

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**Utilização de Ferramentas de Confiabilidade em um
Ambiente de Manufatura de Classe Mundial**

Autor: **Adail Barros Filho**
Orientador: **Kátia Lucchesi Cavalca**

07/03

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

Utilização de Ferramentas de Confiabilidade em um Ambiente de Manufatura de Classe Mundial

Autor: **Adail Barros Filho**

Orientador: **Kátia Lucchesi Cavalca**

Curso: **Engenharia Mecânica**

Área de Concentração: **Planejamento e Gestão Estratégica da Manufatura**

Dissertação de Mestrado Profissional apresentado à comissão de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

São Luis, julho de 2003

MA. - Brasil

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

Dissertação de Mestrado

**Utilização de Ferramentas de Confiabilidade em
um Ambiente de Manufatura de Classe Mundial**

Autor: **Adail Barros Filho**

Orientador: **Prof. Dra. Kátia Lucchesi Cavalca Denini**

Prof. Dra. Kátia Lucchesi Cavalca Dedini, Presidente.
Instituição: FEM / UNICAMP

Prof. Dr. Valdemar Silva Leal
Instituição: CCT / UEMA

Prof. Dr. Waldemir Silva de Lima
Instituição: CCT / UEMA

São Luis, 25 de julho de 2003

Dedicatória:

Aos meus filhos,
A minha querida esposa,
Aos meus pais

Agradecimentos

A Deus e a sua Mãe Maria, que sempre conduziram meus passos, permitindo a conclusão de mais uma etapa.

Aos meus pais e ao meu irmão, pelo apoio em todos os momentos da minha vida.

A minha querida esposa Nelma Lôide Almeida Barros, pelo grande incentivo, apoio e compreensão incondicional recebidos durante a elaboração deste trabalho e nas diferentes fases pelas quais passamos na vida.

A minha orientadora, Profa. Dra. Kátia Lucchesi Cavalca Dedini, pelo apoio, compreensão e orientações fornecidos durante a elaboração deste trabalho.

A todos os professores, funcionários e colegas do departamento de engenharia mecânica da UEMA, que me ajudaram de forma direta e indireta na elaboração desta dissertação.

A ALUMAR, pela visão de progresso e incentivo ao crescimento técnico e científico do Maranhão, em haver possibilitado o acesso a suas instalações para o desenvolvimento do presente trabalho. Um especial agradecimento ao Engenheiro Maurício Fiock, um entusiasta da aplicação da confiabilidade como ferramenta para melhoria do processo produtivo e ao engenheiro Carlos Chaves pela ajuda na elaboração do trabalho.

A RELIASOFT BRASIL, na pessoa do Engenheiro Cláudio Spanó, por haver cedido gentilmente a cópia, na versão sem restrições, dos aplicativos Weibull++ 6.0 e BlockSim 6.0 para a elaboração deste trabalho.

“Só em Deus repousa a minha alma, é dele que
me vem o que eu espero”.

Sl 61:6

Resumo

BARROS FILHO, Adail *Utilização de Ferramentas de Confiabilidade em um Ambiente de Manufatura de Classe Mundial*. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas 2003. 103 p., Dissertação (Mestrado).

No último decênio, vem-se observando a intensificação da competição entre empresas e países como reflexos das tentativas de conter os impactos causados pela mudança de paradigma de produção. Nesse processo a capacidade de rapidamente gerar, introduzir e difundir inovações passou a exercer papel fundamental para a sobrevivência das empresas e até para deslocar rivais de posições aparentemente inexpugnáveis. Assim durante o desenvolvimento deste trabalho, procurou-se contextualizar os aspectos da confiabilidade como parte integrante das ações que caracterizam a manutenção de classe mundial como o TPM e RCM, bem como abordar os aspectos da produção, descrevendo de forma sucinta o sistema Toyota de produção e suas ferramentas no contexto da Manufatura de Classe Mundial, que abrangem as ações que tornam as empresas mais competitivas. Neste trabalho foi estudado a confiabilidade de um conjunto de elementos resistivos de fornos de espera, utilizados em uma planta de produção de alumínio, em várias configurações tipo K-em-N. O estudo de caso teve por objetivo sugerir o período ótimo para a realização das manutenções preventivas baseada nos índices de confiabilidade para cada resistência estudada através dos programas Weibull ++ e BlockSim.

Palavras Chave

- Manufatura de Classe Mundial, Manutenção de Classe Mundial. Confiabilidade de Sistemas

Abstract

BARROS FILHO, Adail *Use of Reliability Tools Under Word Class Manufacture Process*, Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas 2003. 103p., Dissertação (Mestrado).

In the last decade, it has been observed the intensification of the competition among companies and countries as reflexes of the impacts caused by the change paradigm in production. In that process the capacity of quickly generate, introduce and spread out innovations started to play a fundamental role paper for the survival of the companies and even to move rivals of positions seemingly invincible. Thus during the development of this paper, there is a clear attempt to contextualize the aspects of reliability as in important part of the actions that characterize the world class maintenance like TPM and RCM, as well as to approach the aspects of the production, describing in brief forms Toyota system of production and its tools in the context of the World Class Manufacture of that embraces all the actions that make companies more competitive. In this paper a case study was presented in a company of World Class Manufacture with the objective of demonstrating the use of some reliability tools. The obtained results lead the conclusion that the analysis of the reliability of components and productive systems are a powerful tool to companies interested in the stairway of the World Class Manufacture.

Key Words

- World Class Manufacture, World Class Maintenance, Reliability of Systems.

Índice

Lista de Figuras	iv
Lista de Tabelas	v
Nomenclatura	vi
1 – Introdução	1
1.1 - Objetivos do trabalho	2
2 – Revisão da Literatura	4
2.1 – Manufatura de Classe Mundial	4
2.2 - O Sistema Toyota de produção	8
2.2.1 – Princípios do Sistema Toyota de Produção	9
2.2.2 – Classificação das Operações	11
2.2.3 – Princípio do não-custo	11
2.2.4 – Lógica das Perdas	12
2.2.5 – Pilares do STP	14
2.3 - O sistema ABS	17
2.4 – Manutenção de Classe Mundial	20
2.4.1 – Manutenção Produtiva Total	25
2.4.1.1 – Objetivos da Manutenção Produtiva Total	26
2.4.1.2 – Rendimento Operacional das Máquinas	27
2.4.1.3 – Implementação da TPM	27
2.4.2 - Manutenção Centrada na Confiabilidade	28
2.4.2.1 – Diagramas de aplicação da RCM	32

3 – Confiabilidade	34
3.1 – Introdução	34
3.2 – Conceitos Básicos Sobre Confiabilidade	37
3.3 - Funções de Confiabilidade	40
3.4 - Principais distribuições utilizadas em confiabilidade	43
3.4.1 – Distribuição de Weibull	47
3.4.1.1 – Weibull Triparamétrica	48
3.4.1.2 – Weibull Biparamétrica	49
3.4.1.3 – Weibull Monoparamétrica	50
3.4.1.4 – Weibull Mista	51
3.4.1.5 - Influência dos Parâmetros da Confiabilidade	51
3.4.2 – Distribuição Lognormal	53
3.5 – Características da Amostra que Representa a População	54
3.6 – Tipos de Dados de Vida	54
3.7 - Confiabilidade de Sistemas	55
3.7.1 – Confiabilidade em Estruturas Complexas	57
3.7.2 – Estruturas em Série	59
3.7.3 - Estrutura em Paralelo	61
3.7.4 – Estrutura em K-em-N	62
 4 - Metodologia e Ferramentas Utilizadas	 63
4.1 – Levantamento dos Programas de confiabilidade	64
4.2 - O Software Weibull ++	65
4.3 - O Software BlockSim	65
4.4 – Resumo dos Passos	68
 5 – Estudo de Caso e Apresentação dos Resultados	 69
5.1 – Apresentação da Empresa	70
5.2 – Sistema Estudado e Caracterização do Problema	70
5.3 – Cálculo da Confiabilidade dos Elementos Resistivos	71
5.3.1 – Resumo dos dados obtidos	72

5.3.2 – Processamento dos dados no Programa Weibull ++	75
5.3.2.1 – Caracterização da Amostra Estudada	75
5.3.2.2 – Distribuições Estatísticas	76
5.3.2.3 – Resumo dos Parâmetros	76
5.3.2.4 – Cálculo da Confiabilidade	77
5.3.2.5 – Gráficos	78
5.3.3 – Processamento dos dados no Programa BlockSim	80
5.3.3.1 – Análise da Confiabilidade	80
5.3.3.2 – Gráficos	81
5.3.3.3 – Tabelas	86
5.4 – Análise dos Resultados	88
5.4.1 – Elemento Resistivo A	88
5.4.2 – Elemento Resistivo B	89
5.4.3 – Elemento Resistivo Recondicionado C	91
6 - Conclusões e Recomendações	93
6.1 – Conclusões	93
6.2 – Recomendações	95
Referências Bibliográficas	96
Anexo	102

Lista de Figuras

Figura 2.1	Estrutura do Sistema Toyota de Produção	14
Figura 2.1	<i>JIT</i> como filosofia de produção	17
Figura 2.3	Degraus para a Manutenção de Classe Mundial	24
Figura 2.4	Visão Geral do Processo RCM	33
Figura 3.1	Curvas da pdf em função do tempo para beta variando de 0,5 a 5	51
Figura 3.2	Influência do Parâmetro β na Função de Confiabilidade $R(t)$	52
Figura 3.3	Influência do Parâmetro β na Função Taxa de Falha $\lambda(t)$	52
Figura 3.4	Diagrama de uma Estrutura em Série com N Componentes	59
Figura 3.5	Diagrama de uma Estrutura em Paralelo com N Componentes	61
Figura 4.1	Fluxograma da Metodologia dos Parâmetros de Confiabilidade	67
Figura 5.1	Curvas de confiabilidade, fabricante A, B e Recondicionada C	78
Figura 5.2	Curvas da taxa de falha, fabricante A, B e Recondicionada C	79
Figura 5.3	Curvas da pdf, fabricante A, B e Recondicionada C	79
Figura 5.4	Configuração das resistências em paralelo no software BlockSim v. 6.0	80
Figura 5.5	Gráfico da confiabilidade do fabricante A, configuração 32/36	81
Figura 5.6	Gráfico da confiabilidade do fabricante B, configuração 32/36	82
Figura 5.7	Gráfico da confiabilidade recondicionada C, configuração 32/36	83
Figura 5.8	Gráfico da pdf do fabricante A, configuração 32/36	84
Figura 5.9	Gráfico da pdf do fabricante B, configuração 32/36	85
Figura 5.10	Gráfico da pdf recondicionada C, configuração 32/36	86

.....

Lista de Tabelas

Tabela 3.1	Impacto na confiabilidade dos equipamentos	35
Tabela 3.2	Principais Distribuições Estatísticas e suas aplicações	45
Tabela 3.3	Descrição dos Principais Procedimentos de Análise de Estruturas	58
Tabela 5.1	Vida das resistências do fabricante A no forno 1	72
Tabela 5.2	Vida das resistências do fabricante A no forno 2	72
Tabela 5.3	Vida das resistências do fabricante A no forno 3	73
Tabela 5.4	Vida das resistências do fabricante A no forno 4	73
Tabela 5.5	Vida das resistências do fabricante A no forno 5	73
Tabela 5.6	Vida das resistências Recondicionada C no forno 1	74
Tabela 5.7	Vida das resistências recondicionada C no forno 2	74
Tabela 5.8	Vida das resistências recondicionada C no forno 2	74
Tabela 5.9	Vida das resistências recondicionada C no forno 5	75
Tabela 5.10	Vida das resistências recondicionada C no forno 6	75
Tabela 5.11	Resultados dos dados parâmetros para as resistências A,B e C	76
Tabela 5.12	Resultado dos cálculos de confiabilidade para as resistências A, B e C	77
Tabela 5.13	Valores da confiabilidade obtidos do BlockSim para o fabricante A	87
Tabela 5.14	Valores da confiabilidade obtidos do BlockSim para o fabricante B	87

.....

Nomenclatura

Letras Latinas

e – Constante de Euler

F - Falha

f - Número de Falhas.

$f(x)$ - Função Densidade de Probabilidade.

$f(t)$ - Função Densidade de Falha.

$F(x)$ - Função Distribuição Acumulada.

$F(t)$ - Função Densidade de Falha Acumulada.

n - Número de Triagens, Número de Eventos ou Número de Equações.

n - Número Total de Componentes de um Sistema.

N - Número Total de Componentes de um Sistema.

N - Número de Termos de uma Série.

$N(t)$ - Variável Aleatória que Representa o Número de Falhas de Componentes do Sistema após um Tempo t .

N_o - Número de Componentes Postos Inicialmente em Prova.

$Ns(t)$ - Número de Componentes que Sobreviveram no Tempo t .

$P(t)$ - Probabilidade de Encontrar o Sistema no Estado Si no Tempo t .

Q - Probabilidade de Falha.

$Q(t)$ - Função Distribuição de Falhas.

$R(t)$ - Função Distribuição dos Sobreviventes ou de Sucesso.

R_s – Confiabilidade do sistema.

s - Número de Sucessos.

- S - Conjunto Universal ou Espaço Amostral.
S - Suspensão.
SN - Espaço de Estado da Variável Aleatória $N(t)$.
t - Variável Tempo.
T - Conjunto de Parâmetro do Tempo.
x - Número de Ocorrências de um Evento.
x - Valores da Variável Aleatória X .
 x_i - Variável que Representa o Sucesso de um Evento para a i -ésima Unidade.
X - Variável Aleatória.

.....

Letras Gregas

- γ - Vida mínima, parâmetro de posição.
 β - Parâmetro de Forma ou Inclinação.
 ε - Erro Admissível.
 δ - Função Distribuição de Probabilidade Condicional.
 γ - Função de Distribuição Condicional.
 \square - Vida Característica, Parâmetro de Escala
 λ - Taxa de Falhas.
 $\lambda(t)$ - Função Taxa de Falhas.
 μ - Média.
 μ - Taxa de Reparo.
 ρ - Matriz das Taxas.
 σ - Desvio Padrão.

.....

Abreviações

- BSC – Balance Score card.
CWQC - Company Wide Quality Control.
CQZD – Controle de Qualidade Zero Defeito.
CCQ – Circulo de Controle de Qualidade.

DOE –	Design Of Experiments.
ERP –	Enterprise Resourcing Planing.
FMEA -	Failure Mode and Effect Analysis.
FMECA -	Failure Modes, Effects and Criticality Analysis.
FTA -	Fault Tree Analysis.
JIT –	Just in Time.
LCC -	Life Cycle Cost.
MTTF -	Mean Time To Failure.
MSG -	Maintenance Steering Group.
NOTED –	Nontouch Exchange of Die and Tools.
OTED –	One-Touch Exchange of Die method.
PDCA –	Plan Do Check Action.
QFD –	Quality Function Deployment.
QS -	Quality Standards.
RCM –	Reliability Centered Maintenance.
RBD –	Reliability Block Diagram.
SMED –	Single Minute Exchange of Die and Tools.
TPM –	Total Productive Maintenance.
TQM -	Total Quality Management.
TQC –	Total Quality Control.
WCM -	World Class Manufacture.
WCM -	World Class Maintenance.

.....

Siglas

ABS –	Alcoa Business System.
FAA -	Federal Aviation Agency.
ISO -	International Standard Organization.
JIPM -	Japan Institute of Plant Maintenance.

JUSE – Japanese Union of Scientists and Engineers.

OSHAS - Occupation Health and Safety Zone.

PNQ – Prêmio Nacional da Qualidade.

TPS – Toyota Productive System.

.....

1. Introdução

O novo ambiente de competitividade, ocasionado pela globalização, crescimento e evolução da economia, impõe agora, que as empresas em nosso país tenham um compromisso ainda maior com o contínuo aperfeiçoamento de seus produtos, processos e eliminação de desperdícios. As ineficiências não podem mais ser repassadas aos clientes. Assim, a implantação de sistemas de gestão eficazes é uma necessidade imposta pelo mercado.

A emergência das novas tecnologias tem possibilitado a melhoria do processo produtivo e de novos padrões de qualidade/produtividade industrial, incluindo aí os requisitos de normas internacionais, tais como os da série ISO 9000, “QS 9000” além dos prêmios da qualidade (“Deming”, “Malcon Baldrige”, “PNQ”); as novas formas de organização da produção (*TPS*, *Just in Time*, *Células Flexíveis de Manufatura*; “TPM”; “TQC” etc.)

Na busca de redução dos desperdícios, programas de melhoria da qualidade, tais como o *TQC*, tornaram-se amplamente difundidos nas indústrias. Conforme Campos (1992), o objetivo da utilização do *TQC*, como abordagem gerencial nas empresas, é justamente criar condições internas que garantam a sobrevivência das organizações a longo prazo.

Os sistemas de planejamento e controle da produção e de materiais foram sempre uma área de aperfeiçoamento nas indústrias. As empresas esperam sempre ter melhores previsões, melhores sistemas de planejamento, flexibilidade quanto às solicitações inesperadas dos clientes, menores níveis de estoque, melhores respostas aos pedidos dos clientes, tempos de entrega menor, maior capacidade de utilização dos ativos e uma série de outros aspectos.

Segundo Neto (2001), nos países desenvolvidos, é bastante nítida a preocupação, que todos têm, em situar suas empresas no 1º quartil, ou seja, entre as empresas excelentes ou melhores do mundo. Em consequência as áreas de operação e manutenção dessas empresas procuram também a excelência. Portanto, não há empresa excelente sem que os seus diversos segmentos também não o sejam.

A teoria da confiabilidade atualmente é de extrema importância, devido a rápida e irreversível informatização e automação de processos críticos (indústria aeronáutica, transporte metro-ferroviário, área nuclear e indústria química dentre outras), onde a ocorrência de falhas pode representar elevados prejuízos financeiros ou perdas humanas com trágicas consequências. A análise de confiabilidade fornece ferramentas teóricas e práticas, que possibilitam determinar a probabilidade e capacidade dos componentes de um sistema executarem suas funções, sob determinadas condições operacionais, por um período específico, sem que falhas ocorram. Como consequência pode-se planejar melhoramentos ou as ações corretivas necessárias com consequentes benefícios ao sistema operacional.

A modelagem e análise de um sistema confiabilístico podem apontar alternativas para redução de perdas operacionais com o conhecimento probabilístico dos vários modos de falhas.

1.1 Objetivos do trabalho

O presente trabalho tem por objetivo contextualizar a confiabilidade no âmbito da produção e manutenção industrial, para tanto, serão utilizados alguns aplicativos disponíveis no mercado, para a avaliação da confiabilidade de um dado sub-sistema produtivo. A avaliação obedecerá as seguintes etapas:

- a) Pesquisar e adquirir aplicativos comerciais para o cálculo da confiabilidade;
- b) Delimitar o sistema e sub-sistemas a serem estudados;
- c) Levantamento do histórico dos componentes dos sistemas a serem estudados;
- d) Calcular a taxa de falha e tipo de distribuição característica para os componentes estudados;
- e) Elaborar o diagrama de blocos correspondente a estrutura a ser estudada;

- f) Estimar os parâmetros de confiabilidade e apresentar os resultados de forma gráfica;
- g) Avaliar a sensibilidade dos componentes e sua influencia no resultado da estrutura analisada.
- h) Sugerir o tempo ótimo para a manutenção do sistema em questão.

Espera-se, portanto, que este estudo venha a contribuir para o desenvolvimento de conhecimentos e especialização na área da confiabilidade para a melhoria do processo nas indústrias locais, motivando seu uso e difusão.

2. Revisão da Literatura

2.1 Manufatura de Classe Mundial

O termo “*World Class Manufacturing*” -WCM, em tradução livre Empresa de Classe Mundial, foi utilizado por Hayes e Wheelwright (1984). Desde então, o conceito tem sido adotado e expandido por um grande número de autores como Schonberger (1988), que tem reforçado algumas das idéias propostas, adicionando novas práticas e ignorando algumas outras, na formulação e análise das estratégias competitivas de operação. Slack et al. (1997), define que as empresas de classe mundial estão permanentemente em busca dos melhores processos e técnicas operacionais a fim de que possam competir nas dimensões competitivas de custo, qualidade, confiabilidade, flexibilidade e rapidez de entrega.

O trabalho desenvolvido por Hayes e Wheelwright (1984) no campo da estratégia de operações é extremamente relevante em função de algumas razões:

A primeira delas é descrita pela necessidade das empresas desenvolverem um conjunto de práticas que possibilitem a obtenção de um desempenho superior ao de seus concorrentes. Estas práticas podem ser sintetizadas nas seguintes dimensões:

- (a) Perfil da força de trabalho e capacidades organizacionais;
- (b) Gerenciamento da competência técnica;
- (c) Competição através da qualidade;
- (d) Participação da força de trabalho;
- (e) Reconstrução da engenharia industrial (revisão de métodos e equipamentos);
- (f) Abordagem do processo de melhoria contínua.

A segunda razão é que estão entre os primeiros autores no campo de gestão de operações a considerarem os conhecidos *trade-offs* no desempenho da operação, e que as empresas devem ter um conjunto de prioridades claramente definidas e compatíveis com as dimensões de seu desempenho competitivo.

O desenvolvimento de uma estratégia de operações dirigida aos consumidores tem início num processo de análise do mercado, o qual categoriza os consumidores da empresa, identifica suas necessidades, as limitações dos concorrentes e demais restrições do ambiente externo.

Uma vez determinada a estratégia operacional, são desenvolvidas as prioridades competitivas derivadas, ou capacidades que a empresa deve possuir para atender a demanda do mercado.

Conforme Shingo (2002), a *Toyota Motor Company* desenvolveu uma filosofia de excelência de manufatura que supera todas as abordagens anteriormente existentes, através da utilização de conceitos criados por Henry Ford e Waiter Shewhart nos anos 1920s e 1930s.

As grandes companhias japonesas, tão bem sucedidas atualmente também nos Estados Unidos da América, otimizaram a execução dessa filosofia.

Elas possuem simultaneamente menores custos, melhor qualidade, melhores serviços e maior flexibilidade do que os concorrentes, que não evoluíram tão rapidamente com tal filosofia. Conseqüentemente, as empresas japonesas têm sido imensamente bem sucedidas, concorrendo com empresas geridas pelos processos convencionais.

Essa nova forma de pensar é uma ruptura filosófica, uma revolução no pensamento. A adoção dessa filosofia requer uma nova forma de mentalidade, uma mudança cultural dentro da empresa (Schonberger, 1988). Essa nova cultura não é singular ao Japão e foi construída a partir de idéias nascidas nos EUA, aplicando-se a todos os processos de manufatura, contínuos ou por encomenda. A filosofia de excelência de manufatura se baseia em dois princípios: aprimoramento contínuo e eliminação de desperdício.

As metodologias e processos de melhorias aplicados nas indústrias conhecidos como *WCM* tiveram forte influência do modelo japonês dos Programas de Qualidade Total, como o *TQC* e o *TPM*.

