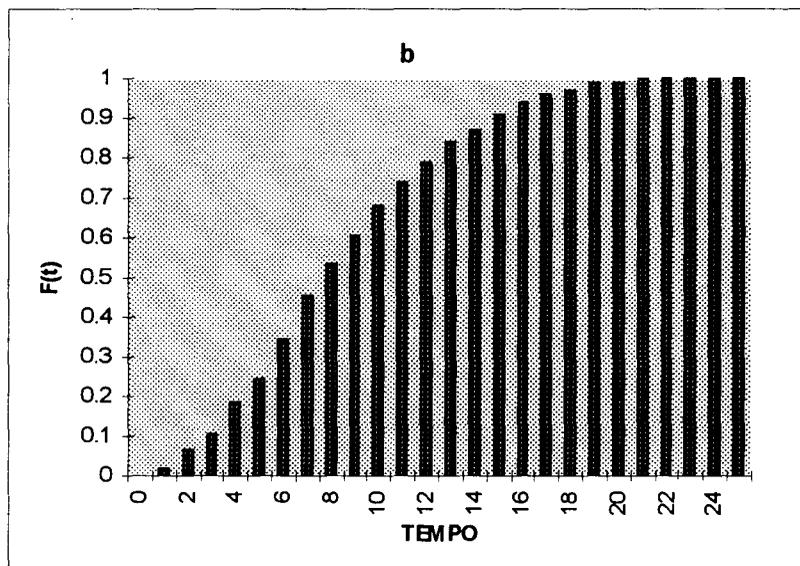
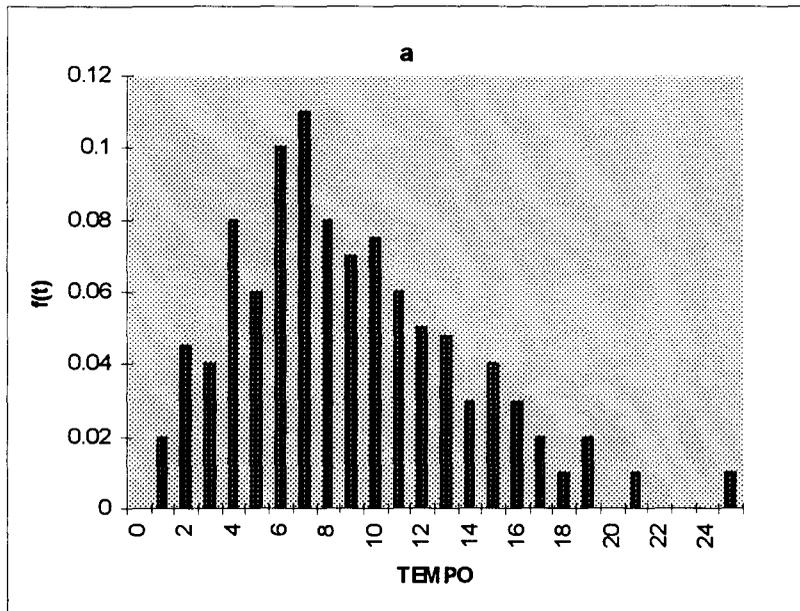


Figura 3.1- a) frequências relativas. b) frequências acumuladas.

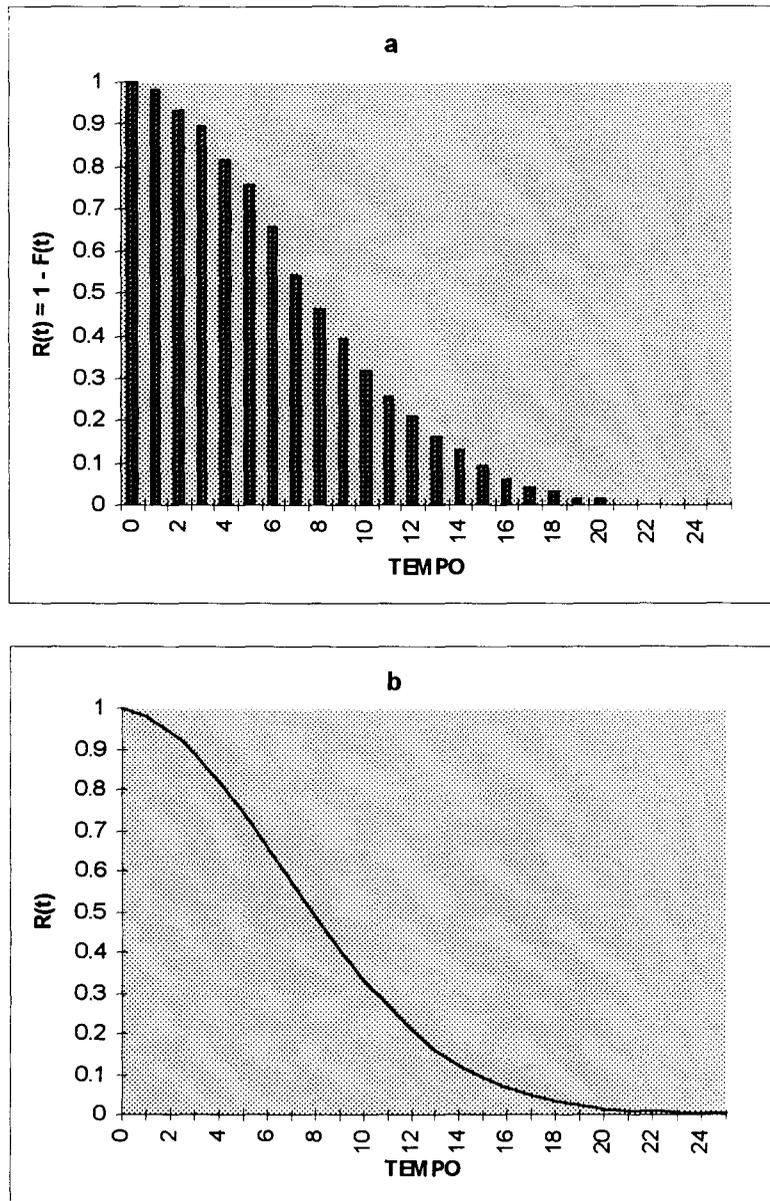


Figura 3.2- Histograma da distribuição de falhas e ajuste para uma função contínua.

A curva contínua ajustada a partir de um histograma de freqüências relativas $f(t)$, é definida como a função densidade de probabilidade (f.d.p.) e a área total sob a curva é igual a 1. Em qualquer tempo t , a área à esquerda é a probabilidade de falha de um componente até o tempo t . A curva de probabilidade de falha versus o tempo é chamada de função de distribuição acumulada (f.d.a.) ou função **desconfiabilidade** $F(t)$.

$$F(t) = \int_0^t f(t') dt' \quad , \text{ para} \quad \begin{aligned} t = 0, & \quad F(0) = 0, \\ t = \infty, & \quad F(\infty) = 1. \end{aligned} \quad (3.2)$$

A área à direita de t é o complemento de $F(t)$, e indica a probabilidade do componente não falhar até o tempo t . A curva de probabilidade de sobrevivência “versus” o tempo é chamada de função **confiabilidade** $R(t)$.

$$R(t) = 1 - F(t), \text{ onde } R(t) = 1 - \int_0^t f(t') dt' , \quad (3.3)$$

para

$$t = 0, R(0) = 1,$$

$$t = \infty, R(\infty) = 0.$$

Como a derivada da função probabilidade de falha $F(t)$ corresponde à função densidade de probabilidade de falha $f(t)$, tem-se:

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = - \frac{dR(t)}{dt} . \quad (3.4)$$

Outra função importante é a taxa instantânea de falha $\lambda(t)$, também conhecida como taxa de mortalidade ou simplesmente taxa de falha. A taxa de falha $\lambda(t)$, pode ser definida em função da confiabilidade $R(t)$ e da função densidade de probabilidade de falhas $f(t)$. A taxa de falhas $\lambda(t)$ pode ser definida como uma probabilidade condicional. Seja $\lambda(t)\Delta t$ a probabilidade de um componente falhar em um tempo qualquer ($t_1 < t + \Delta t$), dado que o componente não falhou até o tempo ($t_1 = t$). Logo:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} . \quad (3.5)$$

A taxa de falha acumulada $H(t)$ é obtida através da equação,

$$H(t) = \int_0^t \lambda(t') dt' . \quad (3.6)$$

Considerando-se agora a eq. 3.4 tem-se,

$$\lambda(t) = - \frac{1}{R(t)} \cdot \frac{dR(t)}{dt} . \quad (3.7)$$

A equação 3.5 é muito interessante sob vários aspectos. Para o tempo ($t = 0$), a taxa instantânea de falha $\lambda(t)$ é igual à função densidade de probabilidade de falhas, ou seja [$\lambda(0) = f(0)$]. Adicionalmente, ela mostra que $\lambda(t)$ é uma função condicional de $f(t)$ relacionada com a sobrevivência $R(t)$. Fisicamente, significa

que $f(t)$ permite a avaliação da probabilidade de falha em qualquer período de tempo t futuro, enquanto $\lambda(t)$ permite que a probabilidade de falha seja avaliada para o próximo período de tempo, desde que o componente tenha sobrevivido até o tempo t . Multiplicando-se a eq. 3.7 por dt e integrando-se entre zero e t resulta,

$$\int_0^t \lambda(t') dt' = -\int_0^{R(t)} dR(t') / R(t'), \quad (3.8)$$

$$\int_0^t \lambda(t') dt' = -\ln[R(t)] \quad (3.9)$$

uma vez que $[R(0) = 1]$. E finalmente exponencializando resulta a expressão desejada para a confiabilidade

$$R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t') dt'} = e^{-H(t)}, \quad (3.10)$$

que corresponde à equação geral da confiabilidade, para qualquer tipo de distribuição de probabilidades. Para o caso particular de taxa de falha constante e independente do tempo, resulta:

$$R(t) = e^{-\lambda t}, \quad (3.11)$$

ou seja, a confiabilidade corresponde a uma função do tipo **exponencial**.

A taxa de falha pode ter diferentes comportamentos, como ficar constante, ser crescente ou decrescente.

A **taxa de falha constante** significa que a probabilidade de uma falha é independente do tempo de vida do componente. Isto normalmente ocorre para componentes eletrônicos, onde as falhas têm causas aleatórias não relacionadas com a idade do componente.

A **taxa de falha crescente** significa que o componente tem maior probabilidade de falhar quanto maior o tempo de uso. Esta é uma condição típica para componentes mecânicos devido a degradação por corrosão, desgaste, fadiga, etc.

A **taxa de falha decrescente**, significa que o componente tem menor probabilidade de falhar quanto maior o tempo de uso. Isto ocorre para componentes novos devido a falhas de controle da qualidade de fabricação (falhas de juventude).

3.6- A Distribuição de Weibull

Comparando-se a distribuição de Weibull com as outras distribuições, como a Gama e a Lognormal, esta tem uma propriedade muito importante, que é a não existência de uma forma característica específica. Dependendo dos parâmetros da função confiabilidade, ela pode representar muitas distribuições particulares. Por este motivo, a distribuição de Weibull é uma das mais usadas para descrever a distribuição dos tempos até falha nas análises de confiabilidade. As vantagens de se usar a distribuição de Weibull nos estudos de confiabilidade são os seguintes:

- ela pode representar distribuições dos tempos até falha com taxas de falha crescentes, decrescentes ou constantes;
- ela é matematicamente simples;
- ela é adequada para análises gráficas;
- ela tem demonstrado maior habilidade para ajustar a maioria dos tempos até falha dos componentes que as demais distribuições;
- na sua forma triparmétrica permite a análise dos casos onde o início de operação do componente não coincide com o início da análise.

A função densidade de probabilidade de falhas é definida como:

$$f(t) = \frac{\beta(t - \delta)^{\beta-1}}{\alpha^\beta} e^{-\left(\frac{t-\delta}{\alpha}\right)^\beta}, \quad (3.12)$$

onde: $t \geq 0$, $\beta > 0$ e $\alpha > 0$;

β = parâmetro de forma;

α = parâmetro de escala ou vida característica (desconfiabilidade 63,21%);

δ = vida inicial ou parâmetro de posição.

A função confiabilidade, dada pela equação 3.10, assume a forma,

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-\delta}{\alpha}\right)^\beta}. \quad (3.13)$$

Parâmetro de forma β , basicamente define a forma das curvas da distribuição de Weibull. Sua influência é mostrada na fig.3.3, correspondendo a uma completa variação da forma, permitindo sua aplicabilidade em diversos casos práticos.

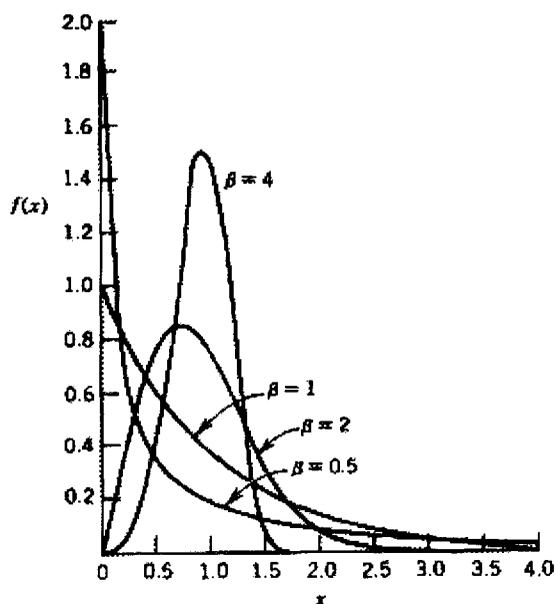


Figura 3.3- Função densidade de probabilidade de uma distribuição de Weibull para $\gamma = 0$, $\alpha = 1$ e $\beta = 0,5; 1; 2$ e 4 .

Da equação 3.5 resulta a taxa instantânea de falha $\lambda(t)$,

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t - \delta}{\alpha} \right)^{\beta-1} \quad (3.14)$$

- Para ($\beta = 1$), taxa instantânea de falha é constante e a distribuição de Weibull resulta em uma distribuição exponencial;
- Para ($\beta > 1$), a taxa instantânea de falha é crescente;
- Para ($\beta < 1$), a taxa instantânea de falha é decrescente.

Para a distribuição de Weibull biparamétrica (β, α) resulta as equações:

$$f(t) = \frac{\beta t^{\beta-1}}{\alpha^\beta} e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta}, \quad (3.15)$$

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta}, \quad (3.16)$$

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta-1}. \quad (3.17)$$

3.7- Manutenibilidade

O tempo necessário para reparar um sistema não é fixo, ele depende de uma série de fatores, como o nível de habilidade da equipe de manutenção entre outros. Portanto o tempo de reparo de um sistema não é uma constante, mas sim, uma variável aleatória.

Existe uma perfeita analogia entre as probabilidades de falhar (confiabilidade e desconfiabilidade) e de manter (manutenibilidade e não-mantenibilidade), ambas referidas a uma mesma variável aleatória o tempo.

Simplificadamente tem-se as seguintes definições, sob o ponto de vista operacional:

- Manutenibilidade $M(t)$: probabilidade de recolocar em serviço um equipamento componente ou sistema em um dado tempo t ;
- Não-Mantenibilidade $N(t)$: probabilidade do equipamento componente ou sistema não ser recolocado em serviço em um dado tempo t .

Considerando-se que, a densidade de probabilidade de recolocação em serviço $g(t)$ vezes um intervalo de tempo Δt é a probabilidade de um elemento ser recolocado em serviço entre um tempo t e $t + \Delta t$, a manutenibilidade é definida como

$$M(t) = \int_0^t g(t') dt' \quad (3.18)$$

Análogo a taxa de falha descrita no item 3.5 a taxa instantânea de recolocação em serviço $\mu(t)$, é dada por

$$\mu(t) = \frac{g(t)}{1 - M(t)} = \frac{g(t)}{N(t)}, \quad (3.19)$$

derivando-se a equação 3.18 obtém-se,

$$g(t) = \frac{dM(t)}{dt} \quad , \quad (3.20)$$

e combinando-se este resultado com a equação 2.18 resulta a equação,

$$\mu(t) = \frac{1}{1 - M(t)} \cdot \frac{dM(t)}{dt} \quad . \quad (3.21)$$

Relocando-se dt para a esquerda e integrando entre 0 e t, obtem-se a equação geral

$$M(t) = 1 - e^{\int_0^t \mu(t') dt'} \quad . \quad (3.22)$$

Por definição, o TMAR de um equipamento componente ou sistema e dado pela equação,

$$TMAR = \int_0^{\infty} N(t) dt \quad (3.23)$$

Para uma distribuição de Weibull com dois parâmetros, resultam as seguintes equações,

Densidade de Probabilidade de Recolocação:

$$g(t) = \gamma \cdot \mu_0 \cdot t^{\gamma-1} \cdot e^{-(\mu_0 \cdot t)^\gamma} \quad . \quad (3.24)$$

Taxa instantânea de recolocação:

$$\mu(t) = \gamma \cdot \mu_0 \cdot t^{\gamma-1} \quad . \quad (3.25)$$

Não-mantenabilidade:

$$M(t) = 1 - e^{-(\mu_0 \cdot t)^\gamma} \quad . \quad (3.26)$$

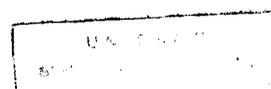
Mantenabilidade:

$$M(t) = 1 - e^{-(\mu_0 t)^\gamma} \quad (3.27)$$

onde:

γ = parâmetro de forma;

μ_0 = taxa de recolocação característica [para $N(t) = 1/e = 0,37$].



4. DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE UMA DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL

4.1- Método Gráfico para Estimação dos Parâmetros da Distribuição de Weibull

Existem basicamente dois métodos para estimar os parâmetros de uma função de Weibull (β e α); um gráfico e outro analítico.

Neste trabalho, os parâmetros da distribuição de Weibull são estimados pelo método gráfico, a partir do programa computacional RAMP. A escolha deste método levou em conta as seguintes vantagens e limitações já mencionadas por NELSON (1982);

Vantagens:

- o método gráfico é rápido e simples para usar. Ao contrário, o método numérico necessita de um especialista para analisar os dados e um “software” especial. Geralmente a maior precisão do método numérico não compensa o esforço;
- apresenta os dados de uma forma de simples compreensão. Isto ajuda a tirar conclusões dos dados;
- o método gráfico permite avaliar o grau de ajuste de uma distribuição teórica aos dados;
- ela se aplica a dados completos e censurados;
- o método gráfico facilita visualizar um ou mais dados incorretos ou viciados;
- permite chegar a várias estimativas de uma distribuição, tais como: parâmetros da distribuição, quartis, percentis, falhas durante a garantia, taxa de falha, etc.

Desvantagens:

- o método gráfico não é objetivo. Duas pessoas usando os mesmos dados podem obter estimativas diferentes, mas normalmente chegam às mesmas conclusões. Com a utilização do programa RAMP esta desvantagem deixou de existir;
- não determina intervalos de confiança ou um teste de hipóteses, entretanto o gráfico é geralmente conclusivo, não necessitando de resultados analíticos.

Os parâmetros (α e β) podem ser determinados graficamente utilizando-se o gráfico de probabilidades de Weibull apresentado na figura 4.1. Para transformar os dados de uma distribuição de Weibull em uma linha reta, multiplica-se duas vezes por \ln os dois lados da equação da confiabilidade obtendo-se,

$$\ln \left[\ln \left(\frac{1}{1 - F(t)} \right) \right] = \beta \ln t - \beta \ln \alpha, \quad (4.1)$$

que pode ser expressa por uma equação linear,

$$Y = \beta.X + C \quad (4.2)$$

Desta forma, o gráfico de variação das desconfiabilidades é construído tendo uma escala $\ln \ln$ na ordenada (y) representando a probabilidade acumulada de falhas $F(t)$, e uma escala \ln na abcissa representando o tempo (t). O coeficiente angular da reta será o parâmetro de forma β , como indicado na figura 4.1. A taxa de falha característica λ_0 será dada por:

$$\lambda_0 = 1/\alpha, \quad (4.3)$$

onde α é a vida característica, ou seja, a vida do equipamento para uma probabilidade acumulada de falha [$F(t) = 0,6321$].

