

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA

**“METODOLOGIA PARA GARANTIA DA CONFIABILIDADE
NO DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS MECATRÔNICOS”**

Tese submetida à

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

Para a obtenção do grau de

DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA

VICENTE MACHADO NETO

Florianópolis, 10 de Maio de 2002.

Biografia do autor

Vicente Machado Neto é nascido em Curitiba – Paraná, filho de Edilberto Cordeiro Machado e Nilda Lima Machado. A sua família por parte de pai tem toda uma história construída no campo jurídico, sendo o seu pai Promotor Público do Estado do Paraná.

Formou-se Técnico em Eletrônica pelo Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná em 1978.

Engenheiro Eletricista pela Universidade Federal do Paraná em 1984.

Especializou-se em Análise de Sistemas, Informática Industrial e Teleinformática e Redes de Computadores.

Trabalhou durante 5 anos no Instituto de Tecnologia do Paraná, nas áreas de ensaios, metrologia e desenvolvimento de produtos eletrônicos microprocessados.

Atuou como empresário entre os anos de 1990 e 1998, no desenvolvimento de painéis eletrônicos, tendo duas patentes de modelos de invenção requeridas.

Desde 1992 leciona no Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná no departamento de eletrônica. No qual já ministrou as disciplinas de Introdução à Eletrônica, Medidas Elétricas II, Técnica de Pulso e Circuitos Elétricos II.

A partir de 1998 dedicou-se exclusivamente aos estudos de doutorado na Universidade Federal de Santa Catarina, na área de metrologia onde tinha adquirido maior experiência profissional.

Maiores detalhes podem ser obtidos em <http://pessoal.cefetpr.br/vmachado>.

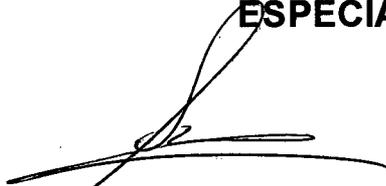
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA

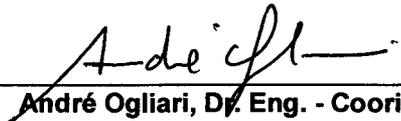
“METODOLOGIA PARA GARANTIA DA CONFIABILIDADE
NO DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS MECATRÔNICOS”

VICENTE MACHADO NETO

Esta Tese foi julgada adequada para a obtenção do título de
DOUTOR EM ENGENHARIA
ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA

sendo aprovada em sua forma final.

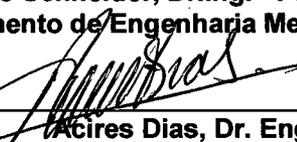

 Carlos Alberto Schneider, Dr. Ing. - Orientador
 Dep. de Eng. Mecânica – UFSC


 André Ogliari, Dr. Eng. - Coorientador
 Dep. de Eng Mecânica – UFSC

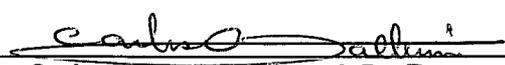

 José Antônio Bellini da Cunha Neto, Dr.
 Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
 Centro Tecnológico / UFSC

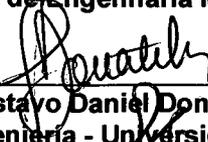
BANCA EXAMINADORA

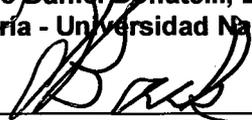

 Carlos Alberto Schneider, Dr. Ing. - Presidente da Banca
 Departamento de Engenharia Mecânica – UFSC


 Acires Dias, Dr. Eng.
 Departamento de Engenharia Mecânica – UFSC


 Alvaro J. Abackerli, Dr. Eng.
 Faculdade de Engenharia Mecânica e de Produção – UNIMEP


 Carlos Amadeu Pallerosi, Dr. Eng.
 Faculdade de Engenharia Mecânica – UNICAMP


 Gustavo Daniel Donatelli, Dr. Eng.
 Facultad de Ingeniería - Universidad Nacional dei Comahue


 Nelson Back, Ph.D.
 Departamento de Engenharia Mecânica – UFSC

Agradecimentos

Aos meus pais, Edilberto e Nilda que me deram a oportunidade de estar aqui, sempre aprendendo nesse longo caminho da vida.

À Nilza, Déborah e Marcus Vinícius, nosso refúgio familiar, pelo incentivo constante, paciência e companheirismo nessa jornada.

Aos meus avós maternos, pelo aprendizado inestimável, que antes de tudo foi inspirador.

Aos meus amigos, que cada qual com suas características, proporcionaram um convívio enriquecedor, com uma grande troca de sentimentos e conhecimentos.

Aos meus alunos, aos quais busco, além de ensinar, transmitir inspiração para suas vidas.

Aos meus queridos professores, que com tanta dedicação compartilharam os seus conhecimentos. Em especial nesse trabalho aos professores Carlos Alberto Schneider e André Ogliari, pela confiança e orientação.

Ao Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná – CEFET – PR, Departamento de Eletrônica pela dispensa para cursar o doutorado.

À Fundação CERTI - Centros de Referência em Tecnologias Inovadoras, pela infraestrutura disponibilizada em especial ao Centro de Inovação em Produtos – CIPd.

À Olga M.R da Rosa da Fundação CERTI que sempre esteve pronta a nos atender, aliviando grande parte das nossas angústias nos momentos difíceis.

A Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Departamento de Engenharia Mecânica e Laboratório de Metrologia e Automação – Labmetro, pela oportunidade de desenvolver esse trabalho.

A CAPES pela bolsa de estudos que financiou minhas despesas.

Esse trabalho é um pouco de cada um de vocês.

Sumário

Sumário	v
Lista de Siglas	x
Lista de Símbolos	xiii
Resumo	xiv
Abstract	xvi

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO _____ **1**

1.1	Áreas do conhecimento envolvidas	3
1.2	Visão geral do trabalho	3
1.2.1	Problemática da confiabilidade no desenvolvimento de produtos mecatrônicos	3
1.2.2	Objetivos do trabalho	5
1.2.3	Como o trabalho foi desenvolvido	6
1.2.4	Estrutura do trabalho	8
1.3	Terminologia usada no estudo	9

CAPÍTULO 2

CARACTERÍSTICAS E EVOLUÇÃO DAS

ÁREAS DE ABRANGÊNCIA DO TRABALHO _____ **10**

2.1	Confiabilidade	10
2.1.1	Definições de confiabilidade	10
2.1.2	Histórico da confiabilidade	12

2.1.3	Confiabilidade x Qualidade _____	15
2.2	Produtos mecatrônicos _____	18
2.2.1	Características e tendências dos produtos mecatrônicos _____	21
2.3	Metodologias de projeto e de desenvolvimento de produtos _____	23
2.3.1	Metodologia da fundação CERTI _____	26
2.3.2	Análises das metodologias de projeto _____	28
2.4	Estudos para a confiabilidade no desenvolvimento de produtos _____	29
2.4.1	Projeto para a confiabilidade _____	29
2.4.2	Processo SURGE – O melhoramento da confiabilidade baseado no tempo de lançamento ao mercado _____	31
2.4.3	Abordagem moderna para melhoramento da confiabilidade do produto _____	33
2.4.4	Análise dos trabalhos apresentados _____	35
2.5	Ensaio para a confiabilidade _____	36
2.6	Principais considerações bibliográficas _____	38

CAPÍTULO 3

PRÁTICAS DE GARANTIA DA

CONFIABILIDADE NAS EMPRESAS DE PRODUTOS

<i>MECATRÔNICOS _____</i>	<i>41</i>	
3.1	Acompanhamento do desenvolvimento de um produto _____	42
3.1.1	Desenvolvimento do projeto Escrow _____	42
3.1.2	Principais ensaios planejados e acompanhados _____	46
3.2	Avaliação do desenvolvimento de projetos nas empresas _____	49
3.2.1	Metodologia de confrontação _____	49
3.2.2	Programação da visita _____	53
3.2.3	Perfil das empresas de produtos mecatrônicos estudadas _____	54
3.2.4	Resultados da aplicação da metodologia de confrontação _____	56
3.2.5	Avaliação gerencial da infra-estrutura e operacional da empresa _____	59
3.2.6	Avaliação da metodologia _____	59
3.3	Principais considerações práticas _____	63

CAPÍTULO 4

O PROCESSO DA CONFIABILIDADE

DENTRO DA EMPRESA, DA ALTA GERÊNCIA AO

PRODUTO FINAL	65
4.1 Aspectos gerenciais da confiabilidade	66
4.1.1 Políticas de confiabilidade da empresa	66
4.1.2 Programas de confiabilidade	67
4.1.3 Organização para a confiabilidade	68
4.2 Aspectos de infra-estrutura da confiabilidade	69
4.2.1 Equipe de projeto	70
4.2.2 Fontes de informação	71
4.2.3 Laboratórios	72
4.2.4 Ferramentas de desenvolvimento de produtos	74
4.2.5 Metrologia	74
4.2.6 Processos de manufatura	75
4.2.7 Controle da qualidade da produção	77
4.2.8 Rede de assistência técnica	78
4.2.9 Banco de dados de projetos	79
4.3 Aspectos operacionais da confiabilidade	80

CAPÍTULO 5

METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO

DE PRODUTOS COM ÊNFASE NA CONFIABILIDADE	81
5.1 Diretrizes da metodologia MEGACOM	81
5.2 Recursos básicos	83
5.2.1 Documentos	83
5.2.2 Ferramentas	85
5.2.3 Ensaios	87
5.3 Metodologia para garantia da confiabilidade no desenvolvimento de produtos mecatrônicos - MEGACOM	87

5.3.1	Visão geral da metodologia	88
5.3.2	Projeto informacional	88
5.3.3	Projeto conceitual	93
5.3.4	Projeto preliminar eletro-eletrônico	95
5.3.5	Projeto preliminar mecânico	99
5.3.6	Projeto preliminar software	102
5.3.7	Projeto detalhado	104
5.3.8	Produção	107
5.3.9	Suporte e utilização do produto	108
5.3.10	Retirada do mercado	109

CAPÍTULO 6

ENSAIOS PARA A GARANTIA DA

CONFIABILIDADE NO DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS

MECATRÔNICOS _____ **111**

6.1	Medições gerais	112
6.1.1	Considerações importantes	112
6.1.2	Planejamento de medições	117
6.2	Planejamento de ensaios de produtos mecatrônicos	119
6.3	Ensaio funcionais	123
6.3.1	Planejamento de ensaios funcionais	124
6.4	Ensaio de materiais	125
6.4.1	Polímeros moldados	127
6.4.2	Ligas metálicas	129
6.4.3	Planejamento de ensaios de materiais	130
6.5	Ensaio para o projeto de parâmetros	130
6.5.1	Tipos de planejamento de experimentos (DOE)	132
6.5.2	Planejamento de ensaios de projeto de parâmetros	133
6.6	Ensaio acelerados	135
6.6.1	Planejamento de ensaios acelerados	136
6.6.2	Estudo de caso de um ensaio acelerado	141

6.7	Ensaaios ambientais	146
6.7.1	Planejamento de ensaios ambientais	147
6.8	Ensaaios de confiabilidade	151
6.8.1	Cr�terios gerais de ensaios	151
6.8.2	Ensaaios de determina�o da confiabilidade (EDC)	152
6.8.3	Ensaaios de conformidade da confiabilidade (ECC)	155
6.8.4	Planejamento de ensaios de confiabilidade	158
6.8.5	Estudo de caso de um ensaio de confiabilidade	159
6.9	Ensaaios de manutenibilidade	166
6.9.1	Medi�o das manuten�es corretivas e preventivas	166
6.9.2	Planejamento de ensaios de manutenibilidade	168
6.10	Ensaaios de manuten�o da confiabilidade da produ�o	171
6.10.1	Planejamento de ensaios de manuten�o da confiabilidade da produ�o	171
6.11	Ensaaios de pr�-envelhecimento	173
6.11.1	Planejamento de ensaios de pr�-envelhecimento	173

CAPÍTULO 7

CONCLUSÕES E CONSIDERA ES

<i>FINAIS</i>	<i>177</i>	
7.1	Confiabilidade pensada desde as fases iniciais do desenvolvimento	178
7.2	Especificidades dos projetos mec�nico, eletr�nico e de software	180
7.3	�nfase nos ensaios	181
7.4	Aspectos metrol�gicos dos ensaios	183
7.5	Aspectos da confiabilidade dentro da empresa	183
7.6	Trabalhos de continuidade	184
7.7	Considera�es finais	186
Bibliografia	187	

Lista de Siglas

SIGLA	SIGLA POR EXTENSO EM INGLÊS	SIGLA POR EXTENSO EM PORTUGUÊS
ADT	Administrative Delay Time	Atrasos devido a fatores administrativos
AGREE	Advisory Group on Reliability of Electronic Equipment	Grupo de auxílio em Confiabilidade de Equipamentos Eletrônicos
ANSI	American National Standard Institute	Instituto de Padrões Nacionais Americanos
CAD	Computer Aided Design	Sistema computacional auxiliar no projeto
CAE	Computer Aided Engineering	Sistema computacional auxiliar na análise de engenharia
CAM	Computer Aided Manufacture	Sistema computacional auxiliar na manufatura
CE	Concurrent Engineering	Engenharia Concorrente
CELTA		Centro Empresarial para Laboração de Tecnologias Avançadas
CEP		Controle Estatístico de Processo
CERTI		Centros de Referências em Tecnologias Inovadoras
CING		Centro de Inovação em Negócios
CIPd		Centro de Inovação em Produtos
CMIP		Centro de Metrologia e Inovação em Processos
CNC	Computer numerical control	Controlador computadorizado
CNEN		Comissão Nacional de Energia Nuclear
CPqD		Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações - Campinas - São Paulo
DDT	Design Defect Tracking	Rastreamento de Defeitos do Projeto
DFR	Design for Reliability	Projeto para Confiabilidade
DFX	Design for X	Projeto para vários enfoques, tais com: manufatura, montagem, confiabilidade, ambiental, modularidade etc.
DoD	Department of Defense	Departamento de Defesa dos EUA
DOE	Design of Experiments	Planejamento de experimentos
DR	Design Review	Revisão de Projeto
DSP	Digital Signal Processor	Processador Digital de Sinais
DTI	Department of Trade and Industry	Departamento de Indústria e Comércio
DTUL	Deflection Temperature Under Load	Temperatura de deflexão sob carga

SIGLA	SIGLA POR EXTENSO EM INGLÊS	SIGLA POR EXTENSO EM PORTUGUÊS
EMC	Eletromagnetic compatibility	Compatibilidade eletromagnética (compatível com o ruído eletromagnético do ambiente)
EMI	Electromagnetic interference	Interferência eletromagnética ou interferência por rádio frequência (RFI)
ETEC		Encontro Técnico de Engenharia da Confiabilidade da Petrobrás
FMCn	Failure mode criticality number	Número crítico de modo de falha
FMEA	Failure Mode and Effects Analysis	Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos
FRACAS	Failure Reporting Analysis & Corrective Action System	Análise dos relatórios de falhas & Sistema de correção de falhas
FTA	Fault tree analysis	Análise da Árvore de Falhas
IEEE	Institute of Electrical and Eletronics Engineers	Instituto de Engenharia Eletro e Eletrônica
INPE		Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IRPS	International Reliability Physics Symposium	Simpósio Internacional da Confiabilidade Física
LDT	Logistics Delay Time	Atrasos devido a fatores logísticos
LIE		Limite inferior extremo
LSE		Limite superior extremo
MA	Maintenance Action	Ação de Manutenção
MDT	Maintenance Downtime	Tempo inoperante do sistema devido à manutenção
MH	Military Handbook	Manual Militar
MIL	Military	Militar
MMH	Mean Maintenance Man-Hours	Tempo Médio de Homens/Hora de Manutenção
MQT	Manufacture Qualification Test	Ensaio de Qualificação da Manufatura
MTA	Maintenance Task Analysis	Análise das Tarefas de Manutenção
MTBD	Mean Time Between Demand	Tempo Médio entre solicitações de Manutenção
MTBF	Mean Time Between Failure	Tempo Médio entre Falhas
MTBM	Mean Time Between Maintenance	Tempo Médio entre Manutenções
MTBMS		Tempo Médio entre Manutenções Programadas (ou preventivas)
MTBMu		Tempo Médio entre Manutenções não Programadas (ou corretivas)
MTBR	Mean Time Between Repair	Tempo Médio entre Reparos
MTFF	Mean Time to First Failure	Tempo Médio para a Primeira Falha
MTTF	Mean Time to Failure	Tempo Médio de Falha
MTTR	Mean Time to Repair	Tempo Médio de Reparo
OH	Operating Hour	Horas de Operação
PCB	Printed Circuit Board	Placa de Circuito Impresso (PCI)
PLD	Programmable logic devices	Dispositivos de lógica programável
PRAT	Production Reliability Acceptance Test	Ensaio de Aceitação da Confiabilidade da Produção
PRIDE	Put reliability in daily efforts	Colocar confiabilidade nas atividades diárias
QFD	Quality Function Deployment	Desdobramento da Função Qualidade
QML	Qualified Manufacturers List	Lista de Fabricantes Qualificados
RAC	Reliability Analysis Center	Centro de Análise da Confiabilidade
RADC	Rome Air Development Center	Centro de Desenvolvimento Aéreo Rome - New York

SIGLA	SIGLA POR EXTENSO EM INGLÊS	SIGLA POR EXTENSO EM PORTUGUÊS
RBD	Reliability Block Diagrams	Diagrama de blocos da Confiabilidade
ROI	Return on investment	Retorno do investimento
ROM	Read only memory	Memória de leitura
RPM	Reliability Program Management	Programa de Gerenciamento da Confiabilidade
RPN	Risk priority number	Número de prioridade de risco
S/N	Signal / Noise	Sinal / Ruído
SAE	Society of Automotive Engineers	Sociedade de Engenharia Automotiva
SEI	Software Engineering Institute	Instituto de Engenharia de Software
SMD	Surface Mount Device	Componente de Montagem na Superfície
SQC	Statistical Quality Control	Controle Estatístico da Qualidade
TQM	Total Quality Management	Gerenciamento da Qualidade Total
UFSC		Universidade Federal de Santa Catarina
UNICAMP		Universidade Estadual de Campinas
UNIMEP		Universidade Metodista de Piracicaba
UQP		Unidade Química de Paulínia
VHSIC	Very high speed integrated circuit	Circuito integrado de altíssima velocidade

Lista de Símbolos

NOMENCLATURA	
LETRAS GREGAS	
LETRA	SIGNIFICADO
α	Risco do produtor
β	Risco do consumidor
μ	Média
β	Parâmetro de Forma Weibull
λ	Taxa de Falha
θ	Parâmetro de Escala da Distribuição de Weibull
θ	Tempo Médio entre Falhas
θ_0	Valor aceitável para o MTBF
θ_1	Valor inaceitável para o MTBF
γ	Parâmetro de Localização Weibull
σ	Desvio Padrão Distribuição Normal
α	Graus de Liberdade
χ^2	Distribuição Qui-Quadrado
$\hat{\theta}$	MTBF estimada
Φ	Função Distribuição Normal

NOMENCLATURA	
LETRAS LATINAS	
LETRA	SIGNIFICADO
\bar{x}	Média das Amostras
p	Porcentagem de Defeituosos
np	Número de Defeituosos
H_0	Hipótese Nula
H_1	Hipótese Alternativa
d	Razão de Discriminação
R	Confiabilidade
A	Disponibilidade
R	Taxa de Êxito
F	Função Distribuição F
n	Tamanho da Amostra
N	Tamanho do Lote
t	Tempo relevante de Ensaio
V	Variância
z	Parâmetro da Dist Normal Normalizada

Resumo

A confiabilidade na sua visão tradicional era vista como um parâmetro a ser medido, após o produto pronto. Normas militares americanas reforçavam esse enfoque.

O presente trabalho aborda a confiabilidade como um parâmetro a ser definido, ainda na fase inicial de projeto. Para isso, o uso de uma metodologia de projeto como a proposta neste trabalho, direciona os esforços de projeto para o enfoque da confiabilidade. A metodologia é baseada em produtos mecatrônicos, ou seja, que envolvem tecnologias mecânicas, eletrônicas e de software.

O trabalho foi desenvolvido sobre uma base teórica, que consistiu na pesquisa do estado da arte da confiabilidade no desenvolvimento de produtos, uma base prática, que consistiu em estudos feitos junto a empresas de produtos mecatrônicos e no acompanhamento do desenvolvimento de um produto mecatrônico.

Sabe-se, no entanto, que a confiabilidade não depende unicamente da aplicação de uma metodologia. Deve existir dentro da empresa todo um ambiente favorável, para que a confiabilidade possa ser disseminada e crescer dentro da organização. Com o intuito de despertar o interesse para os outros aspectos da confiabilidade, uma classificação em aspectos gerenciais, de infra-estrutura e operacionais é feita, sem contudo, entrar em detalhes maiores para não fugir do objetivo do trabalho.

A "Metodologia para garantia da confiabilidade no desenvolvimento de produtos mecatrônicos" - MEGACOM, proposta nesse trabalho, atua nas diferentes fases do projeto propondo tarefas a serem executadas. A confiabilidade deve ser introduzida por meio de pequenas tarefas, a serem executadas nos tempos corretos, ao invés de ações complexas envolvendo diversos parâmetros. As tarefas da metodologia MEGACOM podem ser orientações de pesquisa, definição de parâmetros, uso de determinadas ferramentas e ensaios a serem realizados. Para uma correta documentação e sistematização do desenvolvimento do produto, documentos de

apoio são propostos.

Dentre as ênfases da metodologia e desse trabalho na busca da confiabilidade, destacam-se os ensaios, com a proposição e detalhamento de nove tipos de ensaios a serem aplicados durante o desenvolvimento do produto. Nos ensaios são abordados os aspectos metrológicos para realização de um ensaio tecnicamente correto.

O trabalho se completa com conclusões, recomendações e trabalhos de continuidade para o presente estudo.

Abstract

The reliability in its traditional vision was seen as a parameter to be measured, after the ready product. American military standards reinforced this focus.

The present work approaches the reliability as a parameter to be defined, still in the information project phase. For this, the use of a project methodology as the proposal in this work, addresses the project efforts for the focus of the reliability. The methodology is based on mechatronics products, in another way that involve mechanical, electronics and software technologies.

The work was developed on a theoretical base, that consisted of the research of the state of the art of the reliability in the development of products, a practical base, that consisted of studies facts companies of mechatronics products and in the accompaniment of the development of a mechatronic product.

It is known however, that the reliability doesn't only depend on the application of a methodology. It should exist inside completely of the company a favorable atmosphere, so that the reliability can be disseminated and to grow inside of the organization. With the intention of waking up the interest for the other aspects of the reliability, a classification in managerial aspects, of infrastructure and operational it is done, without however to enter in larger details for not fleeing of the objective of the work.

The " Methodology for warranty of the reliability in the development of mechatronics products " - MEGACOM, proposal in this work, acts in the different phases of the project proposing tasks to be executed. The reliability should be introduced by means of small tasks to be executed in the correct times, instead of complex actions involving several parameters. The tasks of the MEGACOM methodology can be research orientations, definition of parameters, use certain tools and rehearsals to be accomplished. For a correct documentation and order of the development of the

product, support documents are proposed.

Among the emphases of the methodology and this work in the search of the reliability, they stand out the rehearsals, with the proposition of nine types of rehearsals that are applied during the development of the product. In the rehearsals are approached the metrology cares for accomplishment of a correct rehearsal.

The work is finish with conclusions, recommendations and continuity works for the present study.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A confiabilidade está presente no dia a dia das pessoas, mesmo que muitas vezes, quando tudo funciona corretamente, não se atente para a sua importância. A partir do instante que se levanta pela manhã para ir ao trabalho, depende-se de uma série de sistemas, da energia elétrica, da água, do telefone, da rede de distribuição de gás, do canal da emissora de televisão, da infra-estrutura municipal e muitos outros. Interligados aos sistemas maiores, tem-se os subsistemas tais como o rádio relógio para acordar, o chuveiro elétrico para o banho, o aparelho telefônico para ligar ao colega de trabalho, o aparelho de televisão para ver as notícias matutinas, o forno de micro ondas para esquentar o leite, o automóvel e assim por diante. Todos esses sistemas e subsistemas precisam estar operando sem falhas, para que pelo menos uma parte do dia, que vai do momento que se acorda até chegar ao trabalho, ocorra sem problemas.

Caso haja uma interrupção no seu fornecimento de energia, a programação do rádio relógio é perdida e não se consegue chegar ao trabalho no horário, a menos que a pessoa seja prevenida e tenha sistemas alternativos para estas situações.

No caso, a companhia de energia deixou de prover o serviço e pode até dependendo da situação, sofrer além do desgaste da imagem, sanções econômicas por parte dos consumidores. Caso a falha seja no micro ondas (com a energia ativa), talvez não seja tão grave, a ponto de atrasar a chegada ao serviço, mas certamente, haverá uma desconfiança da marca e da próxima compra de eletrodomésticos, evita-se aquela marca.

Caso o micro ondas ainda esteja na garantia, a fábrica certamente, irá ficar com uma

parte do ônus financeiro da falha. Harrington [1] diz que, compra-se pelas características da qualidade que se percebe em um produto e volta-se a comprar e torna-se fiel à marca pela confiabilidade.