Segundo Schonberger (1988), é necessário que algumas premissas básicas sejam implementadas para que as transformações ocorram no chão de fábrica:

- a. Engajamento da alta gerência
- b. Ambiente favorável à implementação de mudanças
- c. Formação e treinamento da mão-de-obra
- d. Facilitação dos trabalhos de times
- e. Quebra das barreiras entre os departamentos
- f. Simplificação dos processos
- g. Diminuição dos estoques intermediários: *Just- in-Time e Kanban*
- h. Engajamento de todos para a melhoria dos processos
- i. Responsabilidade pela produção: quantidade e qualidade
- j. Responsabilidade pelos meios de produção: equipamentos e instalações

Algumas das melhores práticas utilizadas pelas empresas consideradas de Classe Mundial, segundo diversos autores, entre eles Slack et al. (1997), Neto (2002) e Nagao (2001) são:

1. Ciclo do desenvolvimento e lançamento de novos produtos e serviços no mercado, capacidade de inovação, capacidade de captar ou de criar as necessidades do mercado, teste do mercado em pequena escala, adaptação dos processos de produção e acompanhamento do mercado: grande integração com P&D (Pesquisa e Desenvolvimento), Custos, Produção e Marketing. Com o uso de ferramentas como Engenharia Simultânea, QFD, Seis Sigma, *Balance Score Card*, *LCC*, etc;

2. Grande integração dos processos de gestão empresarial: utilização de softwares empresariais com forte integração entre fornecedores, produção e clientes. Com o uso de sistemas de gestão ERP;
3. Utilização dos conceitos de *Supply Chain Management*: otimização da cadeia de suprimentos;
4. Políticas e Práticas da Gestão na empresa: Qualidade Total (*TQC e 5 S*);
5. Indicadores de performance e painéis de melhoria;
6. Sistema *Toyota* de Produção: *Just-in-time, Kanban, Kaizen* etc.
7. Polivalência operacional: quebra de barreiras entre as funções;
8. Utilização do gerenciamento da Confiabilidade, bem como o uso de ferramentas de confiabilidade para aumento da disponibilidade e diminuição de quebras dos equipamentos: *FMEA, FMECA, FTA, DOE, RBD*, etc.;
9. Políticas e Práticas de Segurança Industrial e Meio Ambiente;
10. Rastreabilidade dos processos produtivos e confiabilidade nas análises;
11. Gerenciamento e serviços pós-venda;
12. Manutenção Classe Mundial (*WCM - World Class Maintenance*): implementação das Melhores Práticas (*Best Practices*) em Manutenção *TPM (Total Productive Maintenance)*, *RCM (Reliability Centred Maintenance)*, confiabilidade, etc.;
13. Utilização constante do processo de *Benchmarking*.

Segundo Nagao (2001), o processo de implementação das ferramentas que caracterizam as empresas de manufatura de classe mundial, é feito de forma gradativa e gera mudanças dentro da organização. Novas posturas gerenciais são exigidas e o engajamento das equipes na sua implementação gera confiança e orgulho nas organizações tendo como frutos principais:

- a- Diminuição do ciclo de produção;
- b- Melhoria da qualidade do produto e do serviço;
- c- Diminuição do retrabalho;
- d- Diminuição dos custos;
- e- Aumento da confiabilidade e da disponibilidade dos equipamentos e sistemas;
- f- Melhoria da competência gerencial e operacional;
- g- Melhor controle do processo produtivo;
- h- Melhor clima organizacional;
- i- Maior responsabilidade para com as comunidades vizinhas.

Obter o melhor desempenho mundial em cada um dos processos, torna as empresas mais competitivas em seus negócios. Esse é o objetivo final da implantação das ferramentas que compõem o arcabouço da filosofia *WCM*. Um inovador programa de melhoria da qualidade muito mais abrangente que as normas *ISO* e *QS 9000* juntas. No *WCM*, mudanças cosméticas e iniciativas que não agregam valor ao processo são descartadas. O *WCM* é baseado em um ciclo contínuo, que tem como componentes a medição, a comparação e planos de ação eficazes. A abrangência do programa *WCM* vai além da cadeia produtiva, compreendendo setores como recursos humanos, Logística, faturamento, *Marketing*, entre outros.

No presente trabalho serão apresentadas algumas ferramentas que compõem este arcabouço.

2.2 O Sistema Toyota de Produção (STP)

Conforme Ghinato (1996), o Sistema *Toyota* de Produção é uma filosofia de gerenciamento que procura otimizar a organização de forma a atender as necessidades do cliente no menor prazo possível, na mais alta qualidade e ao mais baixo custo, ao mesmo tempo em que aumenta a

segurança e o moral de seus colaboradores, envolvendo e integrando não só a manufatura, mas todas as partes da organização.

O Sistema Toyota de Produção evoluiu da necessidade, associada a certas restrições de mercado que exigiam a produção de pequenas quantidades de muitas variedades de produtos sob condições de baixa demanda, situação esta enfrentada pela indústria japonesa no período pós-guerra.

O Sistema Toyota de Produção tem sido referenciado genericamente como “Sistema de Produção Enxuta”.

O STP é um sistema de gerenciamento da produção cujo objetivo é o aumento do lucro através da redução dos custos. Este objetivo é alcançado através da identificação e eliminação das perdas, isto é, atividades que não agregam valor ao produto.

2.2.1 Princípios do Sistema Toyota de Produção.

Os princípios básicos de construção do *STP* são: o Mecanismo da Função Produção, o Princípio do Não-Custo e a Lógica das Perdas. Estes princípios desenvolveram-se a partir de ações práticas durante a construção do STP e se inter-relacionam.

Shingo (2002), salienta que: “Antes de estudar o Sistema Toyota de Produção, é necessário entender a função produção como um todo!”. O Mecanismo da Função Produção (MFP) é definido por Shingo, seu criador, como uma rede de processos e operações. É um mecanismo utilizado para visualizar as perdas no setor produtivo, mapeando todo o processo de fabricação.

Shingo (2002) define como processo, o fluxo de produtos de um trabalhador (conjunto trabalhador e máquina) para outro, ou seja, os estágios pelos quais a matéria-prima passa até se tornar um produto acabado. Operação é definida como o estágio distinto no qual o trabalhador (conjunto trabalhador e máquina) pode trabalhar em diferentes produtos. É um fluxo homem/máquina temporal e espacial transformando a matéria-prima.

O conceito de Processo, segundo Ghinato (1996), foi proposto em 1921 por Frank B. Gilbreth, postulando que todo o processo era composto basicamente por quatro fenômenos:

- Processamento: Modificação nas características ou forma do produto, montagem ou desmontagem;
- Inspeção: Comparação com um padrão;
- Transporte: Mudança de posição;
- Armazenagem ou Espera: Passagem do tempo sem a execução de processamento, inspeção ou transporte;
- Estocagem de matéria-prima;
- Espera no Processo: O lote inteiro aguarda o final do processamento do lote anterior e até que a máquina (dispositivos e operador) esteja preparada para o início da operação;
- Espera do Lote: Espera na qual cada peça do lote é submetida, até que todas as peças sejam processadas, para então, seguir para o próximo passo do processo;
- Estocagem do produto.

As esperas acarretam uma série de conseqüências problemáticas, entre elas, longos tempos de atravessamento (*lead-time*) e um aumento de defeitos e retrabalhos. No caso da *Toyota*, uma ferramenta utilizada para evitar as esperas do processo é o *Kanban* e uma técnica utilizada para evitar as esperas do lote é a Troca Rápida de Ferramenta (TRF). O uso de ferramentas conjuntas permite uma ação contra as esperas em geral.

A necessidade da existência de estoques de produtos acabados na *Toyota* constitui-se em uma questão importante desenvolvida em torno do estudo da relação entre o Ciclo de Produção e o Ciclo de Entrega ou intervalo admissível pelo comprador.

Segundo Shingo (2002), a produção de carros na *Toyota* deve ser igual ao número de pedidos, isto é, o estoque de carros acabados deve ser zero. Para atingir isto, a *Toyota* adotou a produção contra-pedido (produção puxada). Mas como nem sempre é possível atingir um ciclo de produção que seja menor que o prazo de entrega, *Shingo* indica o método do supermercado. Esta flexibilidade é controlada pelo *Kanban*.

Quanto ao estoque de matérias-primas, a *Toyota* possui uma política de desenvolvimento de fornecedores. A *Toyota* adotou, perante seus fornecedores, Ciclos de Entrega próximos de zero, isto é, uma lógica *Just-in-Time*. Aos fornecedores, restou então assumir os custos dos estoques de produtos acabados ou trabalhar internamente para reduzir seus Ciclos de Produção.

2.2.2 Classificação das Operações.

Cada operação constituinte do processo de produção possui como classificação básica, segundo Shingo (2002) as seguintes etapas:

a) - Operações de *Set-up* (Preparação): Preparação da máquina para fabricar determinado produto, incluindo remoção, ajuste de matrizes e ferramentas e testes. A maneira mais eficiente de se melhorar as operações de preparação é a utilização de técnicas como a Troca Rápida de Ferramentas;

b) - Operações Principais: É a execução do trabalho propriamente dito. A Operação Principal está dividida em Operação Essencial e Operação Auxiliar;

c) - Operação Essencial: Ação (nas operações de Processamento, Inspeção, Transporte e Estocagem) que executa efetivamente a Operação Principal, como processar um produto, medir a qualidade, movimentar o produto e estocar ou manter o produto;

d) - Operação Auxiliar: Ações que auxiliam na conclusão da Operação Essencial.

2.2.3 Princípio do Não Custo.

A retração de demanda na economia mundial após a crise do petróleo exigiu das empresas uma capacidade de adaptação frente às novas condições de concorrência. A demanda começou a se caracterizar pela exigência de produtos variados, produtos confiáveis (qualidade), prazos de entrega cada vez menores e a preços compatíveis (justos). A partir deste fato, os fabricantes não poderiam mais exercer a lógica do “Princípio do Custo”, até então admitida e empregada. Esta lógica é expressa pela fórmula:

$$\text{PREÇO} = \text{CUSTO} + \text{LUCRO}$$

Com as novas condições de mercado, o “Princípio do Custo” não poderia mais ser concebido, pois os consumidores passaram a determinar o preço de venda. Segundo Ohno “[...] se um preço alto é colocado em virtude do custo do fabricante, os consumidores simplesmente não comprarão”. No Sistema Toyota de Produção, a redução dos custos está vinculada à lógica do “Princípio do Não-Custo” e é o mais básico dos conceitos. É definida como:

$$\text{LUCRO} = \text{PREÇO} - \text{CUSTO}$$

Dentro desta lógica, a lucratividade capaz de sustentar a sobrevivência de uma empresa é definida como a diferença entre o preço de venda e o custo de fabricação.

Uma outra abordagem desta lógica é o Custo-Alvo (*Target Cost*), expresso pela equação:

$$\text{CUSTO} = \text{PREÇO} - \text{LUCRO}$$

O princípio do Não-Custo está ligado a redução de custos desde o desenvolvimento do produto até as atividades de fabricação. A *Toyota* possui, dois sistemas para o gerenciamento dos custos: o Custo-Alvo e o *Custo-Kaizen*. O Custo-Alvo objetiva proporcionar a redução de custos na fase de desenvolvimentos de novos produtos, enquanto que o *Custo-Kaizen* objetiva proporcionar a redução de custos durante o processo de produção propriamente dita. Neste caso, busca-se melhoria diretamente relacionada com a eliminação contínua e sistemática das perdas.

O estudo sobre as perdas no processo produtivo, realizado por Ohno (1997) e Shingo (2002) dentro da *Toyota*, gerou um conceito chamado Lógica das Perdas.

2.2.4 Lógica das Perdas.

Conforme Ghinato (1996), “o princípio da completa eliminação das perdas foi a tradução feita por Ohno de um desafio lançado por *Kiichiro Toyoda* ao final da Segunda Guerra Mundial (1945): ‘[Precisamos] Alcançar a América em três anos. Caso contrário a indústria automobilística do Japão não sobreviverá’ ”. Conforme mencionado anteriormente.

Segundo o autor, esta tradução econômica feita por Ohno passa pela concepção do trabalho dentro da indústria. Mais especificamente, o autor demonstra uma preocupação teórica em definir o movimento realizado pelos trabalhadores dentro das unidades de produção.

O trabalho líquido caracteriza-se por ser o processamento em si, isto é, por mudar a forma ou característica de um produto ou montagem. Pode-se citar como trabalho que adiciona valor como usinar, forjar, montar, soldar, pintar ou polir. O trabalho sem valor adicionado é toda a atividade necessária para o suporte ao processamento propriamente dito, como acionar o botão de partida da máquina ou alimentar e descarregar peças da máquina. As perdas, são atividades que geram custo e não adicionam nenhum valor ao produto, devendo ser eliminadas e, como exemplo, pode-se citar a fabricação de produtos defeituosos, esperas, estocagem de material em processo ou produto acabado e transporte.

Na *Toyota*, a redução dos custos através da eliminação das perdas passa por uma análise detalhada da cadeia de valor, isto é, a seqüência de processos pela qual passa o material, desde o estágio de matéria prima até ser transformado em produto acabado. O processo sistemático de identificação e eliminação das perdas passa ainda pela análise das operações, focando na identificação dos componentes do trabalho que não adiciona valor.

Ohno (1997), propôs que as perdas presentes no sistema produtivo fossem classificadas em sete grandes grupos, a saber:

- a - Perda por Superprodução.
- b- Perda por Transporte.
- c - Perda por Processamento em si.
- d- Perda por Fabricação de Produtos Defeituosos.
- e- Perda por Movimentação
- f- Perda por Espera
- g- Perda por Estoque

2.2.5 Pilares do STP

Existem diferentes formas de representar a estrutura do STP. A figura 2.1 apresenta o TPS com os seus dois pilares e outros componentes essenciais ao sistema.

Conforme Ohno (1997) , o STP possui dois pilares de sustentação: a Autonomiação (*Jidoka*) e o *Just-in-Time* (JIT).

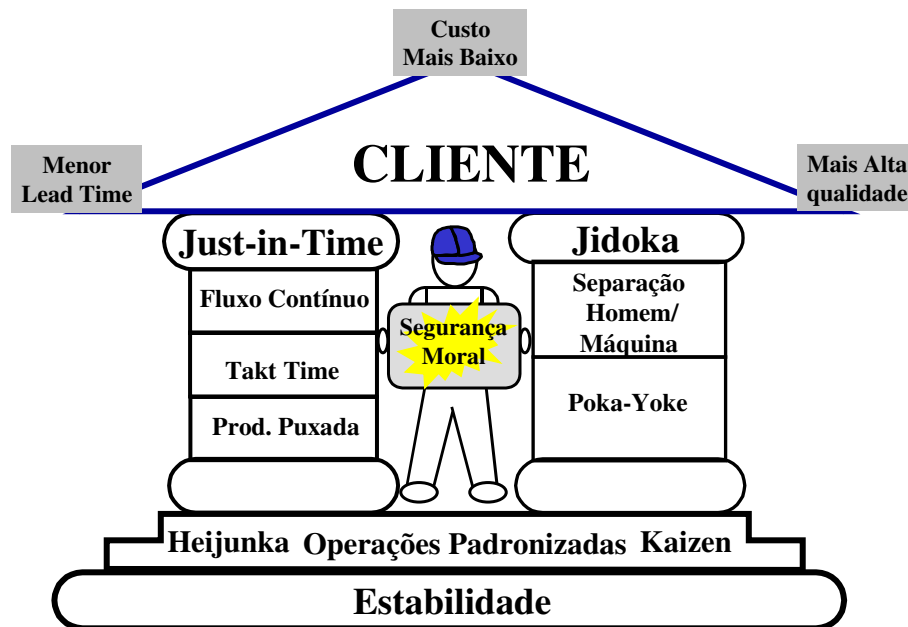


Figura 2.1: Estrutura do Sistema Toyota de Produção, Ghinato (1995).

a)- Autonomiação (*Jidoka*)

Segundo Black (2001) autonomiação não deve ser confundida com automação. Autonomiação se refere ao controle autônomo de qualidade e defeitos.

O conceito de Autonomiação (*Jidoka*) consiste em facultar à máquina ou ao operador a autonomia de interromper a produção sempre que algo anormal seja detectado ou quando a

quantidade planejada tenha sido atingida. Foi disseminado por Ohno e inspirado nos mecanismos de parada automática instalados em teares inventados por *Toyoda Sakichi*. Ohno perguntava-se porque uma pessoa na *Toyota Motor Company* pode operar apenas uma máquina enquanto que na fábrica têxtil *Toyoda* uma moça supervisionava 40 a 50 teares automáticos. A resposta era porque as máquinas da *Toyota* não estavam preparadas para parar automaticamente quando algo anormal acontecesse ou quando o processamento terminasse. A invenção de *Toyoda Sakichi* aplicada nas máquinas da *Toyota* deu origem ao conceito de Autonomia (Black 2001).

No STP, a Autonomia possibilita uma melhoria da qualidade, pois permite que a linha seja parada no caso de detecção de peças defeituosas. Isto gera uma ação imediata de correção da anormalidade por parte do operador ou de outro técnico. Essa intervenção valoriza a atuação do operário e estimula a aplicação de melhorias. Um sistema de controle visual para indicar as paradas da linha é essencial para a orientação das ações corretivas. A *Toyota* utiliza, segundo Ohno (1997), um quadro indicador de parada da linha pendurado acima da linha de produção. Quando as operações estão normais, a luz verde está ligada. Quando um operador deseja ajustar alguma coisa na linha e solicita ajuda, ele acende uma luz amarela. Se uma parada na linha for necessária devido algum problema, a luz vermelha é acesa. Este sistema de controle visual da linha é chamado de *Andon*.

b) - ***Just-in-Time (JIT)***

Segundo Heizer e Barry (2001), *Just-in-Time* é uma filosofia de solução de problemas contínua e obrigatória. Com o JIT, os suprimentos e componentes são “puxados” por meio de um sistema para chegar aonde são necessários e quando são necessários. Quando os materiais não chegam no momento necessário, um “problema” é identificado. Isso torna o *JIT* uma excelente ferramenta para ajudar os gerentes de operação a agregarem valor eliminando o desperdício e a variabilidade indesejada.

Segundo Slack et al. (1997) para entender o *JIT*, o mesmo deve ser analisado em dois níveis. No aspecto geral, o *JIT* é normalmente chamado de uma filosofia de manufatura: Isto é, o

JIT dá uma visão clara, a qual pode ser utilizada para guiar as ações dos gerentes de produção na execução de diferentes atividades em diferentes contextos. Ao mesmo tempo, o *JIT* é uma coleção de várias ferramentas e técnicas, as quais fornecem as condições operacionais para suportar esta filosofia. A figura 2.2 resume a filosofia *JIT* segundo o autor.

A expressão em inglês "*Just-In-Time*" foi adotada pelos japoneses, mas não se consegue precisar a partir de quando ela começou a ser utilizada. Fala-se do surgimento da expressão na indústria naval, sendo incorporada, logo a seguir, pelas indústrias montadoras. Portanto, já seria um termo conhecido e amplamente utilizado nas indústrias antes das publicações que notabilizaram o *JIT* como um desenvolvimento da *Toyota Motor Co.* No entanto, Ohno afirma que o conceito *JIT* surgiu da idéia de *Kiichiro Toyoda* de que, numa indústria como a automobilística, o ideal seria ter todas as peças ao lado das linhas de montagem no momento exato de sua utilização.

Shingo (2002), resume o *JIT* como uma forma de realizar o processo produtivo, em que cada parte do processo deve ser abastecido com os itens necessários, na quantidade necessária e no momento necessário.

Segundo Ohno (1997), *Just-in-time* é mais que um sistema de redução de estoque, mais que redução de tempo de preparação, mais que usar *Kanban*, mais que modernizar a fábrica. É fazer a fábrica operar para a empresa, assim como o corpo humano opera para o indivíduo. O sistema nervoso autônomo responde quando surge um problema no corpo. O mesmo ocorre numa fábrica: deve haver um sistema que responde automaticamente quando problemas ocorrem. Essa função é cumprida pelo *Just-in-time*.

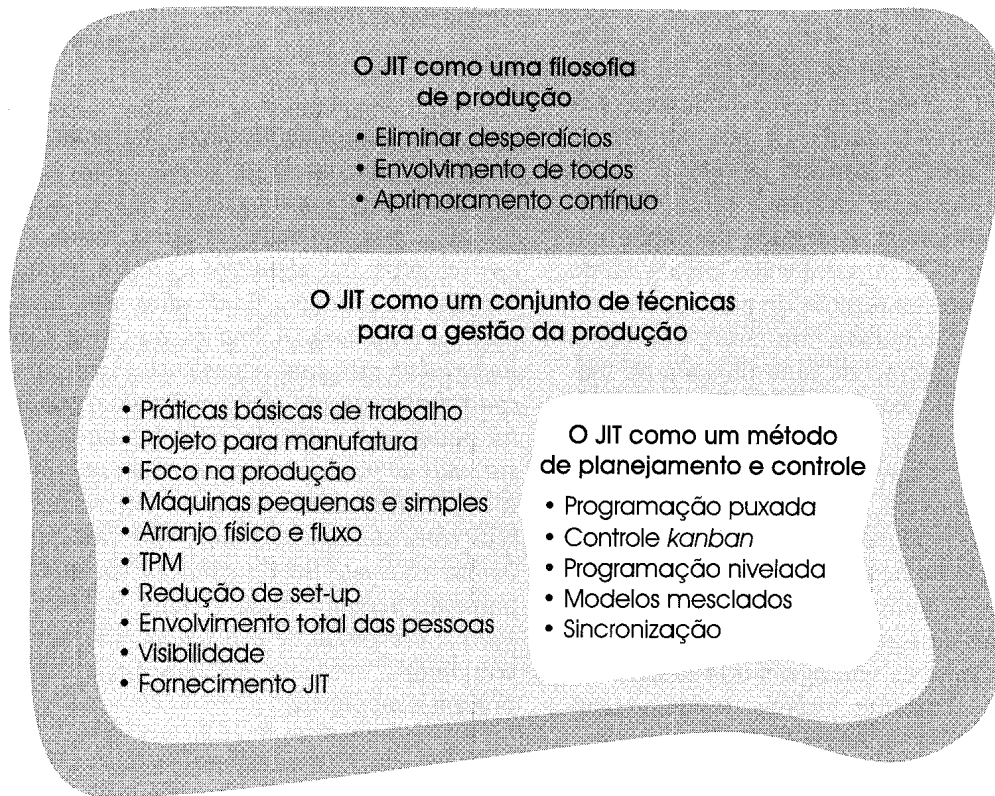


Figura 2.2 , *JIT* como filosofia de produção, Slack et al. (1997).

2.3 O Sistema ABS

“A Alcoa conseguiu o que muitas empresas tentaram sem sucesso: copiar o modelo de produção da *Toyota* e cortar custos”. Foi este o tema da reportagem da revista Exame de 09 de janeiro de 2002 e das edições de 17 de dezembro de 2002 e 03 de abril de 2003.

A Alcoa negociou junto a Toyota o direito a utilizar a metodologia em suas unidades de negócios em 26 países e em mais de 300 unidades de negócios.

O sistema foi batizado de ABS (*Alcoa Business System*) e busca os mesmos objetivos preconizados pelo TPS, ou seja: eliminar desperdícios nas atividades, da entrada do pedido do cliente até o recebimento do pagamento com 100% de qualidade.

Na Alcoa, o sistema ABS é orientado por princípios básicos na busca do estado ideal orientado por um conjunto de princípios básicos e um sistema de medição, para consistentemente direcionar as decisões, comportamentos, processo e atividades em todos os níveis, em todos os negócios e em todas as áreas de trabalho.

O ABS tem como principais metas:

- Melhorar a qualidade;
- Diminuir o custo;
- Reduzir o lead time;
- Melhorar a segurança, saúde e meio ambiente.