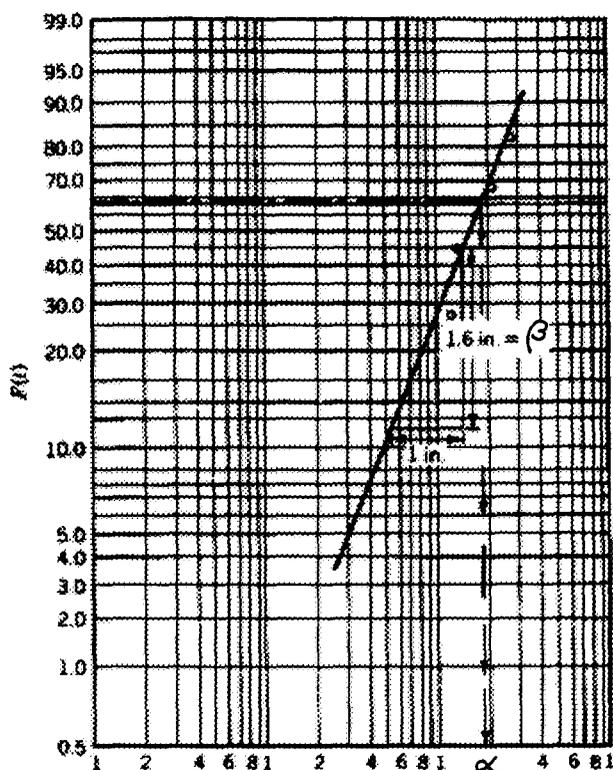


Figura 4.1- Determinação gráfica dos parâmetros da distribuição de Weibull para 5 valores obtidos a partir de um teste até falha.

Para a determinação do parâmetro de forma β utiliza-se a equação:

$$\beta = \ln \left[\ln \left(\frac{1}{1 - F(t)} \right) \right] / (\ln t - \ln \alpha) \quad (4.4)$$

onde (t) é um valor qualquer, de preferência o menor possível, para melhor precisão de cálculo. O programa RAMP utiliza o valor $[F(t) = 0,01]$.

4.2- Análise Gráfica de Dados com Censura Múltipla

Como vimos no item anterior, a análise gráfica é muito usada para interpretar dados, porque ela é simples e efetiva. A análise gráfica é muito utilizada para analisar tempos de vida de equipamentos ou componentes, no campo ou em teste, de equipamentos elétricos ou mecânicos, grandes ou pequenos. A análise gráfica pode ser usada para dados com censura múltipla.

Dados com censura múltipla consistem em analisar tempos de vida até falha e tempos de vida até uma suspensão, conforme pode ser visto na figura 4.2. Estes dados de vida até uma suspensão são muito comuns e resultam das seguintes condições: remoção de uma unidade de uso antes de falhar; perda ou falha da unidade devido a uma causa externa; ou tempos de vida de unidades que estão

ainda operando sem falhar. No caso da manutenção, também se considera como censura a retirada de operação do equipamento por manutenção preventiva sistemática.

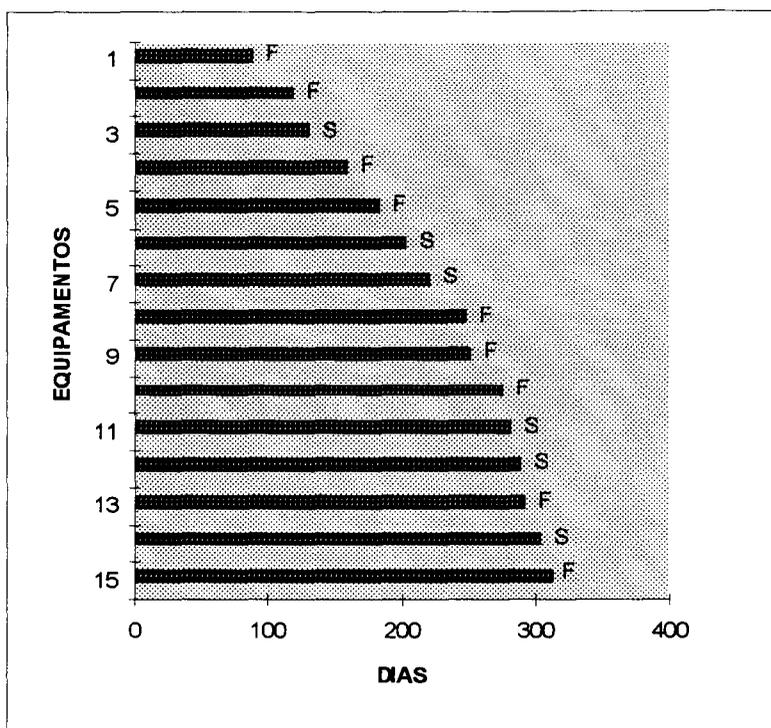


Figura 4.2- Dados com censura múltipla, com tempos até falha (F) e tempos até suspensão (S).

Para analisar os dados históricos de manutenção dos equipamentos através da análise gráfica utilizou-se o método do incremento, conforme norma NBR 6742 de jan/87. Esta norma pode ser utilizada para dados completos ou dados com censura múltipla.

O inter-relacionamento da amostra de equipamentos com a população é representado pelo grau médio, que é a percentagem de falhas $[F'(t_i)]$ obtida em função da quantidade de equipamentos analisados e do número de ordem crescente do equipamento na amostra.

$$F'(t_i) = \text{grau médio} = \frac{i - (1 - \ln 2) - (2 \cdot \ln 2 - 1) \cdot [(i - 1)/(N - 1)]}{N}, \quad (4.5)$$

$$F'(t_i) = \text{grau médio} = \frac{i - 0,3068 - 0,3863 \cdot [(i - 1)/(N - 1)]}{N}, \quad (4.6)$$

onde:

i = número de ordem da falha que se deseja calcular o grau médio;

N = quantidade de equipamentos amostrados.

Transportando para o papel probabilístico de Weibull os valores dos tempos até falha e do grau médio, traça-se uma linha reta resultante ajustada. O valor de coeficiente angular da reta é o parâmetro de forma e a partir da percentagem de falhas, igual a 63,2%, obtém-se a vida característica da distribuição de Weibull.

Quando temos dados com censura (suspensões), os números de ordem para os equipamentos que falharam não são mais números inteiros. Estes números de ordem são determinados pelo cálculo de cada novo incremento para o número de ordem quando uma ou mais suspensões são encontradas na sequência dos equipamentos amostrados, conforme fórmula abaixo:

$$\text{novo incremento} = \frac{(N + 1) - (\text{número de ordem da falha anterior})}{1 + (\text{número de itens posteriores})} \quad (4.7)$$

Este novo incremento calculado continua sendo usado até que ocorra uma outra suspensão, quando novamente calcula-se qual será o novo incremento (ver exemplo na NBR 6742). Com os números de ordem calculados obtém-se o grau médio.

Transporta-se para o papel probabilístico de Weibull somente os tempos até falha e o grau médio dos equipamentos que falharam. A reta ajustada no gráfico, representa uma estimativa da população real com 50% de certeza.

O programa computacional RAMP, utiliza o método do incremento (NBR 6742), ajustando os pontos através do método dos mínimos quadrados e calcula o coeficiente de correlação (r) para avaliar o ajuste dos pontos a reta obtida. Dependendo do valor do coeficiente de correlação, o programa RAMP mostra as seguintes mensagens:

- $0,9 < r \leq 1$: excelente correlação;
- $0,8 < r \leq 0,9$: boa correlação;
- $0,6 < r \leq 0,8$: razoável correlação;
- $r \leq 0,6$: correlação fraca não aceitável.

Quando a correlação é fraca verificar se as hipóteses estabelecidas no item 3.4 foram seguidas ou se está ocorrendo problema de linearização. Analisando-se o gráfico pode-se visualizar os pontos mais discrepantes e analisar as causas.

5. SISTEMAS EM SÉRIE

A maioria dos equipamentos falham devido a mais de um modo de falha. O modelo dos sistemas em série mostra uma relação entre a distribuição de falhas de um equipamento e a distribuição de falhas das suas partes.

Supondo-se que um equipamento possa falhar de N modos diferentes (também chamado de riscos competitivos ou modos de falha), tal equipamento é chamado de um sistema em série, se a sua vida é a menor vida entre os N tempos até falha, isto é, o sistema falha quando a primeira parte falhar.

Segundo NELSON (1982), considerando-se $R(t)$ a função Confiabilidade do sistema e $R_1(t), \dots, R_N(t)$, as funções Confiabilidade dos N modos de falha dos componentes e supondo-se que os tempos até falha para os diferentes modos de falha dos componentes são estatisticamente independentes, logo, estes componentes são sistemas em série com componentes independentes. Para estes sistemas temos,

$$R(t) = R_1(t) \cdot R_2(t) \cdot \dots \cdot R_N(t) . \quad (5.1)$$

Esta expressão é a regra do produto para a confiabilidade de sistemas em série com componentes independentes.

Na manutenção, freqüentemente é importante conhecer como a eliminação de um modo de falha de um componente vai afetar a distribuição dos tempos até falha de um equipamento. Considerando-se que os modos de falha são independentes e que o modo (1) foi eliminado, então,

$$R_1(t) = 1,$$

$$R^*(t) = R_2(t) \cdot \dots \cdot R_N(t) .$$

Através do método gráfico pode-se estimar a distribuição de falhas do equipamento e de cada modo de falha dos componentes. Desta forma pode-se avaliar a influência dos modos de falha na confiabilidade do equipamento. Com este método também é possível simular a eliminação de um ou mais modos de falha e verificar qual é o aumento de confiabilidade no equipamento. Nestes casos os tempos até falha dos modos de falha eliminados são tratados como suspensões.

Este método apesar de ser aproximado, permite tirar valiosas conclusões com respeito a influência da confiabilidade dos componentes em relação a confiabilidade do sistema (equipamento).

6. MÉTODO DO SUCESSO

Quando existem muitas suspensões e poucas ou nenhuma falha, o método denominado do “sucesso” é utilizado para determinar a confiabilidade, quando um dado número de componentes ou equipamentos (n) estão em operação por um período de tempo (t). Neste período, alguns componentes ou equipamentos terão falhado e os outros serão considerados suspensos. O método é baseado na distribuição binomial, cuja densidade de probabilidade de falha $f(x)$ é dada por:

$$f(x) = \binom{n}{x} (1-R)^{n-x} \cdot R^x \quad (6.1)$$

$$\binom{n}{x} = \frac{n!}{x!(n-x)!}$$

onde, $x = 1, 2, \dots, n$, é a variável aleatória que representa a quantidade de sucessos.

A probabilidade de ocorrência de k ou mais sucessos, é dada pela condição (limite unilateral inferior):

$$P(x \geq k) = \sum_{x=k}^n \binom{n}{x} (1-R)^{n-x} \cdot R^x \leq 1 - C \quad (6.2)$$

onde,

C = nível de confiança desejado

R = confiabilidade

n = tamanho da amostra

k = número de sucessos (sobreviventes)

A solução da equação 6.2 para ($k \leq n - 1$), ou seja, com uma ou mais falhas, é geralmente trabalhosa, exigindo uma solução por tentativas, ou preferencialmente por um programa computacional do tipo iterativo como o ATP¹ (GUIDO, 1995).

Uma solução prática da equação 6.2 corresponde ao uso da distribuição χ^2 , como uma aproximação da distribuição binomial, dada por:

$$R \geq 1 - \frac{\chi^2_{1-c, v}}{2n} \quad (6.3)$$

¹ ATP, Accelerated Testing Program, Guido, C. A. P..

$$\text{ou, } n \geq \frac{\chi^2_{1-\alpha, \nu}}{2(1-R)}$$

onde $\nu = 2(n - k + 1)$ graus de liberdade.

7. FALHAS OCULTAS

Equipamentos de sistemas de proteção e segurança normalmente ficam parados (stand-by), esperando para entrar em funcionamento no momento em que ocorrer uma variação anormal dos parâmetros do processo. Durante o período em que o sistema está inativo, a ocorrência de uma falha normalmente não é detectada. Estes componentes estão desta forma, em uma condição semelhante aos componentes não reparáveis, isto é, se sofrerem uma falha, esta não será reparada. Em uma refinaria existem muitos equipamentos que operam nestas condições, tais como: alarmes, sistemas de desarme, relés, válvulas de segurança, etc.. Nestes casos, a falha do sistema de proteção só é detectada depois de uma falha de ocorrência mais grave.

Se nada for feito ao longo do tempo, estes sistemas estarão todos indisponíveis devido as falhas não reveladas dos seus componentes. Para evitar o aumento da indisponibilidade destes sistemas, os mesmos devem ser testados periodicamente para detectar os possíveis componentes em estado de falha e repará-los.

Uma situação análoga a esta são os sistemas de medição dos parâmetros do processo. Ao longo do tempo estes sistemas podem descalibrar (a medição sair fora da faixa de tolerância de erro), o que podemos considerar como uma falha de difícil detecção pelo operador do processo. A calibração periódica dos sistemas de medição, da mesma forma, também vai aumentar a disponibilidade dos sistemas de medição.

O teste dos sistemas não aumenta a sua confiabilidade, ele somente detecta as falhas depois que elas ocorreram. Se os testes forem muito freqüentes, eles podem aumentar o desgaste dos sistemas e diminuir a confiabilidade. Entretanto, eles têm um efeito positivo na disponibilidade. Para demonstrar este efeito devemos considerar dois casos: testes periódicos ideais e testes periódicos reais.

7.1- Testes Periódicos Ideais

Nos testes periódicos ideais, o tempo para fazer o teste e o reparo é desprezível, e o reparo restabelece o sistema na condição de “tão bom quanto novo”. Como a falha do componente só pode ser detectada no momento do teste, durante o período entre testes, tudo se passa como se o componente fosse não-reparável. Portanto, a sua disponibilidade é praticamente igual a sua confiabilidade em cada instante de tempo.

Considerando-se os testes realizados no intervalo T , resulta:

$$D(t) = R(t), \quad \text{para } 0 \leq t < T,$$

$$D(t) = R(t - T) , \text{ para } T \leq t < 2T.$$

onde,

T = tempo entre testes (manutenções).

Repetindo o conceito para N intervalos resulta:

$$D(t) = R(t - N.T) , \text{ para } N.T \leq t < (N + 1)T . \quad (7.1)$$

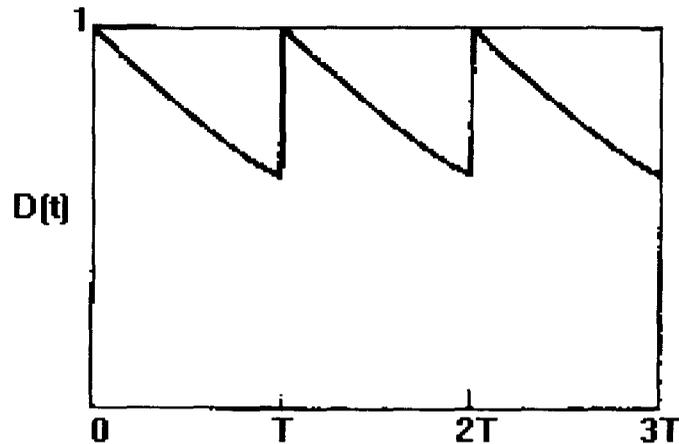


Figura 7.1- Disponibilidade para testes periódicos ideais, com falhas ocultas.

Para a situação indicada na figura 7.1, pode-se calcular a Disponibilidade média para um múltiplo (N) de T , ou seja $N.T$, dado por,

$$D(NT) = \frac{1}{NT} \int_0^{NT} D(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T D(t) dt . \quad (7.2)$$

Para a condição limite ($N \rightarrow \infty$), temos a Disponibilidade Média Limite,

$$D(\infty) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{NT} \int_0^{NT} D(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T D(t) dt . \quad (7.3)$$

Neste caso, em que a disponibilidade é praticamente igual a confiabilidade para a distribuição exponencial, tem-se,

$$D(\infty) = \frac{1}{\lambda T} (1 - e^{-\lambda T}) \quad (7.4)$$

Como o intervalo entre testes é pequeno comparado com o TMAF e ($\lambda T \ll 1$), expandindo-se a exponencial em uma série de potências,

$$e^{-\lambda T} = 1 - \lambda T + \frac{(\lambda T)^2}{2} - \dots,$$

a disponibilidade aproximada é,

$$D(\infty) \cong 1 - \frac{1}{2} \lambda T, \quad (7.5)$$

denominada Disponibilidade Média Limite, logo, quanto menor o T , maior a disponibilidade.

7.2- Testes Periódicos Reais

Pela equação 7.5 pode resultar uma disponibilidade próxima de um, apenas diminuindo-se o intervalo entre testes T . Entretanto, quando o intervalo entre testes fica muito pequeno, outros fatores como tempo de teste, tempo de reparo e reparos imperfeitos, tornam-se muito importantes na estimativa da disponibilidade. Estes efeitos podem ser visualizados na figura 7.2.

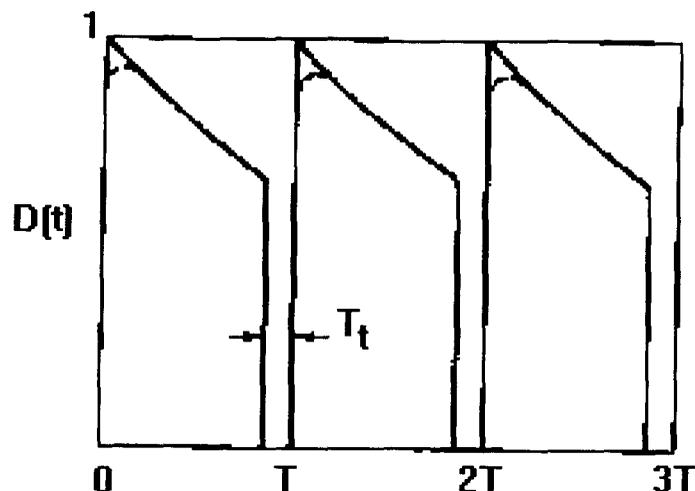


Figura 7.2- Disponibilidade para testes periódicos reais para falhas ocultas.

Considerando-se que o teste tenha uma duração T_t , no qual o sistema fica indisponível, segundo LEWIS (1987), uma boa aproximação para a disponibilidade, uma vez que, $\lambda T \ll 1$ e $T_t \ll T$, resulta,

$$D(\infty) \cong 1 - \frac{1}{2} \lambda T - \frac{T_t}{T}, \quad (7.6)$$

onde,

T_t = tempo de duração do teste.