Hoje em dia, os consumidores mais atentos dão maior importância à qualidade ao longo do tempo do que à qualidade inicial do produto. O consumidor hoje tem uma visão de longo prazo e não está mais somente preocupado com o custo de aquisição do produto, mas também, com o custo de manutenção ao longo da vida do produto, que pode superar em muito o custo de aquisição. Além dos custos diretos da falta de confiabilidade, que podem ser muito grandes dependendo do produto, existem inúmeros e muitas vezes imponderáveis custos relacionados à perda da imagem da empresa, perdas de oportunidades para o consumidor, com a indisponibilidade do produto e outros. Tudo isso sem falar em produtos onde a falta de confiabilidade envolve riscos de vida, ou de acidentes, onde a importância da confiabilidade é ainda maior.

Uma importante classe de subsistemas que está presente no dia a dia é a dos produtos mecatrônicos, tais como, o micro ondas, o vídeo cassete, a televisão, a impressora, o computador, o aparelho de fax e muitos outros. Os sistemas mecatrônicos unem diferentes tecnologias (mecânica, eletrônica e software) com o intuito de criar produtos com diferentes recursos e funções.

Toma-se como exemplo uma empresa de produtos mecatrônicos cujo custo com os retornos de um produto, dentro do período de garantia de seis meses, seja de 3% do valor do produto. Considerando-se um custo unitário de 500 reais por produto, tem-se 15 reais de custo de garantia por unidade produzida. Para uma produção de 3.000 unidades mês, que é uma quantidade facilmente alcançada por uma empresa que tenha uma participação efetiva em um mercado como o brasileiro (desconsiderando-se as exportações), tem-se um custo anual com garantia de 540 mil reais. Esses custos justificam investimentos em ensaios e programas de melhoria da confiabilidade.

Em vista desse cenário, as empresas que desenvolvem produtos mecatrônicos necessitam de alguma forma, introduzir a confiabilidade em seus produtos de acordo com os requisitos do mercado, sob pena de perderem importante fatia dos seus consumidores. A confiabilidade deve ser introduzida de forma dinâmica e integrada à empresa, já que os níveis de confiabilidade evoluem com o desenvolvimento da

tecnologia. A cada dia o consumidor se habitua com maiores níveis de confiabilidade, sem contudo, precisar pagar a mais por isso.

1.1 ÁREAS DO CONHECIMENTO ENVOLVIDAS

No desenvolvimento desse trabalho que trata da confiabilidade de produtos mecatrônicos várias áreas do conhecimento são envolvidas. Pode-se identificar as principais áreas através da Figura 1-1.

Dentro da área de desenvolvimento de produtos mecatrônicos com confiabilidade, tem-se as tecnologias dos produtos mecatrônicos, nas suas diferentes subáreas mecânica, eletrônica e software e também os ensaios para a confiabilidade que visam, com apoio da metrologia, reforçar a confiabilidade dos produtos mecatrônicos em desenvolvimento.

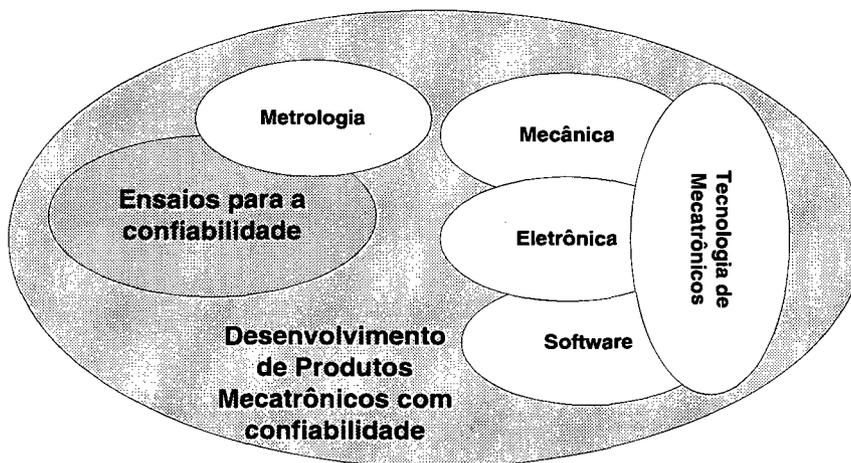


Figura 1-1 – Identificação das áreas envolvidas no trabalho, em destaque para, as áreas que constituem a ênfase do trabalho.

1.2 VISÃO GERAL DO TRABALHO

Este item apresenta em linhas gerais qual a problemática, qual a proposta do trabalho e como o trabalho foi desenvolvido e apresentado.

1.2.1 PROBLEMÁTICA DA CONFIABILIDADE NO DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS MECATRÔNICOS

Pode-se apresentar como principais justificativas para o presente trabalho, os

seguintes fatores:

- a) O aumento da complexidade dos sistemas e qualidade dos componentes resultou em uma mudança das causas de falhas dos componentes, para mais fatores em nível dos sistemas, incluindo manufatura, projeto, requisitos dos sistemas, interfaces e software. Historicamente, esses fatores não eram explicitamente avaliados nos métodos de predição [2]. Para controlar os diversos fatores precisa-se de uma metodologia de desenvolvimento.
- b) A visão tradicional de testar o produto com respeito à confiabilidade após ele estar pronto é antieconômica e leva a atrasos nos cronogramas quando o produto precisa passar por modificações, a partir de deficiências constatadas nos ensaios. Busca-se qual a melhor forma de introduzir a confiabilidade, durante o desenvolvimento de um produto mecatrônico.
- c) As técnicas até então propostas, que tratam da confiabilidade durante o desenvolvimento foram desenvolvidas de forma genérica e portanto, não tratam das especificidades dos produtos mecatrônicos. Os produtos mecatrônicos possuem características que podem ser exploradas para a melhoria da confiabilidade, de forma mais apropriada e com menores custos.
- d) As técnicas e estudos para introdução da confiabilidade, durante o desenvolvimento de um produto, identificam ferramentas e ensaios para a confiabilidade de forma genérica a serem aplicadas ao longo do desenvolvimento do produto. As devidas fases do desenvolvimento para aplicação das ferramentas e ensaios, não são identificadas, tampouco os ensaios foram sistematizados na sua aplicação de forma metrologicamente correta.
- e) É preciso também, entender como a confiabilidade se propaga dentro da empresa, para que uma metodologia seja aplicada de forma apropriada, com todo o suporte necessário. A adoção de uma metodologia em si, não é suficiente para que a empresa passe a ter produtos de melhor confiabilidade. Há que existir todo um suporte construído ao longo de vários projetos e constância na aplicação das diretrizes de confiabilidade.

1.2.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

Vários objetivos são buscados com esse trabalho, alguns são diretamente tratados, outros devido à extensão dos aspectos, são apenas mapeados como forma de situar o leitor e devem fazer parte de futuros trabalhos mais específicos. Assim os principais objetivos do trabalho são:

- a) Pensar na confiabilidade desde as fases iniciais do desenvolvimento, com o auxílio de uma metodologia, reforçando-se os ensaios. Pode-se assim chegar à confiabilidade projetada para o produto. A confiabilidade é um parâmetro do projeto e não um parâmetro que se mede após o produto pronto, pois deve estar incorporada no processo de desenvolvimento. Essa visão substitui a visão passiva da confiabilidade, onde o procedimento era de medir a confiabilidade em ensaios de longa duração, após o produto pronto. Caso a confiabilidade fosse insatisfatória, modificações do projeto precisavam ser feitas;
- b) Abordar em detalhes as especificidades dos projetos eletrônicos, mecânicos e de software, identificando tarefas a serem executadas para uma otimização dos esforços para a confiabilidade. A metodologia MEGACOM é proposta como forma de sistematizar todas essas especificidades. Na apresentação da metodologia ferramentas, documentos e ensaios são propostos como forma de auxiliar o desenvolvimento do produto mecatrônico;
- c) Usar os ensaios como subsídios para a execução das tarefas. Dentro desse contexto, os ensaios também fazem parte dos objetivos do trabalho, onde se busca, primeiramente, identificar os vários tipos de ensaios que podem agregar confiabilidade e posteriormente sistematizar a sua aplicação em projetos mecatrônicos. O objetivo é pensar na confiabilidade no lado experimental, não somente em ensaios de longa duração após o produto pronto, mas sim em ensaios de curta para média duração, para corrigir mecanismos de falha. A mensagem é ensaiar ao longo do desenvolvimento, para evitar erros de projeto. Embora que os ensaios tradicionais de confiabilidade, considerados de fim de linha, também sejam sistematizados.
- d) Identificar os diferentes aspectos metrológicos, aplicados aos ensaios para desenvolvimento de produtos mecatrônicos. Ao longo do detalhamento dos

ensaios as principais incertezas metrológicas devem ser identificadas. É importante que ensaios sejam feitos sabendo-se as incertezas inerentes e que os esforços sejam otimizados, já que ensaios demandam tempo e recursos.

- e) Identificar os principais aspectos que favorecem a confiabilidade dentro das empresas é um dos objetivos do trabalho. Busca-se criar dentro da empresa, um ambiente favorável para que uma metodologia possa ser aplicada e aprimorada ao longo do tempo.

1.2.3 COMO O TRABALHO FOI DESENVOLVIDO

O desenvolvimento do trabalho pode ser dividido basicamente em seis fases:

Fase 1 : Pesquisa bibliográfica. Foram feitas pesquisas sobre produtos mecatrônicos, ensaios, metodologias de projeto, confiabilidade e metodologias direcionadas à confiabilidade. Essa fase desenvolveu-se em paralelo com a fase 2. Esses estudos forneceram as bases bibliográficas do trabalho.

Fase 2 : Acompanhamento da prática de desenvolvimento de um projeto mecatrônico. Essa fase aconteceu dentro da Fundação CERTI (Centros de Referência em Tecnologias Inovadoras) no CIPd (Centro de Inovação em Produtos), acompanhando o projeto Escrow. O projeto Escrow foi desenvolvido para um cliente da CERTI, ligado ao setor de automatização bancária. Um dos principais enfoques desse acompanhamento foram os ensaios realizados nas diferentes fases do desenvolvimento do produto. Durante esse acompanhamento, com auxílio dos conhecimentos adquiridos na fase 1, também foi elaborado um primeiro esboço de uma metodologia (chamada metodologia de confrontação) para desenvolvimento de produtos mecatrônicos com confiabilidade. A metodologia de confrontação continha principalmente, as macro atividades da proposta. Essa fase juntamente com a fase 3, compõe as bases práticas do trabalho.

Fase 3 : Práticas de confiabilidade no desenvolvimento de produtos mecatrônicos nas empresas. Nessa fase com o esboço da metodologia para desenvolvimento de produtos mecatrônicos com confiabilidade

(metodologia de confrontação), visitou-se empresas previamente selecionadas, para confrontação da metodologia com a prática das empresas. Essa fase tinha três objetivos:

- 1) Obter subsídios da prática das empresas e dos seus profissionais especialistas em desenvolvimento de produtos, para refinamento e detalhamento da metodologia, até então numa forma genérica;
- 2) Contribuir para com as empresas participantes do programa, levando até elas, as principais metodologias de desenvolvimento de produtos, assim como, os principais aspectos de uma metodologia para a confiabilidade. Também apontando pontos que poderiam contribuir para a melhoria da confiabilidade dos novos produtos;
- 3) Avaliar a metodologia de confrontação através da comparação com a prática das empresas. Desse objetivo participaram profissionais especialistas em desenvolvimento de produtos mecatrônicos, que avaliaram o cumprimento das tarefas propostas pela metodologia, com a prática de um projeto previamente selecionado da empresa.

Fase 4 : Determinação do processo de confiabilidade dentro das empresas. Essa fase foi elaborada a partir de estudos bibliográficos, do acompanhamento do projeto Escrow e da visita às empresas de produtos mecatrônicos. Tinha por objetivo, determinar quais as principais estruturas organizacionais que dão sustentação à confiabilidade. Durante a visita às empresas, pesquisas foram feitas a respeito da forma de organização das empresas.

Fase 5: Elaboração da metodologia final. Nessa fase com todos os subsídios colhidos dentro da Fundação CERTI, das empresas visitadas e de trabalhos anteriormente desenvolvidos (pesquisa bibliográfica), foi elaborada a metodologia final MEGACOM em todos os seus detalhes.

Fase 6: Sistematização da prática de experimentação. Nessa fase a prática de experimentação foi sistematizada, muito com auxílio da bibliografia e das práticas das empresas, de forma a facilitar o planejamento de ensaios e a sua operacionalização prática. O objetivo é sistematizar a experimentação

para torná-la mais aplicável, compreensível, reprodutível e documentável.

1.2.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Para que os objetivos do trabalho fossem atingidos, o trabalho foi estruturado da seguinte forma:

- O capítulo 1 faz uma introdução ao assunto, desperta o interesse do leitor para os capítulos seguintes e apresenta a metodologia usada no desenvolvimento do trabalho. A problemática, justificativas e objetivos do trabalho são aqui estabelecidos.
- O capítulo 2 trata especificamente da fase 1, faz uma breve revisão bibliográfica com o objetivo de uniformizar conceitos sobre as principais áreas de domínio do trabalho. São estabelecidas as bases bibliográficas sobre as quais o trabalho foi desenvolvido.
- O capítulo 3 trata das fases 2 e 3, apresenta a forma como o trabalho foi conduzido dentro das empresas de produtos mecatrônicos e do estudo de caso projeto Escrow. São estabelecidas as bases práticas sobre as quais o trabalho foi desenvolvido.
- O capítulo 4 trata da fase 4, inicia a contribuição de sistematização do autor, apresentando um panorama geral da confiabilidade dentro da empresa. Busca-se identificar quais são os meios pelos quais a confiabilidade flui dentro da empresa, quais as principais estruturas de apoio, da alta gerência ao nível operacional, passando pela infra-estrutura física necessária.
- O capítulo 5 trata da fase 5, trabalha-se em nível operacional da confiabilidade, ligado ao desenvolvimento de produtos mecatrônicos. Para isto, apresenta-se a metodologia MEGACOM que atuando nas diversas fases do desenvolvimento de um produto, introduz tarefas e ensaios nos devidos tempos, para garantir a confiabilidade do produto final.
- O capítulo 6 trata da fase 6, é portanto dedicado aos diversos tipos de ensaios, que podem ser utilizados durante o desenvolvimento de um produto, para garantir a confiabilidade ao produto final. A ênfase nos ensaios é um dos principais focos do trabalho, o capítulo busca sistematizações para aplicação dos ensaios, também os aspectos metrológicos dos ensaios são abordados.

- O capítulo 7 finaliza o trabalho com sugestões, conclusões e possíveis trabalhos de continuidade a respeito do estudo.

1.3 TERMINOLOGIA USADA NO ESTUDO

A difusão de novas tecnologias necessita que novos termos sejam criados, por vezes, tem-se somente o termo em inglês, sem uma tradução literal para o português.

Mesmo termos já descritos em normas, continuam a serem usados erroneamente. É o caso, por exemplo, do termo “mantenabilidade”, que apesar de definido pela norma NBR 5462 de 1994 como o termo para significar a probabilidade de uma ação de manutenção; ainda assim, o termo “manutenibilidade” continua a ser empregado por muitos, com o mesmo sentido.

Nesse trabalho busca-se, sempre que possível, empregar termos já descritos em normas ou consagrados pelo uso. Assim a consulta à norma NBR 5462[3], sobre a terminologia usada em confiabilidade e mantenabilidade, ou ainda o “Vocabulário internacional de termos fundamentais e gerais de metrologia – VIM [4]”, se farão necessários em alguns itens.

CAPÍTULO 2

CARACTERÍSTICAS E EVOLUÇÃO DAS ÁREAS DE ABRANGÊNCIA DO TRABALHO

Como forma de estabelecer o estado da arte, fase 1 do trabalho, faz-se neste capítulo uma revisão de tendências tecnológicas e conceitos importantes para o estudo, das principais áreas de abrangência do trabalho. Assim são pesquisadas as áreas de confiabilidade, de produtos mecatrônicos, de metodologias de projetos, da confiabilidade aplicada no desenvolvimento de produtos e ensaios.

2.1 CONFIABILIDADE

Para entender o real significado de confiabilidade é preciso, inicialmente, entender todos os aspectos da sua definição. O entendimento passa também, pela compreensão da sua importância no mundo atual e da sua evolução histórica no mundo e no Brasil. Finalizando o item é feita uma comparação entre confiabilidade e qualidade, onde semelhanças e diferenças são discutidas.

2.1.1 DEFINIÇÕES DE CONFIABILIDADE

Confiabilidade é a melhor medida quantitativa da integridade de um projeto, de uma peça, componente, produto ou sistema. Confiabilidade é a probabilidade que peças, componentes, produtos, ou sistemas irão executar suas funções de projeto sem falhas em um ambiente especificado, por um período projetado, com um determinado nível de confiança [5].

Segundo a NBR 5462 [3], confiabilidade é a capacidade de um item desempenhar uma função requerida sob condições especificadas, durante um dado intervalo de tempo.

Uma definição mais formal e completa: “Confiabilidade é a probabilidade condicional, para um dado nível de confiança, que um equipamento irá executar suas funções planejadas satisfatoriamente sem falhas, com limites especificados de desempenho, para uma dada idade, para um intervalo de tempo especificado, ou tempo de missão, quando usado da maneira e para o propósito planejado, enquanto operando de uma maneira específica, sobre uma determinada solicitação ambiental”. Essa é uma excelente definição, que cita todos os aspectos da confiabilidade [BAZOVSKY apud [5]].

Uma definição muito mais simples é, “Confiabilidade é a qualidade ao longo do tempo” [6].

Para software, a confiabilidade é definida como: “A probabilidade de operação sem falhas, de um programa de computador, em um ambiente específico, por um tempo específico” [7].

A definição de Condra [6] na busca da simplificação extrema, tornou-se muito superficial e tenta relacionar duas coisas distintas, que são a confiabilidade e a qualidade. Pode-se verificar pela definição mais completa, que a completa especificação de confiabilidade envolve basicamente sete aspectos:

1. O estatístico que é a probabilidade da ocorrência de uma falha;
2. O nível de confiança que a probabilidade é expressa;
3. O relacionado ao intervalo de tempo, para o qual a probabilidade é estabelecida, também chamada de tempo da missão;
4. A idade ou tempo de vida do produto, pois a probabilidade de falha se altera com a vida;
5. A caracterização do que é considerado como falha, quais os limites de desempenho admitidos;
6. O ambiente de operação, quais as solicitações ambientais que o produto estará sujeito;

7. As condições de uso do produto, qual o ciclo de operação, a carga, a solicitação operacional, ambiental e elétrica que o produto estará sujeito.

Todos os sete aspectos acima citados são fundamentais para a explicitação de um parâmetro de confiabilidade, já que alteram significativamente a confiabilidade.

2.1.2 HISTÓRICO DA CONFIABILIDADE

A confiabilidade como uma disciplina separada, começou nos Estados Unidos na área militar, voltada para produtos eletrônicos. Na época dos anos cinquenta, a disponibilidade¹ operacional dos equipamentos militares, era de apenas 30%.

Algum tempo depois, já na década de 1960, a preocupação com confiabilidade e o aumento notável de falhas em máquinas, essencialmente provocadas pelo desgaste, fez com que a experiência do sucesso com a indústria eletrônica, fosse estendida aos sistemas mecânicos, tanto militares como industriais [8].

A área mecânica, de uma maneira geral, não tem uma metodologia de aplicação da confiabilidade mais definida. Isso se deve a pouca padronização dos seus componentes, por isso, é interessante verificar como a confiabilidade e sua predição evoluíram na área eletrônica, onde a confiabilidade atingiu melhores resultados, devido à forte padronização dos seus componentes.

A Figura 2-1 apresenta os principais fatos do histórico da confiabilidade. O tópico final da figura trata da evolução da confiabilidade no Brasil.

A evolução da confiabilidade propiciou melhorias, tais como:

- Em 1958 somente 28% de todos os lançamentos de satélites obtinham sucesso, em 1991 o índice de sucesso já era de mais de 93% [5].
- Em 1959, as garantias da indústria automobilística eram por um período de 90 dias ou 6.000 km, o que ocorresse primeiro. Já na década de 90 as garantias eram de 7 anos (2555 dias) ou 100.000 km o que ocorresse primeiro [5].

¹ Disponibilidade: Capacidade de um item estar em condições de executar uma certa função, em um dado instante, ou durante um intervalo de tempo determinado, levando-se em conta os aspectos combinados de sua confiabilidade, manutenibilidade e suporte de manutenção, supondo que os recursos externos requeridos estejam assegurados [3].

Época	Principais fatos	Sumário
anos quarenta	<p>Robert Lusser, que trabalhou com os mísseis Alemães V-1, foi um dos primeiros a reconhecer a necessidade da Engenharia da Confiabilidade, como uma disciplina separada [8].</p>	<ul style="list-style-type: none"> • início das pesquisas.
anos cinquenta	<p>Durante a Segunda Guerra Mundial, as válvulas eletrônicas eram os componentes menos confiáveis usados em sistemas eletrônicos. Essa observação levou a formação de grupos de estudo, cujo objetivo era melhorar a confiabilidade desses componentes. Um grupo no início dos anos cinquenta concluiu que :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Havia necessidade de coletar dados de campo; • Melhores componentes precisavam ser desenvolvidos; • Requisitos quantitativos precisavam ser estabelecidos; • A confiabilidade precisava ser verificada por teste, após os componentes estarem em produção de escala industrial; • Um comitê permanente precisava ser constituído, para guiar a disciplina de confiabilidade. <p>Os itens foram implementados através de um grupo de conselho AGREE (Advisory Group on Reliability of Electronic Equipment - AGREE), cuja função era identificar ações a serem tomadas, para prover maior confiabilidade aos equipamentos eletrônicos.</p> <p>Naquela época, estruturou-se a disciplina de engenharia da confiabilidade. Logo se tornou claro que, aquela disciplina emergente estava usando muitos métodos diferentes para alcançar a meta da alta confiabilidade. Um dos métodos era, identificar as causas das falhas e determinar ações a serem tomadas. Outro era as especificações dos requisitos de confiabilidade. Essas especificações dos requisitos conduziram ao desejo de estimar a confiabilidade, antes do equipamento ser construído e testado. Isto com certeza, era o início da predição da confiabilidade.</p> <p>Os anos cinquenta também apresentaram os primeiros trabalhos de confiabilidade, incluindo:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Uma variedade de esforços, para melhorar a confiabilidade através da coleção de dados de projeto; • Estabelecimento de programas de confiabilidade; • Simpósios de Engenharia de Qualidade e Confiabilidade; • Técnicas estatísticas para desenvolvimento da confiabilidade, tais como o uso da distribuição de Weibull e exponencial; • Manuais Militares, que provêm guias para aplicação da confiabilidade de componentes eletrônicos; <p>Em adição a essas realizações, os anos cinquenta também incluem trabalhos pioneiros na predição da confiabilidade. Em 1956, a RAC (Reliability Analysis Center) lançou o TR-1100, que fazia Análise de Solicitação para Confiabilidade de Equipamentos Eletrônicos, apresentava modelos matemáticos para estimar a taxa de falhas dos componentes. Apresentava algumas dificuldades associadas com a correlação estatística versus causa e efeito, foi o predecessor da MH-217 (MH - Military Handbook - Reliability Prediction of Electronic Equipment) [8].</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Métodos introduzidos 1) Causas das falhas e ações corretivas; 2) Início da predição da confiabilidade; • Primeiros grupos de estudo; • Coleta de dados; • Programas de confiabilidade; • Uso de técnicas estatísticas e distribuição de Weibull; • Manuais militares, dados para predição da confiabilidade em produtos eletrônicos; • Primeiros modelos matemáticos para estimar a taxa de falhas de componentes eletrônicos.
anos sessenta	<p>Em 1960 D.N.Chorafas publicou o primeiro livro texto combinando estatística e engenharia de confiabilidade [5].</p> <p>Em 1961 Igor Bazovsky publicou o primeiro livro texto compreensível, em engenharia da confiabilidade [5].</p> <p>Em 1962, a primeira versão da US MH-217 foi publicada pela Marinha dos Estados Unidos. Uma vez publicada, a MH-217 rapidamente tomou-se o padrão para as predições de confiabilidade e outras fontes de taxas de falha gradualmente desapareceram. Uma das razões para não usar outras fontes, era o fato da MH-217, ser freqüentemente citada em contratos. Fornecedores governamentais, não tinham opção para uso de outras fontes de dados.</p> <p>Até agora, a disciplina de confiabilidade estava trabalhando sob o enfoque que confiabilidade, era uma disciplina quantitativa, que necessitava dados quantitativos, para suportar as suas muitas técnicas baseadas em estatística, tais como alocação e modelos de redundância. Contudo, outro aspecto da confiabilidade, abordava os processos físicos pelos quais os componentes falhavam.</p> <p>O primeiro simpósio voltado para esse assunto, foi "A Física da Falha em Componentes Eletrônicos", patrocinado pelo Centro de Desenvolvimento Aéreo Rome - New York (Rome Air Development Center - RADC) e IIT Instituto de Pesquisa (IITRI - IIT Research Institute) em 1962. Esse simpósio foi o último com esse nome, tornando-se o atual Simpósio Internacional de Confiabilidade Física (International Reliability Physics Symposium - IRPS) [8].</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Primeiros livros publicados; • Primeira versão da MH 217, para predição da confiabilidade; • Dois enfoques da confiabilidade: 1) Quantitativo baseado em estatística; 2) Física da falha, o processo pelo qual os componentes falham.

Figura 2-1 – Histórico dos principais fatos da confiabilidade (continua).