O ABS não é um sistema voltado somente para a produção, o mesmo é aplicado em todas as atividades da empresa. Os conceitos do TPS estão deixando de permear apenas o ambiente das fábricas para fazer parte do dia-a-dia dos escritórios da Alcoa, conforme a revista Exame de 03/04/2003.

Os princípios do ABS são:

- Fazer para uso,
- Eliminar desperdícios
- As pessoas é que fazem acontecer.

Na Alcoa quatro regras devem orientar os projetos, as operações, os processos e as pessoas que operam sob os conceitos do ABS, conforme as quatro regras descritas por Bowen e Spear (1999) com adaptações e particularidades próprias. Na Alcoa as quatro regras podem ser descritas sinteticamente conforme Alcoa - Guia de Bolso do ABS (2000), como contendo os seguintes aspectos:

Regra nº 1- Define: o que é preciso e esperado do trabalho das pessoas; o que é necessário providenciar às pessoas meios para pedir ajuda caso necessário; que é necessário reduzir a complexidade em detectar a causa raiz de um problema; que é necessário a ajuda na eliminação de problemas, resolvendo-os de imediato para facilitar a execução das tarefas; é necessário capacitar as pessoas na execução das tarefas pré-especificadas;

Regra nº 2 – Define: que as ligações entre os clientes e fornecedores, sejam eles internos ou externos, deve ser direta e simples, não ambígua (sim ou não – “binária”), possibilitando enviar pedidos e receber respostas; as ligações devem ser designadas com testes internos, para automaticamente sinalizar se um pedido não atinge a resposta esperada ou se a resposta ocorre sem um pedido seja de um pedido de ajuda a manutenção, um pedido de produto ou um pedido de serviço;

Regra nº 3 – Define: que o fluxo durante o processo deve ser simples para tornar o *lead-time* previsível; que as pessoas devem trabalhar com operações binárias; que as unidades de negócios utilizem o máximo dos recursos visuais para ajudar a resolver os problemas; que cada produto e serviço devem fluir de forma simples e pré-estabelecida, livre de *loopings* e bifurcações; que o fluxo seja de produção ou de serviço deve ser designado com testes internos para automaticamente sinalizar se um caminho prescrito foi seguido;

Regra nº 4 – Define: que a busca por melhorias deve ser constante e estruturada; que toda melhoria que envolvem atividades individuais, ligações entre as atividades ou fluxos devem ser feitas usando o método estruturado; que a melhoria é continuada na busca do estado ideal.

O ABS utiliza no seu arcabouço várias ferramentas do sistema Toyota, com adaptações e particularidades próprias às diversas unidades produtivas do grupo Alcoa tais como: *Housekeeping/Cinco S* (*Seiri, Seiton, Seiso, Seiketsu, Shitsuke*); fluxo contínuo; trabalho padronizado; melhoria contínua; regra dos cinco porquês; nivelamento da produção; relatório A3, etc).

Conforme a revista Exame (09/01/2002), com o ABS, a Alcoa obteve como resultado a economia mundial de mais de Um bilhão de dólares, sendo somente na Alumar 35 milhões de dólares até o ano de 2001.

2.4 Manutenção de Classe Mundial

O termo manutenção, na literatura especializada, tem sua origem no vocabulário militar, cujo sentido é manter, nas unidades de combates, o efetivo e o material em nível constante. A esse respeito, Monchy (1989) apresenta a conceituação da Associação Francesa de Normatização, na qual a “manutenção é o conjunto de ações que permitam manter ou restabelecer um bem, dentro de um estado específico ou na medida para assegurar um serviço determinado”.

Sobre o assunto, cabe também observar o posicionamento de Moubray (2000). Para o autor, manter significa continuar em um estado existente, ou seja, a manutenção é o conjunto de técnicas de atuação para que ativos físicos (equipamentos, sistemas, instalações) cumpram ou preservem sua função ou funções específicas.

Autores como Slack et al. (1997), por sua vez, observam que a manutenção é o termo usado para abordar a forma pela qual as organizações tentam evitar as falhas, cuidando de suas instalações físicas. Esta abordagem enfatiza a prevenção e a recuperação das falhas, uma importante área de atuação da manutenção, embora se entenda que não envolve a sua completa amplitude. Em linhas gerais, pode-se afirmar que as causas e os efeitos das falhas merecem atenção especial e permanente, assim como o desenvolvimento de ações pró-ativas, com vistas a minimizar a ocorrência e as conseqüências das falhas caso ocorram.

Como pode ser observado, existem muitas definições e conceitos apresentados para o termo manutenção. Na maioria dos casos são enfocados os aspectos de prevenção do estado de funcionamento e a recuperação, no caso da ocorrência das falhas. Além disso, constata-se que, mais recentemente, os aspectos custo e a dimensão humana e a preocupação com o meio ambiente, têm sido crescentemente considerados nessas definições.

A evolução histórica da manutenção e dos processos industriais é abordada por Moubray (2000) com base em três gerações distintas. A primeira geração apresentou a ênfase no conserto após falha. A segunda geração, por sua vez, esteve associada ao surgimento de maiores exigências com relação à disponibilidade operacional e à vida útil dos equipamentos, a custos menores. Já a terceira geração, que se refere aos tempos atuais, diz respeito aos requisitos característicos, como: maior disponibilidade, confiabilidade, segurança e vida útil, com ausência de danos ao meio-ambiente e ações de manutenções eficazes aos custos envolvidos.

Como pudemos observar, a função manutenção é uma função de grande importância dentro do contexto industrial. A mesma evoluiu significativamente nas últimas décadas, bem como os paradigmas de relacionamento com a operação e demais funções na empresa. A manutenção é também uma função estratégica, podendo agregar valor com o aumento da disponibilidade, aumento da segurança das pessoas e das instalações, redução da demanda de serviços, redução dos custos, redução dos lucros cessantes.

Esta nova postura é fruto dos desafios que se apresentam no cenário de economia globalizada e altamente competitiva, onde as mudanças se sucedem em alta velocidade e a manutenção como uma das funções fundamentais do processo produtivo, precisa inteirar com o sistema de forma pró-ativa.

Uma das questões que as empresas se defrontam, é que passos devem ser seguidos para que atinjam a performance de empresa com manutenção de classe mundial. Segundo Viosca (1998), Nagao (2001) Kardec (2000) são unânimes em afirmar que as empresas têm que subir degraus como se fosse uma escada para atingir o status de manutenção de classe mundial dentro do contexto de empresa de classe mundial.

Na escada hipotética devem ser considerados também a integração dos aspectos técnicos e os relativos ao pessoal envolvido com a manutenção. Na escada virtual proposta por Viosca (1999), conforme a figura 2.3, foram avaliados dados de inúmeras empresas nos mais variados ramos de atividades industriais. As melhores práticas advindas destas informações serviram de

base para a definição de cada degrau. Os degraus e a escada, vistos sistematicamente, ilustram a interdependência dos vários processos.

Os passos não devem, necessariamente, ser seguidos igualmente. Dependendo de cada organização, a seqüência pode variar ligeiramente. Adicionalmente, até que este amplo *benchmark* seja conseguido e as mudanças sejam implementadas, alguns degraus podem ser fortes, fracos, quebrar ou não ser considerados pela empresa. Como exemplo, um excelente sistema de gerenciamento da manutenção pode ser adquirido, mas não ser utilizado (degrau “quebrado”) ou usado apenas parcialmente (degrau “enfraquecido”). Segundo Viosca (1999), a escada virtual pode ser escalonada em três seções: uma de manutenção básica, seguida pela seção computacional e de confiabilidade e finalmente a última seção em tecnologia avançada em confiabilidade.

A fase de manutenção dita básica é a estrutura de suporte na qual práticas mais avançadas de manutenção irão se apoiar. Sendo que um dos maiores problemas enfrentados em plantas *benchmark* é a implantação das melhores práticas sem terem consolidado ainda a infra-estrutura básica necessária. Assim excelentes ferramentas de manutenção preditiva tais como análise de vibração, análise de lubrificantes, etc. podem ser empregadas sem que se consiga obter os ganhos previstos. Sendo que os benefícios integrais das tecnologias advirem apenas para as unidades produtivas que implementaram e utilizam efetivamente as ações básicas.

Na fase básica, ações como inventariar e codificar o parque de equipamentos, criar um histórico, desenvolver um programa sistemático de manutenção para os equipamentos, manter um sistema de parceria com os fornecedores, implementar um sistema de ordem de serviços, desenvolver um sistema básico de controle do gerenciamento da manutenção, treinamento e qualificação das pessoas envolvidas, estabelecer o principio de auditorias e controles, são necessárias e de vital importância.

Uma vez que a manutenção básica esteja implementada e em operacionalização efetiva, o passo seguinte na escada torna-se mais fácil. Um bom conjunto de medições, histórico dos

equipamentos e análise das falhas é pré-requisito para a implementação da fase computacional e de confiabilidade.

Nesta fase, é verificado que as organizações adquirem um poderoso sistema de gerenciamento da manutenção, adotam a figura do operador mantenedor, implementam o *RCM* básico e utilizam ferramentas de confiabilidade.

À proporção que as organizações sobem na escada, ocorre uma re-alocação dos recursos de manutenção. Com a mudança da manutenção reativa para a manutenção pró-ativa, ocorre uma sensível redução nas tarefas de manutenção. Em posição mais alta na escada, uma grande quantidade de processos restritivos são reduzidos sensivelmente. A engenharia de melhoria é posta em prática, a adoção do monitoramento da condição e de sistemas redundantes são sistematizados. A implementação do *RCM* avançado e de todas as fases do *TPM* já estão implementadas.

O uso de ferramentas que garantam a segurança das pessoas e da instalação e os cuidados necessários com o meio-ambiente, como os programas de reciclagem estão em um processo avançado.

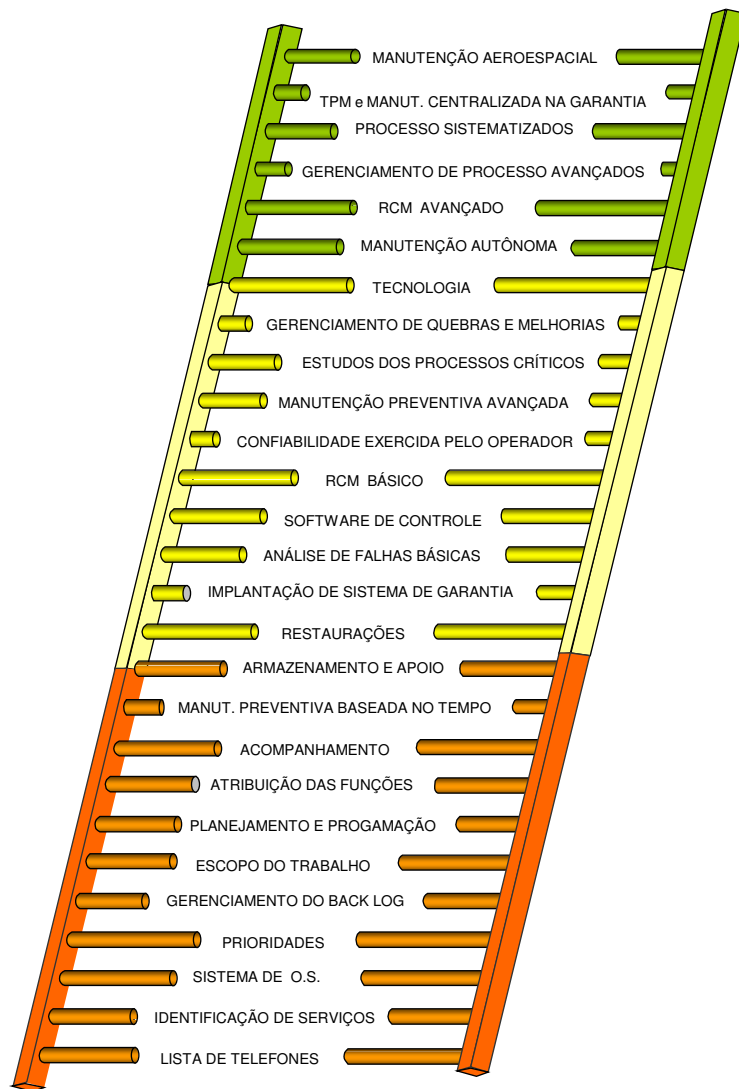


Figura 2.3: Degraus para a Manutenção de Classe Mundial, (Viosca, 1998).

No presente trabalho, serão abordadas algumas das ferramentas que compõem o arcabouço da manutenção de classe mundial: O *TPM*, o *RCM* e a Confiabilidade.

2.4.1 Manutenção Produtiva Total - TPM

A *TPM (Total Productive Maintenance)* surgiu no Japão na década de 60, tendo sido implantada inicialmente, na *Nippon Denso*, entre 1961 e 1969. Por este trabalho, a *Nippon Denso* recebeu o prêmio PM da *JIPM (Japanese Institute of Plant Maintenance)* em 1971, a partir de quando, a metodologia passou a receber a denominação de *TPM (Total Productive Maintenance)*. A *TPM* popularizou-se no Japão na década de 70 e foi apresentada no Brasil em 1986 pelo Sr. Seiichi Nakajima.

Segundo Willianson (2000), O TPM surgiu nos primeiros estágios do Sistema Toyota de Produção no final da década de 1960. Mirshawka e Olmedo (1994), comentam que o conceito moderno de TPM tem se modificado ao longo dos últimos anos.

Inicialmente, a TPM era associada exclusivamente à manutenção. Em um ambiente TPM, a manutenção não é apenas dos equipamentos, nem da produção: a manutenção é da produtividade. Portanto, a TPM pode ser compreendida na atualidade como a manutenção da produtividade total.

Para Mirshawka e Olmedo (1994) a Manutenção Produtiva Total é um programa de manutenção que envolve o conjunto de todos os empregados da organização, desde a alta administração até os trabalhadores da linha de produção. Os autores enumeram cinco objetivos do TPM:

- Garantir a eficiência global das instalações;
- Implementar um programa de manutenção para otimizar o ciclo de vida dos equipamentos;
- Requerer o apoio dos departamentos envolvidos no plano da elevação da capacidade instalada;
- Solicitar dados e informações de todos os empregados da empresa;
- Incentivar o princípio de trabalho em equipe para consolidar ações de melhoria contínua.

Conforme o conteúdo dos livros de Takahashi e Osada (1993), Slack et. al (1997) a *TPM* consiste em um programa ou metodologia que tem como objetivo a maximização do rendimento operacional global, contando com a participação de todos na organização. A *TPM* busca também a quebra zero dos equipamentos, associado ao defeito zero nos produtos e perda zero no processo, atuando diretamente no lucro da empresa à medida que melhora a produtividade e conseqüentemente aumenta a competitividade.

2.4.1.1 Objetivos da Manutenção Produtiva Total

A Manutenção Preventiva Total (MPT) é um programa originalmente descrito por Seich Nakajima para melhorar a produtividade por meio da melhoria das práticas relacionadas a manutenção. Nakajima (1989).

Mirshawka e Olmedo (1994), afirmam que a TPM busca a eficácia da própria estrutura organizacional da empresa, através do investimento na capacitação das pessoas e de melhorias incorporadas às máquinas, equipamentos e dispositivos.

Tais melhorias passam por treinamento e desenvolvimento organizacional. Elas também envolvem melhorias do rendimento global, dos processos de produção, otimizando o uso das máquinas e equipamentos disponíveis, bem como a definição dos tipos e modelos de equipamentos que melhor se adaptam à execução das operações a serem desenvolvidas.

Malcolm (2001) afirma que o TPM faz parte de uma trilogia, onde TQM, hoje conhecida como “6 Sigma”, está focada na qualidade, a Produção Enxuta na expedição e a TPM em custos. Existindo uma forte interação entre elas.

Segundo Takahashi e Osada (1993), a melhoria do rendimento operacional das máquinas e equipamentos é alcançada através da melhoria estrutural e melhoria dos métodos utilizados na manutenção dos mesmos.

As técnicas relacionadas ao equipamento incluem as de fabricação, manutenção e operacionais. As técnicas de manutenção dependem de três fatores: velocidade, precisão e

segurança. As atividades de manutenção são determinadas pelas habilidades técnicas em manutenção.

2.4.1.2 Rendimentos Operacionais das Máquinas e Equipamentos

Diversas atividades podem melhorar o rendimento global dos equipamentos durante seu ciclo de vida. Na avaliação do rendimento global feita pela TPM, o problema da produção, que acompanha as projeções, é levado em conta no cálculo do número total anual de valores em operação.

Segundo Nakajima (1989), são 07 as grandes perdas que podem impedir a eficiência do equipamento, ou seja, que prejudicam o rendimento operacional global e, portanto, devem ser eliminadas:

- a) Perda por quebra esporádica ou crônica dos equipamentos;
- b) Perda devido a ajustes e tempo de preparação e regulagens;
- c) Perda por substituição de ferramentas e peças das máquinas que se desgastam ao longo da produção;
- d) Perda até o equipamento entrar em regime de produção normal, ocasionada pelo emprego de ferramentas inadequadas, problemas por falta de domínio técnico dos operadores para acertar a máquina ou outra;
- e) Perda por parada temporária sem que haja ocorrência de falha (quebra);
- f) Perda por redução da velocidade de produção;
- g) Perda devido ao retrabalho ou eliminação de produtos defeituosos.

2.4.1.3 Implementação da TPM

A implementação da TPM deve ser ajustada às características específicas de cada empresa, tais como escala de negócios, tamanho da empresa, e as características dos produtos e as diferenças entre as modalidades de produção.

Nakajima (1989) diz que as atividades de implantação da TPM poderão ser subdivididas em cinco grupos de atividades que se denominam “os cinco pilares básicos da sustentação da TPM” que são:

- Reformulação e introdução de melhorias específicas e a nível individual nas máquinas para obtenção de uma performance global;
- Estruturação de uma sistemática de manutenção espontânea ou autônoma a ser executada por operadores;
- Estruturação do setor de manutenção para a condução da manutenção de forma planejada;
- Capacitação técnica e busca de novas habilidades tanto para os elementos da produção como manutenção, operação da máquina e da sua manutenção;
- Estruturação para gestão do equipamento desde a fase de sua introdução e início de operação com o uso de técnicas como o LCC.

Conforme o JIPM, a TPM considera como base de sustentação oito pilares:

1. Melhorias Específicas;
2. Manutenção Autônoma;
3. Manutenção Planejada;
4. Manutenção da Qualidade;
5. Controle Inicial;
6. Educação e Treinamento;
7. Áreas Administrativas;
8. Segurança e Meio-Ambiente.

2.4.2 Manutenção Centrada na Confiabilidade

Novas metodologias de manutenção têm surgido, mais recentemente, com o intuito de otimizar os processos de execução da manutenção e da performance operacional dos equipamentos. Uma delas é a manutenção Centrada na Confiabilidade. Essa metodologia foi

desenvolvida inicialmente para a aeronáutica, e migrou mais tarde para outros segmentos industriais.

Segundo Moubray (2000), a *RCM* foi criada nos fins dos anos 1960, durante o advento do desenvolvimento dos *Boeing 747* e *Lockheed 1011*, Jumbo e DC-10 respectivamente. Na ocasião, a indústria de aviação comercial americana estava particularmente preocupada com a falta de uma metodologia para otimizar sua manutenção preventiva.

Quando as companhias aéreas e fabricantes de aeronaves analisaram os seus requerimentos de manutenção, descobriram que provavelmente não seriam capazes de operar economicamente as aeronaves usando as técnicas existentes de manutenção.

Para reduzir os riscos de ocorrência de falhas, seria necessário reduzir a probabilidade de ocorrência de uma falha significativa.

Este novo enfoque requeria uma abordagem completamente nova na maneira como a manutenção deveria ser executada. O resultado foi uma meticulosa e metódica abordagem que levanta algumas questões básicas acerca de como os componentes funcionam e como eles falham. Conhecido estes parâmetros seria possível desenvolver um plano para tratar especificamente das falhas que impedissem as aeronaves de voar.

Nos anos de 1970, o departamento de defesa dos Estados Unidos adotou abordagem semelhante, aplicando a metodologia em navios, tanques de guerra, aviões de combate e outros sistemas de armamento.

Moubray (2000), por exemplo, observa que, em 1960, a *Federal Aviation Agency (FAA)* constituiu uma força tarefa, denominada *Maintenance Steering Group (MSG)*, com a participação das companhias aéreas americanas, para estudar os planos de manutenção até então utilizados. O primeiro resultado foi alcançado em 1965, e posteriormente apresentado em 1967, durante o Encontro Internacional sobre Operação e Projetos de Aeronaves Comerciais. O documento

elaborado recebeu a denominação de *MSG-1*, cujo conteúdo foi utilizado na manutenção do *Boeing 747*.

Posteriormente, uma outra versão foi elaborada, com a denominação de *MSG-2*, e aplicada no desenvolvimento dos programas de manutenção dos aviões *Lockheed 1011*, *S-3* e *P-3*, *Douglas DC 10* e *MCDonnell F4J*. Cabe comentar também que, com base nesses estudos, a indústria européia emitiu documento similar aplicado nos programas de manutenção do *Airbus A-300* e do *Concorde*.

A partir dos documentos *MSG-1* e *MSG-2*, *Nowlan e Heap* (1978) desenvolveram um outro estudo mais detalhado, encomendado pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos, para a determinação de normas e procedimentos de manutenção, com base numa ampla análise estatística. Os autores denominaram o documento de *Reliability Centered Maintenance (RCM)*, que foi traduzido para Manutenção Centrada em Confiabilidade (*MCC*). Este documento, conhecido como *MSG-3*, tornou-se o marco para a manutenção da indústria aeronáutica. Por exemplo, para se ter autorização para voar no espaço aéreo americano, os projetos devem ter seu plano de manutenção embasado nesse documento.

A Manutenção Centrada em Confiabilidade é conhecida na Europa como Otimização da Manutenção pela Confiabilidade (*OMC*), conforme Lafraia (2001) e Kardec e Nascif (2000). No Brasil, outra denominação utilizada é Manutenção Baseada em Confiabilidade (*MBC*).

A busca por melhorias nos processos de manutenção possibilitou novas perspectivas, segundo Moore e Rath (1998), dentre as quais destaca-se que revisões preventivas programadas afetam muito pouco o nível de confiabilidade do equipamento, a menos que um item possua um modo predominante e característico de falha, e, em consequência, pode se afirmar que não existe manutenção preventiva eficaz aplicável a determinados itens.

Moubray (2000), ressalta que os estudos realizados revelaram que a curva da banheira clássica não podia ser considerada como padrão único para a curva de vida de equipamentos, e que grandes revisões periódicas sistemáticas têm pouco efeito na confiabilidade global de um

equipamento complexo, a menos que ele apresente um modo de falha dominante. Como consequência, planos de manutenção preventiva clássica, baseados na hipótese de que sempre há uma relação entre a probabilidade de falha e o tempo em operação, trazem resultados inferiores aos esperados e tornam onerosa a manutenção.

A literatura aponta a RCM como uma ferramenta de manutenção, que visa racionalizar e sistematizar a determinação das tarefas adequadas a serem adotadas no plano de manutenção, bem como garantir a confiabilidade e a segurança operacional dos equipamentos e instalações ao menor custo. Nesses termos, para Branco Filho (2000), a MCC “com sua ênfase em otimização, documentação, rastreabilidade e continuidade está sintonizada com as mudanças gerenciais que vêm se processando ultimamente na indústria em geral”.