Considerando-se também que existe uma probabilidade de encontrar um sistema em falha e que o tempo de reparo é diferente de zero, para T pequeno, a probabilidade de falha é aproximadamente λT . Como $1/\mu$ é o tempo médio de reparo, a contribuição para a indisponibilidade no período de T é $\lambda T/\mu$ ou dividindo-se pelo intervalo T a perda de disponibilidade é λ/μ . Obtem-se a Disponibilidade Média,

$$D(\infty) \cong 1 - \frac{1}{2} \lambda T - \frac{T_t}{T} - \frac{\lambda}{\mu}. \quad (7.7)$$

Diminuindo-se o T , isto é, aumentando-se a frequência de testes, aumenta-se a disponibilidade, mas T_t não é zero, embora seja pequeno, quanto menor o T menor a disponibilidade. Desta forma existe um valor ótimo para o intervalo entre testes. Este valor pode ser obtido derivando-se a equação (7.7) em relação a T .

$$\frac{dD(\infty)}{dT} = -\frac{1}{2} \lambda + \frac{T_t}{T^2} = 0,$$

$$T = \left(\frac{2T_t}{\lambda} \right)^{\frac{1}{2}}, \text{ logo a Disponibilidade máxima é,}$$

$$D(\infty) \cong 1 - \left(2\lambda T_t \right)^{\frac{1}{2}} - \frac{\lambda}{\mu}.$$

7.3- Determinação dos Tempos até Falha

Como os componentes em estado de falha são detectados somente no teste, a única coisa que se pode afirmar é que o momento da falha ocorreu entre os dois

últimos testes. Da mesma forma, se no teste o equipamento está em condições de funcionamento, conclui-se que o tempo até falha será após o momento do teste.

Se o intervalo entre testes é pequeno, o momento da falha pode ser aproximado pelo ponto médio do intervalo entre testes. Estes dados podem ser analisados como dados completos ou com censura. Segundo NELSON (1982), estes tempos até falha aproximados podem ser usados na prática quando o intervalo entre testes for menor que aproximadamente um quinto do TMAF.

Com os tempos até falha aproximados e os tempos censurados, podemos estimar através do programa RAMP os parâmetros da distribuição de Weibull. Com os parâmetros da distribuição de Weibull pode-se calcular os intervalos de teste mais adequados ou evidenciar a necessidade de um sistema mais confiável.

7.4- Influência do Parâmetro de Forma no Intervalo entre Testes

A partir da equação 7.3 e como em equipamentos com falhas ocultas a disponibilidade é praticamente igual à confiabilidade, tem-se

$$D(\infty) = \frac{1}{T} \int_0^T D(t) dt ,$$

onde,

$$D(\infty) \cong \frac{1}{T} \int_0^T R(t) dt \tag{7.11}$$

que resulta

$$D(\infty) \cong \frac{1}{T} \int_0^T e^{-(\lambda_0 t)^\beta} dt . \tag{7.12}$$

A integral da equação 7.12 é uma integral imprópria, descontínua para (t = 0), o que dificulta muito a sua solução. Neste caso é preferível fazer uma integração numérica, através de um programa computacional. No exemplo da figura 7.3 foi utilizado o programa MATHCAD 5.0®.

Considerando-se o modelo para testes periódicos reais resulta,

$$D(\infty) \cong \frac{1}{T} \int_0^T e^{-(\lambda_0 t)^\beta} dt - \frac{T_t}{T} - \frac{\lambda_0}{\mu_0} . \tag{7.13}$$

A correção na equação 7.13, para a probabilidade de encontrar um sistema em falha, e que o tempo de reparo é diferente de zero, é uma aproximação da aproximação considerada na equação 7.7. Esta correção é normalmente

desprezível porque a maioria dos equipamentos e componentes em uma indústria de refino de petróleo têm um $\mu_0 \gg \lambda_0$.

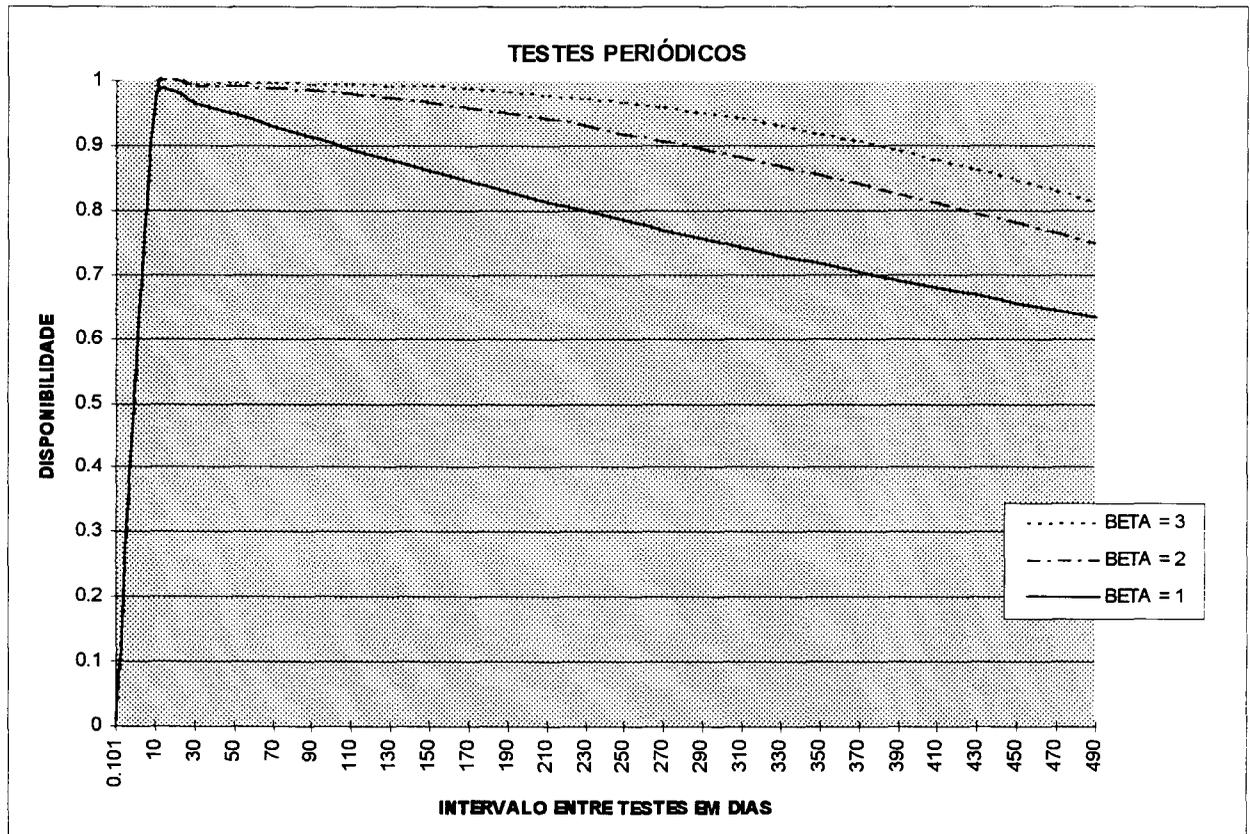


Figura 7.3- Disponibilidade para testes periódicos reais para $\beta = 1, 2$ e 3 e considerando, TMAF = 500 dias; $T_t = 0,1$ dias e TMAR = 1 dia.

Analisando-se a figura 7.3 conclui-se que aumentando-se o parâmetro de forma da distribuição de Weibull aumenta-se o valor ótimo para o intervalo entre testes e também a disponibilidade. Logo, é muito vantajoso possuir equipamentos de proteção e segurança com distribuição de tempo até falha com o parâmetro de forma o maior possível.

Durante os testes periódicos deve-se inspecionar os equipamentos para detectar sinais de deterioração, atuando de forma preditiva. Equipamentos com parâmetro de forma maior que um, que não voltaram à condição de “tão bom quanto novo” após o teste, devem ter o prazo do próximo intervalo de teste calculado pela distribuição de Weibull triparamétrica (β , α e δ).

8. INFLUÊNCIA DA MANUTENÇÃO PREVENTIVA NA CONFIABILIDADE E NA DISPONIBILIDADE

8.1- Influência da Manutenção Preventiva na Confiabilidade

Para determinar uma política de manutenção preventiva é importante saber qual é o efeito da manutenção preventiva sistemática ou simplesmente manutenção preventiva, na confiabilidade.

A confiabilidade de um sistema sem manutenção é $R(t)$, onde t é o tempo de operação do sistema. Se a manutenção do sistema ocorre em intervalos T , então, como indicado na figura 8.1, para $t \leq T$ a manutenção não terá efeito na confiabilidade, ou seja,

$$R_M(t) = R(t), \text{ para } 0 \leq t \leq T, \quad (8.1)$$

onde:

R_M = confiabilidade de um sistema com manutenção preventiva;
 T = intervalo de tempo entre manutenções preventivas.

Agora, seja o caso em que a manutenção em T restaura o sistema na condição de “tão bom quanto novo”. Isto implica que a manutenção no sistema em ($t > T$) não tem memória para efeitos de desgaste acumulado em um tempo antes de T . Então, em um intervalo $T < t \leq 2T$, a confiabilidade é o produto da probabilidade $R(t)$ pela probabilidade $R(t - T)$ de que um sistema “tão bom quanto novo” em T vai sobreviver em um tempo ($t - T$) sem falhas. Logo, obtem-se

$$R_M(t) = R(T).R(t - T), \text{ para } T \leq t < 2T, \quad (8.2)$$

$$R_M(t) = R(T)^2.R(t - 2T), \text{ para } 2T \leq t < 3T. \quad (8.3)$$

O mesmo argumento pode ser usado repetidamente para obter a expressão geral, após N manutenções preventivas,

$$R_M(t) = R(T)^N.R(t - NT), \text{ onde } NT \leq t < (N + 1)T, \text{ para } N = 1, 2, 3, \dots \quad (8.4)$$

O TMAF (Tempo Médio Até Falha) para um sistema com manutenção preventiva pode ser determinado trocando $R(t)$ por $R_M(t)$,

$$TMAF = \int_0^{\infty} R_M(t) dt. \quad (8.5)$$

Dividindo-se a integral em intervalos de tempo T tem-se

$$TMAF = \sum_{N=0}^{\infty} \int_{NT}^{(N+1)T} R_M(t) dt, \quad (8.6)$$

$$TMAF = \sum_{N=0}^{\infty} \int_{NT}^{(N+1)T} R(T)^N \cdot R(t - NT) dt,$$

$$TMAF = \sum_{N=0}^{\infty} R(T)^N \cdot \int_0^T R(t - NT) dt.$$

Desenvolvendo-se em uma série infinita, resulta

$$R(T)^N = \frac{1}{1 - R(T)}, \quad (8.7)$$

$$TMAF = \frac{\int_0^T R(t - NT) dt}{1 - R(T)}. \quad (8.8)$$

a) Taxa de Falha Constante

A primeira conclusão importante é que a manutenção preventiva não tem influência na confiabilidade quando a taxa de falha é constante (falhas aleatórias), pois

$$R_M(t) = (e^{-\lambda t})^N e^{-\lambda(t-NT)} = e^{-N\lambda t} e^{-\lambda(t-NT)} = e^{-\lambda t},$$

onde,

$$R_M(t) = R(t), \text{ para } 0 \leq t < \infty.$$

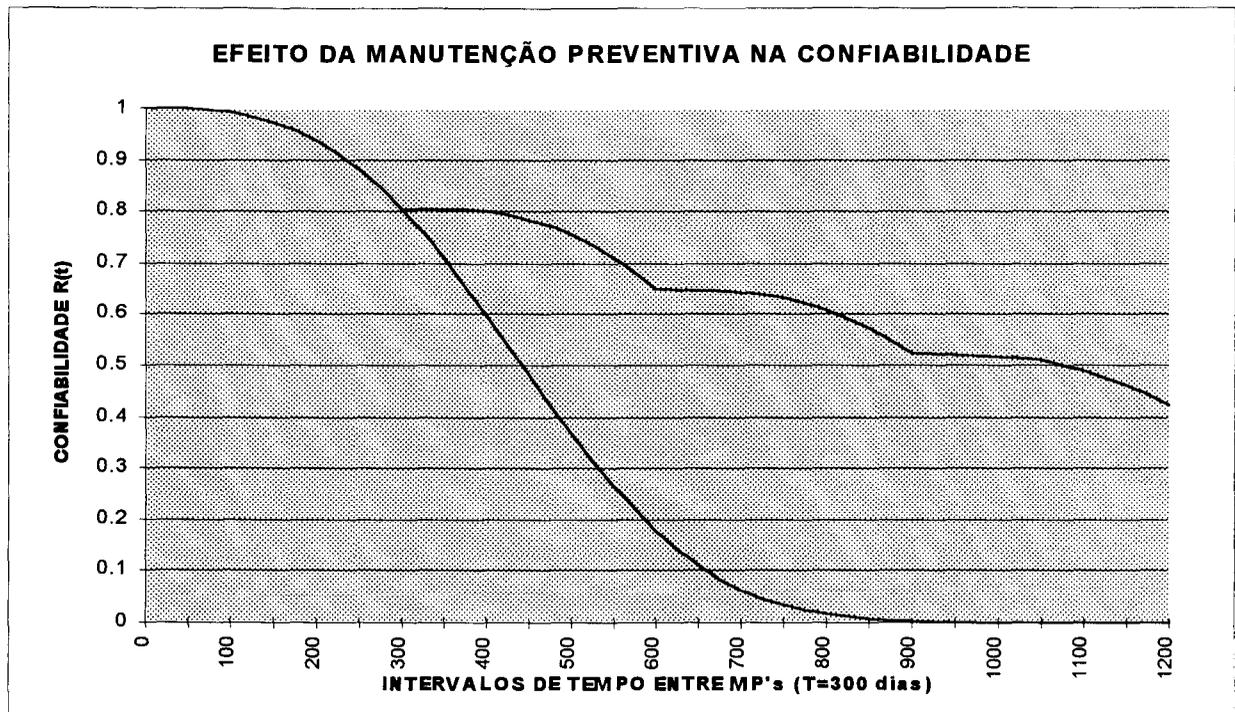


Figura 8.1- Efeito da manutenção preventiva na confiabilidade para $\lambda_0 = 0,002$; $\beta = 3$ e intervalo entre MP's de 300 dias e sem manutenção preventiva.

b) Taxa de Falha Crescente

A manutenção preventiva tem efeito na confiabilidade quando as taxas de falha são crescentes (dependentes do tempo). Para demonstrar este efeito para a confiabilidade, representada por uma distribuição de Weibull com dois parâmetros (ver equação 3.16), tem-se

$$R(t) = e^{-(\lambda_0 t)^\beta}, \quad (8.9)$$

$$R_M(t) = e^{-N(\lambda_0 T)^\beta} \cdot e^{-(\lambda_0 t - \lambda_0 NT)^\beta}, \quad (8.10)$$

onde,

$$NT \leq t < (N+1)T, \text{ para } N = 0, 1, 2, \dots$$

Para examinar o efeito da manutenção preventiva calcula-se a relação, $R_M(t)/R(t)$ para $t = NT$:

$$\frac{R_M(NT)}{R(NT)} = e^{[-N(\lambda_0 T)^\beta + (\lambda_0 NT)^\beta]} \quad (8.11)$$

Para haver ganho de confiabilidade com a manutenção preventiva a exponencial deve ser positiva, dado pela desigualdade positiva

$$(\lambda_0 NT)^\beta > N(\lambda_0 T)^\beta \quad \text{ou seja} \quad N^{\beta-1} - 1 > 0 . \quad (8.12)$$

Isto implica que β deve ser maior que um para a manutenção ter um efeito positivo na confiabilidade, isto corresponde a taxas de falha crescentes com o tempo.

c) Taxa de Falha Decrescente

Para $\beta < 1$, a manutenção preventiva diminui a confiabilidade como pode ser visto na equação 8.12

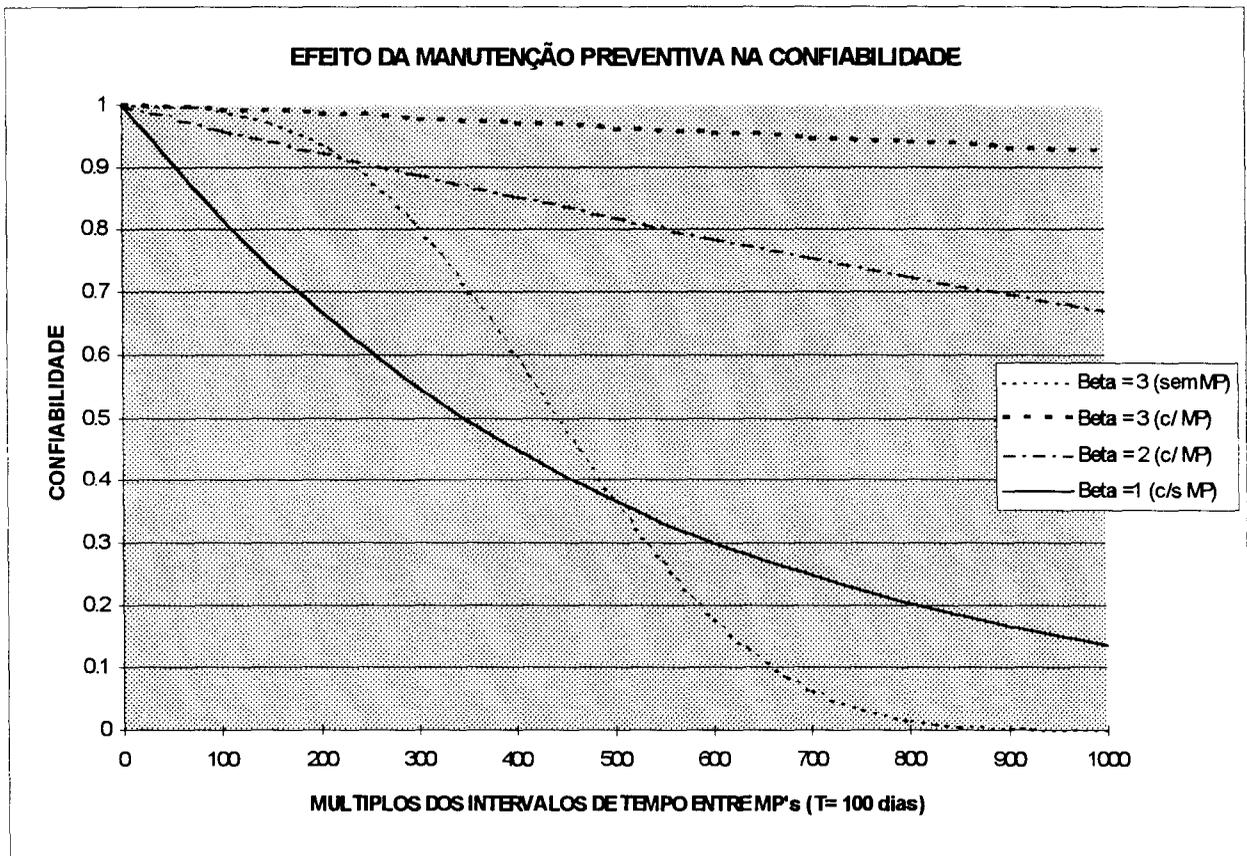


Figura 8.2- Efeito da manutenção preventiva na confiabilidade para $\lambda_0 = 0,002$; $\beta = 1, 2$ e 3 e intervalo entre MP = 100 dias.

8.2- Influência da Manutenção Preventiva na Disponibilidade

Como foi apresentado no item 8.1 anterior, equipamentos sujeitos a desgaste que têm uma taxa de falha crescente, a manutenção preventiva pode aumentar muito a confiabilidade, desde que a manutenção não introduza outros defeitos. Considerando-se que a manutenção preventiva, em muitos casos requer a parada do equipamento e conseqüentemente parar de produzir, pode-se verificar a influência da manutenção na disponibilidade do equipamento.