Época	Principais fatos	Sumário
anos sessenta	<p>As duas abordagens da engenharia da confiabilidade pareciam divergir, com os sistemas de engenharia encarregados de especificar, alocar, predizer, e demonstrar a confiabilidade, enquanto que na física da falha, engenheiros e cientistas estavam empregando seus esforços para identificar e modelar as causas físicas das falhas. Contudo, as duas abordagens são partes integrantes da confiabilidade. As informações físicas são necessárias para desenvolver a parte de qualificação, separação e aplicação de requisitos. E as tarefas do sistema de especificação, alocação, predição e demonstração da confiabilidade, são necessárias para assegurar que os requisitos de confiabilidade foram alcançados [8].</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Dois enfoques da confiabilidade: <ol style="list-style-type: none"> 1) Quantitativo baseado em estatística; 2) Física da falha, o processo pelo qual os componentes falham.
anos setenta	<p>Havia muitos esforços para desenvolver novos modelos para a predição da confiabilidade. Os resultados desses esforços foram modelos de extrema complexidade, que foram criticados pela comunidade de usuários, como sendo muito complexos, custosos e não realistas [8].</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Novos modelos de predição muito complexos não realistas.
anos oitenta	<p>Enquanto a MH-217 foi atualizada muitas vezes, outras agências desenvolveram modelos de predição da confiabilidade únicos para suas indústrias. Como exemplo, a indústria automotiva, sob patrocínio da Sociedade de Engenharia Automotiva (Society of Automotive Engineers - SAE), Comitê de Padronização da Confiabilidade, desenvolveu modelos específicos para a eletrônica automotiva. O comitê da SAE acreditava que não haviam metodologias de predição, que se aplicassem aos níveis de qualidade e ambientais, das aplicações automotivas.</p> <p>O padrão Bellcore de previsão da confiabilidade é outro exemplo de uma indústria que desenvolveu modelos específicos para suas aplicações e condições. Ele foi desenvolvido, originalmente, para atender os interesses da indústria de telecomunicações.</p> <p>Os Estados Unidos desenvolveram o programa VHSIC (very high speed integrated circuit), na tentativa de melhorar a tecnologia dos circuitos integrados e ao mesmo tempo, produzir circuitos capazes de preencher os requisitos únicos das aplicações militares. Do programa nasceu uma lista de fabricantes qualificados (Qualified Manufacturers List QML), ou seja, uma metodologia que qualifica um fabricante de circuitos integrados, ao contrário da qualificação tradicional de peças específicas. O governo dos Estados Unidos percebeu que precisava um QML, como um processo para alavancar os melhoramentos da tecnologia comercial e ao mesmo tempo, ter um esquema de qualificação para produtos e componentes. A partir daquela data, houve uma mudança do enfoque para qualificação do processo [8].</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Várias atualizações da MH 217; • Modelos de predição únicos para determinadas indústrias; • Programa dos EUA para melhorar a confiabilidade de circuitos integrados VHSIC; • Primeira qualificação de fabricantes; • A partir daquela data qualificação de componentes e fabricante.
anos noventa	<p>Muito da literatura sob o tema de predição da confiabilidade, estava centrada em torno do debate, se a confiabilidade deveria se concentrar nos aspectos físicos das falhas, ou em modelos empíricos (tais como a MH-217) para quantificação da confiabilidade.</p> <p>Ao longo dos anos, muitas vezes criticaram a MH-217 a respeito da efetividade do método para avaliar a confiabilidade. Os pesquisadores de falhas afirmam que os métodos preditivos são inexatos e custosos. O fato é que, atualmente, não há outro método viável de domínio público.</p> <p>A base dos métodos tradicionais, tais como MH-217, é que a taxa de falhas é determinada, primeiramente, pelos componentes incluídos no sistema. Isto era uma premissa razoável nos anos sessenta e setenta, quando os componentes tinham uma alta taxa de falhas e quando os sistemas eram menos complexos do que são atualmente. O aumento da complexidade dos sistemas e qualidade dos componentes resultou em uma mudança das causas de falhas dos componentes, para mais fatores em nível dos sistemas, incluindo manufatura, projeto, requisitos dos sistemas, interfaces e software. Historicamente, esses fatores não eram explicitamente avaliados nos métodos de predição [8].</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Debate entre as correntes da física das falhas e da predição da confiabilidade; • Método baseado na MH 217 é o único de domínio público; • A complexidade dos sistemas faz com que o enfoque seja mudado do componente para outros fatores em nível de desenvolvimento.

Figura 2-1– Histórico dos principais fatos da confiabilidade (continuação).

Épo ca	Principais fatos	Sumário
A confiabilidade no Brasil	<p>No Brasil a aplicação da Engenharia da Confiabilidade, começou a ganhar força a partir do início da década dos anos 80. No início dos anos 80 a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), em cooperação com a COPPE/UFRJ, criou um grupo de pesquisa com o objetivo de pesquisar e desenvolver técnicas de Engenharia de Confiabilidade e Análise de Risco, aplicada a questões de segurança de centrais nucleares.</p> <p>Um fato importante de grande relevância para o desenvolvimento da Confiabilidade no Brasil e que merece ser lembrado com destaque, foi a realização do 1º Encontro Técnico de Engenharia da Confiabilidade da Petrobrás, em outubro de 1987. Embora a denominação do encontro mencionasse apenas Confiabilidade, a maioria dos trabalhos estava relacionada a questões de análise de riscos. Isso era reflexo direto, do pequeno número de aplicações realizadas, especificamente, sobre confiabilidade. Devido a grande repercussão, principalmente, na indústria de processos, em setembro de 1989, foi realizado o II ETEC, já com um bom número de aplicações específicas de confiabilidade, embora ainda com predominância dos trabalhos de análise de riscos.</p> <p>Em outubro de 1991, foi realizado o III ETEC, com a maioria dos trabalhos sobre confiabilidade. Naquela mesma época, a Petrobrás iniciou um programa de formação de pessoal especializado em confiabilidade. Também em 1991, a Rhodia iniciou na Unidade Química de Paulínia (UQP), um programa de difusão da cultura de confiabilidade.</p> <p>O INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), parece ter uma preocupação dentro dessa área, para dar suporte aos programas de lançamento de satélites, mas pouco é divulgado sobre a sua atuação na área de confiabilidade.</p> <p>As áreas militares ligadas à Marinha e Aeronáutica, principalmente, em parceria com a Embraer, possuem vários estudos internos pouco divulgados externamente. Os estudos estão relacionados à segurança das aeronaves, com forte ênfase em Manutenção Centrada na Confiabilidade.</p> <p>Atualmente, a disciplina de confiabilidade faz parte de muitos programas de mestrado e doutorado de escolas de engenharia brasileiras.</p> <p>Entre as principais dificuldades nacionais em termos de confiabilidade, mencionadas por Oliveira L.F.S [9], destacam-se: 1) A necessidade da criação de bancos de dados nacionais de falhas, pelas indústrias que operam no Brasil e 2) O uso muito incipiente da confiabilidade na indústria de fabricação de componentes mecânicos, elétricos e eletrônicos no Brasil.</p> <p>Caso os fabricantes de componentes pudessem informar com maior precisão, o nível de confiabilidade dos seus produtos (taxa de falhas ou MTBF), isso representaria um importante fator de redução das incertezas, nos resultados das avaliações de sistemas industriais [9].</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Iniciou-se nos anos 80 pela CNEN (programa nuclear brasileiro); • Primeiros encontros de confiabilidade em 1987. Mais análises de riscos; • Empresas brasileiras que se destacaram em estudos de confiabilidade: Rhodia, Petrobras, Inpe e Embraer.

Figura 2-1– Histórico dos principais fatos da confiabilidade (continuação).

2.1.3 CONFIABILIDADE X QUALIDADE

Muitas vezes os conceitos de confiabilidade e qualidade são confundidos. Faz-se aqui uma caracterização das semelhanças e diferenças, com o principal objetivo de ajudar o entendimento dos aspectos da confiabilidade.

Iniciando pela qualidade, Garvin em 1987 (apud Montgomery [10]) determinou oito dimensões para a qualidade:

1. Desempenho, significando como o produto irá executar o trabalho pretendido;
2. Confiabilidade, significando com que frequência o produto falha;
3. Durabilidade, significando por quanto tempo o produto irá durar;
4. Manutenibilidade, significando o quão fácil é reparar o produto;
5. Estética, significando o apelo visual do produto;

6. Características, significando o que o produto faz;
7. Qualidade percebida, significando qual a reputação da empresa e do seu produto;
8. Conformidade com o projeto, significando a adequação do produto à intenção do projetista. O processo de manufatura não deve distorcer a intenção do projetista, de forma a desqualificar o produto.

Percebe-se que a confiabilidade foi colocada como uma das dimensões da qualidade. Sendo assim, qualidade é um conceito mais abrangente que tem como aspectos mais visíveis para o consumidor comum, a estética, a qualidade percebida, o desempenho, as características e por vezes a conformidade com o projeto. Normalmente, os aspectos de confiabilidade, durabilidade e manutenibilidade, permanecem ocultos à vista do consumidor comum, que os avalia comparando com outros produtos, por meio de recomendações de conhecidos, ou ainda através da chamada qualidade percebida. Uma vez conhecido o produto, a confiabilidade passa a ser um fator preponderante nas próximas escolhas.

Passando para a confiabilidade e fazendo uma análise baseada na variação da taxa de falhas do produto, ao longo de sua vida, tem-se que analisar a chamada curva da banheira. A curva da banheira como pode-se observar na Figura 2-2, é uma composição das falhas da qualidade que caracterizam o período de juventude, com as características de desgaste do projeto e o nível de solicitação à que o produto está submetido. O nível de solicitação pode ser aumentado de acordo com as condições ambientais, umidade, temperatura, poeira, vibração, agentes químicos etc. O aumento da solicitação eleva por completo a curva de taxa de falhas, aumentando a frequência das falhas.

Caso a taxa de falhas inicial (do período de falhas de juventude) seja mais do que duas vezes a taxa de falhas na maturidade, uma seleção da produção, ou ensaios de pré-envelhecimento podem ajudar. No longo prazo, deve-se melhorar o controle do processo próprio e dos fornecedores. Esse período de juventude caracteriza as falhas que aparecem devido às deficiências do controle da qualidade, o que relaciona diretamente o controle da qualidade com a confiabilidade. Falhas de juventude, também podem estar relacionadas a falhas de projeto, isentando nesse caso o controle da qualidade.

O controle da qualidade assegura que o processo de manufatura resulte em um

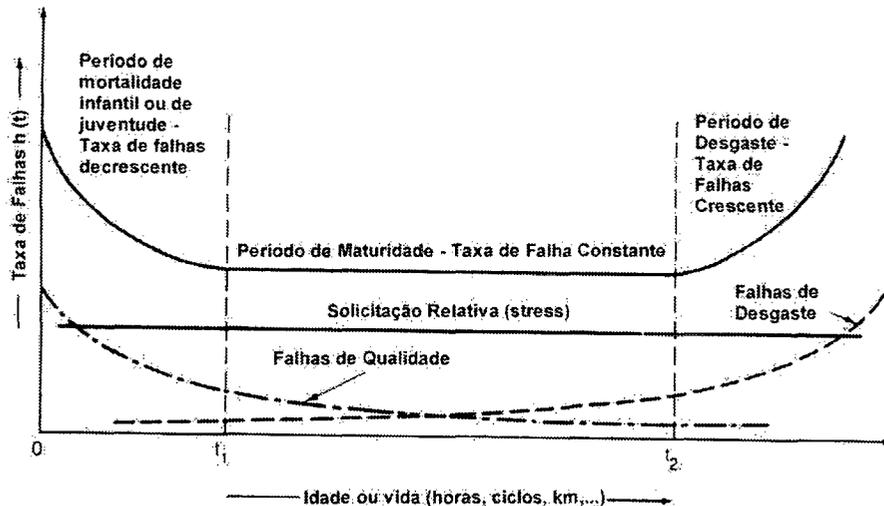


Figura 2-2– Diferentes taxas de falha ao longo da vida útil do produto, as características da curva da banheira dependem não só do projeto, mas também do controle da qualidade e da solicitação [11].

produto uniforme, dentro dos limites das medições e percentagem de defeitos inerentes ao processo. Ele controla trabalhos manuais, processos, e variáveis de materiais, para realizar isso a custo aceitável para o consumidor.

O período de taxa de falhas aproximadamente constante é caracterizado por falhas aleatórias, que têm causas envolvendo aspectos difíceis de serem determinados, sejam essas do projeto, processo ou qualidade. As causas também podem ser combinações da solicitação aplicada e da solicitação ambiental.

O período de aumento da taxa de falhas é causado por mecanismos de falha que criam mudanças progressivas e irreversíveis, tais como corrosão, desgaste mecânico, eletromigração de metais, ou seja, quaisquer perdas das características definidas com o tempo. Esses mecanismos de desgaste limitam a vida útil do produto. Muitas das causas de desgaste podem ser eliminadas no projeto, pela mudança da solicitação de operação, tipos de materiais ou ainda por manutenções preventivas. Mecanismos de desgaste devem ser descobertos e eliminados, caso contrário, apresentarão seus efeitos no longo prazo. No caso do software, teoricamente não existem mecanismos de desgaste, mas sucessivas modificações, podem determinar um aumento gradual da taxa de falhas, o que pode-se caracterizar como um desgaste [7].

Uma implicação óbvia da curva da banheira, é que uma especificação de confiabilidade, não pode ser somente um número. Ela depende da idade do produto,

da solicitação aplicada, do ambiente presente e deve ser expressa por limites de confiança que descrevem a faixa de incerteza do resultado.

2.2 PRODUTOS MECATRÔNICOS

A mecatrônica integra mecânica, eletrônica e software em componentes, módulos, produtos e sistemas complexos.

A expressão mecatrônica primeiramente apareceu no Japão, na metade dos anos setenta [12]. A expressão era usada para descrever o rápido crescimento do uso da eletrônica e do software, para melhorar as características e flexibilizar os produtos mecânicos. Mecatrônica tornou-se a palavra da moda na Europa e nos Estados Unidos, evidenciando-se as vantagens competitivas, que podem ser obtidas com a aplicação da mecatrônica. Não há uma definição aceita pela maioria sobre o que é a mecatrônica, a palavra é utilizada em diferentes contextos. A definição acima serve de base para a área de projeto.

Num programa desenvolvido na Finlândia [13], fez-se uma definição mais completa de sistemas mecatrônicos e servirá de base para esse estudo. Assim, “Mecatrônica é a combinação da tecnologia de informação eletrônica com a mecânica, com o objetivo de aumentar o nível de inteligência das máquinas e equipamentos e ao mesmo tempo aumentar a flexibilidade, versatilidade, eficiência e confiabilidade”. Entende-se como tecnologia da informação eletrônica, o software atuando em um hardware eletrônico.

Há diferenças significativas entre projetos mecânicos, eletrônicos e de software, não somente nas habilidades técnicas requeridas, mas as essências dos problemas diferem. A Figura 2-3 sintetiza os principais aspectos dessas diferenças nos três campos. A figura ilustra as diferenças sobre os aspectos: das funções; projeto conceitual; realização física (realização do conceito); modelagem do projeto; métodos de projeto e ferramentas computacionais.

Durante o processo de projeto, os modelos de projeto, servem a diferentes propósitos, isto é: verificação de funções, comunicação de idéias e documentação. A Figura 2-4 mostra exemplos de modelos de projetos na mecânica, eletrônica e software.

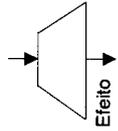
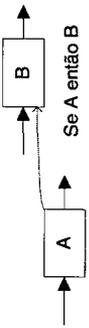
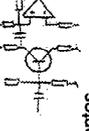
	MECÂNICA	ELETRÔNICA	SOFTWARE
FUNÇÕES	<p>Transformações de material, energia e informação</p>  <p>Propósito das Funções</p>  <p>Efeito</p>	<p>Transformações de informação junto com energia (sinais elétricos)</p> 	<p>Transformações de informação Relação lógica entre as transformações</p> 
PROJETO CONCEITUAL	<p>Princípio das Funções e Estrutura Orgânica</p> <ol style="list-style-type: none"> 1 - Cada problema parece ser novo 2 - Muitas alternativas de solução existem para cada sub-problema 	<p>Estrutura Modular e projeto de circuitos</p> <ol style="list-style-type: none"> 1 - Circuitos padrões existem para a maioria dos sub-problemas 2 - Grande chance de componentes padrões 	<p>Estrutura do Programa e Algoritmos</p> <ol style="list-style-type: none"> 1 - Uma quantidade de operações básicas existem 2 - Reaproveitamento de algoritmos não é comum 3 - Cada problema parece ser novo
REALIZAÇÃO DO CONCEITO	<p>Projetos Próprios e geometria dos elementos</p> <ol style="list-style-type: none"> 1 - Grande chance de produzir tecnologias 2 - Todos os elementos devem ser específicos (forma, dimensões, material, superfície) 	<p>Ferramentas Eletrônicas de Projeto</p> <ol style="list-style-type: none"> 1 - Limitado ao número de tecnologias de circuitos (PCB, circuitos híbridos, IC etc) 	<p>Codificação do Programa</p> <ol style="list-style-type: none"> 1 - Não há fase de produção e sim fase de cópia do programa
MODELAGEM DO PROJETO	<ol style="list-style-type: none"> 1 - Para modelagem de funções, elementos devem ser especialmente manufaturados 2 - Modelos em nível concreto (esboços, modelos, modelos de funções) são facilmente entendidos por não especialistas 	<ol style="list-style-type: none"> 1 - Existe uma linguagem padrão de símbolos, para o projeto de circuitos 2 - Modelagem de funções em protótipos experimentais é facilmente executada para uma grande quantidade de componentes 	<ol style="list-style-type: none"> 1 - Até a fase de codificação, somente modelos gráficos são possíveis (papel ou vídeo do comput.) 2 - A verificação de funções do programa é feita por tentativas de executar o programa em computadores 3 - As funções do programa são difíceis de explicar para não especialistas
MÉTODOS DE PROJETO	<ol style="list-style-type: none"> 1 - Métodos de projeto existem 2 - Somente alguns métodos são aceitos na indústria 	<ol style="list-style-type: none"> 1 - Não há métodos para o projeto de circuitos analógicos 2 - Poucos métodos disponíveis para o projeto 3 - Na indústria protótipos experimentais são comuns, métodos são raramente usados 	<ol style="list-style-type: none"> 1 - Uma grande quantidade de métodos existem 2 - A necessidade de métodos de projeto é geralmente reconhecida na indústria
FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS	<ol style="list-style-type: none"> 1 - A geometria dos modelos em sistemas 2D e 3D, somente pode ser aplicada nas fases finais de projeto 2 - O projeto de parâmetros é possível através de procedimentos padrões de projeto 	<ol style="list-style-type: none"> 1 - Geração de circuitos para projetos lógicos 2 - PCB, híbridos e lay-out & simulação de IC 3 - Compiladores para gerar o lay-out de IC 4 - A Simulação de protótipos é possível 	<ol style="list-style-type: none"> 1 - Não usado nas fases iniciais de projeto 2 - Linguagens de programação de alto nível 3 - Compiladores de linguagens de programação 4 - Existem sistemas de documentação gráfica

Figura 2-3– Tabela comparativa das características dos projetos mecânico, eletrônico e de software [14].

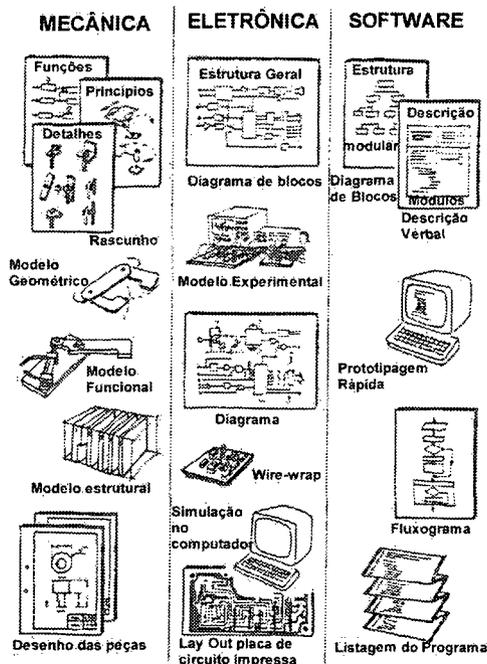


Figura 2-4– Modelos de projeto típicos, usados no desenvolvimento da mecânica, eletrônica e software [14].

O projeto mecânico é essencialmente tridimensional, o projetista necessita rascunhos em perspectiva e modelos em tamanho real, para suportar a sua percepção espacial. Esse não é o caso dos circuitos eletrônicos e software, ambos são basicamente bidimensionais. Por outro lado, rascunhos e modelos em três dimensões estão próximos ao mundo real (pouco nível de abstração), tornando-os potentes meios de comunicação entre técnicos não especialistas, usuários, gerentes, departamento de marketing etc. A modelagem de funções em projetos mecânicos é limitada pelo fato que cada peça deve ser manufaturada especialmente. Modificações são lentas, exigindo máquinas para alterar as peças.

Engenheiros Eletrônicos têm um padrão internacional, o diagrama de símbolos, para projeto de circuitos (projetos mecânicos hidráulicos e pneumáticos também possuem). Eles são ótimos para propósitos de discussão, entre especialistas e para a especificação do sistema. Para não especialistas, eles são muito abstratos, para uma real compreensão das funções. Modelos de funções são simples, já que componentes padrões são utilizados. Modificações são relativamente simples, exigindo no máximo soldas e novos componentes. A interface com o usuário também é simples, por meio de chaves e lâmpadas padronizadas. Assim, um modelo experimental pode tornar-se um modelo funcional, para discussão com não especialistas.

Em Engenharia de Software, modelos de projeto são o ponto fraco [14]. O projeto de software é muito abstrato e até a fase de programação, o projetista não tem nada além de formulações verbais e diagramas, para descrever a estrutura e funções do projeto. Mesmo durante a programação, tem-se apenas listagem de programação e entrada e saída de dados. Isto causa atrito entre projetistas de software e não especialistas.

Como as funções do sistema não podem ser testadas, até que o projeto esteja completo e instalado no hardware, muitas vezes tarde para fazer grandes alterações.

É importante dizer que as afirmações acima quanto às deficiências do software, mostram a realidade atual das empresas de produtos mecatrônicos. Muitas ferramentas computacionais existem, mas parece que as mesmas ainda não chegaram os projetos de software em nível de firmware. Uma das razões é o limitado espaço disponível nas memórias internas para linguagens mais sofisticadas, que acabam sempre aumentando os programas. Outra razão é a falta de conhecimento do pessoal de desenvolvimento do software, normalmente feito pelo próprio engenheiro eletrônico do hardware, não muito afeito a modernas técnicas de programação.

Mesmo soluções como prototipagem rápida, onde as idéias iniciais do problema são apresentadas para os usuários, necessitam do uso extensivo de gráficos, para comunicar as funções do programa para não especialistas. Como paradoxo, a engenharia de software com as linguagens de alto nível e computadores é a mais fácil das três áreas, para a modelagem das funções, com a possibilidade de experimentar alternativas diretamente no computador [14].

2.2.1 CARACTERÍSTICAS E TENDÊNCIAS DOS PRODUTOS MECATRÔNICOS

O rápido desenvolvimento dos produtos mecatrônicos é conseqüência da evolução da microeletrônica, que teve os seguintes resultados [14]:

- Séries baratas de circuitos eletrônicos tornaram possível trocar funções mecânicas, por eletrônicas e de software;
- Circuitos integrados permitiram o controle de movimentos mecânicos e processos de forma fácil, precisa e econômica;
- A robustez dos componentes eletrônicos e circuitos tornou-se boa o suficiente para resistir às vibrações mecânicas, calor e outras solicitações,

que são comuns em sistemas mecânicos. Em geral a confiabilidade eletrônica é melhor do que a dos sistemas mecânicos.

A soma da mecânica, eletrônica e software em sistemas mecatrônicos permite:

- a) Atingir novas funções que não eram possíveis antes (por exemplo, programação de um vídeo cassete, armazenamento de dados de manutenção, correção de falhas, etc.);
- b) Melhorar, aumentar as funções e facilitar a operação (por exemplo, funções inteligentes, melhora da confiabilidade);
- c) Aumentar a flexibilidade do projeto usando-se a flexibilidade do software;
- d) Aumentar a flexibilidade para o uso dos produtos (maior número de funções disponíveis);
- e) Compensação dos pontos fracos da construção mecânica (por exemplo, compensação de desgastes e absorção de vibrações, através de alterações automáticas dos parâmetros do software);
- f) Junção da mecânica e eletrônica para reduzir dimensões e custos de produção (por exemplo, sensores inteligentes e válvulas eletro-hidráulicas).

A Figura 2-5, exemplifica bem a flexibilidade que é possível de obter-se com os produtos mecatrônicos, onde a antiga caixa de redução que apresentava uma relação fixa entre entrada e saída, agora como um produto mecatrônico, tem essa relação, incluindo sentido de rotação, facilmente alterada por software.