De acordo com Smith (1992), a *RCM* tem o propósito de "preservar as funções do sistema, identificar os modos de falha que afetam essas funções, determinar a importância das falhas funcionais e selecionar as tarefas de manutenção preventiva aplicáveis e efetivas na prevenção das falhas" .

Valendo-se das diferentes formas de manutenção, a RCM pretende resguardar a função do equipamento, em seu contexto operacional, a partir da determinação das necessidades de manutenção de cada equipamento.

A definição do contexto operacional tem por base, segundo Moubray (2000), a consideração de certos fatores, tais como: o tipo de processo industrial (se existem redundâncias ou equipamentos em *stand-by*), o nível de exigência a ser atendido pela produção, os riscos de segurança operacional a serem assumidos, os padrões de meio ambiente; o ciclo operativo dos equipamentos, a logística de manutenção disponível, dentre outros.

Fleming (1997), sintetiza que a *RCM* envolve: uma consideração sistemática das funções do sistema, o modo como estas funções falham e um critério de priorização explícito baseado em fatores econômicos, operacionais e de segurança para identificação das tarefas de manutenção que são aplicáveis e custo-eficientes.

A mesma exigência e o conjunto de atividades de manutenção, não são requeridos de maneira semelhante para todos os equipamentos e sistemas. A avaliação deve considerar a dependência funcional e as consequências da perda da função para a produção, na eventualidade de ocorrer uma falha. É importante frisar que preservar a função não é o mesmo que preservar a operação do equipamento, como afirma Smith (1992).

Moore e Rath (1998), por sua vez, observam que a *RCM* está estruturada com o princípio fundamental de que toda tarefa de manutenção deve ser justificada, antes de ser executada. O critério de justificativa corresponde a segurança, a disponibilidade e a economia em postergar ou prevenir um modo específico de falha. Este critério compreende a principal característica da aplicação da *MCC*, ou seja, a partir de uma avaliação acurada das funções desempenhadas, por cada componente de um sistema produtivo ou equipamento, são estabelecidas as tarefas de manutenção mais adequadas para a garantia do desempenho operacional da instalação.

2.4.2.1 Diagramas de aplicação da *RCM*

No processo de aplicação da *RCM*, devem ser sistematicamente identificadas e avaliadas, como primeiro passo, as funções e o padrão de desempenho dos equipamentos em seu contexto operacional. Em seqüência, devem ser definidas as falhas funcionais e seus respectivos modos de falha, bem como o efeito ou consequências dessas falhas. Esta análise se completa, com a determinação das tarefas de manutenção adequadas, técnica e economicamente, para prevenir cada falha. Nesse sentido, a metodologia recomenda o reprojeto do equipamento (ou mesmo assumir o fato de que o sistema irá operar até a falha), caso não possa ser encontrada uma tarefa preventiva adequada para a prevenção da falha.

Fleming (1997) e Lafraia (2001),apresentam um diagrama conforme figura 3.3, com a visão geral do processo de RCM, sintetizado as oito etapas para implementação do processo RCM:

- 1ª - Seleção do Sistema e Coleta de Informações;
- 2ª - Definição das Fronteiras e Interfaces do Sistema;
- 3ª - Modularização do Sistema;
- 4ª - Análise das falhas Funcionais;
- 5ª - Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos (FMEA);
- 6ª - Priorização dos Modos de Falha (diagrama de decisão);
- 7ª - Seleção de Tarefas de Manutenção;
- 8ª - Teste de Validação de ações Corretivas.

Figura 2.4

Requisitos Operacionais	Análise Funcional	Elaborar FMEA	Diagrama de Decisões	Programa de Manutenção
Montar equipe de análise	Identificar funções	Definir os modos de falhas	Aplicar diagrama de decisões	Comparar com atividades existentes
Identificar dados	Definir funções	Definir as causas das falhas	Identificar tarefas Manutenção Preventiva	Detalhar instruções
Coletar dados	Definir falhas funcionais	Definir efeitos das falhas	Selecionar tarefas efetivas	Revisar planos
Descrever sistema		Classificar consequência	Estabelecer intervalos	Conduzir auditorias
Identificar elementos		Identificar sistemas críticos	Identificar mudanças de projeto	Conduzir mudanças de projeto
Definir fronteiras e interfaces				

Figura 2.4: Visão Geral do Processo RCM (MCC – Manutenção Centrada na Confiabilidade) –Lafraia (2001).

3. Confiabilidade

3.1 Introdução

O termo confiabilidade pode ser empregado nos vários ramos de atividades da ciência e da engenharia. Em uma indústria todos os sistemas, do mais simples ao mais complexo, podem se beneficiar com a implementação dos conceitos de avaliação da confiabilidade, nas diversas fases de planejamento, desenvolvimento, projeto, operação, manutenção, marketing e vendas. A engenharia da confiabilidade e todo o desenvolvimento da mesma constituem um importante degrau na escalada da manufatura da classe mundial.

Segundo Castro (1998), o assunto confiabilidade nas indústrias em geral, ainda se encontra em um estágio bastante embrionário, pouco entendido e tratado com elevado grau de empirismo, misticismo e dúvidas, constituindo-se numa verdadeira “caixa preta”.

Isto tem gerado elevados graus de incerteza e dúvidas na mente dos profissionais das áreas de manutenção e operação.

A maioria das plantas não possui de forma estruturada uma função de Engenharia de Confiabilidade e nem programas que tratem do assunto de uma maneira sistemática. E é de conhecimento que a grande maioria dos problemas relacionados com confiabilidade não pode ser atribuída exclusivamente à Função Manutenção.

Kelly (1997), comenta que estudos e levantamentos realizados em um grande número de indústrias, têm mostrado que a função manutenção é responsável por somente cerca de 20% dos problemas de confiabilidade dos equipamentos e sistema. Como mostrado na tabela 3.1 mesmo

na condição ideal de que a manutenção fizesse tudo de maneira correta, ainda assim 80% dos problemas relativos a confiabilidade, ficariam dependentes das outras funções.

Tabela 3.1: Impacto na confiabilidade dos equipamentos (Kelly, 1997).

ORIGEM - Função	PORCENTAGEM
Produção (OPERAÇÃO)	39
Manutenção	18
Planejamento e Controle da Produção - PPC	15
Engenharia de Fábrica	12
Compras	11
Vendas e Marketing	5

Com exceções, a indústria como um todo e a grande maioria dos profissionais ainda não atentaram para essa realidade. Dessa forma, enquanto os programas de confiabilidade continuarem a ser direcionados e focados exclusivamente na função manutenção, os seus resultados, na melhor das hipóteses, serão de alcance muito limitados.

Segundo Kelly (1997), a confiabilidade deve ser considerada no planejamento estratégico da organização, podendo a mesma ser aplicada nas áreas de pesquisa e desenvolvimento (engenharia), nas áreas de operação e manutenção e respectivas áreas de planejamento, nas áreas de marketing e compras/vendas e na de pós-vendas.

A seguir será apresentado como as diversas funções afetam a confiabilidade dos equipamentos e sistemas numa indústria típica de processamento contínuo (Kelly, 1997):

a) Produção: a Produção desempenha o maior papel. Para cada problema relacionado com a manutenção, há dezenas de problemas relacionados com a operação dos equipamentos. A maneira como os equipamentos são operados, erros dos operadores, a inexistência de procedimentos operacionais, falta de treinamento, mão-de-obra desqualificada e cotas e

incentivos de produção, dentre outros fatores, são de fundamental importância na confiabilidade e performance dos equipamentos;

b) Manutenção: a maneira como os equipamentos são mantidos, filosofia de manutenção, erros dos mantenedores, a inexistência de procedimentos de manutenção, falta de planejamento e de mão-de-obra qualificada, dentre outros fatores, são de fundamental importância na confiabilidade dos equipamentos.

É observado que o nível de conhecimento dos mantenedores têm decaído severamente com o passar do tempo. Avaliações realizadas na indústria têm revelado que a maioria dos mantenedores não possui conhecimentos básicos necessários para, por exemplo, instalar adequadamente rolamentos, instalar e alinhar equipamentos e que as quebras frequentes de equipamentos, baixa confiabilidade e custos elevados de manutenção são apenas um reflexo dessa situação;

c) PCP: um PCP/PCM adequado é dependente de um grande número de fatores como: boa comunicação e coordenação com Vendas & *Marketing*, Operação, Manutenção e Compras; conhecimento das unidades produtivas, controle de material, e da confiabilidade dos equipamentos e sistemas.

À menos que tudo isso seja feito de uma maneira muito bem sincronizada, o impacto negativo provocado sobre a confiabilidade, utilização e performance dos sistemas produtivos é bastante elevado;

d) – Projeto e desenvolvimento: A confiabilidade dos equipamentos começa com um bom processo de especificação e seleção. O primeiro critério para uma performance confiável dos equipamentos é um projeto adequado. Sucede que com o passar do tempo muitas modificações são implementadas sem nenhuma aderência às boas práticas de engenharia de projeto. O resultado é que muitos desses equipamentos não são mais de maneira alguma confiáveis, trazendo como reflexo uma confiabilidade não adequada que compromete a performance da planta como um todo;

e) – Compras: a aquisição de equipamentos e componentes em muitas empresas é feita com base quase que exclusivamente no fator preço e não considerando o Custo do Ciclo de Vida (LCC - *Life Cycle Cost*).

Essa prática não conduz a bons resultados de longo prazo, considerando que os subfornecedores têm sofrido o mesmo problema que afetam seus clientes. É um efeito em cadeia, pois muitos fornecedores por motivo de manter margem de lucro aceitável, ou às vezes por força do mercado têm sacrificado boas práticas de engenharia, reduzindo as margens de segurança e a confiabilidade dos equipamentos e componentes;

f) – Vendas & *Marketing* – vendas e marketing impactam diretamente na confiabilidade e performance dos equipamentos. Essa função determina como a maioria das plantas deve ser operada, ritmo de produção, etc. Devendo o sistema ter sido concebido para tal.

Nenhum produto pode apresentar confiabilidade sem um eficiente Controle de Qualidade (CQ), pois este é a base e a união da qualidade final do produto, em todas as suas fases de elaboração até a venda.

Ebeling (1997), ressalta a forte correlação entre confiabilidade e a qualidade de um produto, e que a confiabilidade é freqüentemente considerada como um sub produto da qualidade.

3.2 Conceitos básicos sobre confiabilidade

Segundo Ebeling (1997), "A confiabilidade de um determinado item pode ser definida como sua capacidade de realizar uma função requerida durante um determinado período de tempo, submetido a um determinado meio, em condições de projeto".

Kececioglu (1991) salienta que a confiabilidade é a melhor maneira quantitativa de medir a integridade dos componentes, produtos ou sistemas. Que a confiabilidade é a probabilidade dos componentes, produtos ou sistemas desempenharem suas funções pré-estabelecidas sem falhas em um determinado ambiente por um período de tempo desejado em um dado nível de confiança.

O autor também descreve um breve histórico da confiabilidade desde o ano de 1941 até nossos dias. No histórico o autor descreve que foi Robert Lusser, em 1941, a ser o primeiro homem a reconhecer a necessidade da engenharia da confiabilidade como uma disciplina à parte.

Segundo O'Connor (1988), confiabilidade é o estudo sobre as falhas que podem ocorrer com o produto durante o seu ciclo de vida, ou seja, não é um simples cálculo da taxa de falha ou da probabilidade de um componente ou sistema falhar, mas sim a procura, análise, avaliação e correção de todas as falhas que podem ocorrer com o produto, em todo o seu ciclo de vida.

As definições acima estão de acordo com as definições descritas por Abernethy (2000), Lipson e Sheth (1973), Nelson (1982) e Sotslov (1972).

Entre as definições apresentadas, observa-se basicamente a substituição do termo *capacidade* por *probabilidade*. Esta alteração sugere que a confiabilidade seja definida em função de uma medida e para tal, a probabilidade torna-se a medida de grandeza da confiabilidade. Em geral, nas definições apresentadas, *itens* podem ser componentes, sistemas ou subsistemas que compõem um produto ou serviço e *função requerida* é uma única função ou o conjunto das funções necessárias para um serviço especificado.

Embora existam várias definições sobre confiabilidade, a mais utilizada é: “confiabilidade é a probabilidade de que um item desempenhe a sua função pretendida sem falhar, sob determinadas condições especificadas e por um determinado período de tempo especificado”. Monchy (1989).

Segundo Monchy (1989), o conceito de confiabilidade contém quatro elementos significativos:

1 - *Probabilidade*: associada a conceitos estatísticos. Números de casos favoráveis por número de casos possíveis. A confiabilidade é uma probabilidade. É ela que caracteriza a diferença entre equipamentos da mesma natureza. A probabilidade permite saber o quão é

a aptidão de um equipamento funcionar sem falha durante um certo tempo. É admitida uma possibilidade de falha do item, que pode ser um produto, equipamento ou sistema;

2 - *Desempenhar uma função requerida*: associado a um determinado padrão de uso ou cumprir uma missão ou fazer o serviço esperado. A definição da função requerida implica um patamar de admissibilidade abaixo do qual a função não é mais satisfeita;

3 – *Condições de uso*: associadas a condições de uso (sobrecarga, alívio), considerando as condições ambientais que geram as falhas (temperatura, vibrações, radiações, etc), e as condições de manutenção (reparo, substituição, etc.);

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

Cavalca (1998), exemplifica um enunciado completo para a confiabilidade baseado nos quatro pressupostos acima: *o componente opera com 95% de confiabilidade, a 90% de sua capacidade de carga, durante 100hs, a temperatura ambiente e nível de umidade inferior a 60%.*

Em várias situações de ordem prática, a atitude quanto a manutenção de um equipamento ou sistema, tanto do ponto de vista econômico quanto operacional, é determinada pela durabilidade do equipamento em questão. Em quase todas as situações, os estudos da confiabilidade envolvem o tempo, que está relacionado intimamente com a falha. Portanto, o primeiro passo é definir precisamente o que é uma falha, ou seja, quando é que o equipamento ou sistema deixa de exercer suas funções corretamente. Em algumas situações, a definição de falha já é bem clara, mas em outras poderá envolver termos ambíguos. Um tipo de falha facilmente observado é chamado de falha catastrófica, ou seja, aquela em que o equipamento claramente pára de funcionar. Outros equipamentos deterioram-se gradativamente com o tempo. Esse é o caso em que a definição de falha deve ser clara, para que não ocorram dúvidas de que o equipamento falhou.

Outros conceitos importantes são definidos pela ABNT na NBR 5462 (1981), que além dos conceitos de falha, são conceituados também o defeito e a pane.

3.3 Funções de Confiabilidade

Para avaliar a confiabilidade, é necessário o emprego de funções. Segundo os autores Sotslov (1972), Abernethy (2000), Ebeling (1997), as quatro principais funções fundamentais, por estarem relacionadas com termos como probabilidade e o tempo, que são as principais características para a análise da confiabilidade são: Função da confiabilidade $R(t)$, a função Probabilidade de falha $F(t)$, a função densidade probabilidade de falha $f(t)$ e a função taxa de falha $\lambda(t)$.

Dado um conjunto de condições operacionais, a confiabilidade de um componente ou sistema é a probabilidade que o sistema não venha a falhar (sobreviva) durante um período especificado de tempo. Isto pode ser expresso em termos de uma variável aleatória T (o tempo decorrido até o sistema falhar). A função densidade de probabilidade (fdp) $f(t)$ ou *pdf* (*probability density function*), correspondente tem o seguinte significado: Probabilidade que a falha venha a ocorrer no tempo entre t e $t + \Delta t$. A densidade de probabilidade de falha $f(t)$ é um poderoso instrumento de visualização de como ocorrem as falhas e como elas estão estatisticamente distribuídas.

Conforme Pagés e Gondran (1980), considerando:

$$P(t \leq T \leq t + \Delta t) = f(t) \cdot \Delta t \quad (3.1)$$

Seja a função de distribuição da variável aleatória T , a probabilidade que a falha venha a ocorrer no tempo $T \leq t$, denotada por :

$$F(t) = P(T \leq t + \Delta t) \quad (3.2)$$

Definindo a função de confiabilidade $R(t)$, como a probabilidade que o sistema não venha a falhar num instante inferior a t , denotada por:

$$R(t) = P(T > t) \quad (3.3)$$

Da definição de função de distribuição acumulada, tem-se:

$$R(t) = 1 - \int_0^t f(t)dt \quad (3.4)$$

Segundo Pagés e Gondran (1980), a função de confiabilidade é definida como o complemento da função de distribuição da variável aleatória T . Conseqüentemente, por ser $F(t)$ a probabilidade que o sistema venha a falhar antes de $T = t$, ela é comumente referenciada como função de Não-Confiabilidade (desconfiabilidade), denotada por $F(t)$ ou $Q(t)$:

$$F(t) = \overline{R(t)} = 1 - R(t) \quad (3.5)$$

A equação (3.4) pode ser diferenciada a fim de ser obtida a fdp da variável aleatória T , expressa em termos de $R(t)$. Assim diferenciando tal equação, é obtido:

$$\frac{dR(t)}{dt} = \frac{d(1 - \int_0^t f(t)dt)}{dt} \Rightarrow \frac{dR(t)}{dt} = -f(t) \Rightarrow f(t) = -\frac{dR(t)}{dt} \quad (3.6)$$

A frequência de falhas de determinado componente ou sistema é representada usualmente em confiabilidade pela taxa de falhas λ . Este parâmetro cuja determinação e entendimento é de fundamental importância, pode ser definido em termos da função de confiabilidade $R(t)$ ou da fdp de T , $f(t)$.

Definindo $\lambda(t) \cdot \Delta t$, como a probabilidade de que um sistema venha a falhar para algum valor de $T \leq t + \Delta t$, dado que ele ainda não falhou em $T = t$. Portanto esta definição corresponde a uma probabilidade condicional. Como segue,

$$P(T < t + \Delta t | T > t) = \lambda(t) \cdot \Delta t \quad (3.7)$$

Da definição de probabilidade condicionada, temos:

$$P(T < t + \Delta t | T > t) = \frac{P[(T > t) \cap (T < t + \Delta t)]}{P(T > t)} \quad (3.8)$$

Pode ser notado que o numerador da expressão anterior, é uma forma alternativa de se escrever a fdp de T , como segue,

$$P\{(T > t) \cap (T < t + \Delta t)\} \equiv P\{t < T < t + \Delta t\} = f(t) \Delta t \quad (3.9)$$

O denominador da equação (3.8) é justamente $R(t)$, ver a equação (3.3). Combinando as equações é obtida a função taxa de falhas:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (3.10)$$

A função acima em teoria da confiabilidade também é conhecida como função de risco ou taxa de falhas instantânea.

É muito comum e usual a função de confiabilidade $R(t)$ e a fdp de T $f(t)$ ser escrita em termos da taxa de falhas instantânea.

$$\lambda(t) = -\frac{dR(t)}{dt} \frac{1}{R(t)} \Rightarrow \lambda(t) = -\frac{1}{R(t)} \frac{dR(t)}{dt} \quad (3.11)$$

Multiplicando ambos os membros por dt , tem-se

$$\lambda(t) dt = -\frac{dR(t)}{R(t)} \quad (3.12)$$

Integrando de 0 a t , tem-se :

$$\int_0^t \lambda(t) dt = -\int_0^t \frac{1}{R(t)} dR(t) = -\ln[R(t)] \quad (3.13)$$

Aplicando a função exponencial em ambos os lados da equação anterior, chega-se a uma relação geral para a função de confiabilidade em termos da taxa de falhas.

$$R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} \quad (3.14)$$

Um dos parâmetros mais usados na caracterização da confiabilidade é o tempo médio para falhar (**MTTF**). Por definição o valor esperado de uma variável aleatória contínua T é dado por:

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (3.15)$$

3.4 Principais distribuições utilizadas em confiabilidade

Cavalca (1998), ressalta que são várias as funções que podem modelar a distribuição probabilística de uma variável aleatória. E que a escolha de um modelo matemático estatístico a

ser utilizado está diretamente relacionada aos tipos de testes de falhas realizados, bem como ao tipo e tamanho de amostragem analisada.

Conforme mencionado anteriormente, as variáveis aleatórias podem ser discretas ou contínuas e segundo esta divisão podem ser classificadas como:

1 - Distribuições discretas

1.1 - Distribuição Binomial

1.2 - Distribuição de Poisson

2 – Distribuições contínuas

2.1 - Distribuição Exponencial e Modelo de Falha constante

2.2 - Distribuição Retangular

2.3 - Distribuição de Rayleigh

2.4 - Distribuição Normal

2.5 - Distribuição de Weibull

2.6 - Distribuição Gamma

2.7 - Distribuição Lognormal

2.8 - Distribuição Beta

2.9 - Distribuição de valores Extremos

Lipson e Sheth (1973) e Moras (2002) apresentaram tabelas, comentando as principais aplicações práticas das distribuições acima mencionadas uma adaptação das mesmas encontra-se resumida na tabela 3.2.

Tabela 3.2 : Principais Distribuições Estatísticas e suas aplicações

Distribuições Estatísticas	Aplicações
1.1 - Distribuição Binomial	Aplicada para número elevado de amostras no controle de qualidade. Modela o número de falhas em relação ao tamanho inicial da amostra. A distribuição Hipergeométrica tem aplicação semelhante com exceções.
1.2 - Distribuição de Poisson	Aplicada no controle de qualidade e modela o número de falhas em relação ao tempo de produção.
2.1 - Distribuição Exponencial	Modela o número de falhas durante o período de vida útil de componentes eletrônicos.
2.2 - Distribuição Retangular	Aplicações restritas, casos em que a densidade de probabilidade é constante num intervalo de tempo.
2.3 - Distribuição de Rayleigh	Modela as regiões da curva da banheira para o caso de falhas iniciais e por desgaste, por uma progressão linear.
2.4 - Distribuição Normal	Analisa produtos durante o início de vida e na fase de degradação natural. Modela falha por fadiga ou desgaste.
2.5 - Distribuição de Weibull	Modela falha aleatória.
2.6 - Distribuição Gamma	Modela tempo de falhas em componentes com reparo ideal.
2.7 - Distribuição Lognormal	Caracteriza o tempo de reparo para uma manutenção normal de falhas de desgaste.
2.8 - Distribuição Beta	Aplicações especiais
2.9 - Distribuição de valores Extremos	Normalmente utilizada em situações em que o número de variáveis, dos quais os dados são obtidos, são muito grandes.

Pallerosi (2000), menciona cinco principais tipos de distribuições estatísticas utilizadas no estudo da confiabilidade, sendo as mesmas:

- Weibull (com 1,2 e 3 parâmetros);
- Weibull – Mista (Bi – Weibull, Tri-Weibull) ou Multimodal;
- Exponencial (com 1 ou 2 parâmetros);
- Lognormal (com 2 parâmetros);
- Normal (com 2 parâmetros).

Tendo o autor tecido alguns comentários sobre as principais distribuições utilizadas:

A distribuição do tipo Weibull é a mais geral, precisa e prática dentre todas as outras possíveis distribuições utilizadas no estudo da Confiabilidade. Ela pode englobar, com suficiente precisão, a maioria dos casos práticos. Isto é possível devido a influência do parâmetro de forma Beta (β).

A distribuição do tipo Weibull – Mista ou multimodal é aplicável para dois ou mais diferentes tipos e modos de falhas, e na análise da vida total de um produto (falhas de juventude, vida útil, velhice).

A distribuição tipo exponencial é um caso particular da distribuição de Weibull, com parâmetro de forma $\beta=1$. Sua grande aplicação prática ocorre nos sistemas com significativa quantidade de componentes em série, caso típico de equipamentos eletrônicos, onde a taxa de falha do sistema é constante.