Para estimar-se o efeito da manutenção preventiva na disponibilidade, deve-se considerar que a manutenção faz com que o sistema retorne na condição de “tão bom quanto novo”. Define-se disponibilidade média como

$$D = \frac{\text{somatória dos tempos de operação}}{\text{somatória tempos de operação} + \text{somatória tempos de manutenção}} \quad (8.13)$$

onde:

t_T = somatória dos tempo de operação efetiva.

Desta forma,

$$D = \frac{t_T}{t_T + (N_F \cdot TMAR_F + N_P \cdot TMAR_P)} \quad (8.14)$$

onde:

$$N = N_F + N_P; \quad (8.15)$$

D = disponibilidade média;

$TMAR_F$ = tempo médio até recolocação na manutenção corretiva;

$TMAR_P$ = tempo médio até recolocação na manutenção preventiva;

N_F = número de paradas para manutenção corretiva;

N_P = número de paradas para manutenção preventiva;

N = número total de paradas para manutenção.

A manutenção preventiva ocorre depois que o equipamento operou por um tempo T . Os componentes que sofreram desgaste são trocados e o sistema volta a operar na condição de “tão bom quanto novo”, por mais um período de tempo T . Se o sistema falhar entre duas manutenções preventivas, no tempo t_F , os componentes que falharam são trocados e a próxima manutenção preventiva vai ocorrer no tempo $t_F + T$ ou então uma manutenção corretiva se ocorrer uma falha, prevalecendo o que ocorrer primeiro.

Considerando-se que o tempo total de operação t_T é grande comparado com o tempo médio entre manutenções (TMEM), segundo LEWIS (1987), pode-se utilizar a relação aproximada,

$$N \approx \frac{t_T}{TMEM} \quad (8.16)$$

Segundo LEWIS (1987) apud BARLOW et al. (1965), a equação 8.16 também é válida para taxas de falha dependentes do tempo quando o $t_T \gg TMEF$ (Tempo Médio Entre Falhas).

Como os componentes são trocados automaticamente no tempo T , tem-se

$$TMEM = \int_0^T R(t) dt, \text{ com } R(t) = 0 \text{ para } t > T, \quad (8.17)$$

$$N = \frac{t_T}{\int_0^T R(t) dt} \quad (8.18)$$

O número de manutenções preventivas N_P no tempo t_T , será:

$$N_P = R(T) \cdot N = \frac{t_T R(T)}{\int_0^T R(t) dt} \quad (8.19)$$

Como, $1 - R(t)$ é a probabilidade de falha, o número de manutenções corretivas, por falhas aleatórias N_F e dado por

$$N_F = [1 - R(T)] \cdot N = \frac{t_T [1 - R(T)]}{\int_0^T R(t) dt} \quad (8.20)$$

Substituindo-se os valores de N_P e N_F na equação 8.14 resulta a disponibilidade média operacional no tempo t_T ,

$$D = \frac{t_T}{t_T + \left(\frac{t_T [1 - R(T)]}{\int_0^T R(t) dt} \cdot TMAR_F + \frac{t_T R(T)}{\int_0^T R(t) dt} \cdot TMAR_P \right)} \quad (8.21)$$

Considerando-se uma distribuição de Weibull com dois parâmetros resulta a equação.

$$D = \frac{1}{1 + \left(\frac{[1 - e^{-(\lambda_0 T)^\beta}]}{\int_0^T e^{-(\lambda_0 t)^\beta} dt} \cdot TMAR_F + \frac{[e^{-(\lambda_0 T)^\beta}]}{\int_0^T e^{-(\lambda_0 t)^\beta} dt} \cdot TMAR_P \right)} \quad (8.22)$$

Aplicando-se o método da integração numérica, através do programa computacional MATHCAD 5.0[®], pode-se calcular o valor da disponibilidade média apresentado nas figuras 8.2, 8.3 e 8.4.

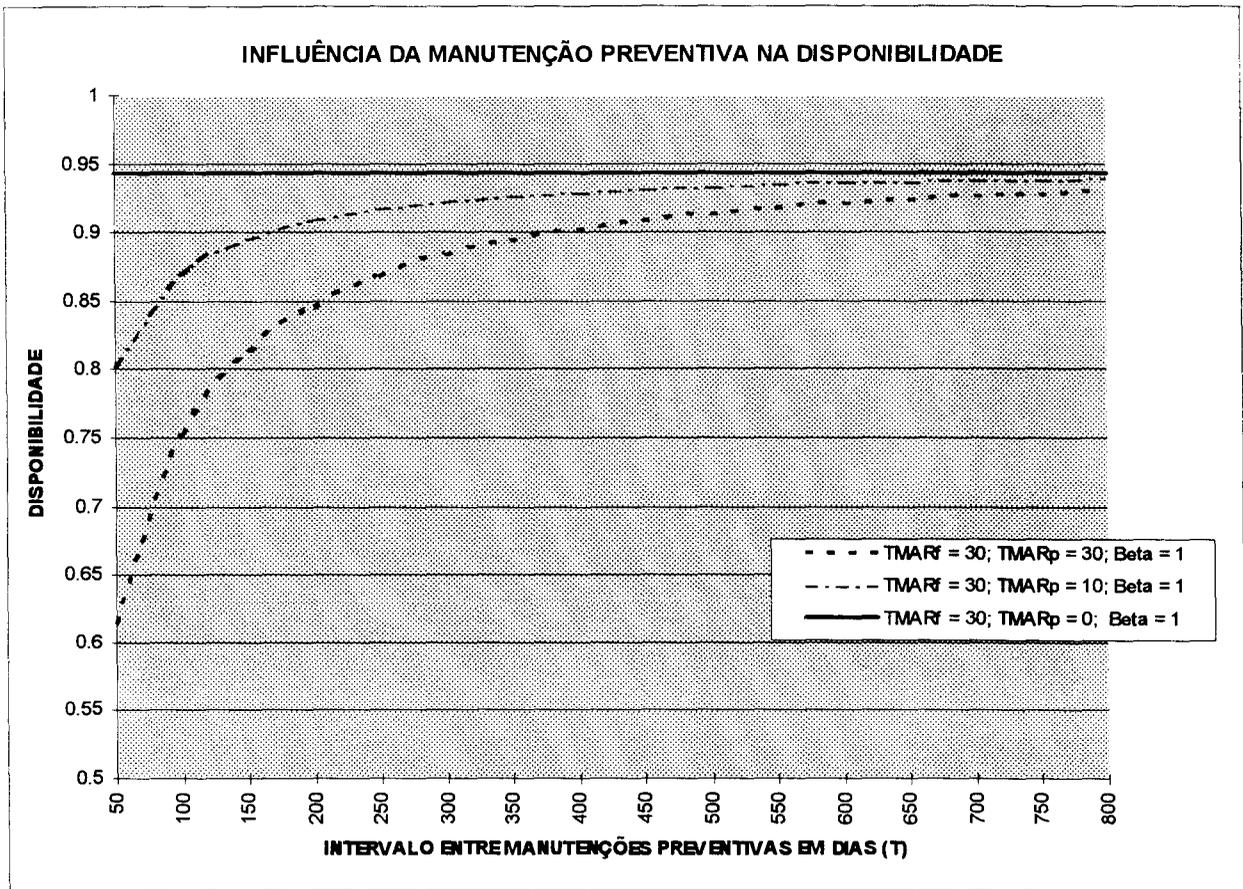


Figura 8.3- Influência da manutenção preventiva na disponibilidade para $TMAr_F = 30$ dias; $TMAr_P = 0, 10$ e 30 dias; $\lambda_0 = 0,002$ e $\beta = 1$.

Analisando-se a fig. 8.3 conclui-se que a manutenção preventiva diminui a disponibilidade quando o parâmetro de forma β é igual a um. Quanto menor o intervalo de tempo entre manutenções preventivas, menor a disponibilidade do equipamento. Como a manutenção preventiva para equipamentos com $\beta = 1$, não aumenta a confiabilidade (vide item 8.1), quanto mais manutenções, maior o tempo que o equipamento fica fora de operação, diminuindo a sua disponibilidade.

Mesmo quando a manutenção preventiva é feita fora do período de produção, ela não tem efeito na disponibilidade (vide fig. 8.3 para $TMAr_P$).

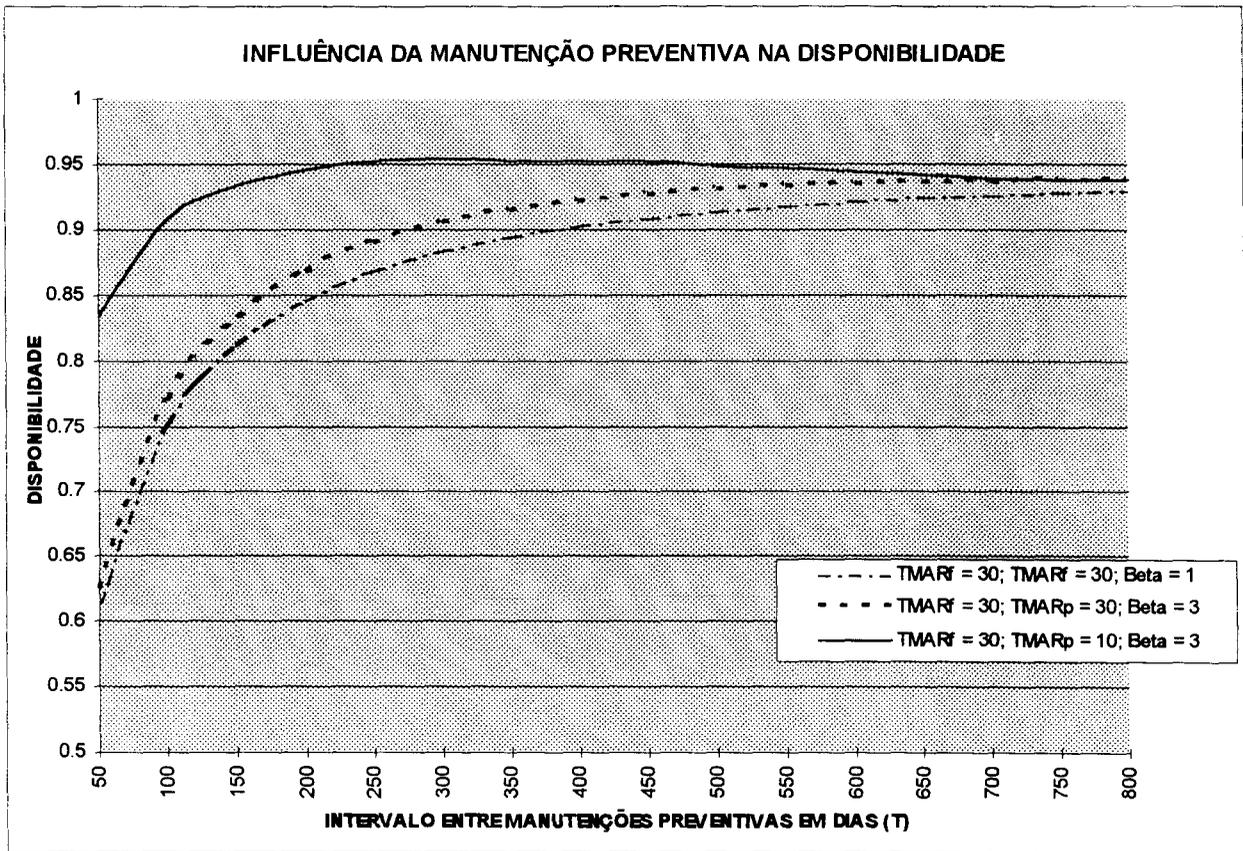


Figura 8.4- Influência da manutenção preventiva na disponibilidade para $T_{MAR_F} = 30$ dias; $T_{MAR_P} = 10$ e 30 dias; $\lambda_0 = 0,002$ e $\beta = 1$ e 3.

A figura 8.4 mostra que, mesmo para equipamentos com parâmetro de forma maior que um, a manutenção preventiva sistemática aumenta muito pouco a disponibilidade quando a manutenção exige uma parada do equipamento durante o período produtivo.

A manutenção preventiva sistemática começa a tornar-se vantajosa em termos de aumento de disponibilidade para equipamentos com parâmetro de forma maior que um, quando o T_{MAR_P} é muito menor que o T_{MAR_F} . Nestes casos pode-se calcular um intervalo ótimo entre manutenções preventivas (vide fig. 8.4 para $T_{MAR_P} = 10$).

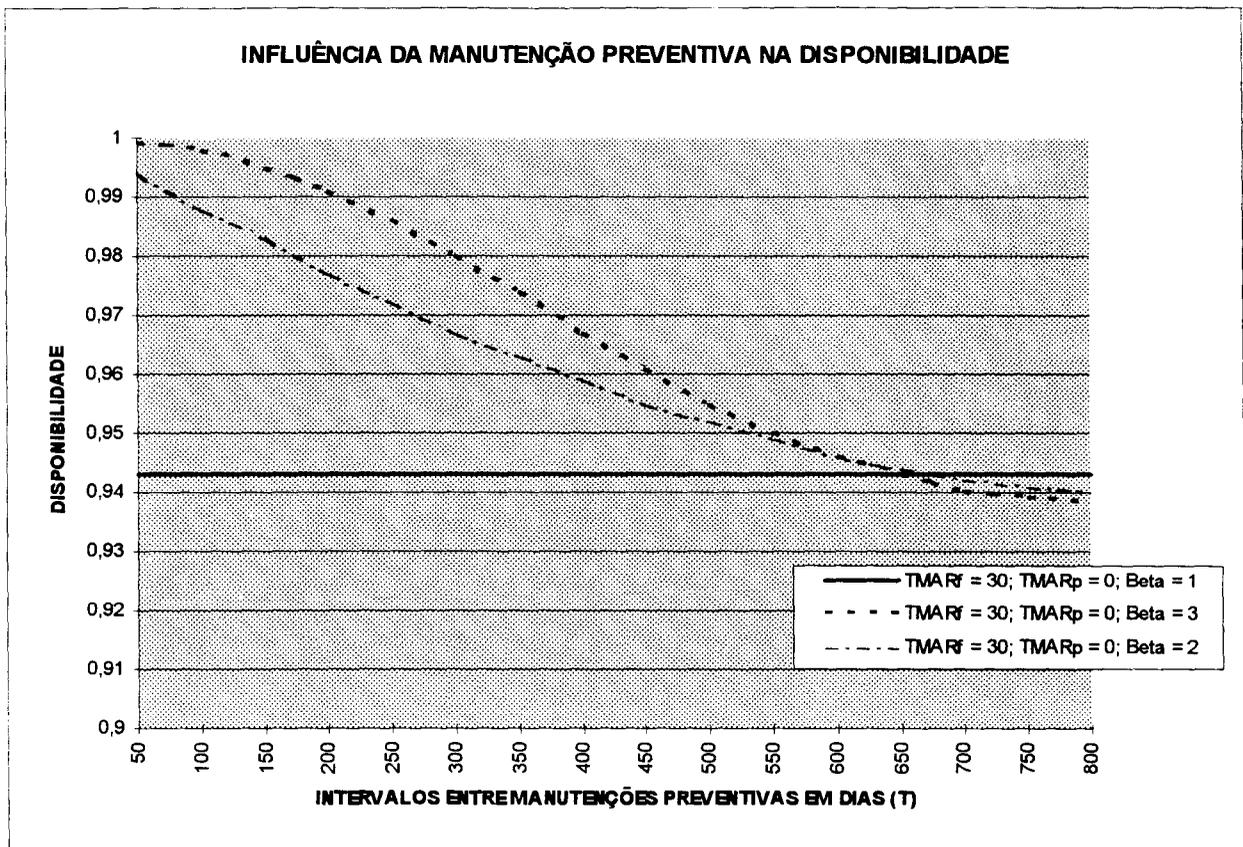


Figura 8.5- Influência da manutenção preventiva na disponibilidade para $TMAR_F = 30$ dias; $TMAR_P = 0$ (manutenção preventiva fora do período de produção); $\lambda_0 = 0,002$; $\beta = 1, 2$ e 3 .

Complementando o que foi mostrado na fig. 8.4, quando a manutenção preventiva é feita fora do período de produção, esta tem uma forte influência na disponibilidade quando β é maior que um.

Nas condições em que a manutenção preventiva aumenta a disponibilidade, é necessário analisar alguns aspectos que ocorrem na manutenção preventiva real, que não foram considerados no modelo adotado. O primeiro efeito a ser considerado é que a manutenção tem uma probabilidade de não ser satisfatória, causando uma falha no sistema, imediatamente após a sua entrada em serviço. Uma manutenção preventiva imperfeita também pode induzir a falhas prematuras em outros componentes. Uma outra consideração a ser feita é que a troca por componentes defeituosos na manutenção acarreta falhas de juventude no equipamento.

Considerando-se a probabilidade de erros de manutenção, é necessário avaliar-se com muito cuidado as vantagens da manutenção preventiva com vistas aos ganhos de confiabilidade e disponibilidade. Considerando-se que não há questões de segurança envolvidas, a decisão de fazer-se manutenção preventiva sistemática passa a ser uma questão econômica.

8.3- Decisão Baseada nos Custos de Manutenção

No caso de equipamentos e sistemas sujeitos a desgaste, com $\beta > 1$, a manutenção preventiva sistemática aumenta a confiabilidade e em alguns casos a disponibilidade, desde que a manutenção seja feita com sucesso e não introduza outros defeitos. O ganho de confiabilidade e disponibilidade na maioria dos casos não é muito sensível, logo a decisão de fazer-se manutenção preventiva sistemática e com que periodicidade deve ser função do custo operacional do equipamento.

Considerando-se a manutenção preventiva em intervalos definidos, o componente do equipamento vai ser substituído depois de operar um tempo T . Se um componente falhar entre duas manutenções preventivas, no tempo t_F , ele será substituído na próxima manutenção em $t_F + T$ ou quando falhar, prevalecendo o que ocorrer antes.

O custo da manutenção preventiva C_P , inclui o custo da mão-de-obra de manutenção, dos componentes substituídos, e do custo da perda de produção, se for o caso. O custo da manutenção corretiva C_F , inclui o custo da mão-de-obra de manutenção, dos componentes substituídos e do custo da perda de produção, custo da mão-de-obra parada, etc.. O custo operacional do equipamento ao longo de um determinado período de tempo t_T é dado por:

$$C = N_F \cdot C_F + N_P \cdot C_P, \quad (8.23)$$

$$\text{com } N = N_F + N_P,$$

onde:

C = custo operacional do equipamento;

C_F = custo da manutenção corretiva;

C_P = custo da manutenção preventiva;

N_F = número de paradas para manutenção corretiva;

N_P = número de paradas para manutenção preventiva;

N = número total de paradas para manutenção.