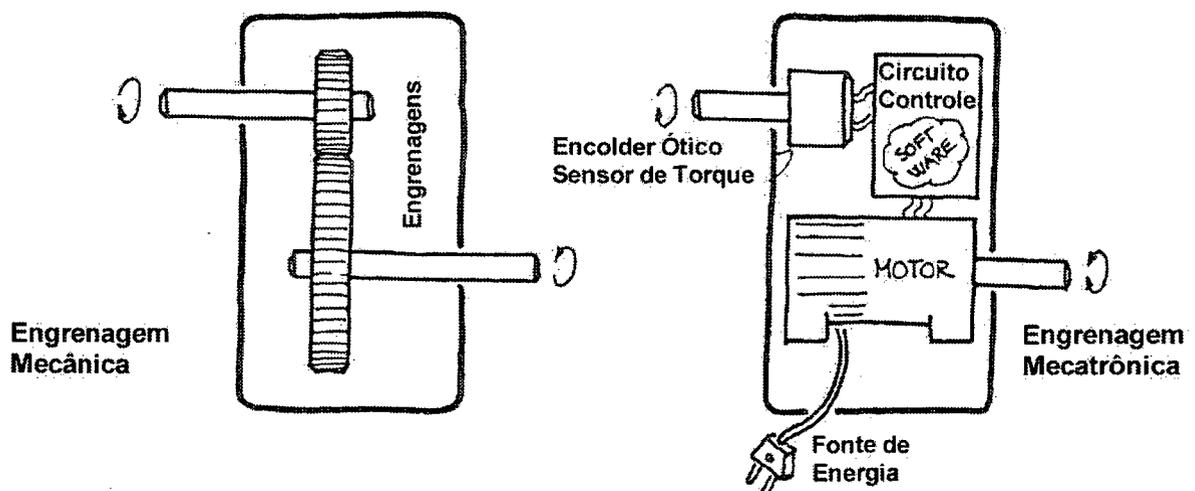


Figura 2-5– Princípio de uma caixa de redução mecatrônica comparada a uma caixa de redução mecânica [14].

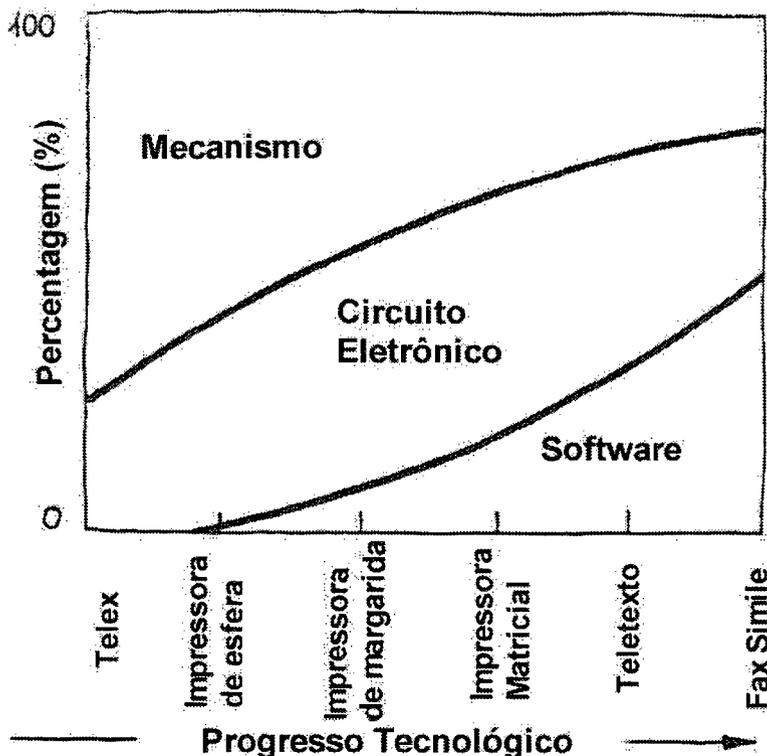


Figura 2-6– Progresso tecnológico ao longo dos anos na área de envio de mensagens impressas a distância, comparação dos percentuais de uso da mecânica, eletrônica e software [15].

A Figura 2-6, ilustra na área de transmissão de mensagens escritas à distância, a tendência dos produtos mecatrônicos, de cada vez mais a eletrônica e principalmente o software, tomarem lugar da mecânica. Esta tendência ainda está presente nos desenvolvimentos atuais.

Assim, os primeiros aparelhos de telex eram predominantemente mecânicos, hoje o atual fax, apresenta poucos componentes mecânicos, que foram substituídos por partes eletrônicas e de software. Com isto, aumentou-se a flexibilidade do produto e novas funções foram integradas. Atualmente, nos fax símiles é permitida a transmissão gráfica de mensagens, já existindo inclusive o fax colorido.

2.3 METODOLOGIAS DE PROJETO E DE DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS

A curva de aprendizado de um novo produto exige freqüentemente muitas tentativas, antes de resultar num projeto aceitável. Em operações de manufatura, uma grande quantidade de retrabalho no produto é encarada como deficiência e fazem-se

ensaios para identificar as causas e propor ações corretivas.

Quanto ao projeto a questão é deixar que o aprendizado ocorra fortuitamente, ou tomar a iniciativa, estudar formalmente o desenvolvimento do produto como um processo, tirando lições do passado, a fim de aperfeiçoar o processo para o futuro.

Segundo BONFIM (apud [16]), no sentido comum, metodologia é o estudo de métodos, técnicas e ferramentas e de suas aplicações na definição, organização e solução de problemas teóricos e práticos. Para ele, o estudo de metodologia de projeto, propriamente dita, significa tratar da geração, adaptação e da aplicação de conceitos de diversos campos da ciência, na proposição de procedimentos lógicos.

Diversas são as metodologias genéricas, que procuram identificar as fases do projeto. Maribondo [16] apresenta um quadro com as principais.

Analisando a metodologia de Blanchard & Fabricky, devido à sua abrangência de todo o ciclo de vida, vê-se que esta é dividida em sete fases, a saber:

1. Definição da necessidade;
2. Projeto conceitual;
3. Projeto preliminar;
4. Projeto detalhado;
5. Produção e/ou construção;
6. Utilização e suporte e;
7. Descarte.

As fases caracterizam um grupo de etapas próximas nos seus propósitos. Maiores detalhes podem ser obtidos em Systems Engineering and Analysis [17].

Outra metodologia, a VDI 2221, tornou-se uma norma alemã, sendo composta das seguintes fases:

1. Esclarecer e precisar a formulação da tarefa;
2. Verificação das funções e de suas estruturas;
3. Pesquisar os princípios de solução e sua estrutura;
4. Dividir em módulos realizáveis;
5. Configurar os módulos principais;

6. Configurar o produto total e;
7. Preparar instruções de execução e de uso.

Nota-se que a VDI 2221 segue uma linha de caracterização das funções e correspondente modularização do projeto, restringindo-se até a fase de planejamento da produção e do uso.

No caso de projetos mecatrônicos, o projeto subdivide-se a partir de um determinado ponto do projeto conceitual, em três projetos distintos, a saber, mecânico, eletrônico e software. Na fase de projeto detalhado os três projetos são novamente integrados em um só. Essa separação atende as características e especificidades dos projetos mecânico, eletrônico e de software como foi anteriormente apresentado na Figura 2-3 e Figura 2-4. Burr [15] aborda esse aspecto da separação dos projetos nas fases iniciais do desenvolvimento.

A Figura 2-7 ilustra as principais atividades das fases iniciais de um projeto mecatrônico. Após a definição do problema e levantamento de informações, passa-se para as fases de projeto conceitual e preliminar, que constam da Figura 2-7.

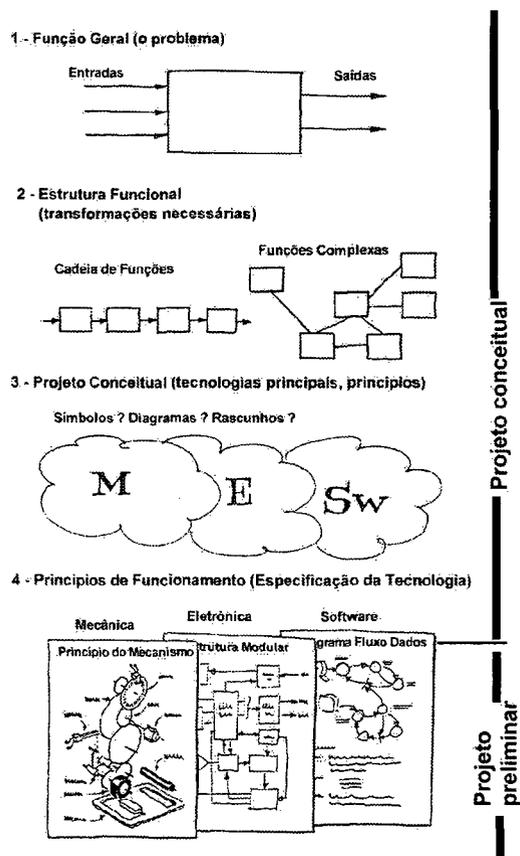


Figura 2-7 – Principais atividades das fases iniciais do desenvolvimento de produtos mecatrônicos (adaptado de Burr [15])

No projeto conceitual inicialmente, abstrai-se da execução física do produto e se determinam as funções do produto. Nas fases mais avançadas do projeto conceitual escolhe-se qual a melhor alternativa de projeto. Nessa etapa já existe uma alocação de funções para as tecnologias mecânica, eletrônica e software, para o caso de projetos mecatrônicos. A tarefa de alocação de funções entre as tecnologias é de grande importância para a confiabilidade.

Na fase de projeto preliminar, uma vez estabelecida a melhor opção de projeto, passa-se ao desenvolvimento de cada um dos projetos, mecânico, eletrônico e de software. Os projetos individuais serão novamente integrados na fase de projeto detalhado, que não consta da Figura 2-7.

A proposta de uma metodologia orientada para um determinado aspecto do produto, como por exemplo a confiabilidade, é apontar tarefas que ao longo das fases, reforcem a característica buscada.

2.3.1 METODOLOGIA DA FUNDAÇÃO CERTI

O Centro de Inovação em Produtos (CIPd) da fundação CERTI, segue toda uma estratégia agressiva, de gerenciamento do negócio da empresa contratante, baseado na geração de novos produtos. A estratégia baseia-se em três pontos básicos:

- a) Alta qualidade no desenvolvimento de novos produtos, que se reflete no produto final, no tempo exigido pelo mercado e dentro da expectativa do consumidor final;
- b) Reconhecimento de novas oportunidades para a empresa;
- c) Comprometimento dos recursos necessários, que obviamente precisam ser bem gerenciados.

A Figura 2-8 ilustra os três pontos básicos do negócio que atuam nas diferentes fases, do ciclo da inovação. O ciclo da inovação foi proposto por Patterson [18] e mostra em termos do fluxo de caixa do negócio, a importância de um rápido desenvolvimento, para que a empresa possa ter lucro com os novos produtos.

A agilidade é fator primordial nos novos desenvolvimentos de produtos, sob pena de perder-se o mercado para a concorrência.

Dentro desta ótica, o CERTI / CIPd adota uma metodologia de desenvolvimento que

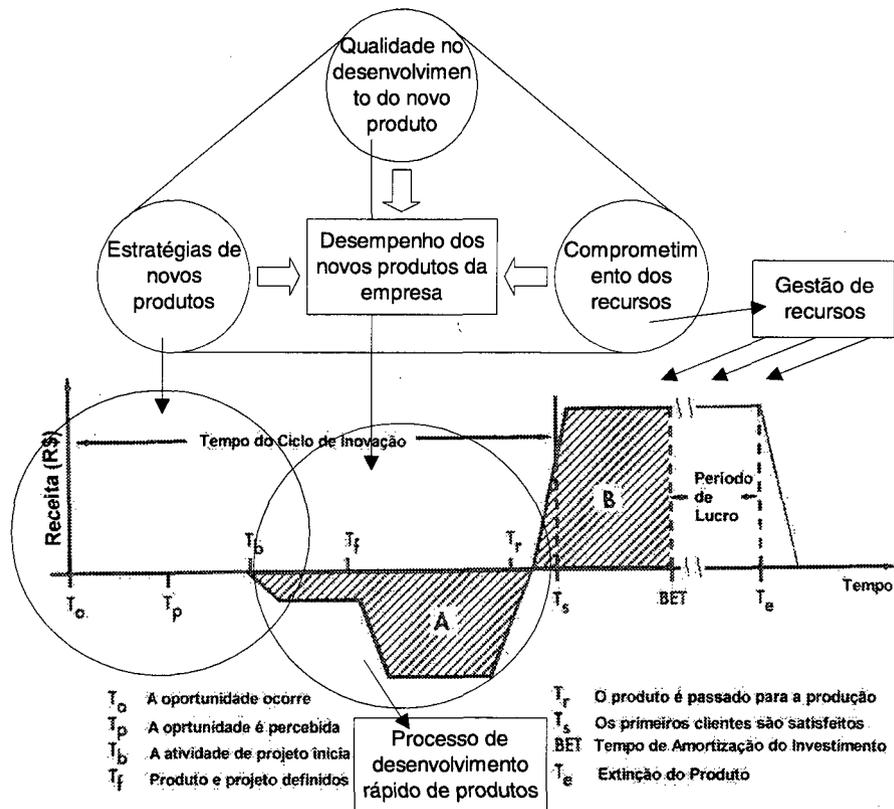


Figura 2-8 – Enfoque estratégico no desenvolvimento de produtos [19], baseado no ciclo de inovação proposto por Patterson [18].

busca ganhar tempo no desenvolvimento de novos produtos.

A Figura 2-9 apresenta as diferentes fases da metodologia de desenvolvimento rápido de produtos CERTI / CIPd, abaixo de cada uma das fases, encontram-se, resumidamente, as principais ações a serem empreendidas. A metodologia de desenvolvimento rápido de produtos tecnológicos CERTI / CIPd, baseia-se em quatro fases, que se propõe a encurtar o tempo de desenvolvimento.

A diminuição do tempo de desenvolvimento baseia-se num forte conhecimento da plataforma de produtos da empresa e no uso das chamadas soluções de prateleira.

Há que se supor que, no desenvolvimento de novas plataformas, que usam a Fase 1,5, a metodologia não apresente nenhuma inovação em relação às tradicionais metodologias de desenvolvimento. No entanto, destaca-se na abordagem o forte apelo comercial e de mercado, presente na execução da metodologia. A idéia é queimar etapas que já sejam conhecidas.

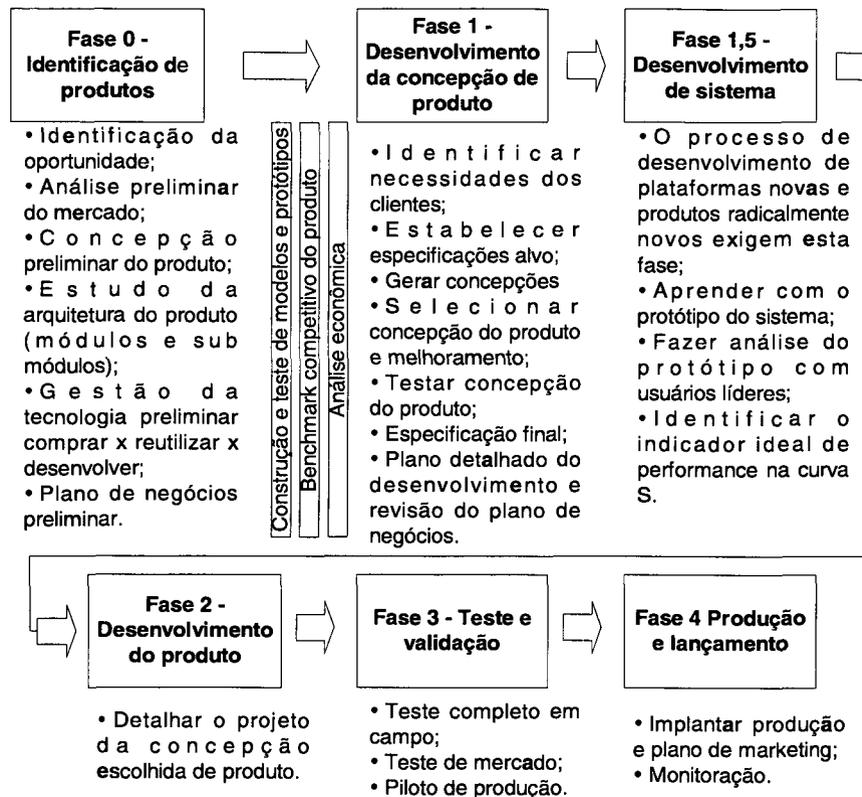


Figura 2-9 – Fases de um desenvolvimento rápido de produtos, metodologia CERTI / CIPd (baseado em Guimarães [19]).

2.3.2 ANÁLISES DAS METODOLOGIAS DE PROJETO

Pela análise das metodologias aqui brevemente apresentadas, Blanchard & Fabricky, VDI 2221, CERTI / CIPd, e outras tomadas como referência (abordagem de Burr para desenvolvimento de produtos mecânicos), pode-se determinar algumas fases, mais ou menos comuns a todas. Estas fases são:

1. Pesquisa inicial e caracterização do problema, onde os dados são colhidos e o problema delimitado;
2. Projeto conceitual onde há uma abstração da forma física de implementação e trabalha-se com as funções que o produto deve desempenhar, orientação da VDI 2221;
3. Projeto preliminar onde as primeiras soluções físicas, divididas nas suas respectivas áreas (para projetos mecânicos em mecânica, eletrônica e software) são delineadas;
4. Projeto detalhado onde as soluções definitivas de projeto e detalhamento da produção são apresentadas;

5. Suporte a produção onde atividades de acompanhamento e suporte a produção são determinadas;
6. Suporte ao produto onde atividades de suporte aos produtos já colocados no mercado são estabelecidas;
7. Retirada do mercado, onde o plano de retirada e / ou substituição do produto é determinado.

Blanchard & Fabrick falam em descarte do produto que está mais relacionado a determinar meios para a reciclagem do mesmo. Estes meios no entanto devem ser indicados no projeto detalhado. Para a empresa que desenvolveu o mais importante é como o produto será retirado e substituído no mercado.

Metodologias como a VDI 2221, detalham mais as fases de projeto preliminar e detalhado, direcionando-as para um projeto construído de forma a criação de módulos internos das partes. No caso da VDI 2221 a orientação é pensar o produto em termos das funções que ele deve desempenhar.

Uma grande parte das metodologias englobam as fases de coleta de dados do mercado (projeto informacional - NEDIP), projeto conceitual, projeto preliminar e projeto detalhado. O trabalho de Maribondo [16] adota esta divisão de fases.

2.4 ESTUDOS PARA A CONFIABILIDADE NO DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS

Alguns trabalhos já publicados apresentam relações com a proposta desse trabalho, sendo aqui apresentados os que mais se aproximam. Os trabalhos foram resumidos nos seus aspectos mais importantes e que serviram de diretrizes para o presente trabalho.

2.4.1 PROJETO PARA A CONFIABILIDADE

O desenvolvimento do processo de “projeto para a confiabilidade” (*Design for Reliability – DFR*), foi resultado da pressão de grandes fabricantes de eletrônicos, no início dos anos oitenta, preocupados com os custos de manutenção e a subtração dos seus mercados por competidores. Começou pelo estabelecimento de uma meta de reduzir as taxas de falhas em dez vezes, durante os anos oitenta. Após essa

definição global, viu-se que as taxas de melhorias podiam variar grandemente, de uma linha de produtos para outra e que uma taxa global não era adequada [11].

As bases do DFR foram estabelecidas com uma lista de 37 atividades, vista na Figura 2-10, que poderiam ser utilizadas para melhorar a confiabilidade.

FASES	ATIVIDADES PARA DFR - PROJETO PARA CONFIABILIDADE
Gerenciamento	Estabeleça metas por divisão da empresa ou produtos
	Dê prioridade para melhorias da qualidade e confiabilidade
	Administre a aplicação e seguimento das metas
Engenharia	Documente o ciclo de projeto
	Estabeleça metas de confiabilidade por produto ou módulo
	Dê prioridade para metas de melhoria da qualidade
	Estabeleça suas próprias metas de confiabilidade
	Treine a equipe de projeto em DFR
	Dê preferência por tecnologia já padronizada
	Faça testes de qualificação de componentes
	Faça testes de seleção e qualificação
	Analise a física das falhas por testes de falhas
	Analise as falhas e suas causas
	Faça experimentos de engenharia estatisticamente planejados
	Aplique regras de projeto e degradação por solicitação
	Checar regras de projeto e revisões de projeto
	Estimar a taxa de falhas (predição)
	Faça medidas e projeto térmico
	Analise o pior caso
	Aplique modos de falha e análise dos efeitos (FMEA)
Faça testes ambientais (margens de segurança)	
Faça testes de múltiplas solicitações	
Localize os defeitos de projeto (design defect tracking - DDT)	
Complemente o banco de dados das lições aprendidas	
Manufatura	Faça o projeto para manufatura (design for manufacturability - DFM)
	Dê prioridades para metas de qualidade e confiabilidade
	Estabeleça metas próprias de qualidade e confiabilidade
	Faça programas de treinamento da qualidade
	Aplique controle estatístico do processo (SPC/SQC)
	Implemente um processo de auditoria interna
	Implemente um processo de auditoria dos fornecedores
	Aplique inspeção de entrada (100% ou por amostragem)
	Faça testes de <i>bum-in</i> em nível de componentes
	Faça testes de <i>bum-in</i> em nível de montagem
	Faça testes de <i>bum-in</i> em nível de produto
	Localize defeitos de manufatura
	Faça relatórios de ações corretivas

Figura 2-10– Diretrizes do DFR, cada macro fase do desenvolvimento do produto apresenta uma série de atividades que conduzem à confiabilidade do produto final [11].

Outras atividades não listadas entre as 37 da Figura 2-10, podem ser:

- a) Testes de quantificação da confiabilidade do produto;
- b) Análise da física das falhas e causas, por vezes utilizando-se microscopia eletrônica;
- c) Análise estatística dos dados;
- d) Revisões de Projeto;
- e) Revisões do Produto.

Os dados e atividades aqui apresentadas levaram em consideração mais hardware de produtos eletrônicos. Contudo, muitas das atividades descritas acima se aplicam perfeitamente, quando se trata de produtos mecânicos ou mesmo mecatrônicos.

Muitas vezes, usa-se um DFR *checklist*, para ter-se certeza que todo o possível está sendo feito, para melhorar a confiabilidade dos produtos.

2.4.2 PROCESSO SURGE – O MELHORAMENTO DA CONFIABILIDADE BASEADO NO TEMPO DE LANÇAMENTO AO MERCADO

O artigo sobre o denominado processo SURGE (stress unveiled reliability growth enhancement - SURGE *Process – a time to market approach to reliability improvement* – John Donovan) [20] a respeito de solicitações de ensaio para melhorar a confiabilidade, enfatiza o aspecto de que uma empresa para ser competitiva precisa reduzir o tempo de introdução do produto no mercado (time to market – TTM). Contudo, a qualidade e a confiabilidade do produto não podem ser comprometidas, apesar do menor tempo para desenvolvimento e teste. Ensaio baseado na norma MIL HDBK 781 [21] para demonstração da confiabilidade não são apropriados, pois levam a tempos inviáveis de ensaios, sendo que os mesmos são por vezes repetidos, nas fases de projeto e de manufatura, devido à falta de entendimento entre as equipes de projeto e manufatura [20]. Outro aspecto é que os resultados dos ensaios realimentam muito pouco o projeto e demoram muito para determinarem melhorias. Nos ensaios da MIL HDBK 781, há o medo constante da falha, não sendo a falha considerada, como uma oportunidade para melhorar o produto. A abordagem mais apropriada, sugerida pelo processo SURGE, é a introdução de alguns controles internos nas fases de projeto [20].

Na Figura 2-11, tem-se um comparativo entre os métodos tradicionais de desenvolvimento e o método SURGE, onde verifica-se que a proposta do método é o encurtamento dos tempos de desenvolvimento com a eliminação dos longos testes de confiabilidade.

O método prevê ainda, a aplicação de controles na fase de projeto, com o objetivo de tornar a atividade mais previsível e não de inibir a criatividade. Tais controles e procedimentos teriam a seguinte forma [20]:

- a) Manual de garantia de projeto (isto é manual da qualidade para projeto);
- b) Políticas de desenvolvimento de hardware e procedimentos;
- c) Políticas de desenvolvimento de software / firmware ¹ e procedimentos;
- d) Processo de mudança do produto;
- e) Processo de mudança de documentação;
- f) Processo de revisão de projeto;
- g) Processo de auditoria;
- h) Processo de melhoramento (atualização) do produto.

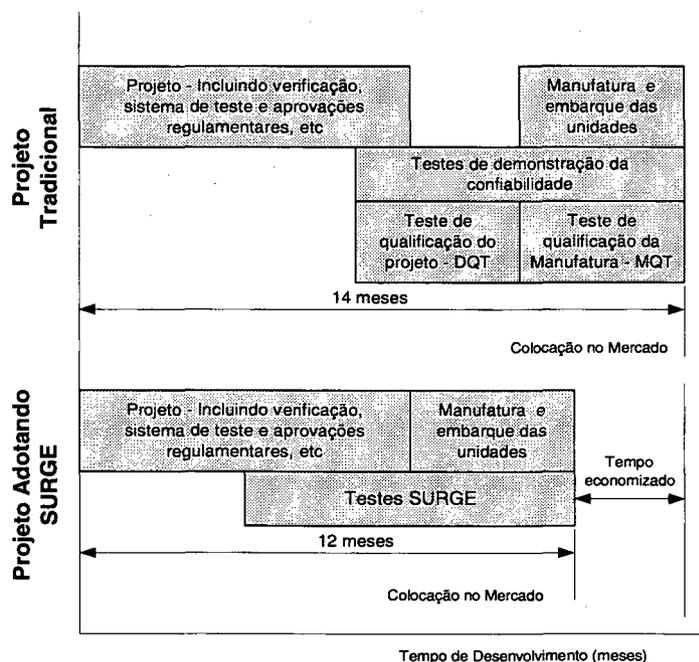


Figura 2-11– Comparativo dos métodos tradicionais e o método SURGE [20].