A distribuição tipo Lognormal é aplicada principalmente quando ocorre uma significativa quantidade de falhas no início da vida do produto, e poucas falhas no fim da vida, apresentando assimetria em relação ao valor médio.

A distribuição tipo normal é aplicada principalmente quando não ocorrem falhas no início ou no fim da vida do produto, concentrando-se em torno de um valor médio. Esta distribuição

aproxima-se bastante da distribuição de Weibull para parâmetros de forma $\beta \gg 3,4$, sendo caracterizada por uma perfeita assimetria em relação ao valor médio.

De acordo com as definições de Cavalca (1998), Pallerosi (2000), David e Myron (1989), Ebeling (1997), dentre outros autores, será detalhado algumas das funções acima:

3.4.1 Distribuição de Weibull

A distribuição de Weibull foi proposta originalmente por W. Weibull (1954) em estudos relacionados ao tempo de falha devido a fadiga de metais. É uma distribuição freqüentemente empregada para descrever o tempo de vida de produtos industriais. A distribuição de Weibull também descreve adequadamente o tempo de vida de componentes ou subsistemas.

O modelo físico que ajusta a distribuição de Weibull origina-se da teoria dos valores extremos, mais especificamente as distribuições de Gumbell.

A distribuição geral do tipo Weibull apresenta as seguintes características:

- a) - Permite uma aplicação à maioria dos casos práticos, com boa precisão, motivo de seu largo emprego;
- b) - A distribuição tipo exponencial resulta como um caso particular, e as do tipo Normal, Lognormal, Rayleigh, ou do Valor Extremo, como uma razoável aproximação, suficiente em grande número de aplicações práticas;
- c) - Permite caracterizar as falhas durante a juventude, vida útil e velhice (senilidade) dos componentes, como será apresentado, correspondendo ao tipo Weibull – Misto;

d) - Na sua forma simplificada (biparamétrica) resulta aplicável a muitos casos práticos, motivo de sua utilização neste manual, por sua maior simplicidade e facilidade de entendimento;

e) - Na sua forma tripamétrica permite a análise dos casos onde o início da operação do produto não coincide com o início da análise, por exemplo, quando uma aeronave apresentava uma dada quantidade de horas de vôo anterior ao início do registro das falhas;

f) - A Disponibilidade pode ser expressa por uma equação geral quando a Confiabilidade e a Manutenibilidade são expressas pela distribuição tipo Weibull.

3.4.1.1 Confiabilidade para Weibull Tripamétrica

Em função da variável t , a equação geral de Weibull, na sua forma tripamétrica é dada por (Pallerosi, 2000):

$$R(t) = e^{[\lambda_o \cdot (t-\gamma)]\beta} = e^{-\left[\frac{(t-\gamma)}{\eta}\right]\beta} \quad (3.16)$$

Onde:

t = variável, referida ao tempo, distâncias (Quilômetros, etc.), ciclos, operações, etc.

γ = Vida mínima, ou Parâmetro de posição.

λ_o = Taxa de falha característica, referida ao valor $R = e^{-1} = 0,367879 (\cong 37\%)$. Seu valor é normalmente referido a 10^{-6} /hora, ou seja, em quantidade de falhas por milhão, ou em % falhas/1000 h. de uso (operação).

β = Parâmetro de forma, que define a variação da Confiabilidade ao longo da vida do componente ou sistema. Quanto maior β , maior a inclinação da reta no gráfico.

$\eta = 1/\lambda_o =$ Vida característica ou Parâmetro de escala, referida ao valor da Confiabilidade $R = e^{-1} = 0,367879$ ($\cong 37\%$) ou o valor da Desconfiabilidade $F = 0,632121$ (63%).

A função Desconfiabilidade F (Probabilidade de falha) é dada por:

$$F(t) = 1 - e^{[\lambda_o \cdot (t-\gamma)]^\beta} = 1 - e^{-\left[\frac{(t-\gamma)}{\eta}\right]^\beta} \quad (3.17)$$

A função densidade probabilidade de falha é dada por:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} \cdot e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (3.18)$$

3.4.1.2 Confiabilidade para Weibull Biparamétrica.

Na sua forma biparamétrica, ou seja, quando o Parâmetro de posição $\gamma = 0$, geralmente correspondente a elementos (componentes, sistemas) novos, s em vida inicial, observada em registros históricos de Banco de Dados de falhas ou resultados de ensaios, resulta para a Confiabilidade (R) a equação,

$$R(t) = e^{-(\lambda \cdot t)^\beta} = e^{-(t/\eta)^\beta} \quad (3.19)$$

e para a Desconfiabilidade (F),

$$F(t) = 1 - R(t) = 1 - e^{-(\lambda \cdot t)^\beta} = 1 - e^{-(t/\eta)^\beta} \quad (3.20)$$

A função densidade probabilidade de falha é dada por (Pallerosi, 2000):

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta} \right)^{\beta-1} \cdot e^{-\left(\frac{t}{\eta} \right)^\beta} \quad (3.21)$$

3.4.1.3 Distribuição Weibull Monoparamétrica

Quando o Parâmetro de forma assume o valor $\beta = 1$ resulta uma distribuição do tipo Exponencial, com Taxa de falha ($\lambda_o = \lambda_o$) constante, ou seja, a Taxa característica de falha (λ_o) é igual à Taxa instantânea de falha (λ_o). Neste caso, as equações (3.19) e (3.20) assumem as formas simplificadas,

$$R(t) = e^{-\lambda_o \cdot t} = e^{-t/\eta} \quad (3.22)$$

e para a Desconfiabilidade (F),

$$F(t) = 1 - R(t) = 1 - e^{-\lambda_o \cdot t} = 1 - e^{-t/\eta} \quad (3.23)$$

A função densidade probabilidade de falha é dada por:

$$f(t) = \frac{1}{\eta} \cdot e^{-\left(\frac{t}{\eta} \right)} \quad (3.24)$$

De particular aplicação a muitos casos práticos, principalmente para sistemas com grande quantidade de componentes em arranjo em série de acordo com Pallerosi (2000).

3.4.1.4 Distribuição Weibull Mista (Mixed Weibull)

Segundo o manual de aplicação do software Weibull ++, normalmente a distribuição do tipo Weibull mista é utilizada para componentes ou sistemas que apresentam múltiplos modos de falha. A distribuição Weibull mista é aplicada para representar populações mistas. A distribuição representa a imagem global da vida do produto, misturando diferentes distribuições de Weibull para diferentes estágios da vida do produto. Através da mesma é possível construir a curva da banheira de um equipamento ou sistema na sua totalidade.

3.4.1.5 Influencia dos parâmetros de forma de Weibull nas principais Funções de Confiabilidade

Como foi citado anteriormente, a lei de distribuição de Weibull, é uma distribuição muito flexível, que pode se aproximar a outras distribuições segundo os valores do parâmetro de forma β , o que pode ser observado nas figuras 3.1 , 3.2 e 3.3 a seguir obtidas de gráficos elaborados em planilha eletrônica a partir das equações anteriores:

a) Função densidade de probabilidade de falha – pdf :

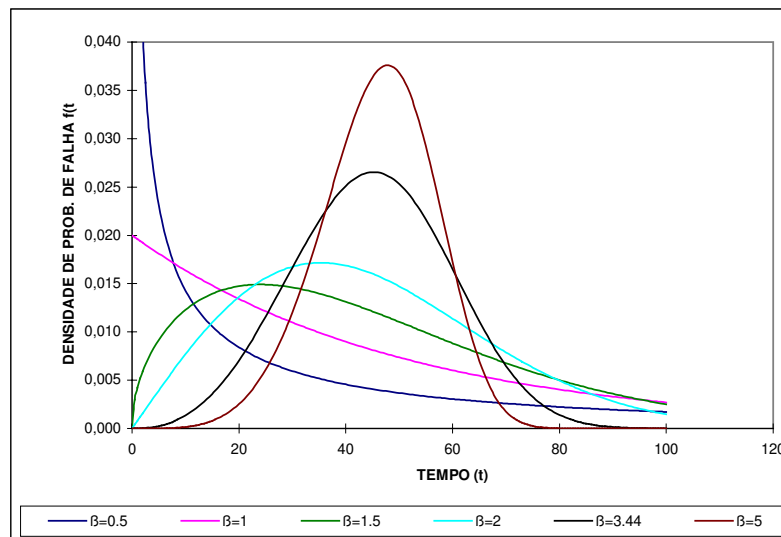


Figura 3.1: curvas da densidade da probabilidade de falha em função do tempo para beta variando de 0,5 a 5.

A Figura 3.1 mostra a forma da distribuição densidade de probabilidade de falha para diferentes valores de parâmetro β . Para $\beta = 1$, a distribuição de Weibull é a distribuição Exponencial. Para $\beta = 2$, a distribuição passa a ser a distribuição de Rayleigh. Para valores $3 \leq \beta \leq 4$, é próxima a distribuição normal.

b) – Função de Confiabilidade:

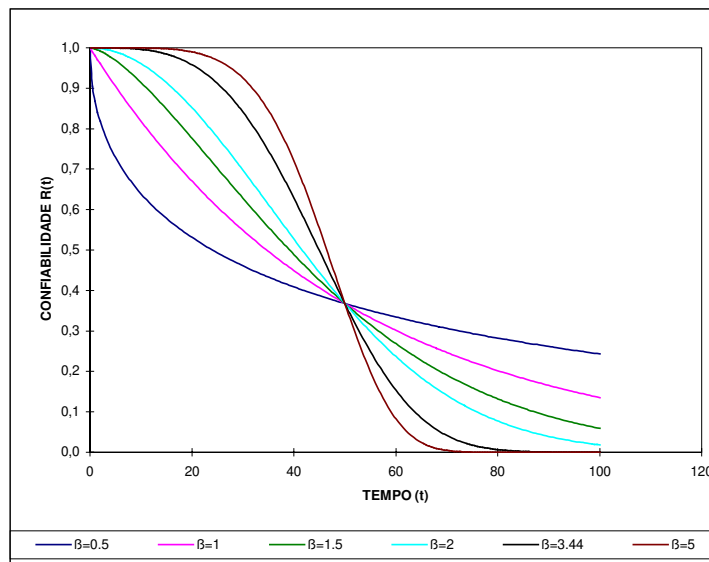


Figura 3.2 : Influência do Parâmetro β na Função de Confiabilidade $R(t)$

c) – Função Taxa de Falha :

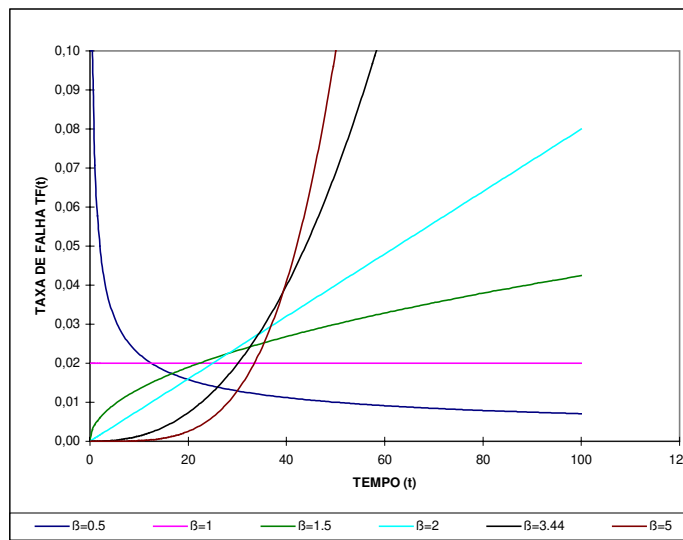


Figura 3.3 : Influência do Parâmetro β na Função Taxa de Falha $\lambda(t)$.

3.4.2 Confiabilidade para distribuição Lognormal

A distribuição lognormal é utilizada com frequência para caracterizar o tempo de vida de produtos e materiais.

A distribuição lognormal é a que melhor descreve os tempos de vida de componentes semicondutores cujos mecanismos de falha envolvem interações químicas, como as encontradas em processos de corrosão, acúmulo superficial de cargas elétricas e degradação de contatos, sendo também adequada para mecanismos de falha por fadiga em materiais. As principais aplicações da distribuição lognormal correspondem a falhas em rolamentos, motores e geradores, fadiga em metais, componentes do estado sólido (semicondutores, diodos e outros), isolantes elétricos, resistências elétricas, etc. Lipson e Sheth (1973)

Com as seguintes principais características e propriedades:

- a) - A distribuição é assimétrica;
- b) - A distribuição é do tipo biparamétrica onde o Valor médio (μ^1) corresponde ao parâmetro de escala e o Desvio-padrão (σ^1) ao Parâmetro de forma;
- c) - As principais aplicações da distribuição lognormal correspondem a falhas em rolamentos, motores e geradores, fadiga em metais, componentes do estado sólido (semicondutores, diodos e outros), isolantes elétricos, etc.

A confiabilidade $R(t)$ para distribuição Lognormal é do tipo biparamétrica, segundo Pallerosi (2000) é dada por:

$$R(t) = \int_{t^1}^{\infty} f(t^1).dt = \int_{t^1}^{\infty} \frac{1}{\sigma^1 \cdot \sqrt{2\eta}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \cdot \left[(t^1 - \mu^1) / \sigma^1 \right]^2} \cdot dt \quad (3.25)$$

3.5 Características da amostra que representa a população

Segundo Dodson (1994), as amostras que caracterizam uma população podem ser basicamente de três tipos, conforme o arranjo dos itens a serem avaliados ou testados:

- Não-agrupados (itens testados ou avaliados individualmente);
- Agrupados (itens testados ou avaliados em grupos selecionados);
- Na forma livre (dados admitidos).

3.6 Tipos de dados de vida

Segundo Nelson (1982) e Abernethy (2000), qualquer tipo de teste para medir a durabilidade de um dado produto ou avaliação de vida até a falha, pode muitas das vezes ser demorado e caro para ser realizado. Mesmo que leve algum tempo para o final do teste, alguns equipamentos ou componentes ainda não falharam, essas informações são ditas incompletas ou parciais, são chamadas de observações censuradas ou suspensas.

Os tipos de dados de vida podem ser completos ou censurados e os censurados podem ser censurados à direita, censurados em intervalos e censurados à esquerda.

Mesmo que se tenham encontrado observações censuradas, todos os resultados provenientes do teste devem ser utilizados na análise estatística. Existem duas razões que justificam tal procedimento, sendo a primeira que os dados censurados também fornecem informações sobre o tempo de vida do componente em questão e a segunda é com as observações das censuras, pode-se obter o efeito da omissão das censuras no cálculo das medidas de confiabilidade.

Como cada componente apresenta uma particular condição de teste, o procedimento de análise deve considerar os seguintes tipos principais – Pallerosi (2000):

- a. Tempo até falha (ou recolocação), sem suspensão (censura), todos os itens completam o ensaio;
- b. Tempo até falha (ou recolocação, com suspensão (censura à direita), onde nem todos os itens completam o ensaio);
- c. Tempo até falha (ou recolocação, com intervalos (intervalo e censura à esquerda), onde os itens são inspecionados em dados intervalos, com itens falhos (ou recolocados) após a última inspeção);
- d. Tempo até falha (ou recolocação), com intervalos e Suspensões (intervalo, censura à esquerda ou à direita), onde os itens são inspecionados em dados intervalos, com itens falhos (ou recolocados) após a última inspeção, com ocorrência também de itens com ou sem Suspensões, e Censura múltipla.

3.7 Confiabilidade de Sistemas

Entende-se por sistema um conjunto de sub-sistemas e componentes, combinados entre si de modo específico, correspondentes a dados arranjos físicos (Série, Paralelos, Compostos e Complexos), para atingir as funções operacionais desejadas, com custos, performances e Confiabilidade que satisfaçam as necessidades do usuário final.

Os diferentes tipos de componentes, sua quantidade, qualidade e arranjos, quando combinados entre si apresentam um efeito direto na confiabilidade do sistema.

Um sistema real é normalmente representado por um diagrama de blocos, (*RBD – Reliability Block Diagram*) no qual os componentes do sistema podem estar conectados entre si nas várias configurações possíveis. Entretanto, a relação entre o sistema real e sua representação por diagramas de blocos deve ser bem definida, antes de ser aplicada uma técnica qualquer para a avaliação da confiabilidade. Muito importante também é o fato de um sistema real e seu modelo de representação não possuírem necessariamente a mesma estrutura topológica.

Moras (2002) e Mojena (1999) mencionam em seus trabalhos algumas definições importantes sobre confiabilidade de sistemas segundo vários autores:

- **Nó:** É um ponto de conexão que possuem as estruturas e os componentes que as formam;
- **Componente:** É qualquer dispositivo ou equipamento (peça, elemento, aparato) considerado no cálculo de confiabilidade como uma parte autônoma separada, que tem uma função bem definida dentro de um sistema, bem como seu índice qualitativo geral de confiabilidade;
- **Entrada:** Uma conexão de um ou mais nós de entrada;
- **Saída:** Uma conexão de um ou mais nós de saída;
- **Diagrama de Blocos:** É um grupo de componentes conectados ou associados em diferentes configurações (convencionais ou não convencionais), para desempenhar uma ou mais funções específicas;
- **Sistema Simples:** É um grupo de n componentes conectados ou associados em uma configuração fixa (exemplo: série, paralelo, delta-estrela, R-em-N, etc.);
- **Sistema Complexo:** Estruturas que estão formadas por duas ou mais estruturas simples as quais podem apresentar diferentes formas de conexão ou associação dos componentes, criando diferentes combinações de configuração. Nestes sistemas, ou parte deles, às vezes não é possível separá-los em arranjos básicos (Série; Paralelo; Compostos). Dentre os vários métodos de análise disponíveis para calcular a confiabilidade dos arranjos complexos, os mais conhecidos são:

(Inspeção; Método do espaço-evento; Caminho de sucesso; Decomposição; Grupo mínimo de corte; Grupo mínimo de ligação; Matriz de conexão; Árvore de eventos; Árvore de falhas).

- **Sistema Equivalente:** Estrutura ou sistema composto por dois ou vários componentes, que pode ser substituído por um componente com confiabilidade igual à da estrutura considerada.

Pallerosi (2001) ressalta que a determinação da confiabilidade de um dado sistema deve considerar duas condições básicas:

- a) Sistemas Estáticos (congelados no tempo) e Dinâmico (dependente do tempo);
- b) Sistemas Reparáveis e Não-reparáveis (uso único, descartável).

3.7.1 Confiabilidade em Estruturas Complexas

Em muitos casos não é fácil reconhecer quais são os componentes que estão conectados em série e quais estão em paralelo em um sistema complexo. A estimativa da confiabilidade de sistemas ditos complexos requer a aplicação de técnicas e procedimentos adequados.

Moras (2002), tabelou para uma melhor visualização e utilização os principais métodos analíticos existentes mostrados na tabela 3.3 a seguir.

Tabela 3.3: Descrição dos Principais Procedimentos de Análise de Estruturas

Procedimentos	Descrição e Aplicação
1 Inspeção	A partir do diagrama de blocos, identifica os sistemas simples, calculando assim, a confiabilidade. Útil quando um pequeno número de componentes está envolvido.
2 Método espaço-evento	Lista, sistematicamente, todas as possibilidades lógicas do sistema. A confiabilidade é obtida pela soma dos eventos favoráveis. Como se tem 2^n eventos, onde n é o número de componentes, o procedimento fica trabalhoso para n maior que 5 ou 6.
3 Caminho do sucesso	Obtém-se todos os eventos favoráveis do sistema e calcula-se a confiabilidade pela união destes. Procedimento algébrico e de trabalhosa implementação para um número de componentes maior que 5.
4 Decomposição	Também chamado de método da probabilidade condicional, pois, através da escolha de um componente principal, utiliza-se a equação 3.21 para calcular a confiabilidade. Procedimento algébrico que depende da escolha correta deste componente principal, e se torna inviável para um número de componentes maior que 5.
5 Grupo mínimo de corte	É um conjunto de componentes do sistema, obtidos de tal forma que se todos o grupo mínimo falhar, o sistema falha. Identifica os modos de falha. Técnica poderosa e de fácil implementação computacional.
6 Grupo mínimo de ligação	É um grupo de caminhos operacionais que formam uma conexão entre a entrada e a saída do sistema. Possui relação com o método espaço-evento.
7 Matriz de conexão	Método matricial que fornece o mesmo resultado que os métodos de espaço-evento e grupo mínimo de ligação. Possui relação com o método espaço-evento.
8 Árvore de eventos	Consiste na representação ilustrativa em forma de árvore, de um espaço de eventos completo de um dado sistema. Torna-se inviável para um número de componentes maior que 5.
9 Árvore de falhas	Representa as condições que podem causar a falha do sistema. Método visual utilizado para analisar sistemas complexos. Utilizando a técnica, permite-se obter a probabilidade do evento principal.

3.7.2 Estrutura em Série

Um sistema é considerado como arranjo série, do ponto de vista da confiabilidade, se o sucesso da operação do conjunto depende do sucesso da operação de todos os seus componentes; se um deles falhar, todo o conjunto falhará. Pallerosi (2000). A figura 3.4 é um exemplo de um sistema em série.

Os componentes não necessitam estar fisicamente dispostos em série, mas é de fundamental importância que todos eles funcionem para que o sistema funcione.

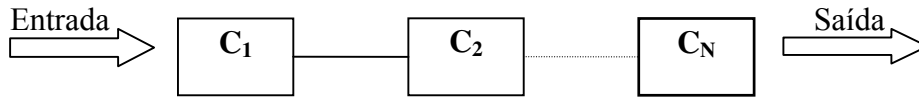


Figura 3.4: Diagrama Representativo de uma Estrutura em Série com N Componentes.

Para que o sistema na estrutura série funcione corretamente, todos os componentes deverão estar funcionando. Admitindo a independência entre todos os componentes, e a partir da confiabilidade individual de cada um, é possível calcular a confiabilidade do sistema em série, da seguinte forma:

Como $R(t) = P(T > t)$, tem-se:

$R(t) = P(T_1 > t \text{ e } T_2 > t \text{ e } \dots \text{ e } T_n > t)$ onde T_n é a duração até falhar do n-ésimo componente. Desta forma,

$$\begin{aligned} R(t) &= P(T_1 > t) \cdot P(T_2 > t) \cdot \dots \cdot P(T_n > t) \Rightarrow \\ R(t) &= R_1(t) \cdot R_2(t) \cdot \dots \cdot R_n(t) \Rightarrow \\ R(t) &= \prod_{i=1}^n R_i(t) \end{aligned} \tag{3.26}$$

Ainda, da equação anterior,

$$R(t) \leq \min[R_1(t), R_2(t), \dots, R_n(t)] \tag{3.27}$$

O que significa que na estrutura série, a confiabilidade do sistema será menor que a confiabilidade de qualquer de suas partes individuais (Pagés e Gondran, 1980).

Consideraremos agora o caso particular em que a taxa de falhas de cada componente do sistema série será constante e igual a λ_i tem-se:

$$R_i(t) = e^{-\int_0^t \lambda_i(t) dt} = e^{-\lambda_i \int_0^t dt} = e^{-\lambda_i t} \quad (3.28)$$

Desta forma temos $e^{-\lambda_i t}$ a confiabilidade do i-ésimo componente, com taxa de falhas constante, logo a confiabilidade de um sistema série para um *tempo de missão* de duração t , denotada por $R_{ss}(t)$, é dado por:

$$R_{ss}(t) = e^{-\lambda_1 t} \cdot e^{-\lambda_2 t} \cdot \dots \cdot e^{-\lambda_n t} = e^{-(\lambda_{ss})t} \quad (3.29)$$

onde $\lambda_{ss} = \sum_{i=1}^n \lambda_i$, é a taxa de falhas do sistema em série.