Calculando-se N_F e N_P , conforme as equações 8.16 a 8.20, o custo operacional C do equipamento durante um determinado período de tempo t_T é dado por:

$$C(T) = \frac{t_T [1 - R(T)]}{\int_0^T R(t) dt} \cdot C_F + \frac{t_T R(T)}{\int_0^T R(t) dt} \cdot C_P \quad (8.24)$$

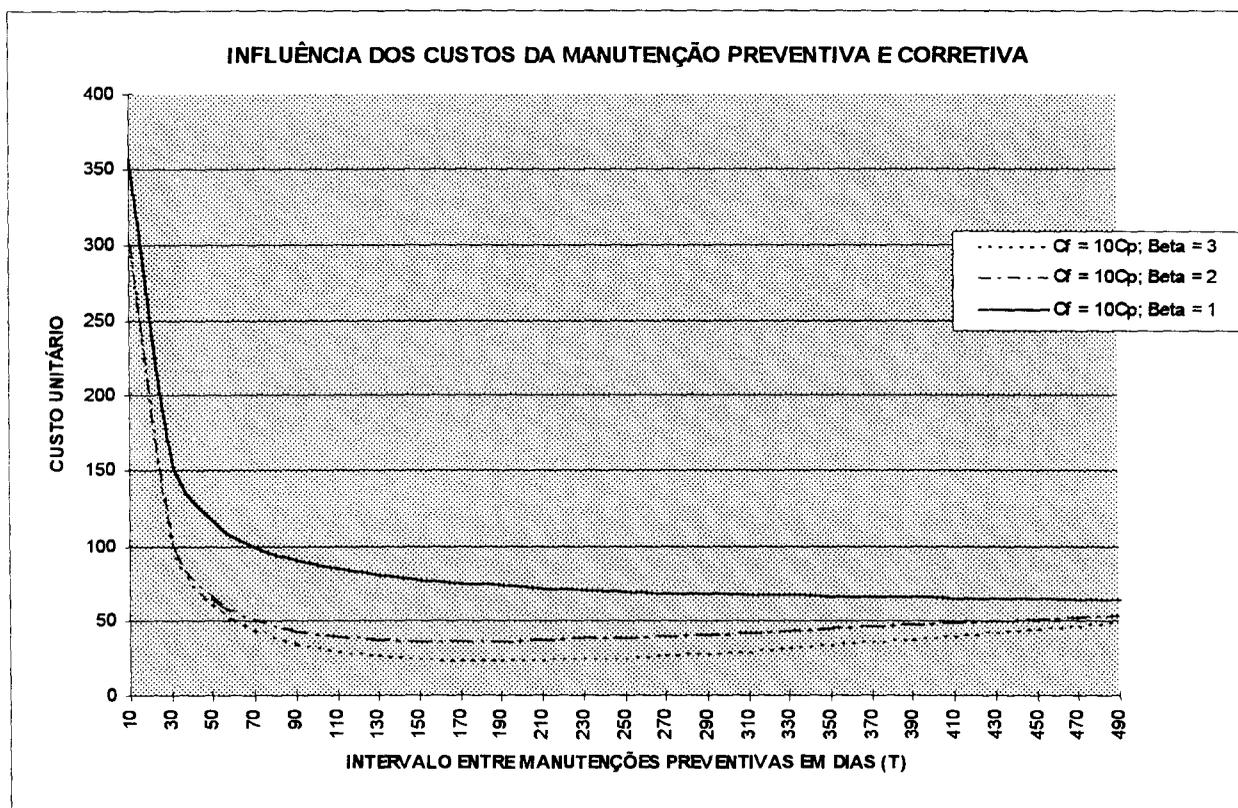


Figura 8.6- Custo de manutenção unitário em função do intervalo de tempo entre manutenções preventivas T , para $C_F = 10C_P$ e para $\lambda_0 = 0,002$; $\beta = 1, 2$ e 3 e tempo total de operação $t_T = 3000$ dias.

Analisando-se as figuras 8.6 e 8.7, conclui-se que para um equipamento com uma distribuição de tempos até falha com $\beta = 1$, quanto menor o intervalo entre manutenções preventivas, maior o custo operacional. Para $\beta > 1$, quanto maior o custo da manutenção corretiva em relação à manutenção preventiva, maior é a vantagem em se adotar uma política de manutenções preventivas sistemáticas, para reduzir o custo operacional do equipamento. Nestes casos, pode-se determinar qual é o intervalo ótimo entre manutenções preventivas. Fazendo-se o caminho inverso, pode-se determinar qual a disponibilidade do equipamento para um custo operacional otimizado.

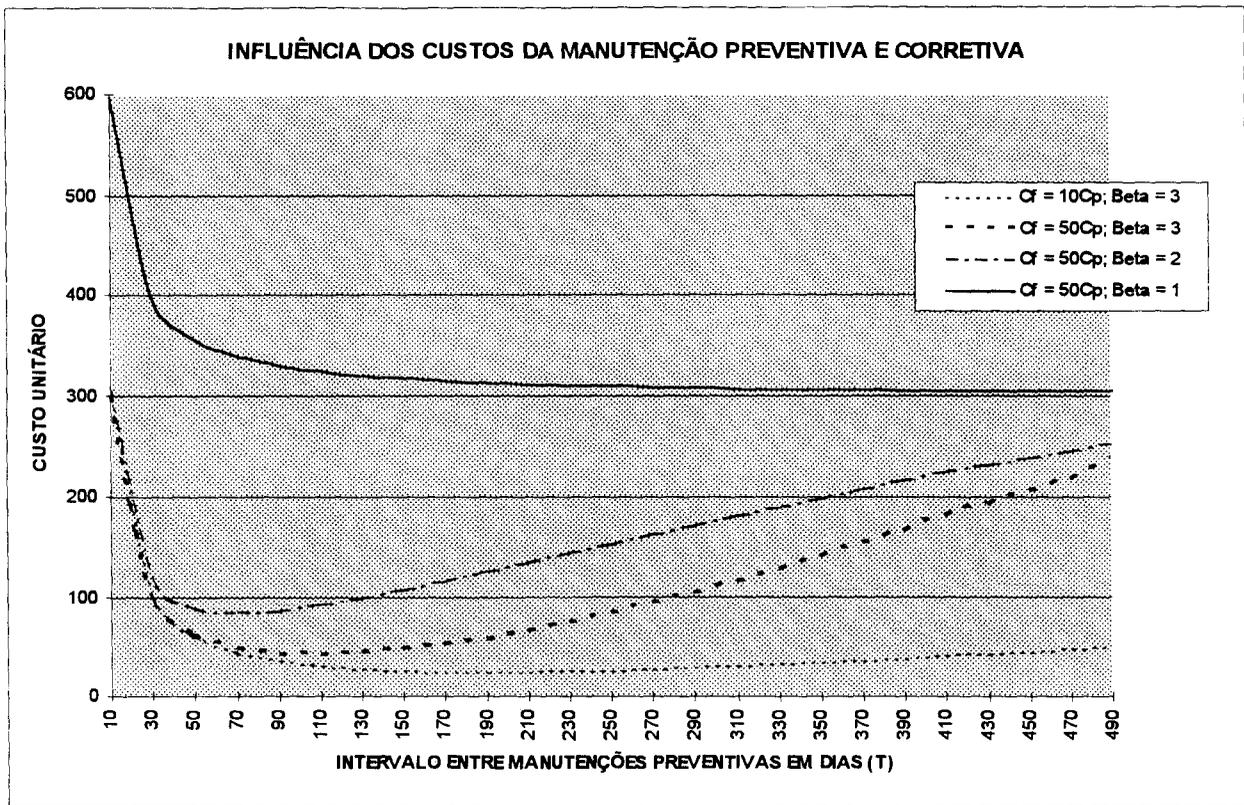


Figura 8.7- Custo de manutenção unitário em função do intervalo de tempo entre manutenções preventivas, para $C_F = 10C_P$; $C_F = 50C_P$ e para $\lambda_0 = 0,002$; $\beta = 2$ e 3 e tempo total de operação $t_T = 3000$ dias.

9. POLÍTICA DE MANUTENÇÃO PREVENTIVA DE INSTRUMENTOS ATUAL

O sistema 7123 considera quatro tipos de manutenção: dois tipos de preventiva; (A = leve) e (B = pesada), e dois tipos de corretiva; (C = leve) e (D = pesada).

- Preventiva tipo A; é uma manutenção sistemática leve, de curta frequência, como: lubrificação, calibração, exames sensoriais, testes, medições e troca de componentes no local;
- Preventiva tipo B; é uma manutenção sistemática pesada, determinada pela preventiva tipo A ou pelo histórico do equipamento. Este vai para a oficina, é desmontado, e normalmente são trocados alguns componentes;
- Corretiva tipo C; é uma manutenção leve, que apenas restabelece o equipamento para a condição de operação;
- Corretiva tipo D; é uma manutenção pesada, que normalmente envolve a troca de componentes danificados ou com sinais de deterioração.

A fig. 9.1 mostra em que circunstâncias são usados os quatro tipos de manutenção. O ciclo de manutenções preventivas é determinado pelo histórico do equipamento e pelas suas condições físicas na última manutenção.

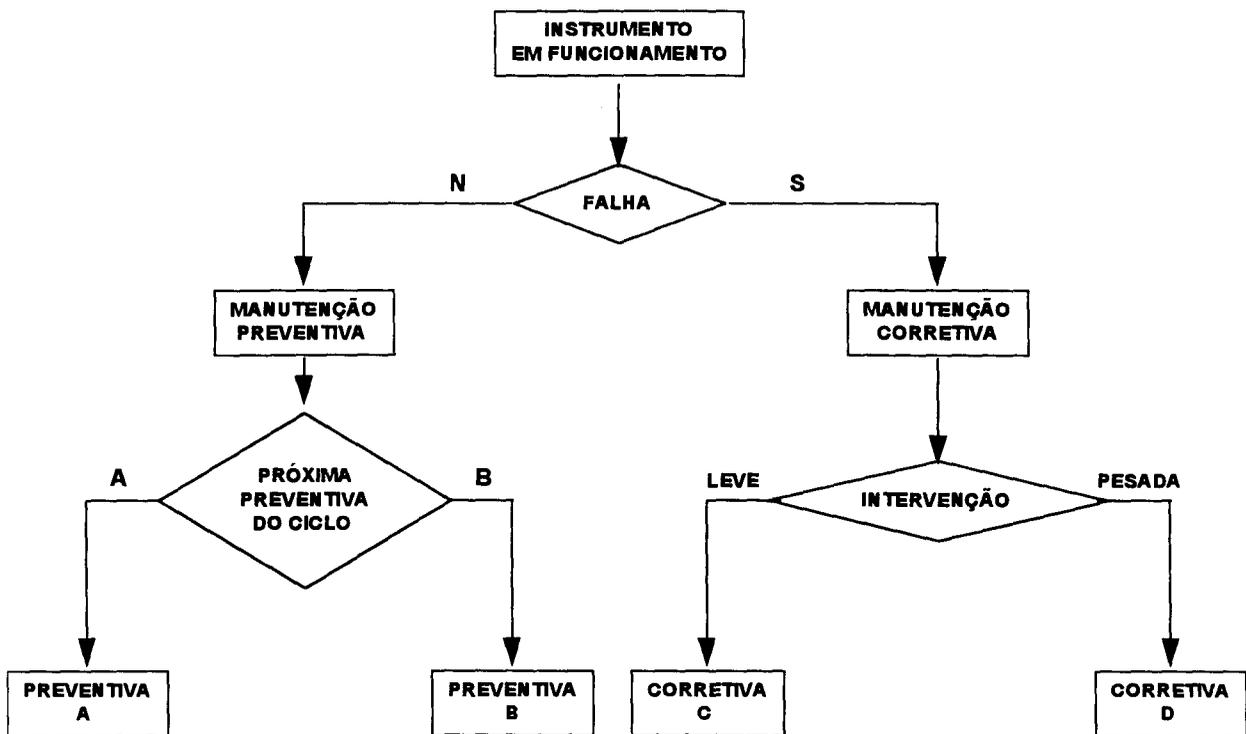


Figura 9.1 - Fluxograma lógico da aplicação dos quatro tipos de manutenção previstos no Sistema 7123.

Esta política de manutenção de instrumentos da REPLAN, assim como as políticas de manutenção atuais para equipamentos mecânicos e elétricos, estão focadas nos equipamentos e não na funções. A divisão da manutenção em especialidades leva a reforçar o foco no equipamento.

Tomando-se como exemplo a função bombear produto para um determinado processo, o sistema de bombeio possui equipamentos elétricos (motor elétrico, acionamento elétrico, etc.), equipamentos mecânicos (bomba, válvulas e tubulações) e instrumentos (manômetros, válvula controladora de vazão, etc.). No modelo atual de manutenção, cada atividade cuida dos seus equipamentos e têm políticas de manutenção independentes. Logo, é difícil aumentar a disponibilidade e a segurança dos sistemas a um custo otimizado.

As políticas de manutenção atuais ainda estão baseadas no pressuposto que quanto maior o número de manutenções preventivas, maior é a confiabilidade. Os intervalos entre manutenções preventivas geralmente são fixos, podendo ser reduzidos em função do estado do equipamento na manutenção anterior. Este procedimento geralmente leva a uma redução generalizada dos prazos de manutenção preventiva dos equipamentos.

10. POLÍTICA DE MANUTENÇÃO PREVENTIVA PROPOSTA

O principal objetivo da manutenção é aumentar a disponibilidade e a segurança dos sistemas, dentro de um custo operacional otimizado. Para atingir este objetivo, a manutenção precisa monitorar a disponibilidade dos sistemas e subsistemas e tomar ações corretivas para corrigir desvios ou melhorar a disponibilidade e a segurança (fig. 10.1). Para manter os níveis de disponibilidade e segurança, a atividade de manutenção precisa adotar uma política de manutenção preventiva (fig.10.2).

10.1- Aumentar a Disponibilidade das Unidades

A disponibilidade das unidades de processo está diretamente relacionada com o resultado do negócio. Logo, quanto maior a disponibilidade de uma unidade maior o seu resultado potencial. Assim, a atividade de manutenção precisa acompanhar a disponibilidade das unidades, dos seus sistemas e subsistemas. Uma unidade de processo com muitas paradas não-programadas ou com a necessidade de aumentar a disponibilidade para atender uma demanda de mercado, são situações comuns na atividade de manutenção.

Segundo PRADHAN (1993), a melhor forma de conduzir um trabalho para aumentar a disponibilidade das unidades de processo ou dos sistemas, é através de equipes multidisciplinares. Uma equipe típica para uma indústria de refino de petróleo pode ser compostas com:

- Engenheiro Mecânico;
- Engenheiro Eletricista;
- Engenheiro de Instrumentos e Controle;
- Engenheiro de Processo;
- Supervisor de Manutenção;
- Supervisor de Processo.

Segundo DOUGAN (1993), a utilização de um diagrama de blocos de disponibilidade é útil para representar a configuração da unidade e a relação entre a disponibilidade dos sistemas e subsistemas. A próxima etapa é determinar as funções críticas através do histórico de manutenção, relatórios de ocorrências anormais, etc.. A Análise por Árvore de Falhas completa este estudo identificando como as falhas importantes podem ocorrer e as funções críticas. O próximo passo é analisar o histórico de manutenção dos equipamentos e componentes que desempenham a função.

O Sistema 7123 possui um módulo histórico de manutenção com as datas das intervenções e o sintoma, causa e solução de cada falha. Além deste levantamento

de dados é importante consultar o pessoal de manutenção e de operação para obter mais informações e conferir a consistência dos registros.

Determinadas as funções críticas e concluída a análise preliminar do histórico de manutenção, o próximo passo para melhorar a disponibilidade das funções (equipamentos e componentes), é aumentar a confiabilidade ou melhorar a mantabilidade.

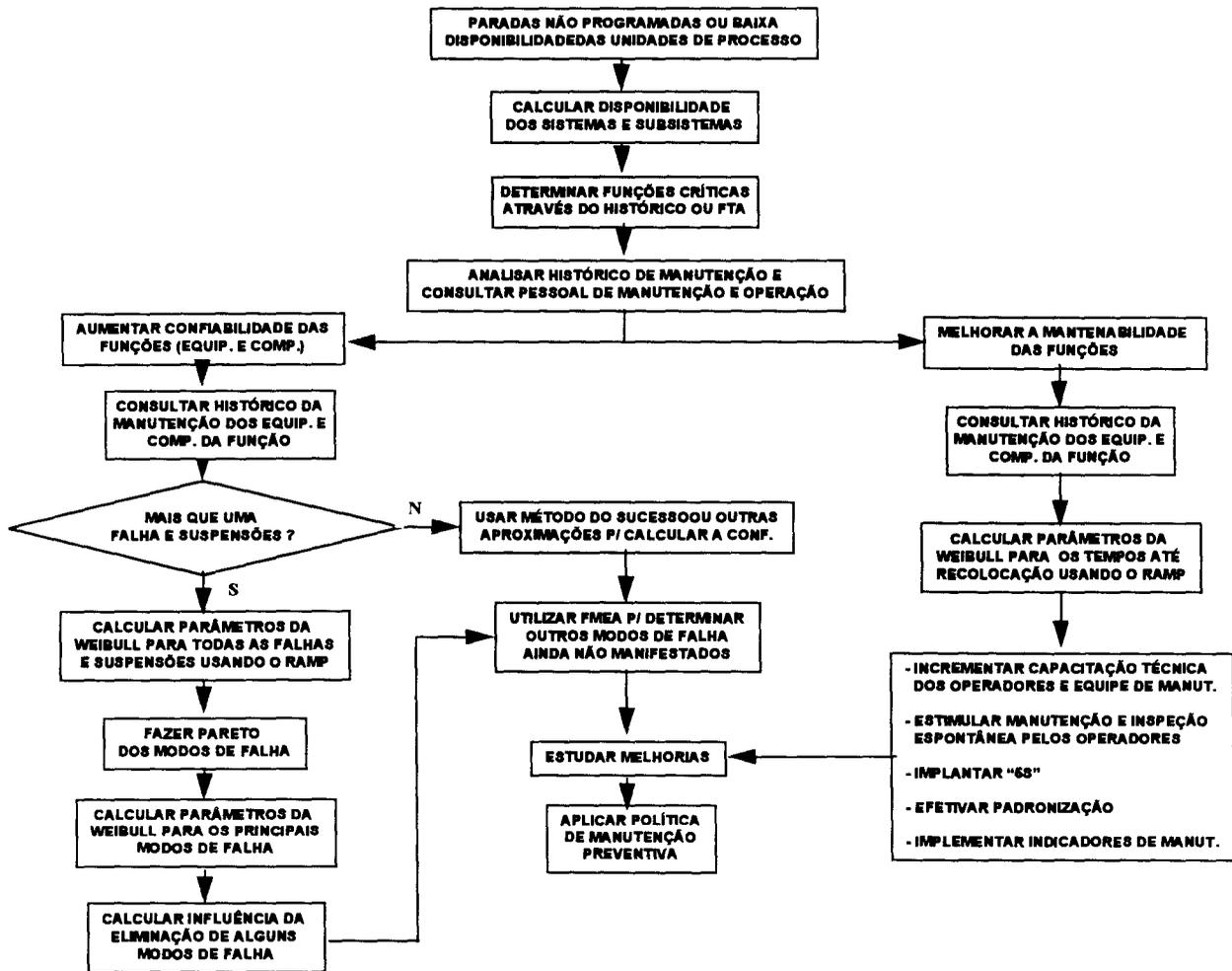


Figura 10.1- Fluxograma lógico para solucionar os problemas de disponibilidade dos sistemas, equipamentos e componentes.

10.1.1- Análise do Histórico de Manutenção

Para aumentar a confiabilidade das funções são utilizados os dados históricos do Sistema 7123. O fato deste Sistema só possuir informações de instrumentos limita muito a sua aplicação. Este método de análise é mais eficaz e eficiente quando o histórico de manutenção de todos os equipamentos que desempenham uma função estão reunidos em um único banco de dados.

As dificuldades para analisar os dados históricos da manutenção são basicamente duas: a confiabilidade dos dados, quanto a sua exatidão e possíveis omissões e a validade da hipótese de que o equipamento, após a manutenção corretiva ou preventiva, está voltando a operar na condição de “tão bom quanto novo”. Para minimizar a primeira dificuldade os técnicos de manutenção devem ser constantemente conscientizados da importância de registrar corretamente todas as intervenções. Para satisfazer a segunda dificuldade é necessário fazer algumas considerações:

- a preventiva “A” não deve ser considerada como uma suspensão. Para isto ela deve limitar-se apenas a inspeções periódicas no local para verificar a calibração, e se necessário, efetuar limpezas, desobstrução de tomadas ou resselagens;
- a preventiva “B” que envolve normalmente troca de componentes, deve ser considerada como uma suspensão, mas para considerar uma nova recontagem do tempo, deve-se analisar a validade da hipótese de retorno do equipamento à condição de “tão bom quanto novo”;
- as corretivas “C” e “D” devem ser consideradas como falhas, mas para considerar uma nova recontagem do tempo, deve-se analisar também, a validade da hipótese de retorno do equipamento à condição de “tão bom quanto novo”.