¹ Firmware : Software em nível operacional, normalmente, gravado em uma memória interna ou externa ao microprocessador.

Os tipos de solicitações ambientais usadas durante os testes SURGE, para estimular o aparecimento de falhas, em substituição aos ensaios de longa duração, são:

- a) Temperatura e umidade;
- b) Vibrações aleatórias;
- c) Ciclos de liga desliga (on/off);
- d) Operacionais (regime de operação submetido ao produto);
- e) Interação com o operador;
- f) Abuso de software;
- g) Combinação das solicitações acima.

O método enfatiza que os ensaios não são de qualificação, aceitação ou ensaios de demonstração de confiabilidade. O objetivo é eliminar defeitos de projeto e manufatura, pela falha dos módulos ou produtos. A ênfase não é no medo das falhas, mas na determinação das suas causas.

2.4.3 ABORDAGEM MODERNA PARA MELHORAMENTO DA CONFIABILIDADE DO PRODUTO

Ahmed explica em seu artigo (*Modern approaches to product reliability improvement* - Josim U. Ahmed) [2] que a confiabilidade é considerada como uma característica da qualidade, determinada após o produto pronto, durante sua vida útil, ainda que a confiabilidade do produto, seja fortemente influenciada pelas técnicas usadas durante a fase de projeto e desenvolvimento. As fases do projeto apesar de consumirem apenas 15% do custo total do ciclo de vida (*life cycle costs LCC*) do produto, são responsáveis indiretas por mais de 95% dos custos remanescentes do LCC (estudos baseados em um equipamento mecânico padrão).

Apesar da literatura enfatizar mais modelos matemáticos e aspectos preditivos, há numerosos métodos e ferramentas que podem ser usadas para melhorar a confiabilidade. Aproximadamente 80 métodos que abordam a qualidade do produto e a confiabilidade, foram listados por Juran em seu manual para controle da qualidade.

A Figura 2-12, lista os principais métodos para desenvolvimento da confiabilidade. Ahmed classifica as técnicas em dois grupos, técnicas ~~on-line~~ e técnicas *off-line*.

Confiabilidade

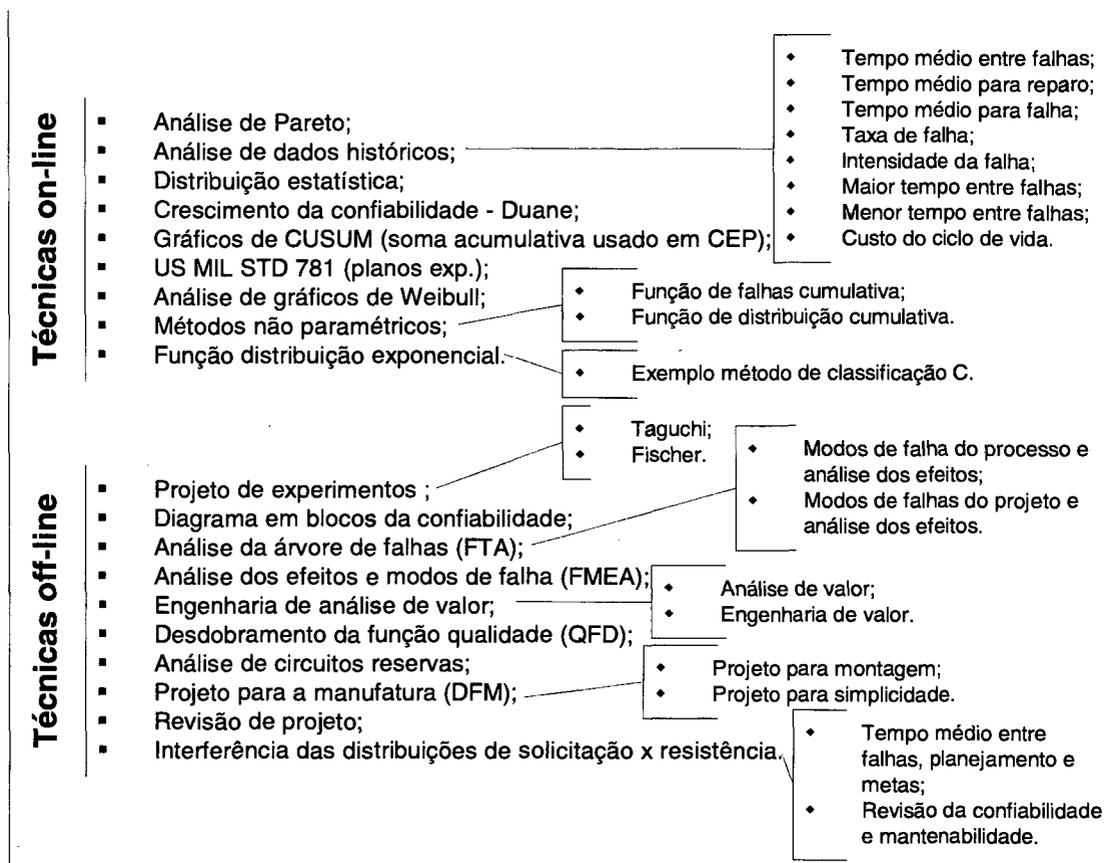


Figura 2-12 – Principais métodos para desenvolvimento da confiabilidade [2].

Algumas destas técnicas, tais como uso de Duane e MIL STD 781, já estão desatualizadas.

As técnicas *off-line* são as técnicas que asseguram a confiabilidade durante o projeto e a manufatura do produto. O autor destaca três técnicas principais:

- Métodos de Taguchi;
- Desdobramento da função qualidade (QFD) e;
- Análise dos modos de falha e seus efeitos (FMEA).

As técnicas *on-line* conforme Ahmed, são usadas para medir, monitorar e avaliar a confiabilidade (Padke [22] chama diferentemente as atividades durante a manufatura de *on-line* e *off-line* as atividades do projeto). Apesar da disponibilidade dos métodos, a aplicação ainda é modesta, problemas ou barreiras são encontradas durante a implementação dessas técnicas. As principais barreiras encontradas durante a aplicação destas técnicas são:

- a) A falta de treinamento ou consciência das técnicas;

- b) A aplicação dessas técnicas requer o uso de equipes interdisciplinares. Nesse contexto recursos significativos são gastos. Normalmente, um time de meio expediente é utilizado para diminuir os custos;
- c) A falta de compreensão e baixa aplicação das técnicas, leva à falsa impressão que elas são ineficientes;
- d) A falta de um compromisso da gerência e medo que essas técnicas que empregam longos procedimentos, possam distrair os engenheiros da sua principal atividade.

Conclui-se do trabalho de Ahmed que, a aplicação das técnicas é fundamental para o desenvolvimento da confiabilidade, durante as fases de projeto e manufatura.

2.4.4 ANÁLISE DOS TRABALHOS APRESENTADOS

Pode-se dizer que os trabalhos apresentados referem-se à confiabilidade de uma forma genérica, sem especificar a que tipo de produtos as técnicas propostas se aplicam. Talvez o objetivo seja esse mesmo, de abranger uma vasta gama de produtos, o que é uma meta difícil de ser atingida, devido às características muito distintas dos produtos, o que torna as tarefas muito genéricas. No caso de produtos mecatrônicos tem-se as particularidades das tecnologias mecânica, eletrônica e de software, que podem determinar tarefas específicas muito mais eficazes.

O DFR enfatiza métodos como “projeto térmico”, “análise de pior caso” e “auditoria dos fornecedores” como as técnicas de melhores resultados. As duas primeiras são aplicadas no projeto preliminar e a última na fase de preparo para a produção.

O processo SURGE enfatiza os ensaios acelerados, como substitutos para os ensaios tipo MIL-HDBK 781. Ensaios com o objetivo de gerar falhas para aprimorar o produto, encurtando-se assim o tempo de projeto. Outro aspecto citado pelo método é a forte sistematização do desenvolvimento de projetos, como forma de tornar o processo de projeto mais controlado e previsível.

Na abordagem moderna, proposta por Ahmed [2], destaca-se os métodos *off-line*, Taguchi, QFD e FMEA como os mais eficientes para a confiabilidade. Ahmed cita ainda, como causa da pouca utilização dos métodos, a falta de conscientização sobre a eficiência dos mesmos.

Outras técnicas poderiam ser citadas tais como: Projeto Robusto, baseado nas técnicas de Taguchi e as modernas técnicas preditivas utilizadas de forma específica para cada área, no entanto as técnicas aqui apresentadas já permitem uma boa compreensão do estado da arte.

2.5 ENSAIOS PARA A CONFIABILIDADE

Os ensaios são fundamentais para a garantia da confiabilidade durante o desenvolvimento de um produto. Num estudo realizado pelo Instituto Britânico de Administração, constatou-se que 36% dos problemas mais sérios da qualidade eram decorrentes de falta de ensaios dos novos produtos, materiais ou processos, e que 16% deviam-se à falta de especificações ou a especificações erradas (BELBIN apud JURAN [23]).

Entre outras ações que serão propostas no capítulo 5, para melhorar a confiabilidade, os ensaios evitam perdas com retornos acima do esperado, dentro do período de garantia. Os ensaios garantem o conhecimento da confiabilidade dos produtos, pode-se assim, determinar qual o período ideal de garantia. O conhecimento da confiabilidade e os respectivos programas de melhoria da confiabilidade podem garantir um aumento significativo de receitas, sendo que o conhecimento adquirido com a melhora da confiabilidade, irá estender-se a todos os futuros desenvolvimentos da empresa. Ou seja, a empresa entra num círculo virtuoso de confiabilidade, onde novos projetos apóiam-se nos estudos feitos anteriormente, para cada vez mais melhorar a confiabilidade.

Os ensaios permitem:

- a)** Determinar e corrigir fontes de variabilidade nos processos;
- b)** Experimentar várias soluções de projeto;
- c)** Determinar qual a melhor combinação entre diversos parâmetros de controle;
- d)** Verificar o correto funcionamento de uma solução;
- e)** Verificar facilidades na manutenção;
- f)** Verificar o funcionamento do sistema sob várias condições ambientais;
- g)** Determinar as características de confiabilidade do produto;

h) Eliminar itens ruins de um lote ou rejeitar o lote.

De maneira geral os ensaios visam detectar fatores de ruído, que influenciam no desempenho de um produto, e através de ações corretivas, minimizam ou eliminam os seus efeitos. A Figura 2-13 ilustra, através de um diagrama P (produto e processo), os principais fatores de ruído que influem no desempenho do produto / processo e os principais ensaios que podem ser utilizados para se descobrir como os ruídos atuam no sistema e assim tomar medidas corretivas, para eliminar ou minimizar os seus efeitos.

Os ruídos foram classificados em três tipos, ruídos externos, de unidade para unidade e devido à deterioração.

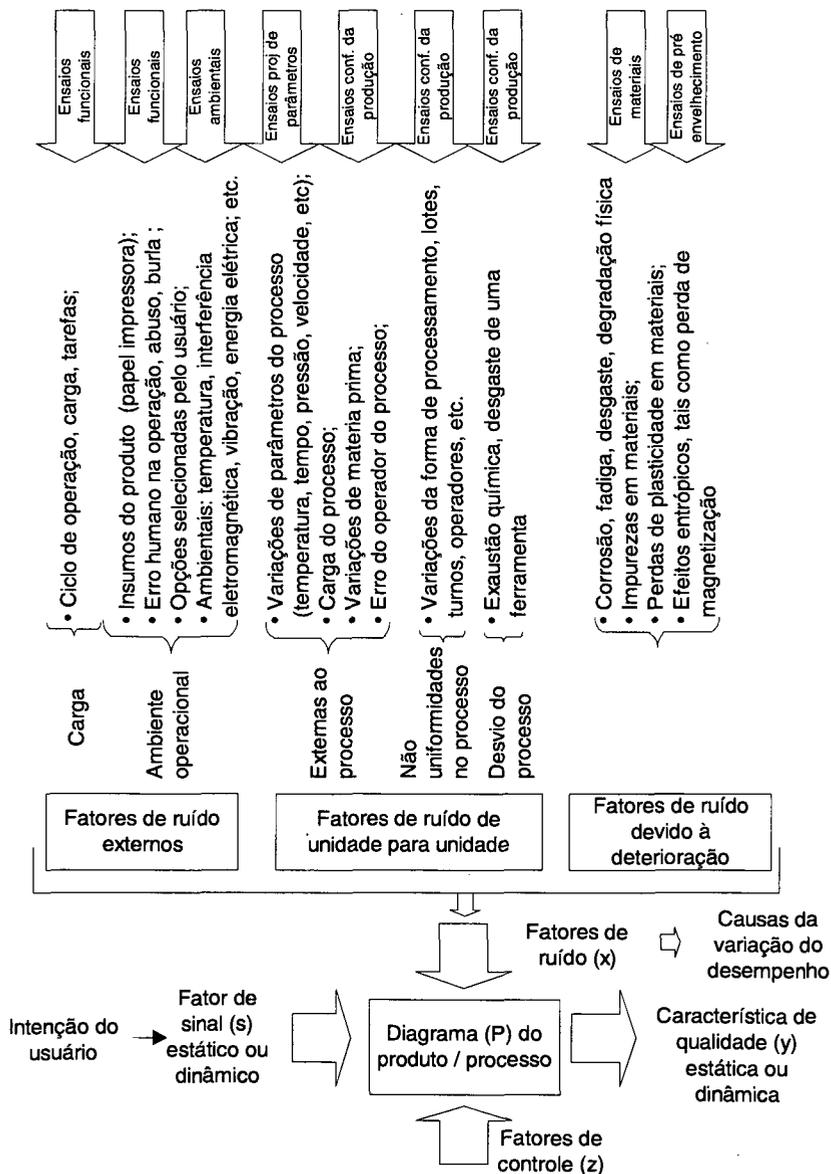


Figura 2-13 – Fatores de ruído que influem no desempenho do produto ou processo.

As possíveis ações corretivas visam: 1) Eliminar a fonte de ruído; 2) Minimizar ou eliminar a sensibilidade do produto ao ruído, se possível atuando nos fatores de controle. Às vezes pode ser muito caro, ou mesmo impossível, eliminar a fonte de ruído [24], tem-se assim como opção, minimizar a sensibilidade do produto / processo.

2.6 PRINCIPAIS CONSIDERAÇÕES BIBLIOGRÁFICAS

Na Figura 2-14 encontram-se resumidas as principais considerações bibliográficas que fundamentaram: a) A pesquisa sobre o processo da confiabilidade dentro da empresa (capítulo 4); b) A metodologia para a confiabilidade em produtos mecatrônicos MEGACOM (capítulo 5) e c) A sistematização dos ensaios para a confiabilidade em produtos mecatrônicos (capítulo 6).

ÁREA DE AÇÃO	PRINCIPAIS CONSIDERAÇÕES BIBLIOGRÁFICAS	ORIENTAÇÕES PARA O TRABALHO
Eletrônica	A robustez dos componentes eletrônicos e circuitos tornou-se boa o suficiente para resistir às vibrações mecânicas, calor e outras solicitações, que são comuns em sistemas mecânicos. Em geral a confiabilidade eletrônica é melhor do que a dos sistemas mecânicos.	Melhorias de confiabilidade devido à evolução dos componentes.
Software	O Software é a mais fácil das três áreas, para modelamento das funções, com a possibilidade de experimentar alternativas diretamente no computador [14].	Mecanismos, eficientes e a baixo custo.
Mecatrônica	Há diferenças significativas entre projetos mecânicos, eletrônicos e de software, não somente nas habilidades técnicas requeridas, mas as essências dos problemas diferem.	O uso de diferentes ferramentas.
	A soma da mecânica, eletrônica e software em sistemas mecatrônicos permite: 1) Atingir novas funções que não eram possíveis antes (por exemplo, dados de manutenção, recuperação de falhas, etc.); 2) Melhorar, aumentar as funções e facilitar a operação (por exemplo, funções inteligentes); 3) Aumentar a flexibilidade do projeto usando-se a flexibilidade do software; 4) Aumentar a flexibilidade para o uso dos produtos; 5) Compensação dos pontos fracos da construção mecânica (por exemplo, compensação de desgastes e absorção de vibrações); 6) Junção da mecânica e eletrônica para reduzir dimensões e custos de produção (por exemplo, sensores inteligentes e válvulas eletro-hidráulicas).	Um número de mecanismos que utilizam, principalmente, as características da eletrônica e do software, podem ser implementados para melhorar a confiabilidade dos produtos mecatrônicos.
	A tendência dos produtos mecatrônicos é de cada vez mais a eletrônica e principalmente o software, tomarem lugar da mecânica.	
Ensaio	Os ensaios são fundamentais para a garantia da confiabilidade durante o desenvolvimento de um produto. Num estudo realizado pelo Instituto Britânico de Administração, constatou-se que 36% das calamidades de qualidade eram decorrentes de falta de ensaios dos novos projetos, materiais ou processos, e que 16% deviam-se à falta de especificações ou a especificações erradas (BELBIN apud JURAN [24]).	Os ensaios contribuem significativamente para a melhoria da confiabilidade. A sistematização dos procedimentos de ensaio é importante para facilitar a aplicação dos mesmos.
	Os ensaios permitem: a) Determinar e corrigir fontes de variabilidade nos processos; b) Experimentar várias soluções de projeto; c) Determinar qual a melhor combinação entre diversos parâmetros de controle; d) Verificar o correto funcionamento de uma solução; e) Verificar facilidades na manutenção; f) Verificar o funcionamento do sistema sob várias condições ambientais; g) Determinar as características de confiabilidade do produto; h) Eliminar itens ruins de um lote, ou rejeitar o lote.	
	Os tipos de solicitações ambientais usadas durante os teste SURGE, para estimular o surgimento de falhas, em substituição aos ensaios de longa duração, são: 1) Testes de temperatura e umidade; 2) Vibrações aleatórias; 3) Ciclos de liga desliga (on/off); 4) Testes operacionais; 5) Interação com o operador; 6) Testes de abuso de software; 7) Combinação das solicitações acima. O método enfatiza que os ensaios não são de qualificação, aceitação ou ensaios de demonstração de confiabilidade. O objetivo é eliminar defeitos de projeto e manufatura, pela falha dos módulos ou produtos. A ênfase não é no medo das falhas, mas na determinação das suas causas.	

Figura 2-14 – Principais considerações bibliográficas (continua).

ÁREA DE AÇÃO	PRINCIPAIS CONSIDERAÇÕES BIBLIOGRÁFICAS	ORIENTAÇÕES PARA O TRABALHO
Metodologia	Garvin em 1987 determinou oito dimensões para a qualidade: desempenho, confiabilidade, durabilidade, manutenibilidade, estética, características, qualidade percebida e conformidade com o projeto.	A qualidade é um parâmetro mais amplo que a confiabilidade.
	Falhas de juventude caracterizam deficiências do controle de qualidade.	C.Q. para baixa taxa de falhas, nos primeiros instantes de vida.
	Muitas das causas de desgaste podem ser eliminadas no projeto, pela mudança da solicitação de operação, tipos de materiais ou ainda por manutenções preventivas.	Um bom projeto é fundamental para a confiabilidade do produto.
	Nota-se que a VDI 2221 segue uma linha de caracterização das funções e correspondente modularização do projeto.	A modularização é uma forma eficiente de projeto, que possibilita melhorias da manutenibilidade e confiabilidade.
	No caso de projetos mecatrônicos, o projeto subdivide-se a partir de um determinado ponto do projeto conceitual, em três projetos distintos, a saber: mecânico, eletrônico e software.	Consegue-se assim tratar especificamente de cada tecnologia.
	Uma empresa para ser competitiva precisa reduzir o tempo de introdução dos novos produtos no mercado (time to market - TTM). Contudo, a qualidade e em especial a confiabilidade do produto, não podem ser comprometidas.	A metodologia ajuda a evitar atrasos, com retornos às fases iniciais do projeto.
	O método SURGE prevê ainda, a aplicação de controles na fase de projeto, com o objetivo de tornar a atividade mais previsível e não de inibir a criatividade.	Esses controles devem estar integrados a uma metodologia.
	A confiabilidade é considerada como uma característica de qualidade, determinada após o produto pronto.	Essa era a visão antiga, a idéia do trabalho é atuar no projeto antecipando dificuldades.
	Apesar da literatura enfatizar mais modelos matemáticos e aspectos preditivos, há numerosos métodos e ferramentas que podem ser usadas para melhorar a confiabilidade. Aproximadamente 80 métodos que abordam a qualidade do produto e confiabilidade, foram listados por Juran em seu Manual para Controle de Qualidade.	Essas ferramentas e métodos precisam estar sistematizados e serem aplicados nos devidos tempos do projeto.
	Apesar da disponibilidade dos métodos, a aplicação ainda é modesta, problemas ou barreiras são encontradas durante a implementação dessas técnicas. As principais barreiras encontradas durante a aplicação das técnicas são: a) A falta de treinamento ou consciência das técnicas; b) A aplicação dessas técnicas requer o uso de equipes interdepartamentais, neste contexto, recursos significativos são gastos. Normalmente, um time de meio expediente é utilizado para diminuir os custos; c) A falta de compreensão e baixa aplicação das técnicas, leva à percepção que elas são ineficientes; d) A falta de um compromisso da gerência e medo que essas técnicas que empregam longos procedimentos, possam distrair os engenheiros da sua principal atividade.	O treinamento do pessoal é um fator importante, para a compreensão e aplicação eficiente de uma metodologia.
	Deve-se atentar que a definição de confiabilidade envolve basicamente sete aspectos: 1. O aspecto estatístico que é a probabilidade da ocorrência de uma falha; 2. O aspecto do nível de confiança que a probabilidade é expressa; 3. A probabilidade de falha é feita para um determinado intervalo de tempo, também chamado de tempo da missão; 4. A idade ou tempo de vida do produto deve ser especificada, pois a probabilidade de falha se altera com a vida; 5. A caracterização do que é considerado como falha, quais os limites de desempenho admitidos; 6. O aspecto do ambiente de operação, quais as solicitações ambientais que o produto estará sujeito; 7. As condições de uso do produto, qual o ciclo de operação, a carga, a solicitação operacional que o produto estará sujeito.	Considerando-se isso a especificação da confiabilidade de um produto na fase de projeto conceitual, deve incluir todos os 7 (sete) aspectos citados.
	Até agora, a disciplina de confiabilidade estava trabalhando sob o enfoque que confiabilidade, era uma disciplina quantitativa, que necessitava dados quantitativos, para suportar suas muitas técnicas baseadas em estatística, tais como alocação e modelos de redundância. Contudo, outro aspecto da confiabilidade, abordava os processos físicos pelos quais os componentes falhavam.	A análise da física das falhas pode ser utilizada em casos muito específicos. Fica mais restrita a fabricantes de componentes.
	Sistemas de engenharia encarregados de especificar, alocar, prever, e demonstrar a confiabilidade, enquanto que na física da falha, engenheiros e cientistas estavam empregando seus esforços para identificar e modelar as causas físicas das falhas.	
	A confiabilidade evoluiu muito na área eletrônica devido a forte padronização, por isto, é interessante verificar como a confiabilidade e sua predição evoluíram na área eletrônica, onde a confiabilidade atingiu seus melhores resultados.	O exemplo da eletrônica deve ser considerado, respeitando-se as diferenças entre as tecnologias.
	O aumento da complexidade dos sistemas e qualidade dos componentes resultou em uma mudança das causas de falhas dos componentes, para mais fatores em nível dos sistemas, incluindo manufatura, projeto, requisitos dos sistemas, interfaces e software. Historicamente, esses fatores não eram explicitamente avaliados nos métodos de predição.	A confiabilidade apresenta inúmeras dimensões a serem trabalhadas.
Métodos preditivos são inexatos e custosos. O fato é que, atualmente, não há outro método viável de domínio público.	Os métodos preditivos ainda são uma boa referência no projeto, principalmente de eletrônicos.	

Figura 2-14– Principais considerações bibliográficas (continuação).

ÁREA DE AÇÃO	PRINCIPAIS CONSIDERAÇÕES BIBLIOGRÁFICAS	ORIENTAÇÕES PARA O TRABALHO
Gerencial	<p>As maiores preocupações com confiabilidade originaram-se nos EUA, para dar suporte aos seus programas militar e aeroespacial.</p>	<p>Portanto as normas militares MIL-STD são uma boa fonte de referência, para estudos de confiabilidade.</p>
	<p>Um grupo de estudo no início dos anos cinquenta concluiu que :</p> <ul style="list-style-type: none"> · Havia necessidade de coletar dados de campo; · Melhores componentes precisavam ser desenvolvidos; · Requisitos quantitativos precisavam ser estabelecidos; · A confiabilidade precisava ser verificada por teste, após os componentes estarem em produção de escala industrial; · Um comitê permanente precisava ser constituído, para guiar a disciplina de confiabilidade. 	<p>Programas específicos para melhoria da confiabilidade devem ser desenvolvidos, atuando-se em várias frentes para melhoria da confiabilidade. Análises estatísticas utilizando-se distribuições apropriadas, ajudam no entendimento e modelamento da confiabilidade.</p>
	<p>Os anos cinquenta também apresentaram os primeiros trabalhos de confiabilidade, incluindo:</p> <ul style="list-style-type: none"> · Uma variedade de esforços, para melhorar a confiabilidade através da coleção de dados de projeto; · Estabelecimento de programas de confiabilidade; · Simpósios de Engenharia de Qualidade e Confiabilidade; · Técnicas estatísticas para desenvolvimento da confiabilidade, tais como o uso da distribuição de Weibull e exponencial; · Manuais Militares, que provêm guias para aplicação da confiabilidade de componentes eletrônicos. 	
	<p>Os Estados Unidos desenvolveram o programa VHSIC (very high speed integrated circuit), na tentativa de melhorar a tecnologia dos circuitos integrados. Do programa nasceu uma lista de fabricantes qualificados (Qualified Manufacturers List - QML), ou seja, uma metodologia que qualifica um fabricante de circuitos integrados, ao contrário da qualificação tradicional de peças específicas. A partir desta data, houve uma mudança do enfoque para qualificação do processo.</p>	<p>A partir desta data houve uma mudança do enfoque para qualificação do processo. Outros fatores entraram na equação da confiabilidade.</p>
	<p>Em termos de confiabilidade no Brasil, destaca-se a necessidade de criar bancos de falhas dos componentes e o uso incipiente da confiabilidade pelas indústrias brasileiras.</p>	<p>Um programa amplo de conscientização para a importância da confiabilidade, trará resultados em toda a cadeia produtiva.</p>

Figura 2-14– Principais considerações bibliográficas (continuação).