Segundo Pagés e Gondran (1980), a função densidade de falhas, relativa ao sistema série, $f_{ss}(t)$ é obtida derivando a sua respectiva função de confiabilidade, como segue:

$$f_{ss}(t) = -\frac{d(R_{ss}(t))}{dt} = -\frac{d(e^{-\lambda_{ss}t})}{dt} \Rightarrow f_{ss}(t) = \lambda_{ss} e^{-\lambda_{ss}t} \quad (3.30)$$

3.7.3 Estrutura em Paralelo

O sistema paralelo tem seus componentes associados como mostrado na figura (3.5) abaixo, onde tem-se n componentes (C_1, C_2, \dots, C_n) conectados em paralelo.

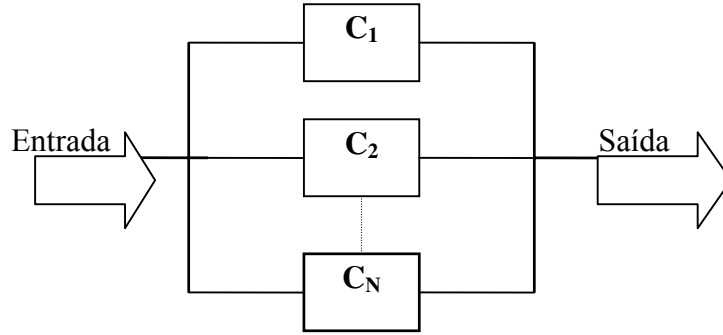


Figura 3.5: Diagrama Representativo de uma Estrutura em Paralelo com N Componentes.

Neste caso o sistema só deixará de funcionar somente se todos os componentes falharem. Este conceito é bastante utilizado, em sistema reais, com o intuito de aumentar a confiabilidade dos mesmos (Pagés e Gondran 1980).

Admitindo-se a independência entre os componentes, a confiabilidade do sistema pode ser expressa em termos das confiabilidades individuais, como segue:

$$\begin{aligned}
 R(t) &= P(T > t) = 1 - P(T \leq t) = 1 - P(T_1 \leq t \text{ e } T_2 \leq t \text{ e } \dots \text{ e } T_n \leq t) \\
 &= 1 - P[(T_1 \leq t) \cdot (T_2 \leq t) \cdot \dots \cdot (T_n \leq t)] \\
 &= 1 - \{[1 - P(T_1 > t)] \cdot [1 - P(T_2 > t)] \cdot \dots \cdot [1 - P(T_n > t)]\} \\
 &= 1 - \{[1 - R_1(t)] \cdot [1 - R_2(t)] \cdot \dots \cdot [1 - R_n(t)]\}
 \end{aligned}$$

logo a confiabilidade do sistema em paralelo $R_{sp}(t)$ é dada por:

$$R_{sp}(t) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - R_i(t)] \quad (3.31)$$

Considerando todos os componentes com a mesma confiabilidade, então:

$$R_{sp}(t) = 1 - [1 - R(t)]^n \quad (3.32)$$

Considerando a taxa de falhas constante e igual a λ_i para todos os componentes do sistema paralelo teremos a confiabilidade do i-ésimo componente igual a $e^{-\lambda_i t}$. Desta forma a confiabilidade do sistema paralelo nesta situação será:

$$R_{sp}(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - e^{-\lambda_i t}) \quad (3.33)$$

3.7.4 Estrutura em K-em-N

Em um sistema K-em-N basta um grupo (k) de componentes independentes idênticos serem bons, de um total (n) de componentes, para que o sistema satisfaça a função esperada com sucesso. Esta configuração é um dos mais importantes aspectos do aumento da confiabilidade e da segurança dos sistemas, largamente aplicado na indústria em geral, segundo Pallerosi (2001).

Para os Arranjos Paralelos Combinados [k / n], com componentes estatisticamente independentes e diferentes Confiabilidades (R_i) para cada i-ésimo componente, a confiabilidade do Sistema (R_s), segundo Pallerosi (2001), é dada por:

$$R_s = 1 - \sum_{i=1}^k \binom{n}{n-1} R_i^{i-1} \cdot \left[\prod_{i=1}^{n-i+1} (1 - R_i) \right] \quad (3.34)$$

$$\text{com} \quad \binom{n}{n-1} = \frac{n!}{(i-1)!(n-i+1)!} \quad (3.35)$$

$$F_s = 1 - R_s \quad (3.21)$$

Onde F_s é a Desconfiabilidade do sistema.

Para componentes iguais a equação geral (3.34) e (3.35) simplifica-se para

$$R_s = 1 - \sum_{i=1}^k \binom{n}{i-1} R^{i-1} \cdot (1-R)^{n-i+1} = \sum_{r=k}^n \binom{n}{r} R^r \cdot (1-R)^{n-r} \quad (3.36)$$

4. Metodologia e Ferramenta Utilizada

Para atingir o objetivo principal deste trabalho foram selecionados softwares comerciais que utilizam os conceitos descritos no Capítulo 3, que possibilitam a análise confiabilística de um dado sistema, em uma empresa de manufatura de classe mundial.

Com o objetivo de avaliar a vida útil, estabelecendo o tempo ótimo de troca, comparar performances, determinar o valor da confiabilidade em estruturas de configuração simples e complexa, foi estabelecida uma metodologia para obtenção dos resultados esperados.

A metodologia consiste em:

- Escolha de um sistema de uma linha de produção em uma indústria de Classe Mundial e caracterização do problema;
- Levantamento dos dados de vida para calcular a confiabilidade;
- Tabulação e tratamento dos dados;
- Levantamento e escolha do software comercial a ser utilizado;
- Tratamento dos dados nos softwares específicos;
- Cálculo da confiabilidade dos componentes e do sistema em questão;
- Avaliação dos resultados

A motivação para a escolha da empresa e do sistema a ser avaliado, bem como a descrição do tratamento dos dados e cálculos pertinentes, as avaliações dos resultados serão apresentadas no estudo de caso do Capítulo 5.

4.1 Levantamento dos Programas de confiabilidade.

Para o levantamento dos *softwares* comerciais para cálculo de confiabilidade existentes no mercado internacional e difundidos entre as empresas, foram levantadas informações em literatura especializada e em páginas de organismos voltados a manutenção na internet.

Willis (2000), apresenta uma seleção de alguns *softwares* existentes no mercado para o cálculo da confiabilidade de sistemas simples e complexos: *AVSIM*; *BLOCKSIM*; *CARE*; *MEADEP*; *RAPTOR*; *RELEX*; *PAR* e *TIGER*. O autor faz uma análise comparativa entre os softwares levando em consideração vários fatores com o objetivo de orientar os engenheiros de confiabilidade na tomada de decisão para seleção e aquisição do software de confiabilidade mais apropriado.

Devido a facilidade de acesso aos manuais, a treinamentos específicos para utilização dos programas e suporte técnico no Brasil, os softwares selecionados para a apresentação no presente trabalho, foram o *Weibull++* versão 6.0 e *BlockSim* versão 6.0 da empresa *Reliasoft*.

4.2 Software Weibul ++ versão 6.0

As características gerais do programa computacional Weibul++ versão 6 serão apresentadas a seguir:

a) Ambiente de trabalho: As interfaces do programa são integradas com os dados adicionados ao “*data folio*”, o qual é similar às planilhas eletrônicas mais utilizadas. Através do “*data folio*”, os dados podem ser imputados, editados e manipulados.

O aplicativo possui várias ferramentas e opções necessárias para realizar as análises de dados de vida. No mesmo podem ser analisados os vários tipos de dados: completos ou censurados. Podendo os dados serem colocados individualmente, na forma agrupados ou na forma livre.

b) Gráficos: O programa dispõe de recursos gráficos para os dados de confiabilidade, permitindo uma visualização conjunta de até seis tipos diferentes de gráficos na tela. Opção de representar no gráfico os pontos referentes à dados suspensos, bem como as quantidades de dados agrupados. Dispõe um editor de gráficos que permite fazer anotações livres e manipulação dos mesmos. Os gráficos possíveis como o de Weibull, confiabilidade pelo tempo, desconfiabilidade pelo tempo, *pdf* e taxa de falha,

4.3 Software BlockSim versão 6.0

O programa foi desenvolvido com o intuito de realizar a análise de confiabilidade, manutenibilidade, disponibilidade, e otimização em sistemas simples e complexos.

O programa é perfeitamente integrado com o Weibull++, permitindo a migração das análises para facilitar os cálculos.

Utiliza o método de diagramas de blocos de confiabilidade (*Reliability Block Diagram – RBD*). Através dos diagramas é possível configurar várias possibilidades de configurações como sistemas em série, paralelo, K-em-N e sistemas complexos.

No programa cada bloco poderá representar um componente, um subsistema, um sistema ou um modo de falha, todos com múltiplas propriedades, sendo que cada bloco pode suportar uma infinidade de níveis. De modo análogo ao *Weibull++*, o *BlockSim* dispõe do recurso “*Quick Calculator Pad*”(QCP) que permite análise das principais propriedades do sistema, seja ele reparável ou não, tais como: cálculo da confiabilidade do sistema para qualquer tempo de missão determinado, cálculo de confiabilidade e probabilidade de falha condicionais para o sistema, cálculo da taxa de falha do sistema para qualquer tempo, cálculo do MTBF ou MTTF para o sistema, cálculo da vida Bx para o sistema.

Os dados de confiabilidade a serem processados pelo programa Weibull++, obedecerão aos passos contidos nos manuais de utilização do programa e sugeridos por Pallerosi (2001), representados na figura 4.1.

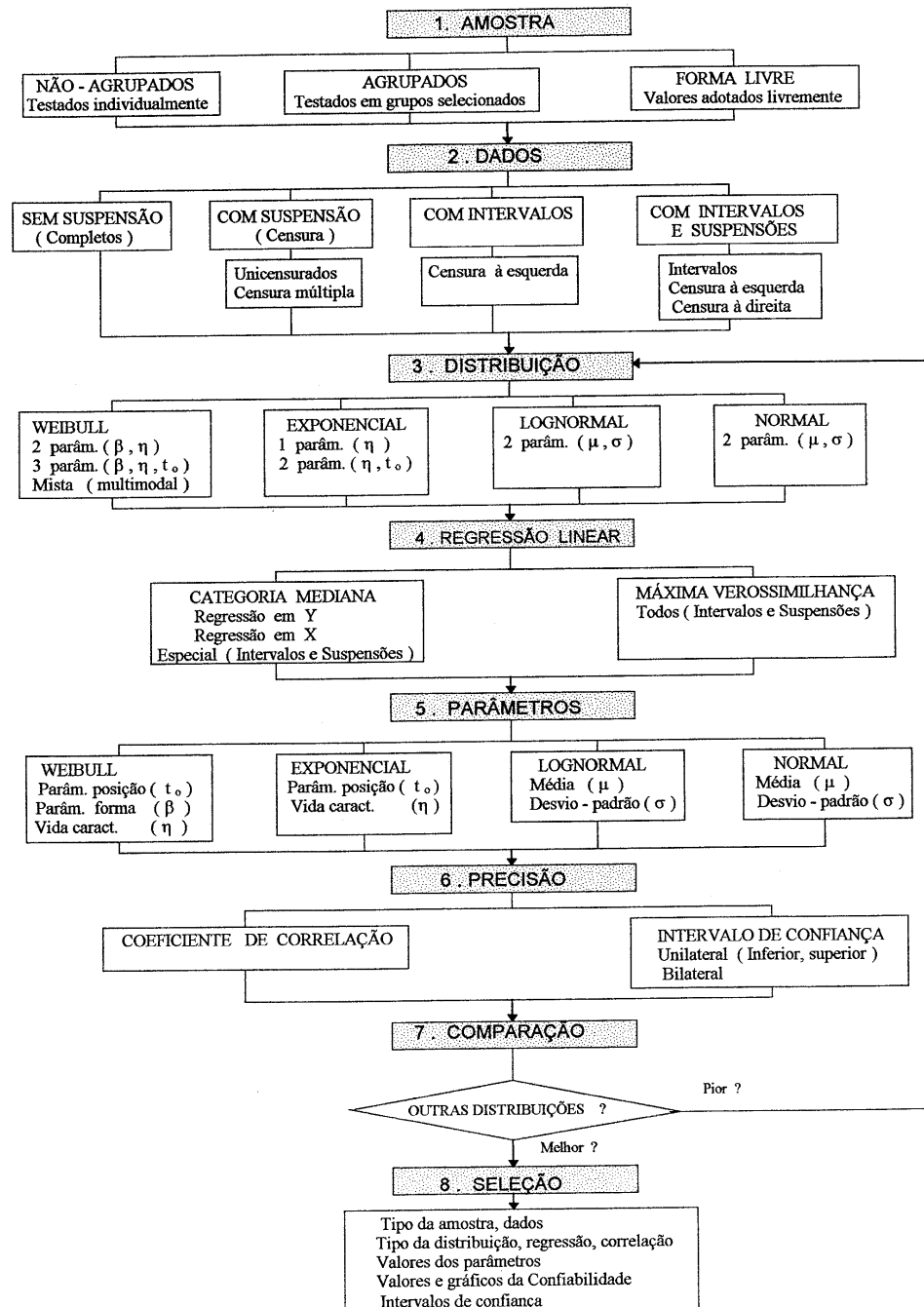


Figura 4.1: Fluxograma das ações para a caracterização da Metodologia dos Parâmetros de Confiabilidade, Pallerosi (2001).

4.4 Resumo dos Passos

Os passos utilizados no processamento dos dados no programa computacional, conforme a metodologia e a teoria da confiabilidade apresentada no capítulo 3 e no fluxo sugerido por Pallerosi (2001), podem ser resumidos em:

- a)- seleção do tipo correto de entrada de dados para a planilha apropriada;
- b) – inserir os dados na planilha previamente selecionada, podendo os dados ser inseridos de forma aleatória, pois são ordenados automaticamente pelo programa;
- c) – selecionar a distribuição e o método de estimativa de parâmetros apropriados, para depois processar o cálculo;
- d) uma vez selecionadas as distribuições, o número de parâmetros e o método de estimação, processar os cálculos acionando o ícone correspondente ao cálculo dos parâmetros;
- e) utilizar o *QCP (Quick Calculator Pad)* para obter os cálculos correspondentes ;
- f) obter os gráficos de confiabilidade em função do tempo, desconfiabilidade, taxa de falha e pdf.

5. Estudo de Caso e Apresentação dos Resultados

Após o delineamento da metodologia empregada para realização do estudo, o presente capítulo traz a apresentação e a análise dos dados levantados junto a empresa Alumar.

A escolha da empresa Alumar para a realização deste trabalho foi devida principalmente à mesma ser considerada uma planta *Benchmark* a nível mundial na implementação das várias metodologias que caracterizam as empresas de Classe Mundial.

Para a realização deste trabalho foi formalizado um estágio entre o aluno do mestrado e a empresa no intuito de propiciar todo apoio necessário para a realização do mesmo.

O estudo de caso tem o objetivo de gerar uma contribuição à empresa mencionada, procurando através da determinação dos índices de confiabilidade, sugerir o período ótimo para a realização da manutenção preventiva sistemática, para o sistema objeto do estudo.

Este capítulo apresenta-se dividido da seguinte forma:

Nas seções 5.1 e 5.2 são apresentados respectivamente, a empresa e o sistema específico a ser estudado, bem como a motivação do estudo aqui apresentado. Na seção 5.3 é apresentado o levantamento histórico das falhas, o tabelamento e classificação das mesmas no software Excel e o processamento e análise no software Weibull++ versão 6.0 e BlockSim versão 6.0. Na seção

5.4 é apresentada a análise dos resultados obtidos e comparação dos mesmos entre os fabricantes dos elementos resistivos A e B e reconicionado C.

5.1 Apresentação da Empresa

A Alumar é uma empresa do setor primário, produzindo matéria-prima (Alumínio) para as indústrias manufatureiras do setor terciário com vasta aplicação nos mais diversos segmentos.

A empresa produz basicamente dois produtos a partir da bauxita: Alumina e Alumínio. Sua capacidade produtiva atual é de 370,5 mil toneladas/ano de alumínio e 1,3 milhão de toneladas/ano de alumina.

5.2 Sistema Estudado e Caracterização do Problema

Os fornos de espera tipo basculante utilizado para manter o alumínio líquido na temperatura ideal de processo, localizados na planta do lingotamento, possuem uma sistematicidade de manutenção do tipo preventiva, que prevê a troca dos elementos resistivos e revisão geral do tipo *overhaul* a cada 78 meses (um ano e meio).

Os elementos resistivos cerâmico-metálico são adquiridos de dois fornecedores A e B. Podendo os mesmos serem recuperados e reutilizados em casos especiais (os nomes dos fabricantes foram omitidos na apresentação do trabalho).

Atualmente, a manutenção dos fornos está sendo executada em uma periodicidade abaixo do previsto em projeto, devido à “queima” de quantidade considerável dos elementos resistivos de forma prematura.

Para o trabalho proposto será utilizado um conjunto de dados reais, levantados na Alumar, contendo o histórico detalhado dos tempos até falha e suspensões do conjunto de resistências utilizados nos seis fornos localizados na planta de lingotamento.

Cada forno possui um conjunto de trinta e seis elementos resistivos instalados, que devem proporcionar em conjunto um aquecimento de aproximadamente 800° C no interior do forno. Para que esta temperatura ideal de processo seja mantida, a quantidade mínima de resistências necessárias é de 27 unidades. Portanto o sistema se caracteriza como sendo do tipo K-em-N, sendo 27 boas em 36 a quantidade mínima para que o sistema ainda continue operando na necessidade do processo e a quantidade ideal de 32 resistências boas em 36.

5.3 Cálculo da Confiabilidade dos Elementos Resistivos

Para o cálculo da confiabilidade dos elementos resistivos dos fabricantes A e B e das resistências reutilizadas caracterizada por C, foi realizado um levantamento histórico das trocas de resistências desde o último *overhaul* até o mês de maio de 2003. As informações de falhas e suspensões foram coletadas, tabeladas e quantificadas no software Excel e posteriormente tratadas nos programas Weibull ++ e BlockSim.

5.3.1 Resumo dos dados obtidos do fabricante A e recondicionado C durante o período observado.

a) – Tabelas dos dados de vida, falhas e suspensões observados para o fabricante A.

Tabela 5.1: Vida das resistências do fabricante A no forno 1

Forno 1		
Quantidade	Falha / Suspensão	Vida em Semanas
27	S	66
1	F	42
2	F	44
1	F	41
1	F	30

Tabela 5.2: Vida das resistências do fabricante A no forno 2

Forno 2		
Quantidade	Falha / Suspensão	Vida em Semanas
18	S	79
2	F	68
3	F	55
5	F	66
4	F	63

Tabela 5.3: Vida das resistências do fabricante A no forno 3

Forno 3		
Quantidade	Falha / Suspensão	Vida em Semanas
30	S	78
1	F	76

Tabela 5.4: Vida das resistências do fabricante A no forno 4

Forno 4		
Quantidade	Falha / Suspensão	Vida em Semanas
27	S	35
2	F	34
2	F	32
2	F	27
1	F	30

Tabela 5.5: Vida das resistências do fabricante A no forno 5

Forno 5		
Quantidade	Falha / Suspensão	Vida em Semanas
17	S	79
2	F	78
2	F	59
1	F	61
1	F	71

Os dados relativos ao forno 06 não foram considerados no presente estudo para o fabricante A, devido não haver resistência do fabricante instaladas no mesmo.

b) - Tabelas dos dados de vida, falha e suspensões observadas para recondicionada C.

Tabela 5.6: Vida das resistências Recondicionada C no forno 1

Forno 1		
Quantidade	Falha / Suspensão	Vida em Semanas
4	S	19
1	F	3
1	S	36
1	F	13

Tabela 5.7: Vida das resistências recondicionada C no forno 2

Forno 2		
Quantidade	Falha / Suspensão	Vida em Semanas
32	S	9
1	F	23
1	F	14
6	S	8
5	F	3

Tabela 5.8: Vida das resistências recondicionada C no forno 2

Forno 3		
Quantidade	Falha / Suspensão	Vida em Semanas
14	S	4
2	S	5
1	S	11
1	S	3
1	F	12

Os dados relativos ao forno 04 não foram considerados no presente estudo para as resistências recondicionadas C, devido não haver resistências instaladas no mesmo.

Tabela 5.9: Vida das resistências recondicionada C no forno 5

Forno 5		
Quantidade	Falha / Suspensão	Vida em Semanas
2	F	14
1	F	4
2	F	5
1	S	6
2	F	10

Tabela 5.10: Vida das resistências recondicionada C no forno 6

Forno 6		
Quantidade	Falha / Suspensão	Vida em Semanas
4	F	9
1	F	5
2	F	6
1	S	21
1	F	3

5.3.2 Processamento dos dados no programa Weibull++ e Apresentação dos Resultados.

5.3.2.1 Caracterização da amostra Estudada

Os elementos resistivos foram caracterizados como agrupados e com suspensões, pois existiam vários elementos com vida e suspensões idênticas no período observado nos vários fornos.

Devido a grande quantidade de dados suspensos e as amostras serem relativamente pequenas para cada resistência analisada, foi escolhido o método da máxima verossimilhança - *MLE* para a análise.

5.3.2.2 Distribuição Estatística

No caso do fabricante A, a distribuição mais apropriada sugerida pelo programa foi a Weibull com três parâmetros, para o fabricante B e recondicionada C, a distribuição mais apropriada foi a de Weibull com dois parâmetros.

5.3.2.3 Resumo dos Parâmetros

O resumo das distribuições, parâmetros de forma, vida característica e vida mínima, calculada para os fabricantes A e B e recondicionado C obtidos no programa Weibull++, estão apresentados na tabela 5.11.

Tabela 5.11: Resultados dos dados parâmetros para as resistências A,B e C.

Fabricante	Distribuição	Beta - β	Eta - η	Gama - γ
A	Weibull -3	1,989	109,224	15,76
B	Weibull - 2	3,8598	58,41	-
C - recondicionada	Weibull - 2	1,1077	24,58	-

5.3.2.4 Cálculo da Confiabilidade

O resumo do cálculo da confiabilidade das resistências dos fabricantes A e B e reconcondicionadas C considerados individualmente, para os períodos de 15, 20, 25, 30, 40, 52 e 78 semanas, bem como o MTTF e a vida com 90% de confiabilidade estão apresentados na tabela 5.12.

Tabela 5.12 : Resultado dos cálculos de confiabilidade para as resistências A, B e C.

Semanas- Missão	Fab. A	Fab. B	Rec. C
78	72%	0,5%	0,2%
52	89,55%	58,23%	10,00%
40	95,12%	83,45%	18,45%
30	98,28%	94,70%	28,55%
25	99,27%	97,49%	36,90%
20	99,84%	99,00%	45,75%
15	100,00%	99,70%	56,25%
MTTF - Semanas	112	54	23
Vida 90% - Semanas	51	35	3,5

5.3.2.5 Gráficos

Os gráficos de $R(t)$, taxa de falha e pdf obtidos para o fabricante A, B e recondicionado C, foram obtidos do programa Weibul++.