A hipótese de retorno do equipamento à condição de “tão bom quanto novo” deve ser analisada caso a caso. Quando ocorre troca do equipamento a hipótese é válida. Na troca de componentes de um equipamento, a hipótese pode ser válida para os componentes, mas geralmente não é válida para o equipamento como um todo. Entretanto, isto não invalida o uso da teoria, desde que sejam tomados alguns cuidados na análise dos resultados. A hipótese de “tão bom quanto novo” pode ser validada através da comparação dos parâmetros da distribuição de Weibull após manutenções sucessivas (1ª manutenção, 2ª manutenção, ...). A hipótese é válida quando a variação dos parâmetros entre as sucessivas manutenções for pequena. Esta hipótese está associada à qualidade da manutenção como um todo e à política de manutenção adotada.

Nos casos em que um equipamento ou componente tem apresentado muitas falhas, em uma proporção muito maior que a dos outros equipamentos similares, estes dados devem ser descartados para efeito de análise. Certamente está ocorrendo algum problema crônico específico que deve ser estudado e solucionado.

Equipamentos e componentes que foram trocados porque apresentavam indícios de deterioração ou que estavam prestes a falhar, não devem ser considerados na análise como falha, e sim como suspensão.

10.1.2- Cálculo da Confiabilidade e Mantenabilidade

O sistema 7123, através do módulo de consultas seletivas, permite realizar as mais variadas formas de consulta aos arquivos do programa. Para fazer as análises de confiabilidade utiliza-se o arquivo histórico de manutenção. O conteúdo deste arquivo contém todos os dados necessários para fazer a análise de confiabilidade e mantenabilidade, tais como:

- data e hora do início de operação do equipamento;
- data e hora do pedido de manutenção;
- data e hora do início de manutenção;
- data e hora do término da manutenção;
- tipo de manutenção (preventiva A ou B, corretiva C ou D);
- sintoma (anomalia detectada que indicou a falha);
- causa (motivo que levou à falha, detectado após a análise do instrumento defeituoso);
- solução (ação adotada para corrigir a falha);
- módulo de análise (código alfanumérico que identifica o fabricante e o modelo do equipamento);
- seqüencial de análise e módulo de análise (particulariza um determinado equipamento).

Para efeito de simplificação do número de dados que precisam ser colocados no sistema, consideramos a data e hora do pedido de manutenção como o momento em que o equipamento falhou, e a data e hora do término da manutenção como a hora em que o equipamento voltou a operar. Estes dados vão introduzir um erro na análise, que no nosso caso foi considerado como não significativo.

Na análise a manutenção tipo “B” é considerada como suspensão e os tipos “C” e “D” como falha. A manutenção tipo “A” não envolve a troca de componentes importantes, portanto, não é considerada como uma suspensão.

Através do módulo de análise e do seqüencial de análise, pode-se obter a distribuição dos tempos até falha e suspensão e os tempos até recolocação em serviço de um equipamento ou de vários equipamentos iguais (mesmo fabricante e modelo) que operam em condições semelhantes.

Uma vez selecionados os equipamentos através do Sistema 7123, esta consulta é arquivada em um outro arquivo, onde é possível modificar, eliminar ou acrescentar dados sem alterar o arquivo histórico do Sistema. Deste arquivo é acessado o programa RAMP para estimar os parâmetros da distribuição de Weibull.

O programa RAMP estima os parâmetros de uma distribuição de Weibull quando os equipamentos em estudo possuem um histórico com pelo menos duas falhas. Quando isto não ocorre, recomenda-se usar o método do sucesso ou outras aproximações conforme descrito no item 10.1.2.1.

Quando se tem muitas falhas e suspensões para um conjunto de equipamentos de um mesmo fabricante e modelo, após o cálculo dos parâmetros da distribuição de Weibull é importante fazer um gráfico de Pareto para identificar os modos de falha preponderantes.

Caso haja dados históricos suficientes para os principais modos de falha ocorridos, pela teoria dos sistemas em série (capítulo 5), pode-se fazer uma análise gráfica para cada um dos modos de falha do equipamento. Com estes dados é possível saber qual é a influência de cada modo de falha na confiabilidade total do equipamento. Também permite fazer simulações, eliminando um ou mais modos de falha para saber a influência na confiabilidade do equipamento, direcionando os esforços para obter o maior ganho de confiabilidade.

Quando não se tem muitos dados históricos ou os equipamentos têm pouco tempo de operação, ainda não houve tempo para manifestarem-se a maioria dos modos de falha, é recomendável utilizar uma técnica como a FMEA (Failure Modes and Effects Analysis) para evidenciar quais os modos de falha que podem ocorrer neste equipamento.

Conforme fluxograma da fig. 10.1, após identificados os modos de falha e a influência na confiabilidade, o próximo passo é propor melhorias. Uma vez implantadas as melhorias, a aplicação de uma política de manutenção preventiva deve manter os resultados alcançados.

10.1.2.1- Existência de Poucos Dados Históricos

Quando o histórico dos equipamentos possui menos que duas falhas não é possível usar o método gráfico para determinar os parâmetros da distribuição dos tempos até falha. Nestes casos adota-se o método do sucesso ou outras aproximações para obter uma estimativa da confiabilidade.

Considera-se uma taxa de falhas média constante e adota-se uma das quatro situações:

- quando existe apenas uma falha (manutenção corretiva) e nenhuma suspensão (manutenção preventiva), tem-se apenas uma estimativa do TMEF (Tempo Médio Entre Falhas),

TMEF = tempo de operação até a falha.

Logo,

$$\lambda_m = 1 / \text{TMEF}, \text{ onde,} \quad (10.1)$$

λ_m = taxa de falhas média;

- quando existe apenas uma falha ($r = 1$) por manutenção corretiva e nenhuma suspensão (manutenção preventiva sistemática ou preditiva), tem-se apenas uma estimativa:

$$\lambda_m = 1 / \text{TMEF}_1, \quad (10.2)$$

onde,

TMEF_1 = tempo de operação até a falha

- quando não existe falha e nem suspensão (conforme ABNT-NBR 9321/86), tem-se apenas uma estimativa para equipamentos ainda em operação,

$$\lambda_m = 1 / (3 \cdot t_{\text{operação}}), \quad (10.3)$$

onde,

$$\text{TMEF} = 1 / \lambda_m,$$

$t_{\text{operação}}$ = tempo de operação;

- quando existem muitas suspensões e poucas ou nenhuma falha, as suspensões geralmente ocorrem devido as manutenções preventivas, usar o método do sucesso (capítulo 6) que corresponde a uma distribuição binomial.

Os dados para calcular a confiabilidade manualmente ou através do programa computacional ATP são:

n = tamanho da amostra (número de suspensões e falhas);

r = quantidade de falhas;

C = nível de confiança (usar 90%).

O resultado da confiabilidade (R) calculado deve ser

$$R \geq e^{-\lambda_m \cdot t_m}, \quad (10.4)$$

logo,

$$\lambda_m \leq \frac{-\ln R}{t_m}, \quad (10.5)$$

$$TMEF \geq 1/\lambda_m,$$

$$t_m = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n} \quad (10.6)$$

t_m = tempo médio entre suspensões;
 t_i = tempo de cada iésima suspensão.

10.1.2.2- Cálculo da Mantenabilidade

A manutenibilidade tem uma grande influência na disponibilidade. Mesmo equipamentos com baixa confiabilidade podem ter uma excelente disponibilidade se o tempo de recolocação em operação for rápido.

Da mesma forma que foi feito para calcular a confiabilidade, o Sistema 7123 registra todas as datas do pedido e do término da manutenção. Estas datas podem ser usadas para estimar a manutenibilidade do equipamento através do programa RAMP.

Não é objetivo deste estudo detalhar de que forma podemos aumentar a manutenibilidade, mas alguns conceitos devem ser lançados para reflexão. A prática da TPM, NAKAJIMA (1988), tem-se mostrado uma filosofia muito poderosa para melhorar a disponibilidade dos sistemas através da integração homem e equipamentos. O homem atuando como sensor, através dos cinco sentidos e mais a inteligência pode monitorar os equipamentos prevendo falhas e atuando antes que elas ocorram.

10.2- Aplicação de uma Política de Manutenção Preventiva

O primeiro passo para aplicar uma Política de Manutenção Preventiva é entender o que é manutenção preventiva (MP) no sentido geral. Adotando-se a definição geral de SMITH (1989), que é a seguinte: “Manutenção preventiva é a execução de qualquer tarefa **programada**, feita de acordo com um plano pré-estabelecido, cujo objetivo é reduzir (talvez eliminar) o potencial de falhas que teriam um impacto adverso na confiabilidade, disponibilidade ou na segurança da instalação”.

Esta definição leva a três objetivos da MP: prevenir a deterioração e falha em equipamentos; detectar falhas incipientes e descobrir falhas ocultas em equipamentos na condição de espera, antes que ocorra a necessidade de entrar em operação.

Para atender estes objetivos são aplicadas três tipos de atividades de MP:

- a) Definidas pelo tempo - esta atividade é usualmente conhecida como manutenção preventiva sistemática ou simplesmente manutenção preventiva que é executada com base em uma periodicidade pré-estabelecida;
- b) Definidas pela condição - esta atividade mede periodicamente (continuamente ou a intervalos regulares) o desempenho ou a condição de um item. Quando algum limite ou padrão pré-estabelecido for atingido, a intervenção é feita para substituir ou recuperar o item antes de ocorrer a falha completa. Esta atividade é conhecida como manutenção preventiva preditiva ou simplesmente manutenção preditiva;
- c) Descoberta da falha - muitos equipamentos só são usados ocasionalmente, como sistemas de proteção e segurança, equipamentos redundantes, etc.. Nestes casos, estes equipamentos são testados para verificar se já estão em estado de falha. Em caso positivo, a ação corretiva é tomada antes que a necessidade de uso ocorra. No método RCM esta atividade é tida como muito importante no programa de MP.

Para preservar as funções, e assim manter a disponibilidade e a segurança das instalações, precisa-se tomar decisões de uma forma sistematizada para priorizar a utilização de recursos limitados. Isto é feito para cada modo de falha dominante através de uma árvore de decisão (fig. 10.2).

Cada tarefa potencial de MP deve ser aplicável, isto é se aplicada reduz a possibilidade de falha ou perda da função, e efetiva, quer dizer que é o caminho mais econômico para atingir o objetivo. O risco potencial de segurança é a única condição onde as considerações de custo são ignoradas.

A primeira questão (vide fig. 10.2) é saber se a ocorrência da falha é evidente. Caso negativo temos uma função com falha oculta. Neste caso deve-se prever uma manutenção programada para testar os equipamentos, com uma frequência que possa reduzir o risco de falhas múltiplas para níveis aceitáveis (ver item 7.4). Quando a ocorrência da falha é evidente, o próximo passo é saber se a falha tem algum efeito na segurança da operação. Se não tem efeito na segurança, a escolha do tipo de manutenção vai depender exclusivamente da sua economicidade. Se a manutenção preventiva não reduzir o custo operacional da função a decisão é deixar a falha acontecer, manutenção corretiva.

Quando a falha tem efeito na segurança da operação, a determinação do prazo de manutenção preventiva sistemática ou preditiva vai depender do risco que pretende-se assumir, ou melhor, da desconfiabilidade para um determinado modo

de falha. Neste caso, se a manutenção preventiva sistemática não tem efeito na confiabilidade da função a decisão deve ser estudar melhorias.

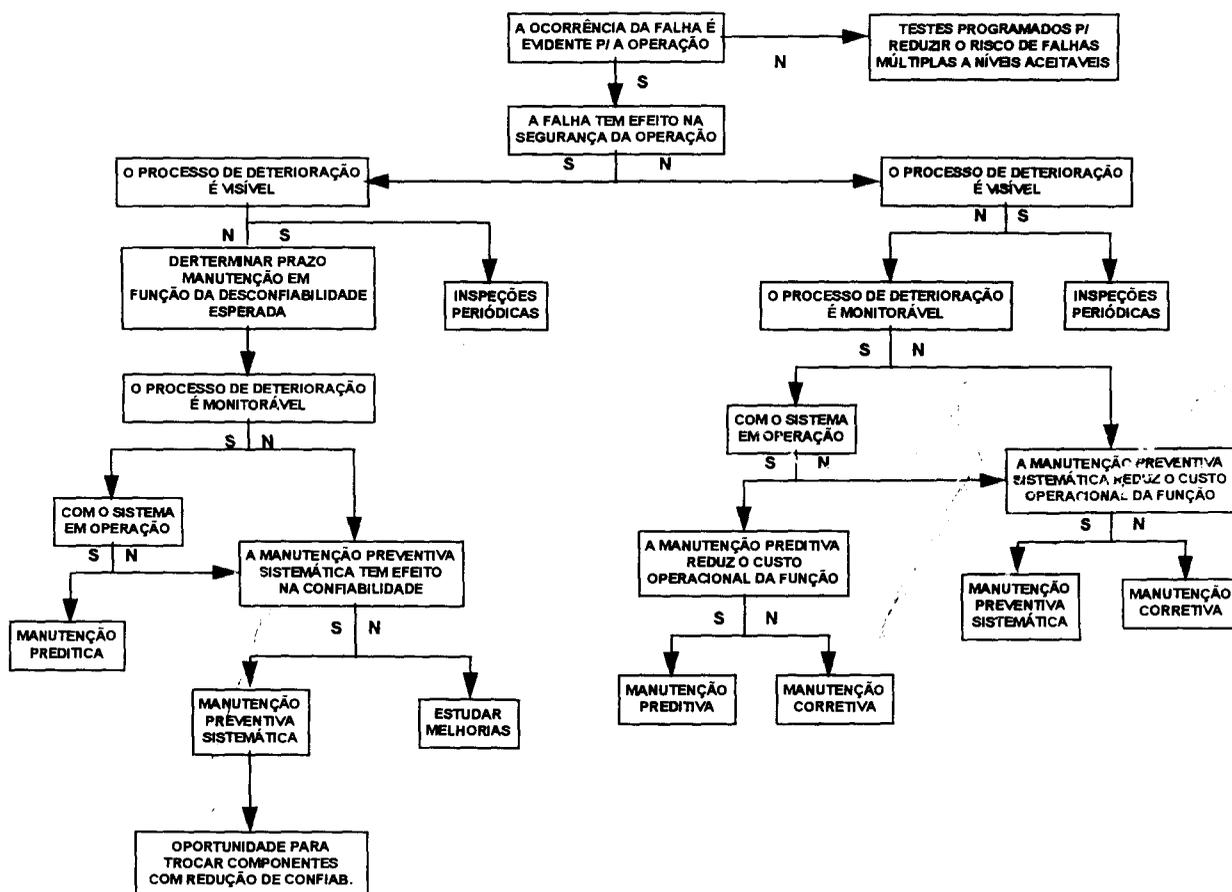


Figura 10.2- Fluxograma lógico para determinar o tipo de manutenção e a sua periodicidade.

11. APLICAÇÃO DO MODELO DE POLÍTICA DE MANUTENÇÃO PROPOSTA

Para demonstrar uma aplicação do modelo de política de manutenção preventiva, analisou-se uma situação de manutenção real, apenas com os dados numéricos modificados. A escolha do problema foi função da possibilidade de extração direta dos dados do Sistema 7123, e da quantidade de dados registrados.

A função que se deseja aumentar a disponibilidade é a de analisar o oxigênio dos gases de combustão dos fornos. O analisador de oxigênio, modelo X70, executa esta função continuamente enquanto os fornos estão operando. Com o resultado destas análises controla-se o excesso de ar para a queima do combustível dos fornos.

Um aumento de 10% no excesso de ar dos fornos corresponde a aproximadamente 2% a mais na queima de combustível, além de aumentar os custos de manutenção devido a maior corrosão na área fria dos fornos. As constantes falhas dos analisadores de oxigênio não afetam muito a sua disponibilidade, mas levam ao descrédito no instrumento por parte dos operadores de processo. Os operadores não confiando nos resultados do aparelho, deixam de fazer as correções necessárias para controlar o excesso de ar para queima. A disponibilidade calculada a partir dos dados históricos foi igual a (0,97), mas devido ao descrédito no aparelho, a disponibilidade real é muito menor.

De acordo com a fig. 10.1, o próximo passo foi analisar o histórico de manutenção destes equipamentos no Sistema 7123, para determinar as funções críticas destes instrumentos. O histórico de manutenção por mais completo que seja, sempre deixa dúvidas, que devem ser esclarecidas no campo com os operadores e com a equipe de manutenção. As dúvidas são devidas geralmente a dados incompletos, omissões, verificar em que condições os equipamentos realmente operam e outras informações que muitas vezes estão só na cabeça das pessoas.

Neste estudo (ver capítulo 9), os analisadores de oxigênio que sofreram manutenção tipo B, C e D foram considerados que voltaram a operar na condição de “tão bom quanto novo”. Esta hipótese deve ser considerada com cautela, porque ela pode ser uma aproximação grosseira do que ocorre na realidade.

A partir do histórico de manutenção dos analisadores de oxigênio, modelo X70, o programa RAMP estimou os parâmetros da distribuição de Weibull para os tempos até falhas e suspensões e para os tempos até recolocação em operação.

O programa RAMP estimou os seguintes parâmetros para a confiabilidade e a mantabilidade dos analisadores de oxigênio:

Taxa de falha característica: $\hat{\lambda}_0 = 2,58 \cdot 10^{-3}$;

Parâmetro de forma: $\hat{\beta} = 2,55$;

Coefficiente de correlação de ajuste da reta: $r = 0,987$;

Taxa de reposição característica: $\hat{\mu}_0 = 87,8 \cdot 10^{-3}$;

Parâmetro de forma: $\hat{\gamma} = 1,6$;

Coefficiente de correlação de ajuste da reta: $r = 0,96$;

HISTÓRICO DA MANUTENÇÃO DOS ANALISADORES DE OXIGÊNIO
MODELO X70

SEQ. ANALISE	TIPO MAN.	DIAS OPER.	RETORNO OPER.(dias)	SINTOMA	CAUSA	SOLUÇÃO
X70 - 0001	C	88	12	OB	SU	FL
X70 - 0004	C	118	10	OB	SU	FL
X70 - 0005	B	130	3			
X70 - 0006	B	159	2			
X70 - 0007	C	182	8	IF	ID	CA
X70 - 0002	B	203	3			
X70 - 0003	C	220	5	OB	SU	FL
X70 - 0008	D	248	17	II	CE	RI
X70 - 0001	C	250	10	OB	SU	FL
X70 - 0009	C	275	15	CD	CE	RI
X70 - 0016	C	280	14	OB	SU	FL
X70 - 0004	B	289	2			
X70 - 0013	C	292	13	IF	ID	CA
X70 - 0017	C	304	13	IF	BD	RM
X70 - 0011	C	313	8	IF	CE	VC
X70 - 0015	C	348	10	OB	EN	FL
X70 - 0010	C	354	12	CD	CE	SE
X70 - 0007	D	370	13	IF	CE	SE
X70 - 0012	C	389	7	CD	CE	SE
X70 - 0005	B	403	2			
X70 - 0008	C	427	11	OB	SU	FL
X70 - 0006	D	447	18	CD	CE	SE
X70 - 0014	D	478	13	II	CE	SE
X70 - 0003	C	494	6	CD	CE	SE
X70 - 0004	C	525	18	II	MC	RI

Sintoma:

CD - controle deficiente

IF - indicação falsa

II - instrumento inoperante

OB - obstrução

Solução:

CA - calibração

FL - feita limpeza

RI - reparados internos

RM - reparado/subst. "mainfold"

SE - subst. componente eletrônico

VC - verificada calibração

Causa:

BD - baixo desempenho

CE - componente eletrônico avariado

EN - emtup. sistema de tinta

ID - instrumento descalibrado

MC - mau contato

SU - sujeira

Tabela 11.1- Histórico de manutenção dos analisadores de oxigênio modelo X70.