CAPÍTULO 3

PRÁTICAS DE GARANTIA DA CONFIABILIDADE NAS EMPRESAS DE PRODUTOS MECATRÔNICOS

Este capítulo apresenta as fases 2 e 3 do desenvolvimento do trabalho.

A fase 2 consistiu no acompanhamento do desenvolvimento de um produto mecatrônico dentro da Fundação CERTI (Centros de Referência em Tecnologias Inovadoras), particularmente no CIPd (Centro de Inovação em Produtos). A CERTI situa-se dentro do Campus da Universidade Federal de Santa Catarina e presta serviços para as empresas brasileiras. Durante esse acompanhamento foram enfatizados os ensaios, como forma de melhorar a confiabilidade do produto.

A fase 3 consistiu na visita às empresas de produtos mecatrônicos para verificar e confrontar a metodologia de desenvolvimento de produtos com ênfase na confiabilidade, na época na forma de uma metodologia de confrontação, com a prática de desenvolvimento das empresas. Durante as visitas, aspectos ligados à estrutura organizacional foram pesquisados.

Nesse capítulo apresentam-se detalhes da estratégia usada na pesquisa de campo e os critérios usados para avaliação da metodologia de confrontação. Encontra-se no final do capítulo as principais considerações práticas usadas para: a) Determinação do processo de confiabilidade nas empresas; b) Elaboração da metodologia MEGACOM; e c) Sistematização dos ensaios.

3.1 ACOMPANHAMENTO DO DESENVOLVIMENTO DE UM PRODUTO

Durante esta fase foi acompanhado o desenvolvimento de um produto mecatrônico, chamado Escrow. O CIPd no qual foi feito o acompanhamento, desenvolve produtos para empresas em geral e especializou-se, pela demanda do mercado, no desenvolvimento de produtos mecatrônicos. O seu trabalho de desenvolvimento, está voltado particularmente para o setor bancário, que tem demandado soluções para automatização dos seus serviços.

O acompanhamento deu-se com dois enfoques, o primeiro de conhecer a prática diária de uma equipe de desenvolvimento de produtos mecatrônicos e o segundo de acompanhar e ajudar no planejamento de ensaios durante o desenvolvimento. O primeiro enfoque serviu de base para a elaboração da metodologia de confrontação e posteriormente da “Metodologia para garantia da confiabilidade no desenvolvimento de produtos mecatrônicos - MEGACOM” (capítulo 5). O segundo enfoque, apesar de também servir como base para a metodologia, ajudou a sistematizar um importante aspecto da confiabilidade durante o desenvolvimento de um produto mecatrônico, que são os ensaios, descritos no capítulo 6 desse trabalho.

Nesse subitem apresentam-se os dois enfoques acima citados, além dos aspectos característicos do desenvolvimento de produtos mecatrônicos.

3.1.1 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO ESCROW

O Escrow de cédulas é um produto mecatrônico desenvolvido para o setor bancário, que tem por objetivo transporte interno e o armazenamento temporário de cédulas. O produto foi concebido para ser acoplado, juntamente com validadores de cédulas (máquinas que verificam a originalidade e o valor de cédulas, rejeitando cédulas falsas), em máquinas automáticas que aceitam cédulas. A Figura 3-1 mostra as principais partes mecânicas do projeto Escrow I.

Em resumo o Escrow executa a função de armazenamento temporário das cédulas introduzidas pelo usuário, até que a operação seja terminada, quando então as cédulas são armazenadas definitivamente num cofre. Caso a operação de pagamento seja cancelada no seu transcurso, o Escrow que armazenou as cédulas introduzidas, devolve-as ao usuário.

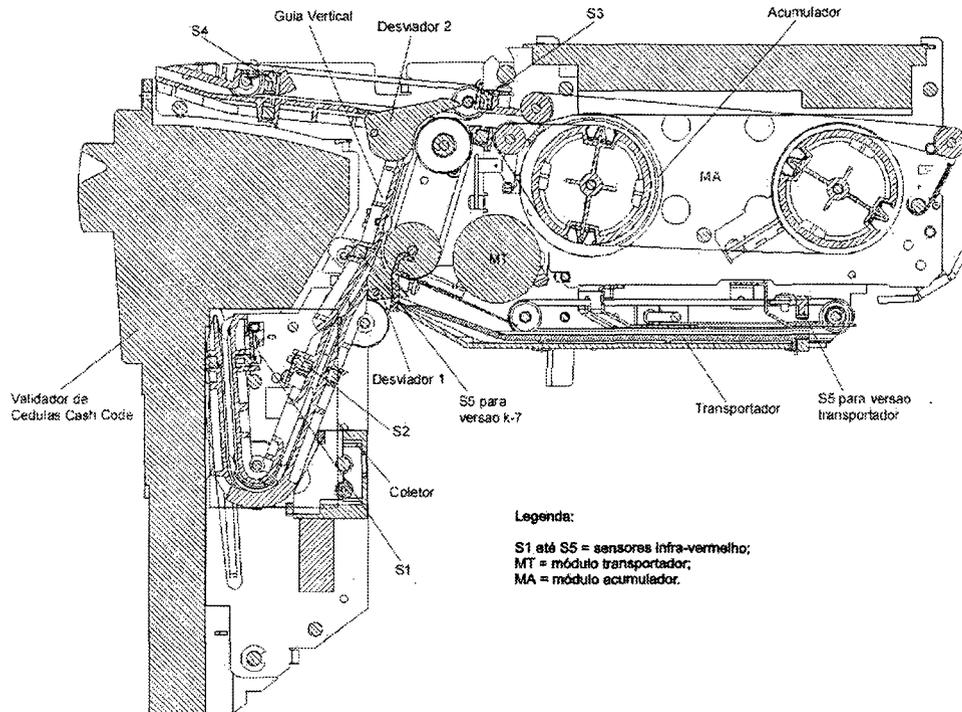


Figura 3-1 – Principais partes mecânicas do projeto Escrow I.

O produto veio a solucionar um problema enfrentado nas máquinas de pagamento automático, que era a de devolver cédulas diferentes das que foram introduzidas, possibilitando assim à máquina funcionar como trocadora de cédulas, mudando a sua real finalidade.

O projeto Escrow resultou em dois produtos distintos, o Escrow I e o Escrow II. O Escrow I foi desenvolvido sob uma ótica de atender apenas o mercado local. No final do desenvolvimento do Escrow I, houve uma mudança de visão da empresa contratante, que vendida para uma empresa norte americana, passou a vislumbrar um mercado muito maior, mas para isto, mudanças profundas de projeto foram feitas. Sendo assim, dentro de especificações totalmente novas, foi desenvolvido o Escrow II.

Esse trabalho baseia-se, principalmente, no acompanhamento do desenvolvimento do Escrow I. Do projeto Escrow II houve um acompanhamento, das principais atividades, com maior ênfase para os ensaios.

Pode-se sintetizar o acompanhamento do desenvolvimento do projeto Escrow, em dois tópicos: a) Fases do desenvolvimento do projeto, e b) Dificuldades enfrentadas.

A) PRINCIPAIS FASES DO DESENVOLVIMENTO

Pode-se resumir as principais fases do desenvolvimento pelas seguintes ações:

→ **Demanda pelo projeto:** A demanda surgiu da experiência do cliente no setor bancário, que vislumbrou um mercado promissor para o novo produto. O conhecimento das necessidades das grandes estatais e empresas do ramo, futuros usuários do produto, ajudou a garantir o mercado. Toda essa pesquisa inicial ficou a cargo do contratante, que possui o conhecimento do mercado.

→ **Levantamento dos parâmetros do projeto:** Especificações iniciais do projeto, principais características genéricas: flexibilidade, vida útil, atualização da configuração do software em campo, capacidade de armazenamento de cédulas, manutenibilidade, operação rápida, MTBF, manutenções preventivas, custo das peças, etc. Características das cédulas de diferentes tipos e estados de conservação, que apresentam uma variação muito grande, exigindo adaptação do produto, às diferentes condições. Muitas especificações foram feitas a partir de medições, dos parâmetros mecânicos no módulo validador de cédulas, ao qual o produto em desenvolvimento (Escrow) se acoplaria.

→ **Cronograma inicial:** Extremamente otimista, por vezes a CERTI / CIPd é obrigada a apresentar um cronograma otimista, para poder executar o projeto e efetuar ajustes à medida que dificuldades técnicas apareçam. Um cronograma otimista permite exercer uma certa pressão sobre os projetistas, a terem uma solução rápida para os desafios tecnológicos.

→ **Concepções preliminares:** As primeiras concepções culminaram com a montagem de uma maquete do produto, onde se podia simular o funcionamento do produto manualmente. Diferentes concepções foram antes analisadas e com a selecionada, fez-se a maquete.

→ **Módulos do produto:** O produto foi dividido em módulos, o que facilitou a divisão de tarefas entre os integrantes da equipe, bem como a compreensão do sistema.

→ **Construção dos protótipos:** A construção dos protótipos, requereu uma criteriosa avaliação dos fornecedores locais. Houve muita dificuldade em encontrar fornecedores e muitas peças precisaram de ajustes manuais após a fabricação. As peças mais críticas foram as feitas por estereolitografia.

→ **Protótipos do produto:** O protótipo inicial apresentou problemas relativos aos princípios de soluções adotadas (sistema não operacional). Na versão final diversos tipos de problemas ocorreram com o protótipo, mas as soluções adotadas com os devidos ajustes, mostraram-se adequadas.

→ **Especificação dos ensaios:** Diversos ensaios, específicos para algumas peças, foram feitos. Os principais ensaios realizados de todo o conjunto foram ensaios funcionais, para verificar as mais diversas situações possíveis, bem como a operacionalidade do produto. Ensaios para otimização de parâmetros utilizando-se Taguchi, também foram realizados.

B) DIFICULDADES ENFRENTADAS

→ O desenvolvimento do software operacional (*firmware*) avolumou-se, exigindo um tratamento mais sistêmico e um desmembramento em módulos, para desenvolvimento por dois programadores.

→ Problemas com materiais, engrenagens fabricadas com materiais diferentes dos especificados apresentaram problemas de desgaste prematuro.

→ Problemas com sensores com indicação incorreta, solução inicial usando uma mecânica muito delicada, não foi uma solução adequada. O problema foi que a montagem delicada, sensível a vibrações, também exigia uma energia do insumo básico do produto (cédulas), para o seu acionamento. O problema foi resolvido com o uso de sensores óticos reflexivos em conjunto com prismas.

→ Diversos problemas com peças móveis. Todas as peças móveis são críticas com respeito à confiabilidade e devem ser estudadas criteriosamente.

→ Problemas com os fornecedores dos protótipos iniciais e de início de produção, pouco confiáveis, escolhidos mais pelo critério de custo.

→ Grande variação das características dos materiais insumos básicos, tais como chapas com variação muito grande de espessura, o que determinou mudanças no projeto para compensar as grandes variações. Deve-se evitar o acúmulo de tolerâncias, deve-se prever mecanismos para que o sistema fique imune ou compense as variações dos materiais.

→ Muitas das deficiências mecânicas foram compensadas pela adaptação do software (*firmware*), já que este é mais fácil de ser modificado.

- Por vezes foi necessária muita sistematização, para isolar problemas do protótipo. A quantidade de possíveis causas para um problema obriga a adoção de procedimentos sistematizados, para isolar e determinar se a fonte do problema é mecânica, eletrônica ou do software.
- Um caminho eletrônico indevido, condição que não se imaginava inicialmente, exigiu uma maior potência dos motores do sistema, levando-os a um sobre aquecimento.
- Problemas de terminais sensíveis a quebrar com a vibração do funcionamento.
- Muitas vezes é difícil em nível de protótipo, ter-se uma boa qualidade em peças que exigem o desenvolvimento de ferramentas especiais, o que pode levar a um mau funcionamento do protótipo. Causando problemas de confusão na análise das falhas, para determinar se o problema foi devido ao princípio do projeto, ou da manufatura do protótipo.
- *Time outs*¹ e *watch dogs*² necessitaram de ajustes nos tempos, de forma a torná-los mais eficazes na prática.
- Certas partes do produto exigiram a colocação de sensores redundantes, para confirmar operações críticas.

3.1.2 PRINCIPAIS ENSAIOS PLANEJADOS E ACOMPANHADOS

Uma série de medições e ensaios foram planejados e realizados durante o desenvolvimento, os principais foram:

- a) **Medições gerais para determinar especificações:** As medições foram realizadas no validador de cédulas a ser acoplado ao Escrow, como forma de determinar um correto acoplamento mecânico e operacional entre as partes. Não houve preocupações maiores com metodologias, sendo as principais preocupações de tornar as medições significativas. Isso foi feito na medida do possível, já que poucas unidades do validador, estavam

¹ Time out: Tempo após o qual uma determinada atividade é suspensa, desde que não haja um retorno.

² Watch dog: Sistema de monitoramento contra a perda da seqüência lógica dos passos na execução de um programa.

disponíveis. As principais medições foram dimensionais, de velocidades de acionamento e de forças necessárias ao acoplamento entre os módulos.

- b) Medições gerais para conhecer alternativas de projeto:** Feitas para o conhecimento de possíveis soluções adotadas em produtos similares. Serviram de base para o estabelecimento das diversas opções de projeto. Não foram adotadas metodologias, uma vez que as medições serviriam apenas para delinear possíveis soluções de projeto. Novamente seria importante a adoção de uma metodologia de medida, não se quer dificultar o processo, apenas torná-lo mais compreensível e reproduzível.
- c) Medições gerais e ensaios de confiabilidade de peças:** Feitos para verificar se determinadas peças poderiam ser utilizadas no novo produto. Nesse caso, procedimentos de ensaios informais foram estabelecidos, com as principais variáveis de ensaio previamente determinadas. Nos ensaios de confiabilidade das peças buscaram-se formas de acelerar os ensaios, por meio do aumento da frequência, supondo-se não estar com isto, induzindo diferentes tipos de falhas. Periodicamente, as peças eram medidas para verificar desgastes ou degradações, sendo a perda das suas funções o principal indicativo de falha, que foi previamente estabelecida para cada caso.
- d) Ensaios funcionais de módulos:** Alguns módulos foram ensaiados separadamente dos demais, como forma de agilizar o projeto. Ensaios funcionais preliminares foram feitos nesses módulos, tentando simular o acoplamento com os demais módulos. A simulação das reais condições do ensaio, normalmente, dificulta o ensaio, chegando às vezes a inviabilizar a construção de dispositivos especiais, somente para testar um módulo. Obviamente, seria melhor se todos os módulos fossem previamente ensaiados, antes da integração.
- e) Ensaios funcionais preliminares:** Diversos ensaios funcionais foram feitos em protótipos, para verificar se o produto já estava operacional. Os primeiros protótipos sofreram inúmeras modificações, para corrigir as freqüentes falhas. Muitas das modificações foram ajustes de parâmetros de software, para compensar desajustes do hardware. O planejamento dos ensaios foi simples, baseando-se na determinação do número de ciclos a

serem efetuados e na verificação de possíveis falhas. Também nesse caso, as falhas foram anteriormente tipificadas, pela análise da árvore de falhas e as falhas foram devidamente documentadas.

- f) **Ensaio funcionais:** Mais ensaios funcionais foram feitos para determinar o comportamento do produto, com a variação do principal insumo que o produto recebe, as cédulas de dinheiro que circulam em seu interior. Ou seja, introduziram-se ruídos no produto, que tendiam a desviar o seu comportamento. Esses ensaios visavam verificar se o produto estava suficientemente robusto, para as variações do seu principal insumo. Modificações foram feitas a partir das observações do ensaio. O planejamento desse ensaio baseou-se, principalmente, na escolha de um lote de cédulas representativo da população. Como forma de acelerar as conclusões e tornar o produto mais robusto, um lote especial de cédulas com características piores do que o da população em geral, também foi testado.
- g) **Ensaio para o projeto de parâmetros:** Uma vez com o produto já razoavelmente operacional, decidiu-se por realizar um ensaio para otimizar os principais parâmetros de controle. Seguiu-se nesse ensaio a metodologia de Taguchi, com a devida escolha dos parâmetros de controle, seus níveis, característica de qualidade, ruídos externos ao produto e a escolha da matriz ortogonal que comportasse o número de fatores e níveis. A dificuldade de escolha de uma característica de qualidade, que sintetizasse o melhor funcionamento do produto, não permitiu conclusões significativas a respeito do projeto de parâmetros. Caso a característica de qualidade fosse facilmente quantificada e os parâmetros de controle, facilmente relacionados a essa, então as influências seriam mais facilmente determinadas.
- h) **Ensaio de confiabilidade:** Os ensaios de confiabilidade não foram completos e se limitaram a determinações de percentuais de falhas nas operações. Como os percentuais estavam abaixo dos percentuais de rejeição do módulo validador, ao qual o Escrow é acoplado, esses foram considerados satisfatórios, não se chegando a real determinação da taxa de falhas do Escrow. Uma das dificuldades para a determinação da taxa de falhas do Escrow foi a automatização dos ensaios. Precisaria-se de um

projeto mecânico à parte, somente para automatizar o ensaio de confiabilidade, tentou-se operacionalizar uma solução na qual dois Escrow ficariam trocando cédulas, mas o sistema não se mostrou muito confiável para uma operação contínua. Durante os chamados ensaios de confiabilidade vários parâmetros do produto foram monitorados automaticamente, com o objetivo de verificar possíveis desvios que determinassem um aumento da taxa de rejeição.

3.2 AVALIAÇÃO DO DESENVOLVIMENTO DE PROJETOS NAS EMPRESAS

Uma vez conhecida a realidade de um ambiente de desenvolvimento de projetos mecatrônicos, elaborou-se na terceira fase do trabalho, uma metodologia de desenvolvimento de projetos mecatrônicos com ênfase na confiabilidade (chamada de metodologia de confrontação) e foi-se a campo, para confrontação com a realidade do ambiente de desenvolvimento das empresas. De acordo com as respostas do mercado, modificações e adequações foram feitas na metodologia.

A abrangência do trabalho, desde os instantes iniciais da concepção do produto até a fabricação, colocação no mercado, assistência técnica e retirada do mercado, exigiu a participação de diversos setores das empresas, tais como marketing, assistência técnica, produção, comercialização, gerência, desenvolvimento de produtos etc.

3.2.1 METODOLOGIA DE CONFRONTAÇÃO

Uma metodologia genérica foi elaborada, como forma de avaliar os projetos das empresas. A metodologia de confrontação não poderia ter muitos detalhes operacionais devido a várias razões: 1) Era a primeira tentativa de juntar um conjunto de tarefas e compor uma metodologia; 2) A diversidade dos tipos de projetos e particularidades das empresas, não permitia uma metodologia muito detalhada; 3) Como se usaria o tempo e o pessoal das empresas, procurou-se ser o mais direto possível. Com essas diretrizes foi elaborada a metodologia de confrontação, que pode ser vista na Figura 3-2.

A metodologia de confrontação foi dividida em sete fases (detalhes em metodologias no capítulo 2). As fases são: 1) Projeto informacional; 2) Projeto conceitual; 3)

Projeto preliminar; 4) Projeto detalhado; 5) Produção; 6) Suporte e utilização e 7) Retirada do mercado. Cada uma das fases possui tarefas e ensaios característicos, que foram avaliados pela equipe de projeto das empresas visitadas.

Os ensaios foram nessa fase do trabalho divididos em dez tipos: 1) Medições gerais; 2) Ensaio operacionais; 3) Ensaio de materiais; 4) Ensaio de planejamento de parâmetros (DOE); 5) Ensaio acelerados; 6) Ensaio ambientais; 7) Ensaio de determinação e conformidade da confiabilidade; 8) Ensaio de aceitação da confiabilidade da produção; 9) Ensaio de pré-envelhecimento e 10) Ensaio de manutenibilidade.

A) PESO DAS TAREFAS / ENSAIOS DA METODOLOGIA

Dependendo da fase as tarefas / ensaios possuem um maior ou menor peso. Na distribuição dos pesos, levou-se em consideração o critério já consagrado [25], que as fases iniciais de projeto, possuem uma grande importância, já que determinam pontos de partida difíceis de modificar, quando o projeto já está nas fases mais avançadas. Isso é válido para tarefas a serem executadas. Quanto a ensaios, infelizmente nas fases iniciais, os ensaios só podem ser feitos em produtos da concorrência ou similares. Assim, os pesos atribuídos a cada uma das fases, para tarefas e ensaios, refletem essa orientação. Por exemplo, as tarefas do projeto informacional tiveram um peso atribuído de 20%, enquanto a fase de uso e apoio logístico, quando o sistema já está definido, tiveram um peso de apenas 5%. Já os ensaios ficaram concentrados nas fases de projeto preliminar, detalhado e produção, onde possuem pesos de 15, 50 e 20% respectivamente. A Figura 3-3 ilustra os pesos atribuídos a cada uma das fases, em termos de tarefas e ensaios executados.

B) CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO DAS TAREFAS / ENSAIOS DA METODOLOGIA

A avaliação do quanto, cada uma das tarefas e ensaios, foi cumprida no projeto analisado da empresa, seguiu um critério de classificação em 4 níveis:

Nível 1 → notas 1,2 e 3;

Nível 2 → notas 4,5 e 6;

Nível 3 → notas 7, 8 e 9 e

Nível 4 → nota 10.

Essa forma de classificação, facilita a avaliação, na Figura 3-3 pode-se ver o critério de avaliação, no quadro à direita da figura.

Fases 1 - Projeto informacional		<i>s/n</i>
Peso das tarefas do projeto informacional %		20,0
Etapa - Esclarecimento e definição do projeto		
1.1) Determinar as necessidades do cliente / pesquisar o mercado		
1.2) Pesquisar informações técnicas e de mercado sobre o produto		
1.3) Caracterizar o ambiente operacional		
1.4) Pesquisar normas de confiabilidade, regulamentares e de garantias do consumidor		
1.5) Hierarquizar requisitos do projeto		
1.6) Definir a confiabilidade do produto		
1.7) Definir a estratégia de solicitação reduzida das peças		
1.8) Definir a estratégia de manutenção		
1.9) Definir a estratégia de ensaios		
1.10) Definir a confiabilidade humana no projeto		
1.11) Definir a coleta de dados e documentação do projeto		
1.12) Definir a estratégias de tecnologias de projeto mecânico, eletrônico e de software		
1.13) Definir as especificações do projeto		
1.14) Revisar o projeto		
Ensaio / Medidas		
Peso dos ensaios do projeto informacional %		5,0
1) Medições gerais		
2) Ensaios operacionais		
3) Ensaios de materiais		
5) Ensaios acelerados		
6) Ensaios ambientais		
7) Ensaio de determinação e conformidade da confiabilidade		
10) Ensaios de manutenibilidade		
Fase 2 - Projeto conceitual		<i>s/n</i>
Peso das tarefas do projeto conceitual %		20,0
Etapa - Determinação das funções e suas estruturas		
2.1) Modelar o sistema mecatrônico		
2.2) Construir a estrutura funcional do sistema		
2.3) Considerar simplicidade, clareza e unidade (DFR)		
2.4) Revisar o projeto		
Etapa - Pesquisar por princípios de solução e suas combinações		
2.5) Gerar alternativas de projeto		
2.6) Avaliar as alternativas		
2.7) Fazer predição / ensaiar a confiabilidade em produtos similares		
2.8) Revisar o projeto		
Etapa - Divisão em módulos realizáveis		
2.9) Identificar possíveis módulos		
2.10) Fazer um diagrama de blocos		
2.11) Revisar o projeto		
Ensaio / Medidas		
Peso dos ensaios do projeto conceitual %		5,0
1) Medições gerais		
2) Ensaios operacionais		
3) Ensaios de materiais		
5) Ensaios acelerados		
6) Ensaios ambientais		
7) Ensaio de determinação e conformidade da confiabilidade		
10) Ensaios de manutenibilidade		

Figura 3-2 – Tarefas analisadas no desenvolvimento dos projetos das empresas divididas nas várias fases do projeto – Metodologia de confrontação (continua).