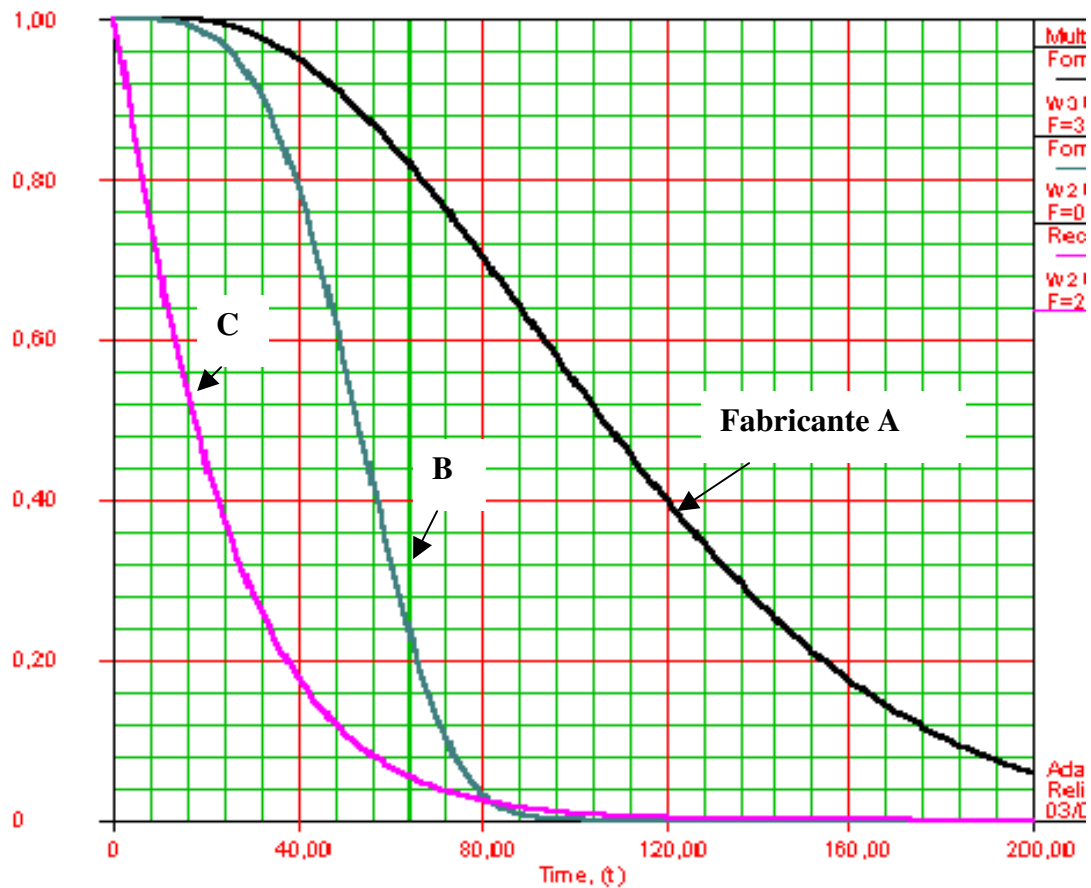


Figura 5.1: Curvas da confiabilidade pelo tempo (em semanas) , para fabricantes A, B e recondicionada C.

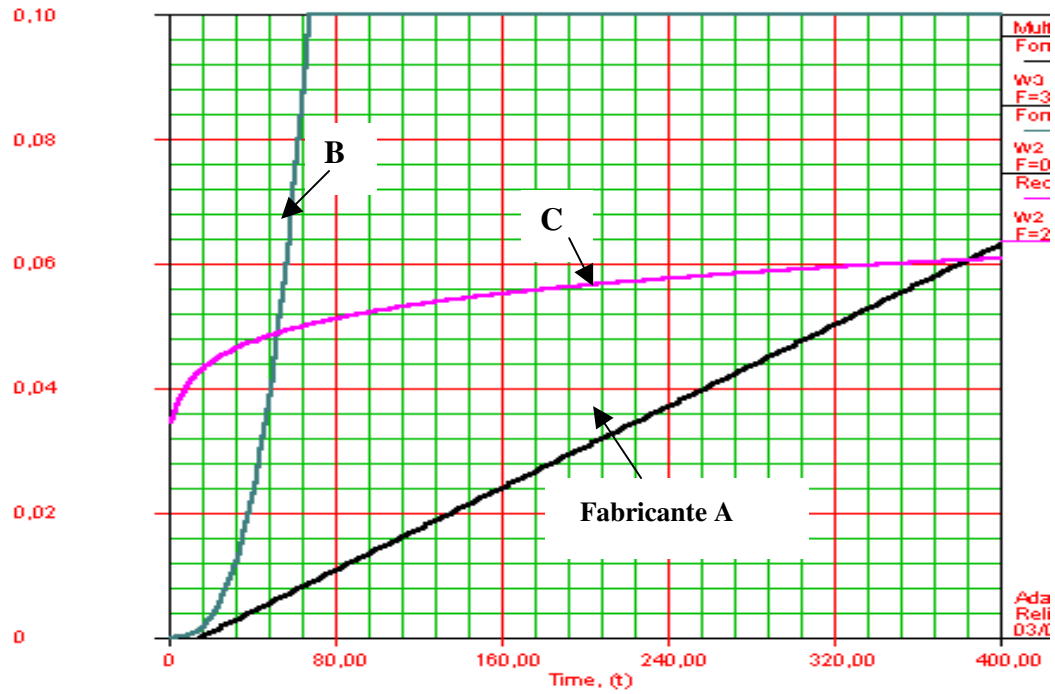


Figura 5.2: Curvas da taxa de falha pelo tempo (em semanas) , para fabricantes A, B e reconcondicionada C.

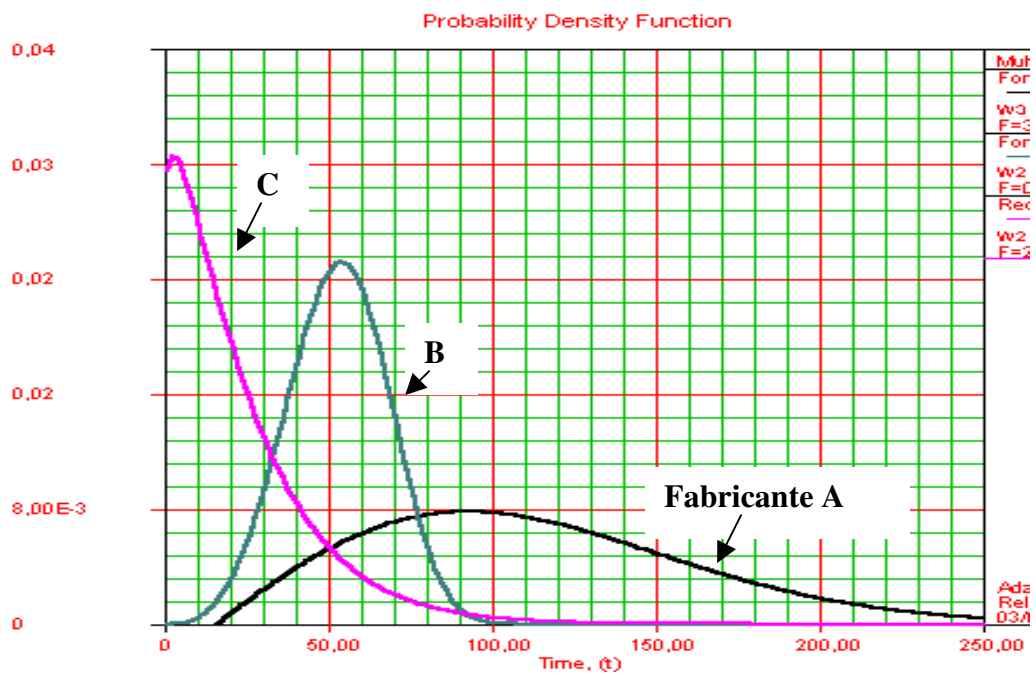


Figura 5.3 : Curvas da pdf pelo tempo, para fabricantes A e B e reconcondicionada C.

5.3.3 Processamento dos dados no programa BlockSim e apresentação dos resultados.

5.3.3.1 Análise da Confiabilidade

Análise dos dados relativos a confiabilidade do sistema de resistências em cada forno no programa BlockSim, considerando a configuração paralela K-em-N, de 27 resistências boas em 36 e também 32 em 36 para efeito comparativo entre as configurações mínima e ideal. Os cálculos foram processados para os fabricantes A e B e recondicionada C. O procedimento de cálculo foi idêntico para cada elemento resistivo.

Na figura 5.9 é representada a configuração de 36 resistências idênticas. O programa BlockSim dispõe do recurso de representar elementos idênticos por um único bloco representativo.

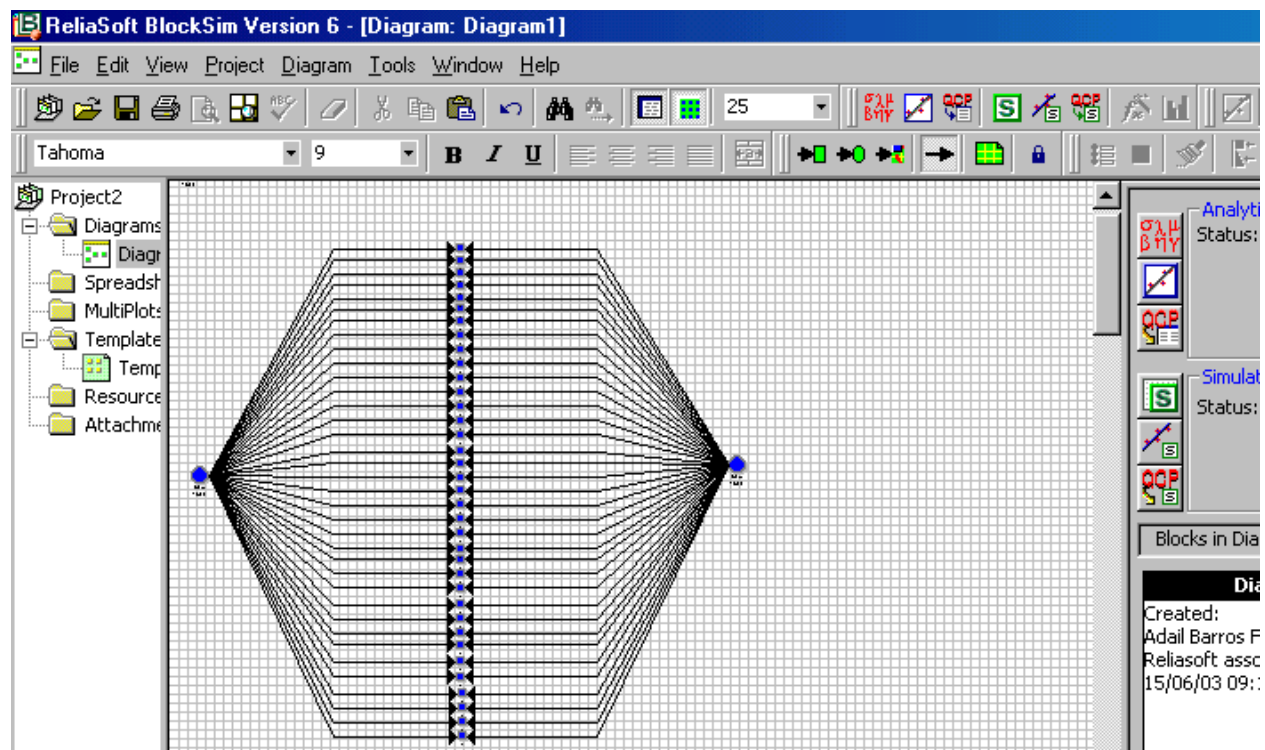


Figura 5.4: Configuração das resistências em paralelo no software BlockSim v. 6.0.

A configuração dos blocos é feita no módulo específico de propriedades, onde são inseridos os dados de sistema em série ou paralelo, no caso específico paralelo com K-em-N e as características da distribuição obtidos no programa Weibull++.

5.3.3.2 Gráficos

Obtenção dos Gráficos de confiabilidade pelo tempo (em semanas), *pdf*, e taxa de falha para os fabricantes A e B e recondicionada C para efeito comparativo. Os gráficos da confiabilidade no tempo apresentados nas figuras 5.12, 5.13 e 5.14 e da pdf apresentados nas figuras 5.15, 5.16 e 5.17 são correspondentes aos fabricantes A, B e recondicionadas C. Os mesmos são correspondentes à configuração K-em-N de 32 resistências boas em 36.

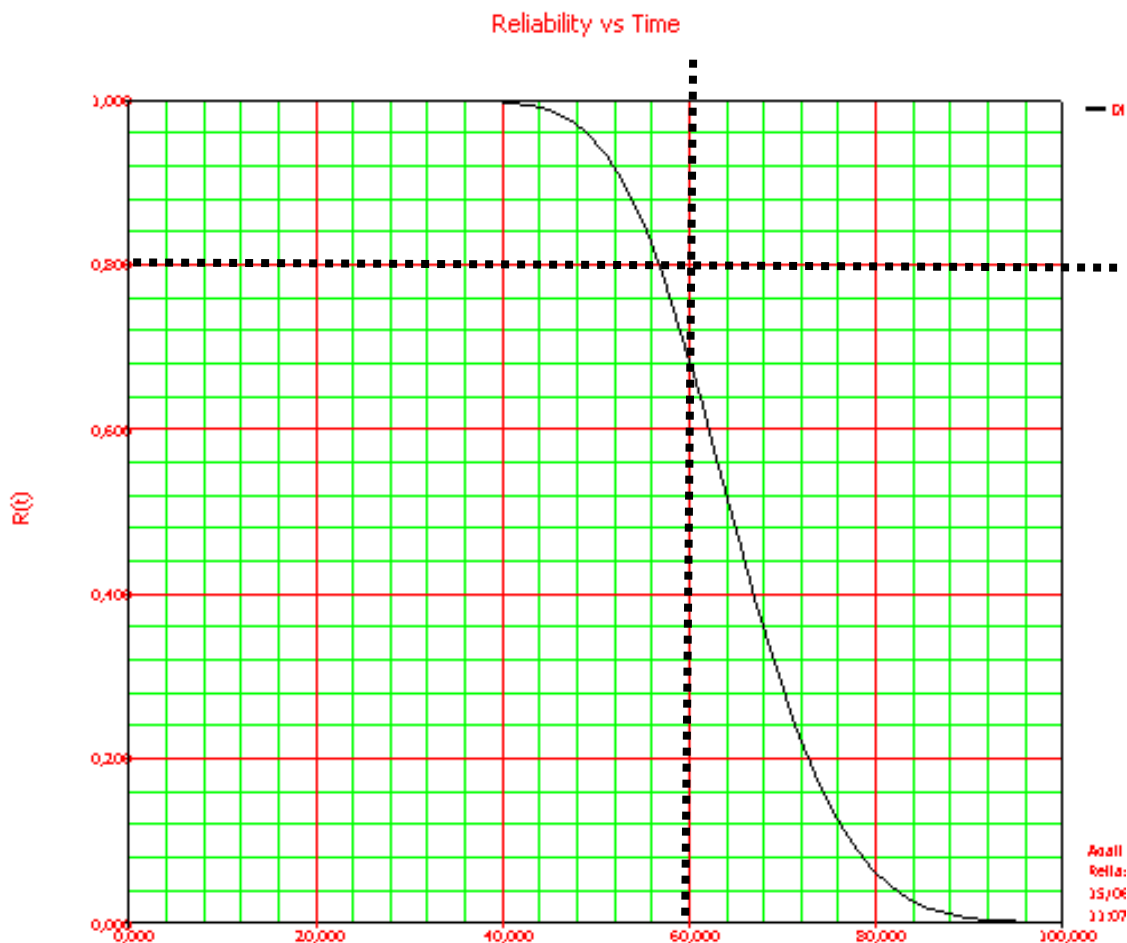


Figura 5.5: Gráfico da confiabilidade do fabricante A, configuração 32/36.



Figura 5.6: Gráfico da confiabilidade do fabricante B, configuração 32/36.

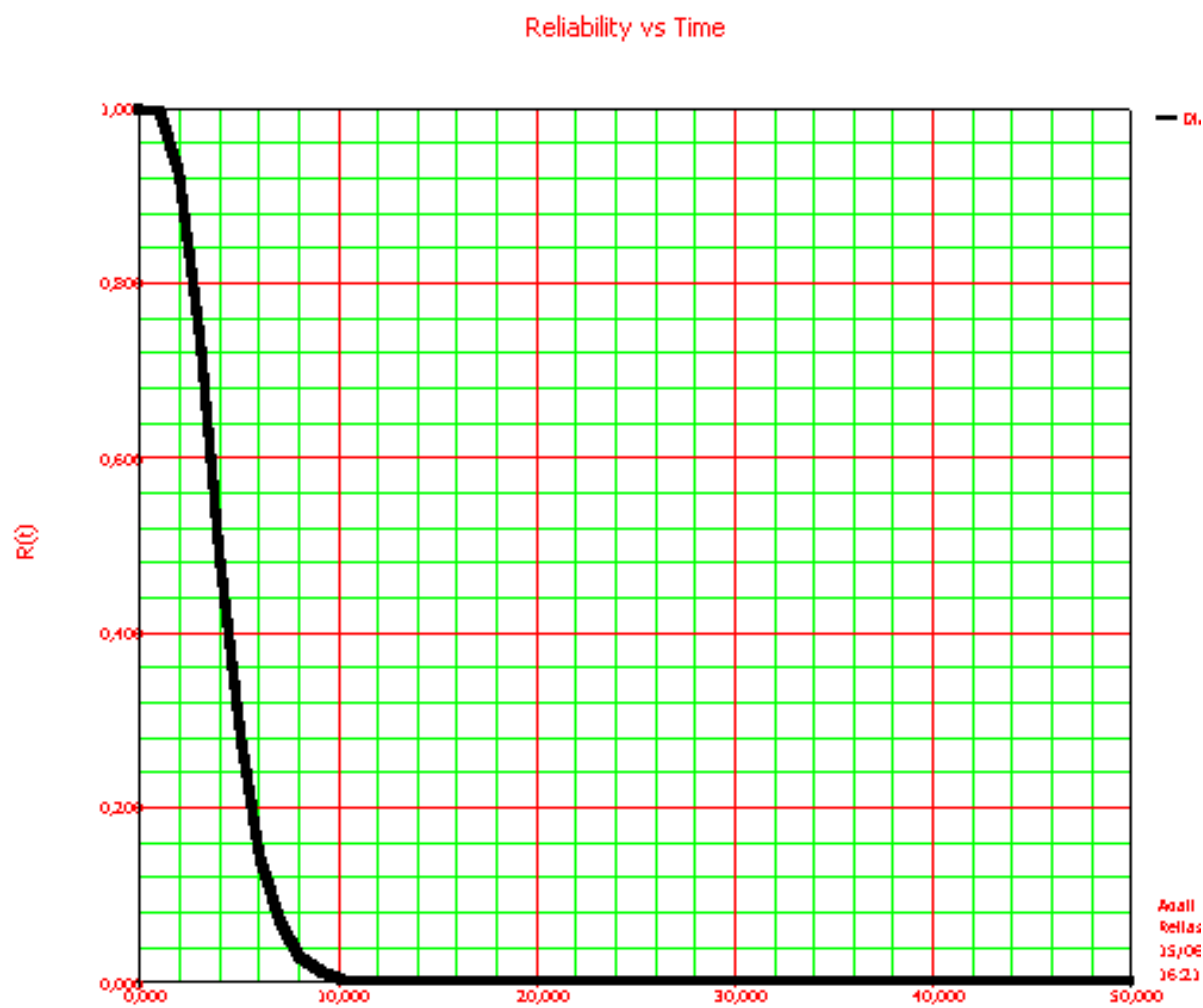


Figura 5.7: Gráfico da confiabilidade x tempo da recondicionado C, configuração 32/36.

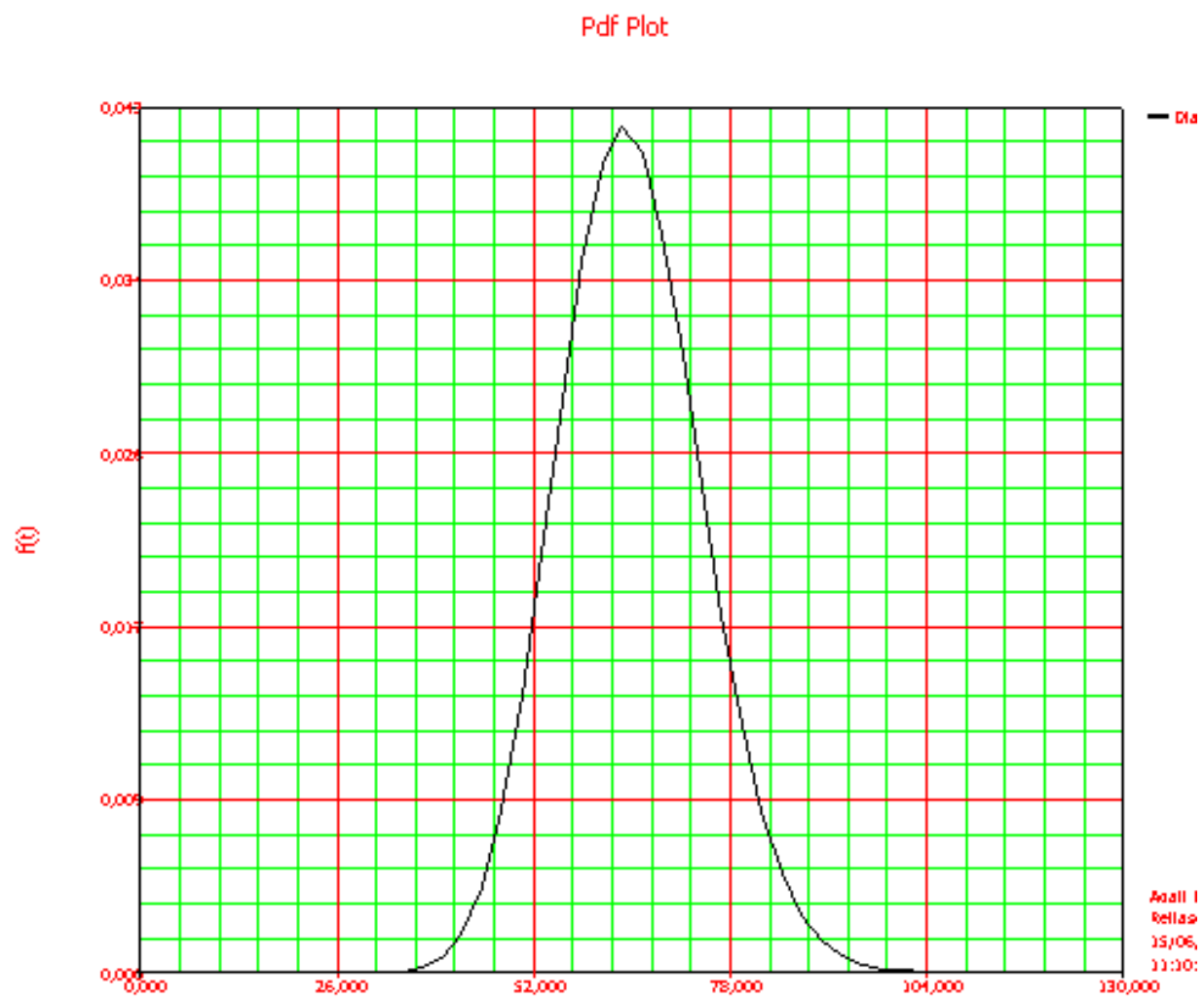


Figura 5.8: Gráfico da pdf x tempo para fabricante A, configuração 32/36.