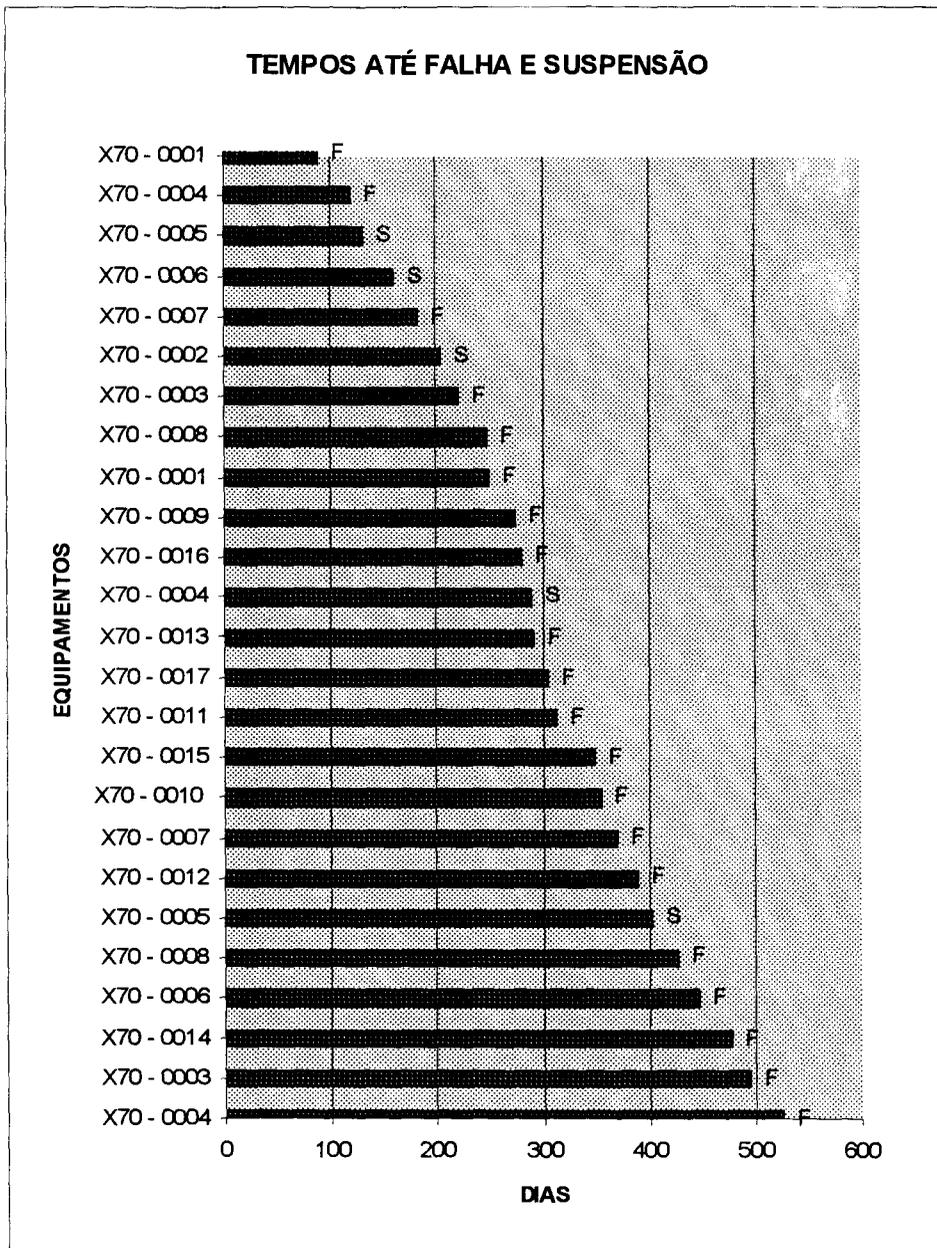


Figura 11.1- Dados com censura múltipla, para os tempos até falha (F) e suspensão (S) dos analisadores de oxigênio.

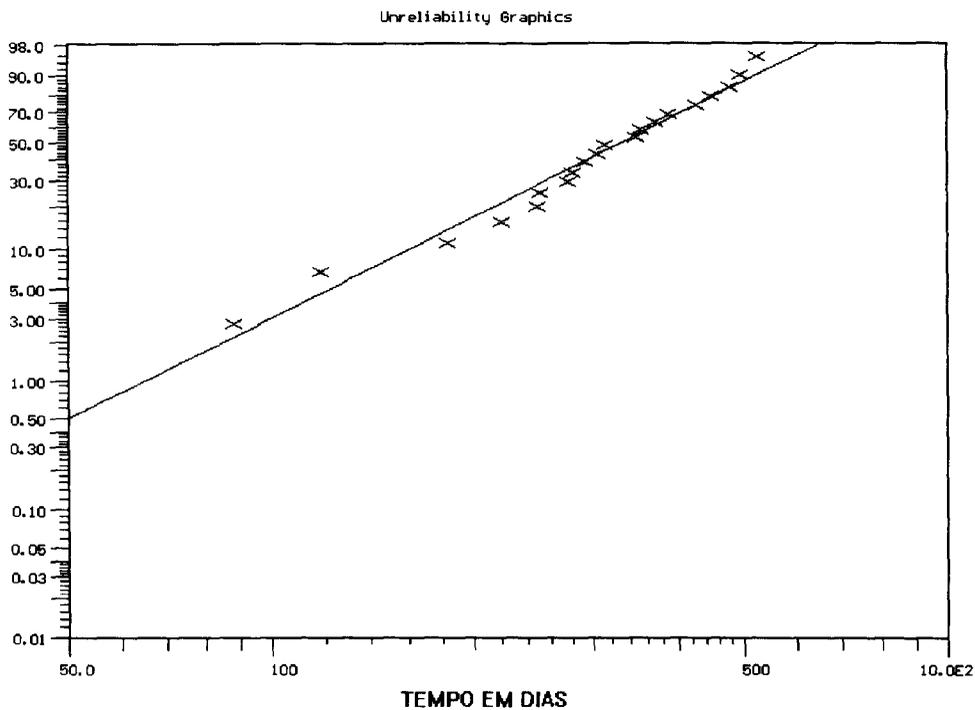


Figura 11.2- Gráfico de desconfiabilidade traçado pelo programa RAMP a partir do histórico de manutenção dos analisadores de oxigênio.

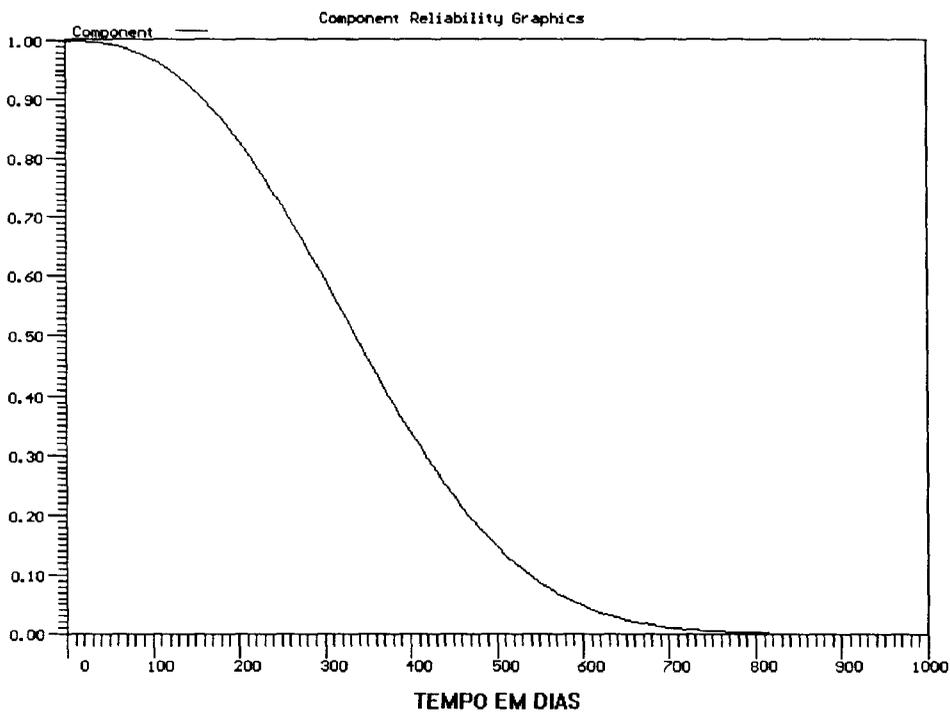


Figura 11.3- Gráfico da confiabilidade dos analisadores de oxigênio.

Utilizando a fórmula para calcular a disponibilidade média temos,

$$D = \frac{\sum_{i=1}^{25} TAF_i}{\sum_{i=1}^{25} TAF_i + TAR_i} = \frac{7586}{7586 + 245} = 0,97$$

A manutenibilidade tem uma grande influência na disponibilidade, entretanto, como reduzir os tempos médios até recolocação em serviço, não faz parte do objetivo central do trabalho.

Considerando que o valor esperado da confiabilidade é maior que o valor efetivo, para um determinado período, passamos para a próxima etapa, que é analisar a influência dos modos de falha. O Sistema 7123 classifica as falhas por sintoma, causa e solução. A seguir pode-se analisar o diagrama de Pareto dos sintomas e das causas.

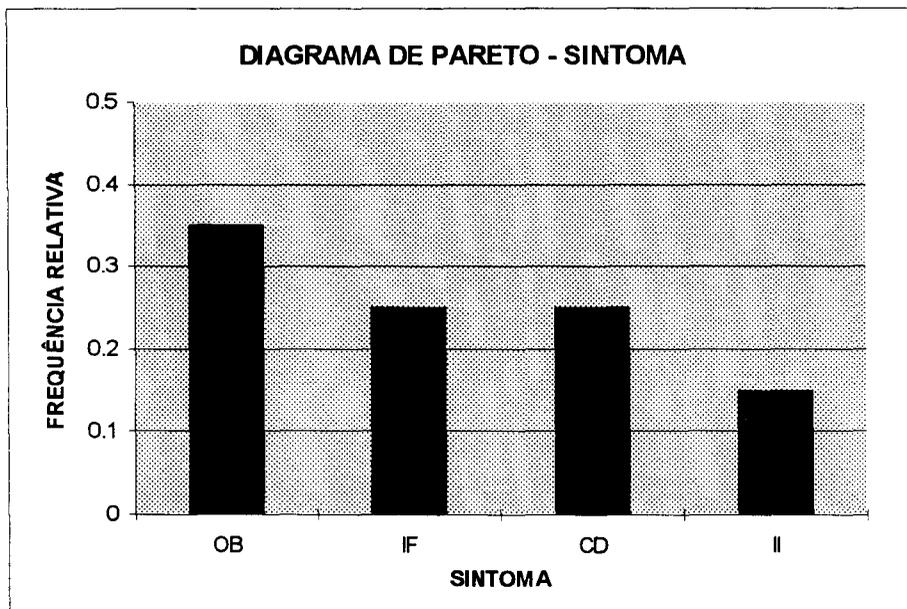


Figura 11.4- Diagrama de Pareto dos sintomas das falhas.

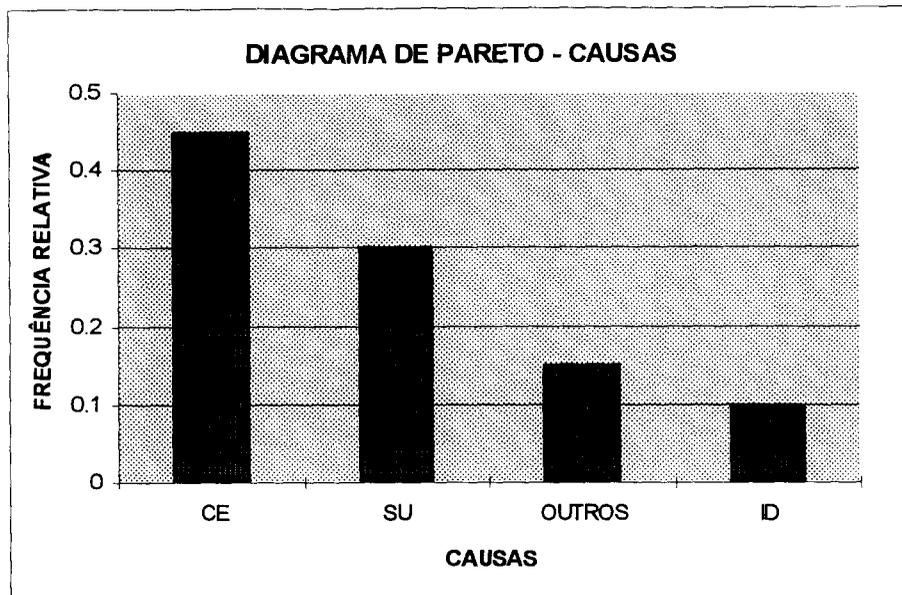


Figura 11.5- Diagrama de Pareto das causas das falhas.

Analisando os sintomas e as causas das falhas identifica-se dois modos de falha preponderantes: queima do cartão eletrônico (CE) e falhas devido a sujeira nas tomadas dos instrumentos (SU). O próximo passo é calcular a influência destes modos de falha na confiabilidade total dos equipamentos conforme capítulo 5. A tabela 11.2 mostra os resultados.

MODOS FALHA	$\hat{\lambda}_0 \cdot 10^{-6}$	$\hat{\beta}$	R_{100}	R_{200}	R_{400}
TODOS	2578	2,55	0,969	0,83	0,34
SU	1409	1,64	0,961	0,88	0,67
CE	2173	4,36	0,999	0,97	0,58
OUTROS	1891	3,2	0,995	0,96	0,66
TODOS - SU	2387	4,0	0,997	0,95	0,44

Tabela 11.2- Dados da simulação, eliminando apenas o modo de falha decorrente da sujeira nas tomadas e considerando apenas um único modo de falha atuando de cada vez.

Os tempos até falha dos modos de falha eliminados na simulação, são tratados como suspensões. Analisando os resultados, conclui-se que eliminando os problemas de sujeira nas tomadas dos instrumentos, aumenta-se a confiabilidade dos analisadores. Como o problema de sujeira está ocorrendo apenas com alguns instrumentos analisou-se com a equipe de manutenção a razão desta ocorrência. Neste caso o problema ocorre com todos os analisadores de oxigênio. O fato de apenas alguns apresentarem este modo de falha, deve-se a falta de manutenção

preventiva do tipo “A” durante um certo período. Com uma política de manutenção preventiva tipo “A” esta ocorrência deve ser quase totalmente eliminada.

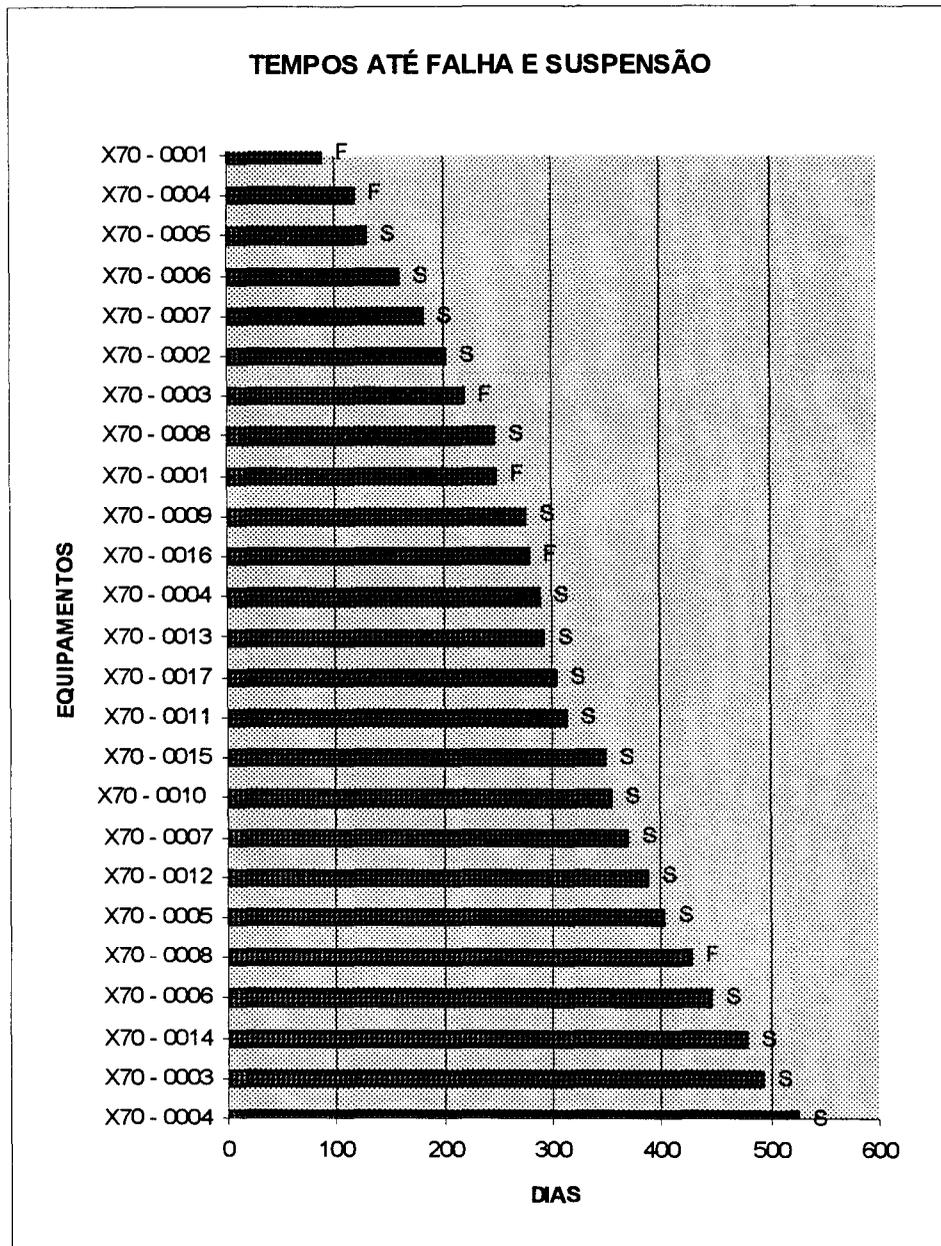


Figura 11.6- Dados com censura múltipla considerando apenas como falha a causa, sujeira nas tomadas dos instrumentos e suspensões para as demais causas.

A queima do cartão eletrônico dos instrumentos em um período relativamente curto e com o parâmetro de forma da distribuição alto, o que não é característico de equipamentos eletrônicos, chamou atenção. Analisando o fato com a equipe de manutenção chegou-se a conclusão que a queima do cartão eletrônico era devido a uma falha no procedimento de manutenção. Este equipamento possui uma célula

provadora que ao longo do tempo perde eficiência. Devido a falta de células sobressalentes, o ajuste de temperatura do fornilho de análise do equipamento era alterado para compensar a perda de eficiência da célula, com isto sobrecarregando o cartão eletrônico que acabava queimando.