Fase 3 - Projeto preliminar		<i>s/n</i>
Peso das tarefas do projeto preliminar %		20,0
Etapa - Desenvolvimento dos Módulos Principais		
3.1) Alocar a confiabilidade dos módulos em nível de componentes		
3.2) Analisar os efeitos dos períodos de armazenagem ou não operação na confiabilidade		
3.3) Projetar levando em consideração EMI / EMC		
3.4) Determinar itens críticos de software e hardware		
3.5) Selecionar peças / fornecedores		
3.6) Aplicar a estratégia de solicitação reduzida estabelecida		
3.7) Fazer modelos / simulações		
3.8) Cuidar com placas de circuitos impressos		
3.9) Verificar possíveis mecanismos de falha (FTA / FMEA)		
3.10) Planejar o desgaste das peças sem perda de todas as funções do produto		
3.11) Fazer o projeto técnico do produto		
3.12) Revisar o projeto		
Ensaio / Medidas		
Peso dos ensaios do projeto preliminar %		15,0
1) Medições gerais		
2) Ensaios operacionais		
3) Ensaios de materiais		
4) Ensaios de planejamento de parâmetros (DOE)		
5) Ensaios acelerados		
6) Ensaios ambientais		
7) Ensaio de determinação e conformidade da confiabilidade		
10) Ensaios de manutenibilidade		
Fase 4 - Projeto detalhado		
Peso das tarefas do projeto detalhado %		25,0
Etapa - Desenvolvimento geral do produto		
4.1) Integrar as tecnologias		
4.2) Analisar as falhas e propor ações corretivas		
4.3) Analisar os efeitos das tolerâncias no desempenho do produto (variabilidade e piores casos)		
4.4) Analisar os circuitos ocultos SW e HW		
4.5) Fazer ensaios de normas regulamentares e aspectos de segurança		
4.6) Verificar embalagem quanto a solicitações ambientais		
4.7) Documentar o projeto / produto		
4.8) Revisar o projeto		
Etapa - Prepare a produção e instruções de operação		
4.9) Determinar possíveis mecanismos de falhas no processo		
4.10) Otimizar os parâmetros do processo produtivo		
4.11) Fazer ensaios das placas de circuitos impressos		
4.12) Determinar os parâmetros funcionais do produto		
4.13) Documentar o processo produtivo		
4.14) Revisar o projeto		
Ensaio / Medidas		
Peso dos ensaios do projeto detalhado %		50,0
1) Medições gerais		
2) Ensaios operacionais		
3) Ensaios de materiais		
4) Ensaios de planejamento de parâmetros (DOE)		
5) Ensaios acelerados		
6) Ensaios ambientais		
7) Ensaio de determinação e conformidade da confiabilidade		
8) Ensaios de aceitação da confiabilidade da produção		
10) Ensaios de manutenibilidade		

Figura 3-2– Tarefas analisadas no desenvolvimento dos projetos das empresas divididas nas várias fases do projeto – Metodologia de confrontação (continuação).

Fase 5 - Produção durante o ciclo de vida		<i>s/n</i>	
Peso das tarefas da produção %			10,0
Etapa - Produção			
5.1) Controlar os parâmetros funcionais internamente e nos fornecedores			
5.2) Revisar o projeto			
Ensaios / Medidas			
Peso dos ensaios da produção %			20,0
1) Medições gerais			
2) Ensaios operacionais			
3) Ensaios de materiais			
4) Ensaios de planejamento de parâmetros (DOE)			
8) Ensaios de aceitação da confiabilidade da produção			
9) Ensaios de pré envelhecimento			
Fase 6 - Suporte e utilização do produto		<i>s/n</i>	
Peso das tarefas de suporte e utilização do produto %			5,0
6.1) Fazer a coleta de dados de campo			
6.2) Analisar falhas e propor ações corretivas			
Fase 7 - Retirada do produto do mercado			
Peso das tarefas de retirada do produto do mercado %			
7.1) Elaborar plano de retirada do produto do mercado			
7.2) Fazer coleta de dados de campo			
Ensaios / Medidas			
Peso dos ensaios de suporte e utilização do produto %			5,0
1) Medições gerais			
2) Ensaios operacionais			
3) Ensaios de materiais			

Figura 3-2– Tarefas analisadas no desenvolvimento dos projetos das empresas divididas nas várias fases do projeto – Metodologia de confrontação (continuação).

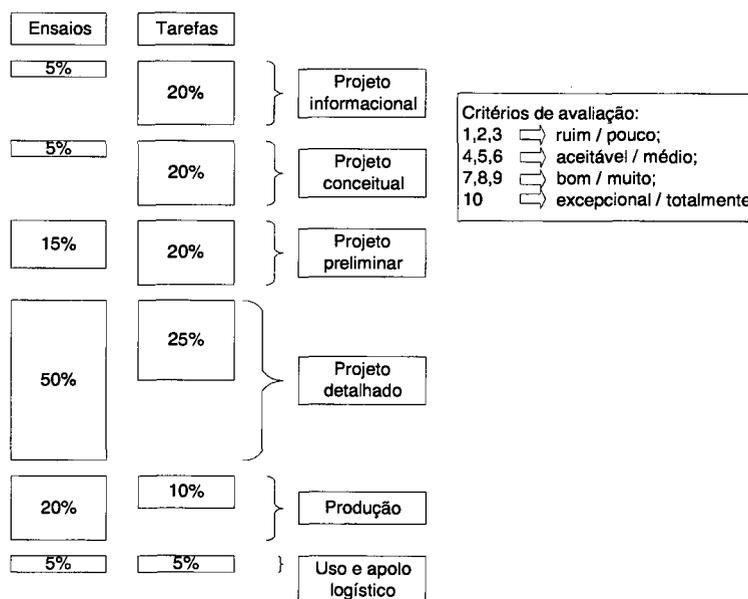


Figura 3-3 – Pesos adotados nas fases para ensaios e tarefas e critérios de avaliação.

3.2.2 PROGRAMAÇÃO DA VISITA

Uma vez definida a metodologia de confrontação, pesos e critérios de avaliação,

passou-se à elaboração da programação de visita. A programação da visita, com título “Práticas de confiabilidade no desenvolvimento de produtos mecatrônicos”, teve como critérios na sua elaboração:

- a) Alterar o mínimo possível as atividades normais das empresas visitadas;
- b) Buscar subsídios para a metodologia;
- c) Contribuir com sugestões úteis no desenvolvimento de produtos.

A Figura 3-4 mostra a programação da visita elaborada para ser cumprida em três dias. A programação contém três fases:

1. Na primeira fase, uma apresentação da metodologia de confrontação com suas tarefas e ensaios é feita. As outras atividades da fase envolvem conhecer os produtos da empresa, metodologias de desenvolvimento e definição do produto a ser avaliado, na próxima fase;
2. Na segunda fase, um projeto da empresa é confrontado com a metodologia e notas são dadas pela equipe de projeto, pelo seguimento ou não de cada uma das tarefas e ensaios propostos. A outra atividade da fase é a avaliação da infra-estrutura da empresa e busca de informações para conclusão da análise do desenvolvimento de produtos na empresa;
3. Na terceira fase os resultados finais da confrontação são apresentados, sugestões, comentários e recomendações são feitas de ambas as partes (empresa e pesquisador).

3.2.3 PERFIL DAS EMPRESAS DE PRODUTOS MECATRÔNICOS ESTUDADAS

As empresas foram selecionadas considerando-se alguns critérios:

- a) Ter em sua linha, produtos mecatrônicos de médio porte;
- b) Reconhecimento pelo mercado da qualidade dos seus produtos;
- c) O porte da empresa não poderia ser muito grande, pois dificultaria ou mesmo inviabilizaria o trabalho, já que seria necessária a participação de muitos setores da empresa. No entanto uma empresa de grande porte foi selecionada, confirmando as dificuldades acima citadas;
- d) Facilidades oferecidas para a execução do trabalho, tais como interesse, proximidade, disponibilização de informações de projeto e outras.

"PRÁTICAS DE CONFIABILIDADE NO DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS MECATRÔNICOS" - PROGRAMAÇÃO DA VISITA ÀS EMPRESAS			
Atividade 1	Atividade 2	Atividade 3	Atividade 4
<p>Apresentação da "Metodologia para Garantia da Confiabilidade no Desenvolvimento de Produtos Mecatrônicos - Versão de Confrontação".</p> <p>Participantes Preferenciais: Gerentes de Produto, Engenharia, Produção, Controle de Qualidade / representantes dos segmentos mecânico, eletrônico e de software, setor da qualidade, setor de produção e outros setores relacionados.</p> <p>Duração de até 3h</p>	<p>Conhecer os Produtos / Plataforma de Produtos da Empresa e Infra Estrutura.</p> <p>Envolvidos o Gerente de Engenharia e auxiliares designados.</p> <p>Duração o Restante do dia</p>	<p>Conhecer a prática de desenvolvimento de produtos da empresa com ênfase nos aspectos de confiabilidade.</p>	<p>Definir um "produto plataforma P" como objeto de estudo.</p>
1º DIA			
<p>Atividade 5</p> <p>Reunião para comparar as tarefas da metodologia de confrontação com a prática da empresa no produto / plataforma P. Debatendo-se prós e contras.</p> <p>Participantes Preferenciais: Gerente de engenharia / representantes dos segmentos mecânico, eletrônico e de software, setor da qualidade, setor de produção e outros setores relacionados.</p> <p>Duração de até 3h</p>	<p>Atividade 6</p> <p>Trabalho de compilação e busca de informações complementares, inclusive visita à instalação da empresa para conhecimento de detalhes da infra estrutura, procedimentos , etc.</p> <p>Envolvidos equipe de projeto, produção e qualidade, para eventuais consultas informais.</p> <p>Duração o Restante do dia</p>		
2º DIA			
<p>Atividade 7</p> <p>Reunião de fechamento e apresentação de resultados / sugestões.</p> <p>Participantes Preferenciais: Gerentes de Produto, Engenharia, Produção, Controle de Qualidade / representantes dos segmentos mecânico, eletrônico e de software, setor da qualidade, setor de produção e outros setores relacionados.</p> <p>Duração de até 3h</p>			
3º DIA			

Figura 3-4 – Programação do estudo feito junto às empresas de produtos mecatrônicos”.

Empresa	Característica das empresas	Nacionalização módulos / componentes	Faturamento anual geral da empresa (milhões de reais)	Período de garantia (meses)	Unidades produzidas ano do produto analisado	Faturamento com o produto analisado (milhões de reais)
A	Médio porte Moderna S/A horizontalizada	30% módulos importados - 60% módulos fabricados por terceiros nacionais -10% módulos fabricados internamente	110 (estimado)	6	6.000	3
B	Pequeno porte Tradicional Ltda verticalizada	80% módulos internos - 20% módulos terceirizados nacional	30 (estimado)	33 (estuda expansão)	2.000	20 (estimado)
C	Tradicional grande porte S/A verticalizada	100 % componentes nacionais, fabricação interna, exceto alguns componentes eletrônicos	1.250 (estimado)	12 a 36 (conforme mercado)	250.000	25
D	Médio porte, S/A tradicional verticalizada	70% componentes importados - 30% componentes nacionais	não fornecido	12	100.000 (estimado)	6

Figura 3-5 – Perfil das empresa analisadas no estudo.

A Figura 3-5 apresenta um perfil das empresas analisadas. Pode-se verificar que empresas de médio porte (faturamento acima de 100 milhões de reais) foram selecionadas, com exceção de uma considerada de grande porte (faturamento acima de 500 milhões de reais).

A execução do trabalho teve uma grande aceitação por parte das empresas participantes, interessadas em conhecer formas de melhorar a confiabilidade dos seus produtos. Muitas das empresas consideraram o trabalho como uma forma de treinamento para os seus funcionários e uma oportunidade de reunir os diferentes responsáveis pela confiabilidade dos produtos, para discutir o assunto. Houve uma participação ativa dos funcionários, com sugestões para o trabalho, como também várias formas de melhorar a confiabilidade dos produtos da empresa foram discutidas.

A Figura 3-6 apresenta o perfil dos participantes das empresas visitadas, pode-se ver, que houve uma participação do pessoal de diversas áreas, como foi solicitado, devido a natureza multidisciplinar da avaliação.

3.2.4 RESULTADOS DA APLICAÇÃO DA METODOLOGIA DE CONFRONTAÇÃO

Os resultados da etapa de confrontação com um projeto da empresa, podem ser vistos na Figura 3-7. Outras considerações também são feitas, para ter-se uma idéia do contexto geral da empresa.

EMPRESAS	Participantes pelas empresas da etapa de pesquisa de "Práticas de confiabilidade no desenvolvimento de produtos mecatrônicos"
A	Analista da qualidade, Gerente industrial, Gerente de engenharia, Projetista mecânico, Diretor técnico.
B	Diretor de expansão industrial & qualidade, Diretor geral, Gerente da assistência técnica, Gerente de projetos, Supervisor industrial.
C	Especialista produto / confiabilidade, especialista em garantia da qualidade, pesquisador, gerente do projeto.
D	Coordenador de projetos, gerente de planejamento industrial, supervisor do laboratório de confiabilidade e aprovação, coordenador do projeto, supervisor de importação, coordenador de desenvolvimento de fornecedores, responsável pela assistência técnica, engenheiro de processos, inspeção do produto.

Figura 3-6 – Perfil dos participantes do programa “Práticas de confiabilidade no desenvolvimento de produtos mecatrônicos”.

Na coluna do uso ou não de metodologia no desenvolvimento, vê-se que não é costume das empresas ter uma metodologia definida, isto mesmo para empresa grandes e consolidadas no mercado.

Outra constatação é do pouco uso de normas, sejam elas nacionais ou internacionais. Isto demonstra a falta de cultura no uso de normas, bem como demonstra a pouca preocupação em expandir as exportações dos produtos para mercados mais exigentes, onde a adequação a normas é um critério indispensável. Os tempos de desenvolvimento normalmente visados giram em torno de 12 meses, mas quase sempre sofrem atrasos, podendo-se dizer que chegam a atingir em média 18 meses.

De uma maneira geral as notas atribuídas pela equipe de projeto às tarefas sugeridas pela metodologia, podem ser consideradas como boas (acima de 6). Embora se deva fazer a observação que, normalmente documentos comprobatórios da execução das tarefas não foram verificados. Considerou-se assim o fato dos assuntos sugeridos nas tarefas serem levados em consideração sem maiores comprovações formais.

Tipos de ensaios realizados no desenvolvimento / produção e apoio	Principais normas utilizadas	Ferramentas usadas para confiabilidade	Tecnologia dos produtos / processos	Tempo de desenvolvimento	Tempo de vida no mercado (estimad.)	Metod. desenvolvido para produtos	Médias das notas atribuídas pela equipe a tarefas que visam a confiabilidade no projeto	Médias das notas atribuídas pela equipe a ensaios que visam a confiabilidade no projeto
<p>A</p> <ul style="list-style-type: none"> • Teste de vida (esporádicos) / acelerados; • Testes funcionais após produção 100%. 	<p>Atualmente atende normas exigidas pelo cliente. Pretende usar UL, TÜV, IEC, ULC exportar.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Banco dados falhas; • Fornecedor participam do projeto. 	<ul style="list-style-type: none"> • Chapas corte laser; Tratamento zincado; • Engrenagens retas; • Micro processador; • Placa impressa SMD 4 camadas; • Bios eprom. 	12 meses (estimado)	não definido (estima-se de 24 meses)	Utiliza metodologia interna de produção detalhada.	<p>Projeto informacional = 7,6 Projeto conceitual = 7,0 Projeto preliminar = 4,8 Projeto detalhado = 7,2 Produção = 7,5 Suporte = 6,0 Retirada do mercado = n.d Média Final = 6,7</p>	<p>Projeto informacional = 5,0 Projeto conceitual = 6,2 Projeto preliminar = 5,0 Projeto detalhado = 5,0 Produção = 5,2 Suporte = 1,5 Média Final = 4,9</p>
<p>B</p> <ul style="list-style-type: none"> • O fornecedor do componente chave não faz teste vida; • Testes funcionais após produção 100%. 	<p>Algumas normas de menor porte de padronização de cores em chicotes.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Relatórios de não conformidade 	<ul style="list-style-type: none"> • Placas impressas perfuradas dupla face; • Releés de estado sólido (migração); • Chapas pintadas a seco. 	12 meses	Não definido espera-se + 4 anos	não definida.	<p>Projeto informacional = 5,5 Projeto conceitual = 8,0 Projeto preliminar = 7,3 Projeto detalhado = 6,2 Produção = 6,0 Suporte = 5,5 Retirada do mercado = 2,0 Média Final = 6,6</p>	<p>Projeto informacional = 8,0 Projeto conceitual = 5,7 Projeto preliminar = 5,9 Projeto detalhado = 5,7 Produção = 5,2 Suporte = 6,0 Média Final = 5,7</p>
<p>C</p> <ul style="list-style-type: none"> • Testes de vida durante desenvolvimento e modelagem da confiabilidade; • Testes durante a produção normal 30 dias acelerado; • Testes funcionais após produção. 	<p>Normas UL e IEC dependem do mercado.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Predição confiabilidade • FMEA; • Análise de situações adversas; • Testes acelerados. 	<ul style="list-style-type: none"> • Placas impressas perfuradas dupla face; • Microprocessada; • Chapas repuxadas e tratadas; • Mecânica fina nos comp. principais. 	30 meses 1ª geração; 22 meses 2ª geração.	Não definido espera-se + 10 anos.	Disse utilizar várias.	<p>Projeto informacional = 8,8 Projeto conceitual = 6,5 Projeto preliminar = 8,3 Projeto detalhado = 9,3 Produção = 10 Suporte = 9,0 Retirada do mercado = n.d Média Final = 8,5</p>	<p>Projeto informacional = 9,7 Projeto conceitual = 9,0 Projeto preliminar = 9,9 Projeto detalhado = 9,8 Produção = 10 Suporte = 7,3 Média Final = 9,7</p>
<p>D</p> <ul style="list-style-type: none"> • Teste de vida de um componente crítico; • Testes operacionais após produção. 	<p>Padrões ditados pelo regulador do mercado nacional.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Seleção de ferramentas específicas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Chip on board, placas SMD, dupla face; • Display cristal líquido; • Microprocessador; • Peças injetadas. 	Máximo 2 anos.	Máximo 2 anos.	não definida.	<p>Projeto informacional = 7,3 Projeto conceitual = 8,0 Projeto preliminar = 6,4 Projeto detalhado = 7,6 Produção = 8,0 Suporte = 8,0 Retirada do mercado = n.d Média Final = 7,4</p>	<p>Projeto informacional = 3,0 Projeto conceitual = 7,3 Projeto preliminar = 7,3 Projeto detalhado = 7,5 Produção = 7,3 Suporte = 8,0 Média Final = 7,2</p>

Figura 3-7 – Resumo das principais constatações do estudo às empresas de produtos mecatrônicos, incluindo as notas dadas pela adequação com a metodologia de confrontação.

3.2.5 AVALIAÇÃO GERENCIAL DA INFRA-ESTRUTURA E OPERACIONAL DA EMPRESA

Outras avaliações feitas com a participação de um gerente de projeto, ou cargo compatível, foram com respeito à infra-estrutura, aspectos gerenciais e operacionais da confiabilidade dentro da empresa. Os aspectos de infra-estrutura, gerenciais e operacionais foram classificados em cinco níveis de acordo com o grau de sistematização dos mesmos ou de disponibilizar recursos. A Figura 3-8 mostra os resultados da avaliação nas quatro empresas visitadas, bem como o critério de classificação em cinco níveis. Pode-se observar que em termos de infra-estrutura os pontos mais frágeis foram considerados:

- Estrutura da organização para a confiabilidade;
- Uso de normas técnicas;
- Laboratórios.

Em termos operacionais os pontos fracos foram considerados:

- Uso de ferramentas para análise de confiabilidade;
- Medições de confiabilidade;
- Estratégia de manutenção;
- Auditoria de projetos.

A avaliação gerencial de maneira geral foi considerada satisfatória.

3.2.6 AVALIAÇÃO DA METODOLOGIA

Como forma de avaliar a compatibilidade da metodologia de confrontação, com a prática das empresas, três análises foram feitas:

1. A primeira análise consistiu em verificar o número de tarefas consideradas relevantes pela equipe de projeto das empresas, independentemente da nota atribuída, já que a equipe, tinha a oportunidade de considerar uma tarefa, como não indicada para o projeto analisado e assim não lhe atribuir nota. As tarefas sugeridas na metodologia de confrontação foram aceitas como relevantes, na pior das avaliações, em 93% dos casos. No caso dos ensaios, esses foram considerados relevantes, na pior das avaliações, em 68 % dos casos.

Avaliação gerencial	Avaliações				Avaliação operacional	Avaliações			
	EMPRESAS					EMPRESAS			
	A	B	C	D		A	B	C	D
1) Política de confiabilidade da empresa	4	4	4	3	1) Metodologia de desenvolvimento de produtos	(3)	3	5	2
2) Métodos de gestão	3	3	5	4	2) Treinamento de pessoal	1	4	5	4
3) Realização de benchmarking de gestão e políticas	1	4	5	5	3) Levantamento de requisitos de projeto / análise de mercado	3	3	4	4
4) Política de vendas de peças de reposição / assistência técnica	(3)	4	5	3	4) Benchmarking produto / processo	1	4	4	4
5) Como são estruturadas as equipes de desenvolvimento	(3)	3	5	5	5) Aplicação das diretrizes modernas de projeto	1	4	4	4
Médias das avaliações dos aspectos gerenciais	3	4	5	4	6) Uso das melhores tecnologias mecânica, eletrônica e de software	4	4	5	4
Avaliação da infra estrutura	A	B	C	D	7) Uso das ferramentas de confiabilidade	1	3	4	2
1) Equipe de projeto	3	4	4	4	8) Medições de confiabilidade	1	4	4	3
2) Estrutura da organização para a confiabilidade	1	4	4	3	9) Passagem do projeto para a produção	3	3	4	4
3) Acesso a fontes de informação	3	3	5	3	10) Seleção de componentes e fornecedores	4	4	4	4
4) Uso de normas técnicas	1	3	5	3	11) Controle da qualidade da produção	3	4	5	4
5) Uso de ferramentas de desenvolvimento de produtos	4	4	4	4	12) Assistência técnica	2	3	4	4
6) Laboratórios	2	2	5	3	13) Estratégia de manutenção	1	3	5	3
7) Metrologia	2	3	5	4	14) Captar dados da assistência técnica	4	3	5	3
8) Controle da qualidade da produção	3	3	5	5	15) Auditoria de projetos	1	2	5	4
9) Banco de dados de projeto	2	3	5	5	16) Documentação de projetos	4	3	4	5
Médias das avaliações dos aspectos de infra estrutura	2	3	5	4	17) Acompanhamento de projetos	5	4	4	4
Obs: () valores estimados, não foram atribuídos pela equipe da empresa.					Médias das avaliações dos aspectos operacionais	2	3	4	4
Critérios de Avaliação Nível 5 - Otimizado - Melhoria contínua do processo através da realimentação quantitativa. Nível 4 - Gerenciado - São feitas medições detalhadas do processo. O processo é entendido quantitativamente. Nível 3 - Definido - O processo é documentado, padronizado e integrado em processos padrões da organização. Nível 2 - Repetitivo - Processos básicos estabelecidos para controlar custos, cronogramas e funcionalidade. Nível 1 - Inicial - Processo ocasional até caótico, pouco definido, sucessos dependem dos esforços individuais.									

Figura 3-8 – Quadro resumo da avaliação dos aspectos gerenciais, de infra-estrutura e operacionais das empresas sob o enfoque da confiabilidade.

2. A segunda análise consistiu em um questionário de avaliação sobre a metodologia. As perguntas e respostas das empresas podem ser vistas na Figura 3-10. A análise das respostas mostra a validade do trabalho. Um importante aspecto considerado, que pode ser objeto de um futuro trabalho, é de facilitar a execução da aplicação das tarefas através de ferramentas de software, que já auxiliem na documentação do projeto. Outro aspecto levantado pelas empresas é uma sensação, que a aplicação da metodologia, iria dilatar os prazos do projeto.

Fases do Projeto	Tarefas sugeridas pela metodologia	Empresas				Ensaios sugeridos pela metodologia	Empresas			
		Tarefas consideradas relevantes					Ensaios considerados relevantes			
		A	B	C	D		A	B	C	D
1) Projeto informacional	14	14	14	12	13	7	1	5	7	1
2) Projeto conceitual	11	10	11	11	11	7	6	7	7	3
3) Projeto preliminar	12	11	12	12	9	8	8	8	8	7
4) Projeto detalhado	14	13	14	14	14	9	9	9	9	8
5) Produção	2	2	2	2	2	6	6	5	6	6
6) Suporte e utilização	2	2	2	2	2	3	3	3	3	2
Totais	55	52	55	53	51	40	33	37	40	27
Percentagens	Percent. do total %	95	100	96	93	Percent. do total %	63	93	100	68

Figura 3-9 – Percentagem das tarefas e ensaios sugeridas consideradas relevantes pelas empresas.

Considera-se que, o que mais atrasa o projeto, são os trabalhos feitos, por causa da não consideração de determinados aspectos ou ensaios não feitos, nos seus devidos tempos. Por dificuldades para execução da programação completa, uma das empresas não respondeu ao questionário;

3. A terceira análise consistiu de cartas de recomendação, ou não da metodologia. As cartas, no seu conteúdo recomendam a metodologia. Da mesma forma que no preenchimento do questionário, uma das empresas não elaborou a carta de recomendação, por não ter participado da programação completa. A Figura 3-11 contém os principais comentários das cartas.

É claro que uma unanimidade não pode ser conseguida em termos de projetos, já que os diversos aspectos dos projetos, tomam contornos diferentes em cada aplicação. Acredita-se, com base nas análises feitas, que a metodologia sistematiza um conjunto de tarefas e ensaios, e quando corretamente aplicada, trará resultados cada vez mais significativos ao longo da sua aplicação continuada em diferentes projetos. Deve-se dizer ainda, que caso a empresa opte pela elaboração de uma metodologia própria, o que parece ser o mais indicado, ela já terá todo um estudo que pode ser adaptado às suas necessidades.