Figura 5.9: Gráfico da pdf x tempo para fabricante B, configuração 32/36.

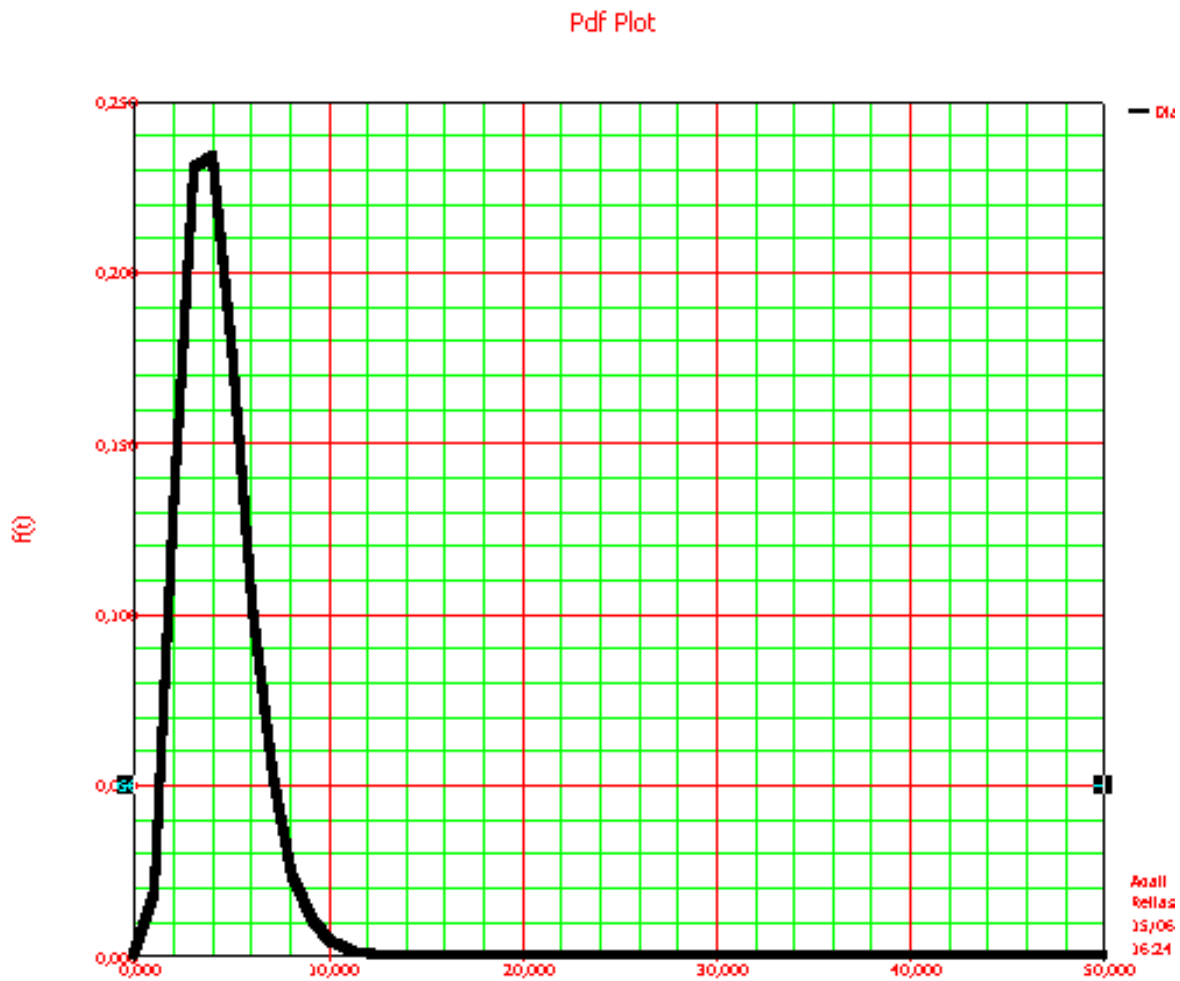


Figura 5.10: Gráfico da pdf x tempo para recondicionada C, configuração 32/36.

5.3.3.3 Tabelas

Tabelas dos resultados da confiabilidade para as várias resistências, considerando os mesmos períodos em semanas. Foram feitas as considerações de 27/36; 30/36; 32/36 resistências boas no total de 36, para os fabricantes A e B e recondicionada C, apresentados na tabela 5.13 e 5.14.

Tabela 5.13 : valores da confiabilidade obtidos do BlockSim para o fabricante A.

Semanas (Missão)	32/36	30/36	27/36
78	1,3%	8,8%	42%
52	66%	92%	99,65%
40	97%	99,8%	100%
36	99%	99,98%	100%
30	99,96%	100%	100%
25	100%	100%	100%
15	100%	100%	100%
MTTF	56 semanas	64 semanas	76 semanas
Confiabilidade 90%	45 semanas	53 semanas	64 semanas

Tabela 5.14 : valores da confiabilidade obtidos do BlockSim para o fabricante B.

Semanas (Missão)	32/36	30/36	27/36
78	-	-	- %
52	-	-	- %
40	10%	30%	80%
36	40%	74%	97%
30	87%	98%	99,98%
25	99,30%	99,97%	100%
15	100%	100%	100%
MTTF	35 semanas	38 semanas	43 semanas
Confiabilidade 90%	29 semanas	33 semanas	38 semanas

Os valores da confiabilidade para as resistências recondicionadas C, foram desprezíveis para os períodos em semanas considerados.

5.4 – Análise dos Resultados

No presente trabalho é apresentado a análise dos resultados obtidos do processamento dos dados de falhas e suspensões no programa Weibull++ e configurações dos blocos nos vários arranjos em paralelo no programa BlockSim, considerando as resistências dos fabricantes A,B e reconduzidas C .

5.4.1- Elemento Resistivo A

- Nos dados de confiabilidade obtidos do programa Weibull++, para o fabricante A, a distribuição apropriada para os dados sugerida pelo programa foi a Weibull de três parâmetros, o que implica uma vida mínima onde a probabilidade de falha durante a mesma pode ser desconsiderada. No caso o valor calculado foi de aproximadamente 16 semanas.
- O parâmetro de forma β encontrado foi próximo de 2, conforme tabela 5.11, o que caracteriza uma distribuição do tipo lognormal ($1 < \beta < 3,4$) ou de Rayleigh. A distribuição pode ser observada no gráfico da *pdf* na figura 5.3. Também no gráfico da figura 5.2, pode ser observado que a taxa de falha é crescente de forma constante.
- A vida característica η estimada foi de aproximadamente 110 semanas, o que caracteriza que aproximadamente 63% das ocorrências de falhas ocorrem neste período. A MTTF calculada foi 112 semanas, que corresponde à vida média da população.
- A confiabilidade para o período de 78 semanas (aproximadamente um ano e meio), considerando uma resistência individual, no caso do fabricante A, foi de 72% e de

90% para o período de 52 semanas (aproximadamente 1 ano). Os dados de confiabilidade no tempo podem ser obtidos no programa Weibull++ através do módulo *QCP* ou através da análise do gráfico correspondente. No caso através do gráfico apresentado na figura 5.1.

- Nos dados de confiabilidade obtidos através do programa BlockSim, onde é considerada a análise conjunta do grupo de resistências, no caso em paralelo e na configuração K-em-N, para o fabricante A. Na configuração de 32 resistências boas em 36 que é conservadora, conforme mencionado anteriormente, a confiabilidade calculada para a missão de 78 semanas foi mínima e para a missão de 45 semanas foi de 90%.
- Considerando a configuração mais desfavorável para o processo e mais conservadora para a combinação de K-em-N, no caso, de 27 boas em 36 a confiabilidade encontrada conforme tabela 5.13 foi 42% para 78 semanas e de 100% para 45 semanas. Os valores da MTTF e da confiabilidade para um intervalo de confiança de 90%, apresentados na tabela 5.13, permitem concluir que quanto menos exigentes for a configuração K-em-N, maior a confiabilidade e a MTTF.

5.4.2 - Elemento Resistivo B

- Nos dados de confiabilidade obtidos do programa Weibull++, para o fabricante B, a distribuição apropriada para os dados sugerida pelo programa foi a Weibull com dois parâmetros, β e η o que implica inexistência de vida mínima.
- O parâmetro de forma β encontrado foi próximo de 4, o que caracteriza uma distribuição do tipo normal ($\beta > 3,4$), conforme pode ser observado no gráfico da

pdf na figura 5.3 e tabela 5.11. No gráfico da figura 5.2, pode ser observado que a taxa de falha é crescente exponencialmente a partir de dado período de tempo, o que é uma característica importante para determinação do intervalo ótimo para substituição preventiva do elemento resistivo.

- A vida característica η estimada foi de aproximadamente 59 semanas, o que caracteriza que aproximadamente 63% das ocorrências de falhas ocorrem neste período. A MTTF calculada conforme apresentada na tabela 5.12 foi 54 semanas, que corresponde à vida média da população.
- A confiabilidade calculada para o período de 78 semanas (aproximadamente um ano e meio), considerando uma resistência individual, no caso do fabricante B, foi desprezível e de 90% para o período de 35 semanas. Os dados de confiabilidade no tempo podem ser obtidos no programa Weibull++ através do módulo *QCP* ou através da análise do gráfico da figura 5.1.
- Nos dados de confiabilidade obtidos através do programa BlockSim, para o fabricante B. Na configuração de 32 resistências boas em 36, a confiabilidade calculada para a missão de 78 semanas foi mínima e para a missão de 29 semanas foi de 90%.
- Considerando a configuração mais desfavorável para o processo e mais conservadora para a combinação de K-em-N, no caso, de 27 boas em 36 a confiabilidade encontrada conforme tabela 5.14, foi 80% para 40 semanas e de 100% para 29 semanas.

5.4.3 - Elemento Resistivo recondicionado C

- Nos dados de confiabilidade obtidos para as resistências recondicionadas C, a distribuição sugerida pelo programa foi a Weibull com dois parâmetros, β e η o que implica inexistência de vida mínima γ .
- O parâmetro de forma β encontrado foi de 1,1077 o que caracteriza uma distribuição do tipo exponencial ($\beta \cong 1$), com falhas do tipo aleatórias, impossibilitando a definição de um período ótimo para manutenção preventiva do tipo sistemática.
- A vida característica η estimada foi de aproximadamente 25 semanas, o que caracteriza que aproximadamente 63% das ocorrências de falhas ocorrem neste período. A MTTF calculada foi 23 semanas, que corresponde à vida média da população.
- A confiabilidade calculada para o período de 78 semanas (aproximadamente um ano e meio), considerando uma resistência individual, no caso de C, foi desprezível e de 90% para o período inferior a 15 semanas. Os dados relativos a confiabilidade no tempo podem ser obtidos no programa Weibull++ através do módulo *QCP* ou através da análise do gráfico correspondente, conforme já mencionado anteriormente.
- Todos os dados de confiabilidade obtidos através do programa BlockSim, para C, nas diversas configurações e missões de 15 a 78 semanas foram desprezíveis, caracterizando a aleatoriedade das falhas. O MTTF para a configuração de 27 boas em 36 foi de 13 semanas. Os dados estão apresentados na tabela 5.15.

6. Conclusões e Recomendações

6.1 Conclusões

- A análise comparativa dos dados entre os fabricantes A e B e recondicionada C, levando em consideração somente o aspecto confiabilidade (no presente trabalho não foi considerado outros aspectos como o custo de compra, recuperação e de substituição) permite concluir que o elemento resistivo do fabricante A é o que apresenta maior confiabilidade individualmente e associado em paralelo nas configurações estudadas. A vida mínima apresentada por A, no caso de 16 semanas é uma característica importante que deveria ser apresentada pelas demais resistência.
- O valor de Beta próximo a quatro (3,8598), apresentado pelo fabricante B conforme tabela 5.11 é uma característica que determina a concentração das falhas e permite fazer uma melhor previsibilidade da ocorrência das mesmas. Portanto apesar do fabricante B haver apresentado uma confiabilidade inferior ao fabricante A para o período observado, significa que o mesmo possui um potencial de melhoria, apresentando uma vida mínima e vida característica maior conforme pode ser observado nos gráficos das figuras 5.3 e 5.9.
- Os dados de confiabilidade obtidos para as resistências recondicionadas C, para os períodos considerados, foram desprezíveis. O fato implica na impossibilidade da previsão de troca por manutenção preventiva sistemática para as mesmas. Somente uma avaliação associada da confiabilidade com os custos envolvidos permitiriam decidir pela recuperação das resistências o que foge do propósito deste trabalho.

- Levando em consideração as premissas de troca das resistências a cada 78 semanas (intervalo para overhaul) e a condição conservadora, do ponto de vista do processo, de 32 resistências boas em 36, para um intervalo de confiança de 90%, os elementos resistivos estudados não atendem a esta especificação.
- De acordo com a análise dos resultados, o intervalo de manutenção (troca das resistências preventivamente) sugerido para o fabricante A é de 45 semanas. Para o fabricante B de 30 semanas e para a resistência recondicionada C, não é possível sugerir um período para a manutenção preventiva sistemática.
- A metodologia utilizada para selecionar um melhor componente dentre vários levou a concluir que pode ser aplicada perfeitamente a sistemas mais complexos e até mesmo modelar unidades inteiras de produção com o objetivo de calcular a confiabilidade, a manutenibilidade e a disponibilidade dos mesmos. A aplicação da metodologia utilizada no estudo de caso certamente será de grande utilidade para engenheiros do setor de confiabilidade das empresas.

6.2 Recomendações

Durante a construção deste trabalho de dissertação, perceberam-se idéias de oportunidades em vários assuntos, que poderiam ser temas ou integrarem futuros trabalhos. Seguem-se algumas das idéias percebidas:

- Elaboração de estudo semelhante calculando a confiabilidade das resistências através dos diversos programas disponíveis, comparando os resultados e metodologias de cálculo entre os programas apresentados;
- Ampliar o presente estudo realizando simulações com o objetivo de determinar as características de uma resistência que possa vir a ser mantida nos intervalos de tempos considerados ideais. Determinando os parâmetros de forma, vida mínima e vida característica, levando em consideração também os custos envolvidos;
- Ampliar o presente estudo modelando com diagrama de blocos de confiabilidade todo o sistema produtivo da planta de lingotamento da Alumar, contemplando as sub-estações, as balanças, as pontes rolantes, os derramadores de cadinhos, fornos de espera, calhas de vazamento, máquinas Gautschis e empilhadeiras. Com o objetivo de calcular a confiabilidade, a manutenibilidade e a disponibilidade do sistema;
- Pesquisar para a área de manutenção, índices *benchmarking* que traduzam os valores de confiabilidade para cada unidade produtiva.

Referências Bibliográficas

Abernethy, R.B., *The new Weibull handbook* , 4th edition, Palm Beach, 2000, 309p.

Alcoa. *Guia de Bolso do ABS - Alcoa Business System*, São Paulo , 2000, 52p.

Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, NBR-5462; *Confiabilidade – Terminologia* - Rio de Janeiro, 1981, 17p.

Black, J.T., *O Projeto da Fábrica com Futuro*. Porto Alegre: Bookman , 2001, 288p.

Bowen, H.K., Spear, S. *Decoding the DNA of The Toyota Production System* – Harvard Business Review – September-October 1999.

Branco Filho, G., RCM – *Manutenção Centrada em Confiabilidade*. In: VI Curso de Gerência de Manutenção, Rio de Janeiro. 2000.

Campos, V.F., *TQC: controle da qualidade total (no estilo japonês)*. Belo Horizonte: Fundação Christiano Ottoni, 1992, 274p.

Castro, D. A., Confiabilidade, mitos e realidades. In: Congresso Brasileiro de Manutenção. 1997, São Paulo. Anais... Rio de Janeiro: Abraman, 1997.

Cavalca, K. L., *Confiabilidade em Engenharia*. Apostila da Disciplina IM461 , Campinas 1998, 110p.

- Lloyd, D.K e Lipow, M., - *RELIABILITY: Management, Methods and Mathematics* Milwaukee, WI, Prentice-Hall/ ASQC, 1989, 589p.
- Davis, M.M., Aquilano N.J., Chase R.B. *Fundamentos da Administração da Produção* - 3ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2001, 598p.
- Day Jr., J., *Strategy to Achieve World-Class Production Through Reliability* – disponível em http://www.reliabilityweb.com/articles/alumax_reliability.htm acessado em 01/02/2003.
- Dodson, B., *Weibull analysis*, Milwaukee, USA: ASQC Quality Press, 1994, 256p.
- Ebeling, C.E., *An introduction to reliability and maintainability engineering*, New York: McGraw-Hill, 1997, 486p.
- Fleming, P.V., Oliveira, S.R.R., *Considerações Sobre a Implementação Conjunta de TPM e MCC na Indústria de Processos*. 12º Congresso Brasileiro de Manutenção – Abraman, 1997.
- Freitas, M.A., Colosimo, E.A., *Confiabilidade: Análise de Tempo de Falha e Testes de Vida Acelerados*. Belo Horizonte: Azul Computação Gráfica Ltda, 1997, 303 p.
- Ghinato, P., *Sistema Toyota de Produção; mais do que simplesmente just-in-time*. EDUCS, Porto Alegre 1996, 209p.
- Hayes, R.H., Wheelwright, S.C. *Restoring Our Competitive Edge: Competing Through Manufacturing*. New York: Wiley, 1984, 323p.
- Heizer, J. Barry, R., *Administração de Operações – Bens e Serviços* - 5ª ed. Rio de Janeiro, LTC , 2001, 647p.
- Ishikawa, K., *Controle de Qualidade Total; à maneira japonesa*. Rio de Janeiro, Ed.Campus, 1993, 247p.

- Kardec, A., Nascif, J., *Manutenção Função Estratégica – Rio de Janeiro*, QualityMark 2000, 287p.
- Kececioglu, D., *Reliability Engineering Handbook* Vol. 1, New Jersey: Prentice-Hall, 1991, 688p.
- Kelly, A., *Maintenance organization & systems – Business-Centred-Maintenace* , Great Britain: Butterworth Heimemann, 1997, 280p.
- Lafraia, J.R.B., *Manual de Confiabilidade, Manutenibilidade e Disponibilidade*, Rio de Janeiro: Qaulitymark, 2001, 374p.
- Life data Analysis Reference – *Weibull ++ Version 6* – Reliasoft Publishing 2002.
- Lipson, C., Sheth, J.N., *Statistical Design and Analysis of eengineering experiments* -New York, McGraw- Hill 1973, 518p.
- Malcolm, J., *TPM. Works Management*. Horton Kirby. Aug. 2001. vol.54. iss 8. p.41, U.K.
- Mirshalka, V. Olmedo, N., *TPM à moda brasileira*. São Paulo: Makron Books, 1994, 330p.
- Monchy, F., *A Função Manutenção - Formação para a gerência da manutenção industrial* - São Paulo: Ebras/Durban, 1989, 424p.
- Moore,R. Rath, R., “Combining TPM and RCM”SMRP: case study – disponível em http://www.smrp.org/vl/case_study/rem1.html - acessado em 26/07/02
- Moras, F.C., *Metodologia para Implementação do Modelo Markoviano em Análise Confiabilística de Sistemas* Unicamp-Campinas 2002, 116p . Tese (Mestrado)

- Morais, V. O., TPM – Manutenção Produtiva Total: Aplicação Prática na Refinaria da Alumar, Abraman- São Paulo 1993.
- Moubray, J., *Reliability-centered Maintenance(RCM) Manutenção centrada em Confiabilidade*– edição brasileira – Grã Bretanha: Aladon/Biddles, 2000, 426p.
- Mojena, M.A.R., *Análise e Redução de Estruturas em Confiabilidade* Campinas ; Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1999, 158p Tese (Mestrado)
- Nagao, S.K., *Workshop manutenção melhores práticas*, São Paulo, IMAN, 2001.
- Nakajima, S., *Introdução ao TPM – Total Productive Maintenance*. São Paulo: IMC , 1989, 322p.
- Nelson, W., *Applied Life Data Analysis*. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1982,634p.
- Neto, J.A ., *Manufatura Classe Mundial - Conceitos, Estratégias e Aplicações* , São Paulo Atlas 2001, 230p.
- Nowlan, F.S.; Heap, H.F., *Reliability Centered Maintenance*. National Technical Information Service, USA, report n.AD/A066-579, 1978.
- O'Connor, P. D. T., *Reliability Engineering* New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1988, 305p.
- Ohno, T., *O Sistema Toyota de Produção : além da produção em larga escala*.Porto Alegre: Bookman, 1997, 288p.
- Pagès, A., Gondran,M., *Fiabilité des Systèmes* Paris Editions Eyrolles 1980, 323 p.
- Pallerosi, C.A ., *Confiabilidade Conceitos Básicos e métodos de cálculo*, São Paulo, 2000, 280p.

_____. *Confiabilidade A quarta dimensão da qualidade - Confiabilidade de sistemas* – São Paulo , Reliasoft Brasil , 2001, 132p.

Reliasoft Publishing , *BlockSim User's Guid* , 2002.

Reliasoft Publishing , *Weibull ++ V.6.0. User's Guid* , 2002.

Revista Exame, edição de 03 de abril de 2003. *O Escritório Enxuto*. Ed. Abril, São Paulo

Revista Exame, edição de 09 de janeiro de 2002. *Uma questão de Valor*. Ed. Abril, São Paulo

Revista Exame, edição de 17 de dezembro de 2001. *Eu Sou Normal*. Ed. Abril, São Paulo

Sekine, K.; Arai, K. ,*TPM for the lean factory – Inovative methods and woksheets for equipment managment* . Portland,Or: Productivity Press, 1998,322p.

Schonberger, R.J., *World Class Manufacturing: the next decade*. Free Press 1988, 329p.

Shingo, S., *Sistemas de Produção com Estoque Zero, O Sistema Shingo para Melhorias Contínuas*. Porto Alegre, Bookman, 1996, 288p.

Shingo, S., *O sistema Toyota de Produção do Ponto de Vista da Engenharia de Produção*. 2ª ed. Reimpressão 2002, Porto Alegre, Bookman 2002, 291p .

Slack, N. et al., *Administração da Produção*. São Paulo: Atlas, 1997, 726p.

Smith, A.M., *Reliability Centered Maintenance*. California-USA: McGraw-Hill, 1992, 216p.

Sotslov, B., *Fundamentos de La Teoria y Del Calculo de Fiabilidad*. Moscou: Editorial Mir, 1972, 263p.

Viscosa, R.R., *Up the Reliability Ladder To World Class* - disponível em <http://www.mt-online.com/articles/06-98mr.cfm> - 1998, acessado em 14/11/2002.

Williamson, R.M., TPM: An Often Misunderstood Equipment Improvement Strategy – disponível em <http://www.mt-online.com/current/04-00tpm2.html> - acessado em 24/11/02.

Willis, R., *Comparision of Reliability-Availability Mission Simulators*- 2000 – disponível em <http://www.sre.org/pubs/simul8a.doc> - acessado em 11/09/2002.

Anexo

Fotografias dos fornos e resistência



Fotografia 1: Forno de Espera



Fotografia 2: Elementos Resistivos Metálico-Cerâmico