Com uma política de manutenção preventiva, inclusive com a troca periódica das células, a confiabilidade deve aumentar como pode ser visto na tabela 11.2, no item “outros”. Alguns problemas classificados como “outros” também devem ser resolvidos com as medidas tomadas para estes dois problemas principais.

A sujeira nas tomadas dos analisadores de oxigênio, só pode ser monitorada com a parada do equipamento e uma inspeção visual. O prazo para efetuar a preventiva, como não é um modo de falha que compromete a segurança, deve ser função do custo operacional.

O custo de uma MP para limpeza das tomadas é US\$ 200,00 e o custo de uma manutenção corretiva é de aproximadamente US\$ 4.000,00 (custo da manutenção, queima adicional de combustível durante o período que o instrumento estava fora de operação ou com indicação falsa e maior custo da manutenção devido a corrosão da área fria dos fornos).

Considerando o menor custo operacional, o intervalo ótimo entre MP tipo “A” para limpeza é de 160 dias (ver fig. 11.7).

Caso a falha da função destes analisadores pudesse comprometer, de alguma forma, a segurança da operação dos fornos deveríamos estabelecer um risco que estaríamos dispostos a assumir, por exemplo 4% de desconfiabilidade. Neste caso o prazo da MP para limpeza seria de aproximadamente 100 dias (ver fig. 10.2).

No caso destes instrumentos, em particular, a equipe de manutenção está desenvolvendo uma forma de fazer uma MP por condição. Foi estabelecida uma carta de controle para as medições do excesso de ar. Quando os resultados apresentam alguma tendência para mais ou para menos pesquisa-se qual é a causa especial que está ocorrendo.

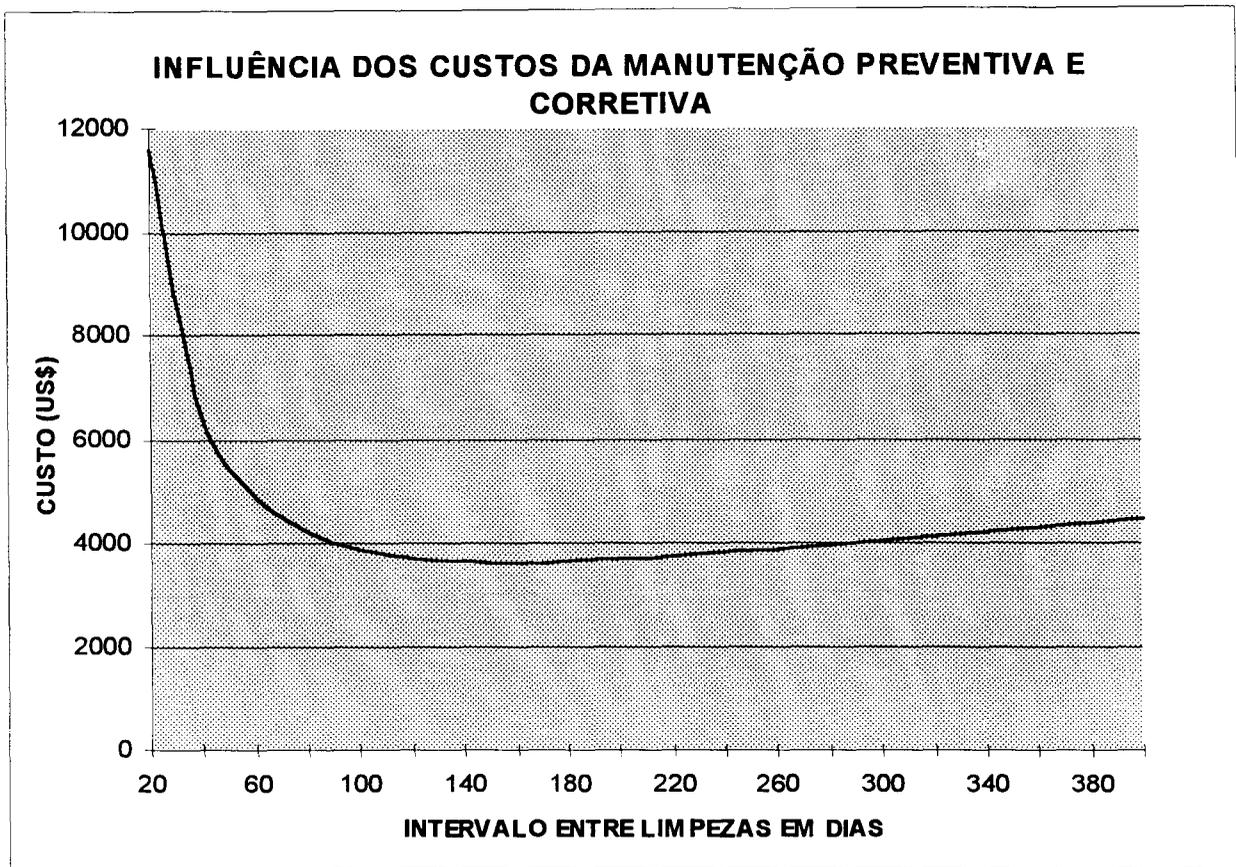


Figura 11.7 Influência dos custos da MP e da manutenção corretiva no intervalo entre limpeza em dias, para $\hat{\lambda}_0 = 0,0014$; $\beta = 1,64$; $C_F = \text{US\$ } 4000$; $C_P = \text{US\$ } 200$ e tempo total da análise de custos 1095 dias.

Uma função importante do instrumento, difícil de ser detectada, é a exatidão dos valores medidos. Tratamos esta característica do instrumento como uma função oculta, portanto deve estar sujeita a testes de aferição/calibração regulares. Neste caso tivemos apenas duas falhas que foram atribuídas como causa a descalibração do instrumento. Entretanto não se sabe realmente, quando ocorreu a falha, apenas constatou-se que o instrumento estava descalibrado. Estes dois valores somente foram considerados como um ponto de partida para estabelecer um programa de aferição/calibração.

Taxa de falha característica: $\hat{\lambda}_0 = 0,0037$

Parâmetro de forma: $\hat{\beta} = 2,7$

Com os parâmetros da distribuição de falhas calculamos o intervalo entre aferição/calibração que proporciona maior disponibilidade. Conforme a fig.11.8, inicialmente a aferição/calibração deve ser feita em intervalos de aproximadamente 40 dias.

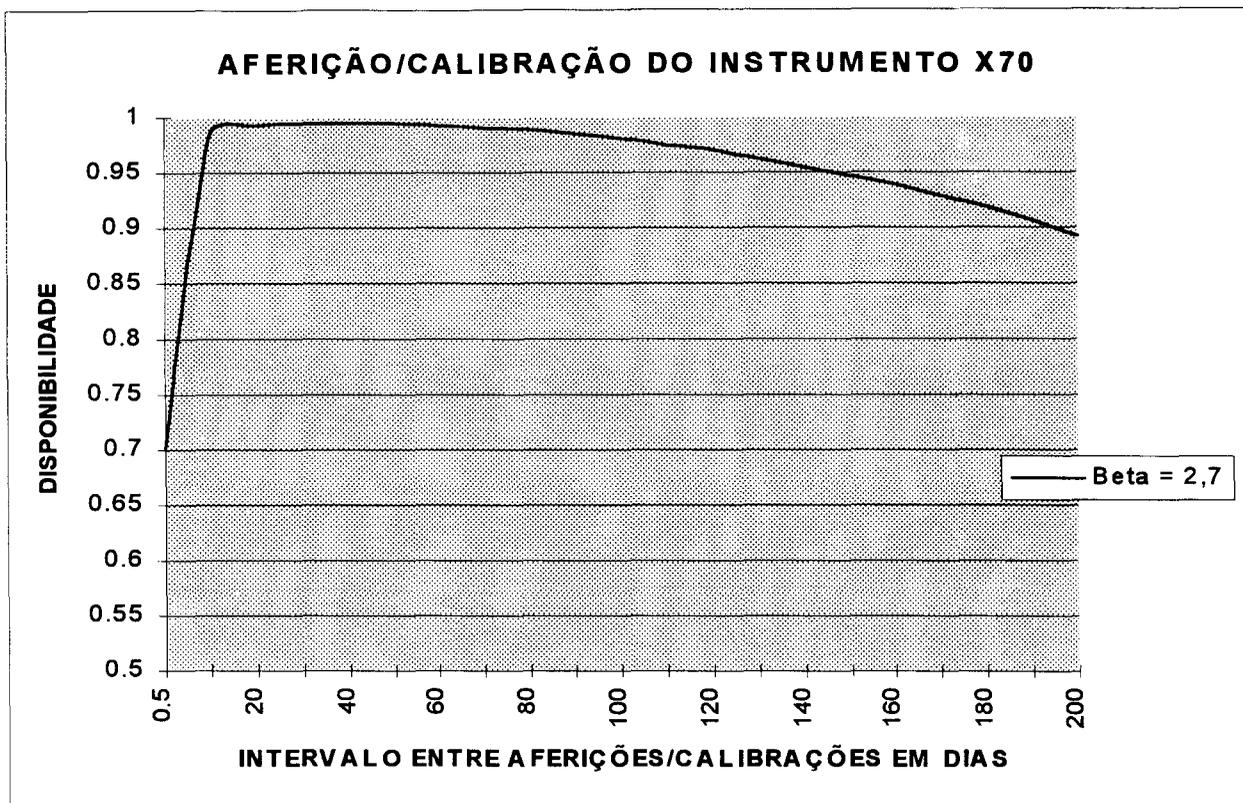


Figura 11.8- Intervalo ótimo entre aferições/calibrações para obter a máxima disponibilidade.

Neste exemplo prático, inicialmente devemos fazer apenas uma MP tipo “A” para limpeza das tomadas dos instrumentos em intervalos de 160 dias, fazer aferição/calibração a cada 40 dias e estabelecer um período para a troca das células provadoras. Para evitar diversos serviços no mesmo instrumento em datas diferentes convém estabelecer um programa que possa atender as três situações. Neste caso como a exatidão das medidas não é muito importante e o teste de aferição/calibração é muito trabalhoso, pode-se aumentar o intervalo de testes para 100 dias sem comprometer muito a disponibilidade e diminuir o intervalo entre limpezas para 100 dias sem aumentar muito o custo operacional (ver figuras 11.7 e 11.8). Assim toda vez que se faz uma aferição/calibração executa-se uma limpeza nas tomadas do instrumento.

12. CONCLUSÕES

- A tendência atual da atividade de manutenção é enfatizar a preservação das funções dos sistemas, ao contrário da abordagem tradicional que é preservar a operação dos equipamentos. A tendência é também adotar apenas atividades de manutenção preventiva que efetivamente reduzem a possibilidade de perda da função (item 1.1).
- A Manutenção Centrada na Confiabilidade (RCM) atribui uma maior prioridade para funções com falhas ocultas que ocorrem geralmente nos dispositivos de proteção ou equipamentos redundantes em “stand-by”. Na indústria de refino de petróleo falhas em sistemas de proteção geralmente têm consequências sérias (item 1.1).
- A Manutenção para Produtividade Total (TPM) tem reforçado a prática da multifunção dos operadores de processo para executarem algumas atividades de manutenção. O operador de processo passa a atuar com sensor, identificando prontamente os primeiros sintomas que podem levar a uma falha do equipamento (item 1.2).
- Os testes periódicos aumentam a disponibilidade das funções sujeitas a falhas ocultas. Quanto maior o parâmetro de forma da distribuição de Weibull do sistema, tanto maior é disponibilidade e o intervalo ótimo entre testes (item 7.4).
- A manutenção preventiva sistemática tem efeito positivo na confiabilidade quando a taxa de falhas é crescente e não tem efeito na confiabilidade quando a taxa de falhas é constante (item 8.1).
- A manutenção preventiva sistemática diminui a disponibilidade quando a taxa de falhas é constante. Mesmo quando a manutenção preventiva é feita fora do período de produção do equipamento, esta não tem efeito na disponibilidade (item 8.2).
- Para equipamentos com taxa de falhas crescente a manutenção preventiva sistemática aumenta muito pouco a disponibilidade quando a manutenção exige uma parada do equipamento durante o período produtivo. A manutenção preventiva sistemática começa a tornar-se vantajosa em termos de aumento de disponibilidade, para equipamentos com taxa de falhas crescente, quando o $TMAR_P$ é muito menor que o $TMAR_F$ (item 8.2).

- Quando a taxa de falhas é crescente e a manutenção preventiva é feita fora do período de produção, esta tem uma forte influência na disponibilidade (item 8.2).
- A manutenção preventiva pode não ser bem sucedida ou induzir a falhas prematuras, portanto, ela pode anular os ganhos de confiabilidade e disponibilidade (item 8.2).
- Para equipamentos com taxa de falhas constante, quanto menor o intervalo entre manutenções preventivas, maior o custo operacional. Para equipamentos com taxa de falhas crescente e quanto maior o custo da manutenção corretiva em relação à manutenção preventiva, maior é a vantagem em se adotar uma política de manutenções preventivas sistemáticas, para reduzir o custo operacional do equipamento (item 8.3).
- A criação de uma interface do programa RAMP com o Sistema 7123, permitiu o cálculo direto das taxas de falha (λ) e taxa de recolocação em serviço (μ), bem como os Parâmetros de Forma (β e γ) para os equipamentos de instrumentação (itens 10.1.1 e 10.1.2).
- Com a possibilidade de quantificar a disponibilidade, confiabilidade e a manutenibilidade dos sistemas, equipamentos e componentes, através do programa RAMP e utilizando uma árvore lógica de decisões, pode-se manter ou melhorar a disponibilidade das plantas de processo (item 10.1 e fig. 10.1).
- A utilização de uma árvore lógica de decisões baseada em conceitos confiabilísticos, para analisar os modos de falha dominantes, permite, de uma forma sistematizada, descobrir qual é o tipo de manutenção mais efetivo e econômico a ser aplicado (item 10.2 e fig 10.2).
- A utilização dos dados históricos dos equipamentos, para análises de confiabilidade, tem mais importância pelas dúvidas que surgem do que pelas respostas neles contidos. Portanto, é preciso ter muita cautela para tomar decisões apenas baseado em dados históricos (item 11).
- Todos os modelos confiabilísticos aplicados representam condições limitadas da realidade. Entretanto, isto não invalida a sua utilização, desde que se conheça as limitações destes modelos.

13. SUGESTÕES PARA FUTUROS DESENVOLVIMENTOS

- Analisar qual é o melhor método para determinar o intervalo de confiança para dados com censura múltipla analisados pelo método do incremento, conforme NBR 6742, incorporando-o ao programa RAMP, para auxiliar a tomada de decisão.
- Desenvolver um modelo confiabilístico para determinar a frequência das manutenções preditivas em função da confiabilidade esperada e do custo operacional mínimo.

14. BIBLIOGRAFIA

14.1- Referências Bibliográficas

- CARVALHO, R. S. N.; ALVES, J. E. *Manutenção Baseada em Confiabilidade na PETROFLEX - RJ*. Revista Manutenção, Mar./Abr. 1994.
- CRELIN, G. L. *Use of Reliability-Centered Maintenance for Maintenance for the McGuire Nuclear Station Feedwater System*. EPRI NP-4795, Set. 1986.
- DOUGAN, K. W. *Quantitative Reliability Methods Improve Plant Uptime*. Hydrocarbon Processing, Ago. 1993.
- GUIDO, C. A. P. *Ensaio Acelerado uma Nova Metodologia*. Tese (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP, 1994.
- HOOK, T. G. *Application of Reliability-Centered Maintenance to San Onofre Units 2 and 3 Auxiliary Feedwater System*. EPRI NP-5430, Out. 1987.
- KUMAMOTO, H. ; HENLEY, E. J. *Reliability Engineering and Risk Assessment*. USA, Prentice-Hall, 1981.
- LAMB, R. G. *Approach to Making Maintenance Operations the Strategic Resource for Availability Performance in Asset Utilization*. NPRA, MC-93-73, Mai. 1993.
- LEWIS, E. E. *Introduction to Reliability Engineering*. USA, John Wiley & Sons, 1987.
- MOUBRAY, J. *Maintenance Management - The Third Generation*. Euromaintenance, 1988.
- NAKAJIMA, S. *TPM - Total Productive Maintenance*. Apresentado no Seminário Internacional da IMC, São Paulo, 1988.
- NELSON, W. *Applied Life Data Analysis*. USA, John Wiley & Sons, 1982.
- Norma, ABNT NBR 6742. *Utilização da Distribuição de Weibull para Interpretação dos Ensaio de Durabilidade por Fadiga*. Jan. 1987.

- Norma, ABNT NBR 9321. *Cálculo de Estimativas por Ponto e Limites de Confiança Resultante de Ensaios de Determinação da Confiabilidade de Equipamentos*. Abr. 1986.
- PALLEROSI, C. A., FOLLEDO, M. *Confiabilidade de Componentes e Sistemas*. Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP, 1994.
- PRADHAN, S. *Apply RCM to Sealless Pump Managment*. Hydrocarbon Processing, Mar. 1993.
- PRADHAN, S. *Maintenance Strategies for Greater Availability*. Hydrocarbon Processing, Jan. 1994.
- SMITH, A. M. *Improving PM Programs Via the Reliability-Centered Maintenance Technique*. EI Internacional, Inc., 1989.
- VASUDEVAN, R. *Application of Reliability-Centered Maintenance to Component Cooling Water System at the the Turkey Point Plants Numbers 3 and 4*. EPRI NP-4271, Out. 1985.

14.2- Bibliografia Recomendada

- BLANCHARD, B. S. *Maintainability: a key to effective serviceability and maintenance management*. John Wiley & Sons, Inc., 1995.
- BILLINTON, R.; ALLAN, R. N. *Reliability Evaluatin of Engineering Systems - Concepts and Techniques*. England, Plenum Press, 1987.
- CASCONE, N. R. *Metodologia para Análise e Otimização da Confiabilidade, da Mantenabilidade e Disponibilidade de um Processo Contínuo de Produção*. Tese (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP, 1994.
- GUNTER, B. *Reliability Data Analysis: Part 1, 2 and 3*. Quality Progress, Jun.,Ago. e Out. 1994.
- KLINGELFUS, L. G. *Failure Data Analysis of Sprinters` Diesel Engine*. Department of Manufacturing Engineering, University of Birmingham, 1990.
- MONCHY, F. *A Função Manutenção, Formação para a Gerência da Manutenção Industrial*. São Paulo, Editora DURBAN/EBRAS, 1989.

- MOUBRAY, J. *Reliability - Centred Maintenance*. Oxford, Butterworth-Heinemann Ltd, 1994.
- NELSON, W. *How to Analyze Reliability Data*. American Society for Quality Control, Vol. 6, Wisconsin, USA, 1983.
- NELSON, W. *Accelerated Testing: Statistical Models, Test Plans, and Data Analyses*. USA, John Wiley & Sons, 1990.
- PALLEROSI, C. A.; PAONE, N. *Sensores como Elemento de Aumento da Confiabilidade de Componentes e Sistemas Mecânicos*. Revista Brasileira de Ciências Mecânicas, Dez. 1991.
- PATTON, J. D. *Preventive Maintenance*. Instrument Society of America, USA, 1983.
- SIMOLA, K. et al. *Pump Failure Analysis: VTT's Contribution to the EuRedatA Benchmark Exercise on Data Analysis*. Technical Research Centre of Finland (VTT), Espoo, Out. 1991.
- SUTTON, I. S. *Integrated Management Systems Improve Plant Reliability*. Hydrocarbon Processing, Jan. 1995.