EMPRESAS PERGUNTAS	A	B	D
1) Como a metodologia poderá ajudar o processo de desenvolvimento de produtos da sua empresa?	Garantindo a confiabilidade e diminuindo os riscos em novos projetos. Na avaliação de um projeto da empresa pudemos avaliar os ganhos que teríamos com a utilização da metodologia.	Eliminando as possíveis falhas durante o desenvolvimento do projeto.	Definindo as prioridades e pontos de análise em cada fase do projeto.
2) Pretende adotar algumas das tarefas propostas pela metodologia? Quais? De que forma?	Sem distinção de tarefas, todas elas podem ser aplicadas desde as idéias iniciais até a coleta de dados de campo.	FMEA inicialmente; Diagrama funcional e outras na medida da necessidade.	O uso de medições de desempenho e melhorias contínuas em cada fase do projeto.
3) Quais as pessoas (cargo) que você julga necessárias de conhecer a metodologia na sua empresa?	Toda a equipe de engenharia de desenvolvimento e industrial.	Diretoria, gerência e supervisão de projetos	Todas as pessoas envolvidas no projeto direta ou indiretamente (marketing, assistência técnica, produção, qualidade etc.).
4) Cite aspectos positivos e negativos desse trabalho para avaliação da confiabilidade?	Positivos: 1) Objetivo da metodologia; 2) Determinação do grau de confiabilidade; 3) Utilização de históricos de projetos; 4) Previsão da taxa de falhas e vida útil; 5) Histórico de ações que podem reforçar a robustez do projeto. Negativos: Projetos "comodities" (simples e restritos) não requerem estudos aprofundados.	Positivos: 1) Produtos desenvolvidos totalmente em nível de engenharia; 2) Controle da evolução dos cronogramas; 3) Uso de normas, padrões internacionais. Negativos: 1) Demora em apresentar o produto desenvolvido; 2) Técnica e instrumentos não disponíveis; 3) Pessoal para garantir os prazos de desenvolvimento.	Positivos: Todo o processo de confiabilidade de desenvolvimento de produto deve ser implementado, considerando-se que cada projeto deva passar por uma fase de análise e validação. Negativos: A empresa deve incentivar seus colaboradores a implantar essas ferramentas e perceberem a importância do uso desse método de trabalho.
5) Já teve conhecimento de metodologias de desenvolvimento de produtos? Qual (is)?	Somente na forma de normas para serem cumpridas.	Metodologia desenvolvida para atender requisitos da norma ISO 9001, controle do processo e fluxograma.	Sim, quando trabalhava em outra empresa (Multibras C2C) usava ferramentas de desenvolvimento de produtos.
6) Sugestões.	Reforço nas tarefas relacionadas com o processo produtivo. Obs: As sugestões já fazem parte da atual versão da metodologia.	Desenvolvimento de um software que facilite a aplicação e documentação.	sem comentários

Figura 3-10 – Questionário de avaliação da metodologia pelas empresas, principais considerações

EMPRESA	COMENTÁRIOS A respeito da "Metodologia para garantia da confiabilidade no desenvolvimento de produtos mecatrônicos" e do trabalho "Práticas de confiabilidade no desenvolvimento de produtos mecatrônicos" (vide figura 3.4) desenvolvido sob a orientação do aluno de doutorado Eng ^o Vicente Machado Neto, podemos verificar que:
A	O trabalho desenvolvido nos dias 28, 29 e 30 de Março de 2001, trouxe uma nova perspectiva para a empresa no sentido em encarar a confiabilidade não somente através de números provenientes de ensaios de longa duração. Observou-se que a confiabilidade assim como a qualidade, deve fazer parte do processo de desenvolvimento da empresa. Assina o Diretor Industrial
B	O trabalho desenvolvido nos dias 02, 03 e 04 de Maio de 2001 pôde mostrar que a metodologia vem de encontro com a nossa necessidade de garantia para o desenvolvimento de produtos com eliminação de falhas, garantindo uma maior qualidade ao produto com redução de tempo do projeto ao lote piloto. Visto que é priorizado um maior planejamento visando a eliminação das possíveis falhas. Assina o Diretor de Expansão Industrial e Qualidade
D	O trabalho desenvolvido nos dias 15/05; 07/06; 12/06; 20/06; 09/07/2001 será de grande valia aos projetos a serem desenvolvidos pela empresa, buscando subsídios para que se possa melhorar ainda mais a confiabilidade de nossos produtos, buscando cada vez mais o desenvolvimento através de processos definidos com medições de desempenho e melhorias contínuas em cada fase do projeto. Assinam: Coordenador de Projetos e Gerente do Laboratório de Ensaios

Figura 3-11 – Cartas de recomendação ou não da metodologia, comentários.

3.3 PRINCIPAIS CONSIDERAÇÕES PRÁTICAS

Na Figura 3-12 encontram-se resumidas as principais considerações práticas que fundamentaram: a) A pesquisa sobre o processo da confiabilidade dentro da empresa (capítulo 4); b) A metodologia para a confiabilidade em produtos mecatrônicos MEGACOM (capítulo 5) e c) A sistematização dos ensaios para a confiabilidade em produtos mecatrônicos (capítulo 6).

TIPO DE AÇÃO	PRINCIPAIS CONSIDERAÇÕES PRÁTICAS	ORIENTAÇÕES PARA O TRABALHO
Ensaios	Diversos ensaios, específicos para algumas peças, foram feitos. Os principais ensaios realizados de todo o conjunto, foram ensaios funcionais, para verificar as mais diversas situações possíveis, bem como a operacionalidade do produto. Ensaios para otimização de parâmetros utilizando-se Taguchi também foram realizados.	Diversos ensaios de pequeno porte realizados ao longo do desenvolvimento do produto, levam à melhoria da confiabilidade do produto final.
	Diversos problemas com peças móveis. Todas as peças móveis são críticas com respeito à confiabilidade e devem ser estudadas criteriosamente.	
	Alguns módulos foram ensaiados separadamente dos demais, como forma de agilizar o projeto. Ensaios funcionais preliminares foram feitos nesses módulos, tentando simular o acoplamento com os demais módulos. A simulação das reais condições do ensaio, normalmente, dificulta o ensaio, chegando às vezes a inviabilizar a construção de dispositivos especiais, somente para testar um módulo.	
	Diversos ensaios funcionais foram feitos em protótipos, para verificar se o produto já estava operacional. Os primeiros protótipos sofreram inúmeras modificações, para corrigir as freqüentes falhas. Muitas das modificações foram ajustes de parâmetros de software, para compensar desajustes do hardware.	
	Problemas com materiais, engrenagens fabricadas com materiais diferentes dos especificados, apresentaram problemas de desgaste prematuro.	Pesquisa de materiais.
	Outra constatação é do pouco uso de normas, sejam elas nacionais ou internacionais.	Enfatizar uso de normas.

Figura 3-12 - Principais considerações práticas que fundamentaram os capítulos 4, 5 e 6 do estudo (continua).

TIPO DE AÇÃO	PRINCIPAIS CONSIDERAÇÕES PRÁTICAS	ORIENTAÇÕES PARA O TRABALHO
Metodologia	A construção dos protótipos, requereu uma criteriosa avaliação dos fornecedores locais. Houve muita dificuldade em encontrar fornecedores e muitas peças precisaram de ajustes manuais após a fabricação.	O processo é um importante aspecto da confiabilidade.
	Problemas com os fornecedores dos protótipos iniciais e de início de produção, pouco confiáveis, escolhidos mais pelo critério de custo.	
	Sensores são elementos críticos, portanto devem ser criteriosamente escolhidos.	A falha de um sensor quase sempre determina uma falha do produto.
	Certas partes do produto exigiram a colocação de sensores redundantes para confirmar operações críticas.	
	Deve-se evitar o acúmulo de tolerâncias, deve-se prever mecanismos para que o sistema fique imune ou compense as variações dos materiais e do processo.	Acúmulo de tolerâncias determinam muitos produtos não conformes.
	Muitas das deficiências mecânicas foram compensadas pela adaptação do software (firmware), já que este é mais fácil e rápido de ser modificado.	
	Por vezes foi necessária muita sistematização, para isolar problemas do protótipo. A quantidade de possíveis causas para um problema, obriga procedimentos sistematizados para isolar o problema e determinar se a fonte é mecânica, eletrônica ou do software.	
	Medições gerais feitas para determinação das especificações do projeto. Não houve preocupações maiores com metodologias, sendo as principais preocupações de tomar as medições significativas. Isso foi feito na medida do possível, já que poucas unidades estavam disponíveis. As principais medidas foram dimensionais, de velocidades de acionamento e de forças necessárias ao acoplamento entre os módulos. O não seguimento de uma metodologia, mesmo para medições simples, pode invalidar todos os dados obtidos. Também não se pode fazer comparações com medidas anteriores, assim como a documentação fica comprometida e difícil de ser feita.	Uma metodologia ajuda o ordenamento das tarefas de projeto, documentação e pode ser sempre melhorada com a prática de vários projetos.
	Não é costume das empresas ter uma metodologia definida, isto mesmo para empresa grandes e consolidadas no mercado.	
	Verificou-se a dificuldade de documentação dos projetos. Principalmente a documentação do software.	
Time outs e watch dogs necessitaram de ajustes nos tempos, de forma a torná-los mais eficazes na prática.	Diferenças entre unidades do produto exigem ajustes apropriados nos tempos do projeto.	
Gerencial	Houve uma mudança de visão da empresa contratante, que vendida para uma empresa norte americana, passou a vislumbrar um mercado muito maior. Falhas na pesquisa de mercado, projeto informacional. Toda essa pesquisa inicial ficou a cargo do contratante, que possui maior conhecimento do mercado.	Ênfase a ser dada na fase de projeto informacional, com muita pesquisa de mercado. Deve-se antever possíveis tendências do mercado.
	Um cronograma otimista permite exercer uma certa pressão sobre os projetistas, a terem uma solução rápida para os desafios tecnológicos.	As tarefas propostas devem ser executadas rapidamente.
	As primeiras concepções culminaram com a montagem de uma maquete do produto, onde se podia simular o funcionamento do produto manualmente.	Um modelo de projeto visual ajuda a compreender o sistema.
	O produto foi dividido em módulos, o que facilitou a divisão de tarefas entre os integrantes da equipe, bem como a compreensão do sistema.	
	O desenvolvimento do software operacional (firmware), avolumou-se exigindo um tratamento mais sistêmico e um desmembramento em módulos, para desenvolvimento por dois programadores.	A modularização permite a participação dos especialistas.
	Pode-se observar que em termos de infra-estrutura os pontos mais frágeis foram considerados: <ul style="list-style-type: none"> · Estrutura da organização para a confiabilidade; · Uso de normas técnicas; · Laboratórios. 	Os seguintes tópicos quanto aos aspectos gerenciais, operacionais e de infra-estrutura, devem ser consideradas com cuidado.
	Em termos operacionais os pontos frágeis foram considerados: <ul style="list-style-type: none"> · Uso de ferramentas para análise de confiabilidade; · Medições de confiabilidade; · Estratégia de manutenção; · Auditoria de projetos. 	
A avaliação gerencial de maneira geral, foi considerada satisfatória.		
Mecatrônica	Muitas especificações foram feitas a partir de medidas diretas sobre o módulo do validador ao qual o Escrow seria acoplado.	Informações técnicas detalhadas de produtos da concorrência, ou em produtos aos quais o novo produto se acoplará, na maioria das vezes são obtidas por engenharia reversa.

Figura 3-12- Principais considerações práticas que fundamentaram os capítulos 4, 5 e 6 do estudo (continuação).

CAPÍTULO 4

O PROCESSO DA CONFIABILIDADE DENTRO DA EMPRESA, DA ALTA GERÊNCIA AO PRODUTO FINAL

Este capítulo aborda a fase 4 do trabalho, ou seja, os diferentes aspectos da confiabilidade nas empresas e como a confiabilidade propaga-se da alta gerência ao produto final. A Figura 4-1 ilustra que as diretivas da alta gerência para a confiabilidade, devem ser o ponto de partida para as ações em nível operacional, que efetivamente agregam confiabilidade ao produto final. As diretivas da alta gerência chegam em nível operacional através da infra-estrutura, que deve dar suporte às ações a serem implementadas.

Esse capítulo justifica-se pelo fato de que é preciso uma compreensão geral da confiabilidade nas empresas, para que, uma metodologia com enfoque na confiabilidade, possa produzir resultados concretos, em termos de produtos mais

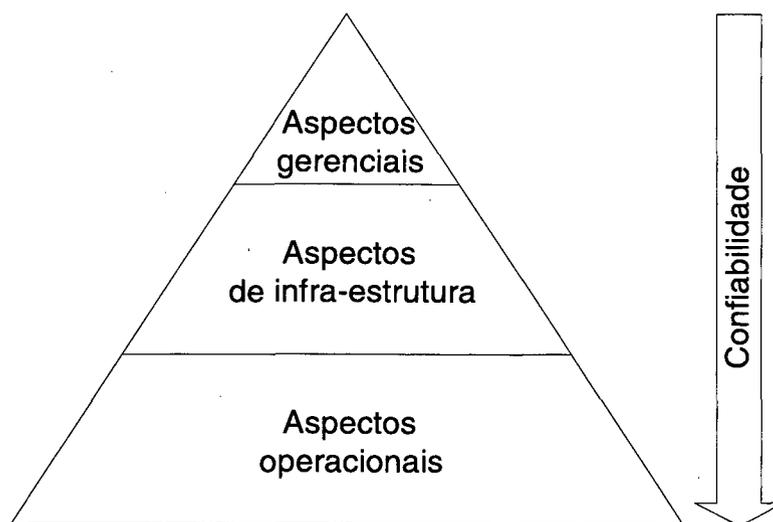


Figura 4-1 – Propagação da confiabilidade dentro da empresa da alta gerência ao produto final.

confiáveis. Uma vez estabelecido um processo de melhoramento contínuo da confiabilidade, novos produtos incorporam os desenvolvimentos dos anteriores e refinamentos contínuos da confiabilidade são obtidos.

4.1 ASPECTOS GERENCIAIS DA CONFIABILIDADE

Este item aborda como os aspectos gerenciais podem influir na confiabilidade dos produtos de uma empresa. Quais os principais aspectos gerenciais que devem ser estudados, por serem os principais difusores da confiabilidade.

4.1.1 POLÍTICAS DE CONFIABILIDADE DA EMPRESA

Na definição das políticas busca-se uma direção a ser seguida, quanto aos futuros e atuais desenvolvimentos da empresa. Uma política que privilegie a busca de novas tecnologias e uma aplicação prática após uma comprovação da confiabilidade, terá reflexos diretos na confiabilidade dos produtos da empresa [1].

Uma forma sintética de divulgar a política de confiabilidade da empresa, é através de uma declaração do tipo: “Os clientes / consumidores dos nossos produtos irão perceber que a confiabilidade dos nossos produtos, é melhor do que a dos nossos concorrentes. Todos os novos produtos terão confiabilidade melhor do que a dos seus antecessores. Quando falhas ocorrerem em campo, 98% delas, serão corrigidas com quatro horas após a notificação” [1].

Cada novo desenvolvimento da empresa precisa estar enquadrado num contexto maior, que garanta uma continuidade dos desenvolvimentos em novos projetos, podendo dessa forma haver um processo, onde cada vez mais a confiabilidade é incrementada.

Das empresas visitadas, nenhuma possuía uma política definida de confiabilidade. O maior enfoque é para o aspecto da qualidade, sendo o parâmetro confiabilidade, devido à dificuldade de determinação, relegado a um segundo plano. Isso não significa que os produtos das empresas não tenham confiabilidade, apenas que faltam parâmetros de confiabilidade. Em um novo desenvolvimento, os projetistas têm dificuldade e pouca tradição, com o estabelecimento de parâmetros de confiabilidade. A modificação dessa situação vem com um trabalho de conscientização das empresas da importância da confiabilidade, com o treinamento

do pessoal de projeto e com muitos ensaios de peças e produtos. Na confiabilidade os novos desenvolvimentos se apóiam nos anteriores, dos quais já se conhecem os parâmetros de confiabilidade.

4.1.2 PROGRAMAS DE CONFIABILIDADE

Uma atividade óbvia em um programa de confiabilidade é o controle da qualidade. Para muitos produtos simples, onde os riscos e custos são baixos e conhecidos, o controle da qualidade é suficiente para assegurar conformidade com as especificações [26].

Um programa efetivo de confiabilidade deve começar, nomeando uma pessoa como responsável pelo programa, chamada de Gerente do Programa de Confiabilidade. A partir disso deve-se estabelecer metas de confiabilidade a serem cumpridas. Os principais setores envolvidos com as metas estabelecidas são: 1) Marketing; 2) Pesquisa e desenvolvimento; 3) Engenharia do produto; 4) Engenharia de manufatura; 5) Engenharia da qualidade; 6) Engenharia da confiabilidade; 7) Compras; 8) Manufatura e 9) Serviço pós-vendas.

Um programa de confiabilidade específico para um novo produto, deve começar no início da fase de projeto informacional. É nesse estágio que as decisões fundamentais, que afetam significativamente a confiabilidade, são tomadas.

Os benefícios de um programa de confiabilidade são sentidos em todo o processo de engenharia, porque muitas atividades de confiabilidade, estão relacionadas com outras características do produto. Por exemplo, um FMEA feito em um programa de confiabilidade, pode contribuir para a análise de segurança do produto. Assim as tarefas de confiabilidade, devem estar integradas no projeto, manufatura e utilização do produto.

Das empresas visitadas, nenhuma tinha um programa de confiabilidade em andamento. A preocupação maior era com problemas isolados de falhas, em determinadas peças, ou seja, com a análise de falhas e ações corretivas.

Empresas que executaram programas de melhoria da confiabilidade, o fizeram em produtos já lançados no mercado, nos quais se queria melhorar a confiabilidade. O programa foi realizado mais em nível dos fornecedores de partes, aos quais foi exigido melhorias na confiabilidade, para melhoria do conjunto final.

4.1.3 ORGANIZAÇÃO PARA A CONFIABILIDADE

Devido às diversas atividades que contribuem para a confiabilidade do produto, é difícil ser categórico a respeito da melhor organização para assegurar um efetivo gerenciamento da confiabilidade. A confiabilidade é afetada pelo projeto, controle da qualidade de produção, controle dos sub contratados, manutenções e outros fatores. Essas atividades precisam ser coordenadas e os recursos aplicados a elas devem estar de acordo com os requisitos do produto.

Como o conhecimento, habilidades e técnicas da engenharia de confiabilidade, são essencialmente as mesmas daquelas requeridas para análise de segurança e para engenharia de manutenibilidade, é lógico e eficiente, combinar estas responsabilidades no mesmo departamento ou equipe de projeto.

Considere-se também que o gerenciamento da confiabilidade deve estar integrado com outras funções de gerenciamento de projeto, para assegurar à confiabilidade a apropriada atenção e recursos em relação aos outros requisitos do projeto.

Há basicamente dois tipos de organização com respeito à confiabilidade. A organização baseada no controle da qualidade e a organização baseada na engenharia.

A organização baseada no controle da qualidade, Figura 4-2, coloca a responsabilidade pela confiabilidade com o gerente de garantia da qualidade, que controla a qualidade do projeto, manutenção, etc, bem como o controle da qualidade da produção. Essa forma de organização é baseada na definição da qualidade, como a totalidade das características que suportam a habilidade do produto, de satisfazer os requisitos do cliente. Essa definição é mais aceita nos países europeus, assim na Europa o departamento de garantia da qualidade é geralmente,

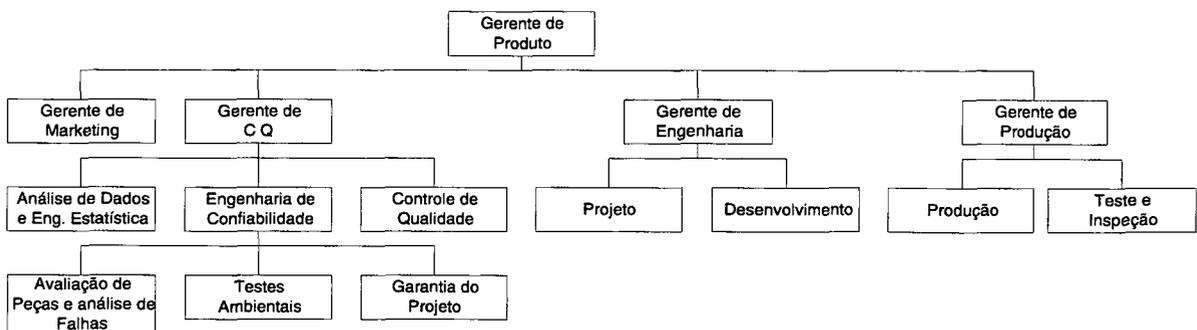


Figura 4-2– Organização para a confiabilidade baseada no controle da qualidade [26].

responsável por todos os aspectos de confiabilidade do produto.

Na organização baseada na engenharia, Figura 4-3, a responsabilidade pela confiabilidade é do gerente de engenharia. O gerente de controle da qualidade é responsável apenas pelo controle da qualidade de produção e pode reportar-se diretamente ao gerente de produto ou ao gerente de produção.

Uma organização baseada no controle da qualidade permite fácil integração de algumas tarefas que são comuns ao projeto, desenvolvimento e produção. Normalmente, engenheiros com qualificação em controle da qualidade têm familiaridade com métodos de engenharia de confiabilidade.

Contudo, para produtos onde uma grande quantidade de inovações de projeto são requeridas, a organização baseada na engenharia tem vantagens, visto que, mais do esforço de confiabilidade será direcionado para a garantia do projeto, tais como análise de solicitações, revisões de projeto e testes de desenvolvimento.

Das empresas visitadas os setores predominantes eram os de controle da qualidade, somente a maior empresa, possuía pessoal dedicado somente à confiabilidade. Nas demais, a confiabilidade era tratada juntamente com o controle da qualidade. Na empresa que possuía pessoal especializado em confiabilidade, esse pessoal estava mais diretamente ligado ao projeto. De uma maneira geral, observou-se que somente empresas de grande porte, com um setor de desenvolvimento avançado, em geral multinacionais, que possuem tradição em confiabilidade das suas matrizes, possuem esse setor bem definido.

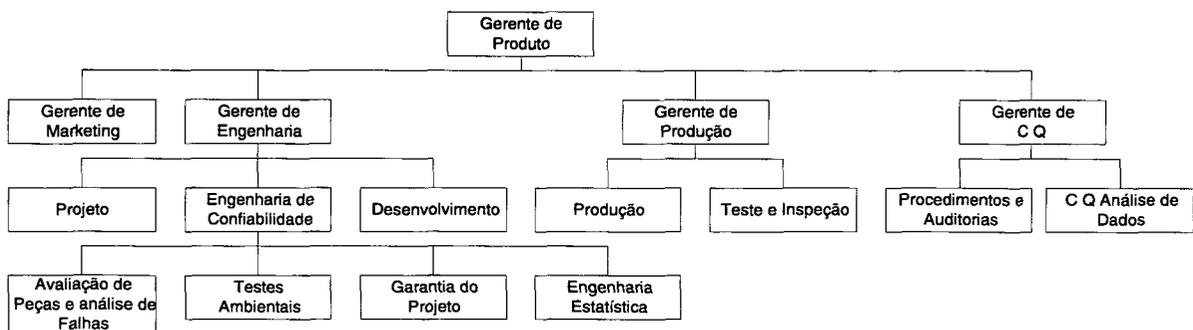


Figura 4-3 – Organização para a confiabilidade baseada na engenharia [26].

4.2 ASPECTOS DE INFRA-ESTRUTURA DA CONFIABILIDADE

Neste subitem discute-se a infra-estrutura básica, para difusão da confiabilidade dentro da empresa.

4.2.1 EQUIPE DE PROJETO

As principais atribuições de uma equipe de projetos mecatrônicos, pode ser visualizada na Figura 4-4, sendo que, em equipes menores, uma mesma pessoa pode acumular várias destas atribuições.

Deve-se mencionar que vários aspectos da confiabilidade, não mostrados na Figura 4-4, são implementados através do apoio logístico. Muitas dessas atribuições são tarefas de vários especialistas, típicos de uma organização de negócios, engenharia, finanças, confiabilidade, qualidade, manufatura, serviço ao cliente, marketing, etc, todos trabalhando juntos em um processo de confiabilidade.

Uma equipe multifuncional é essencial para o sucesso de um projeto. Algumas pessoas irão fazer parte da equipe, durante todo o programa de desenvolvimento, enquanto outras, somente durante a fase que requer suas especialidades. Um importante critério é que não haja mudanças abruptas na composição da equipe, visto que uma mudança da equipe pode causar uma perda de continuidade.

Uma equipe de desenvolvimento é fortemente influenciada por sua composição de generalistas ou especialistas. Antes de 1940, a maioria dos produtos eram desenvolvidos por generalistas, esse procedimento servia para produtos que não eram de alta tecnologia e sofisticação [27]. Com o aumento da complexidade dos produtos precisou-se de especialistas. Isto conduziu a segmentação, ou seja, grupos fechados passaram a olhar somente para a sua especialidade. Uma equipe de sucesso deve contrabalançar essas tendências, a pessoa mais especializada deve ser capaz de comunicar-se eficientemente, com os seus colegas de trabalho. Isto os habilita a trabalhar como uma equipe.

Das empresas visitadas, a grande divisão de tarefas é entre mecânica e eletrônica, sendo o software em nível de firmware, normalmente desenvolvido pela mesma pessoa encarregada da eletrônica. O software aplicativo, que é o de mais alto nível e faz interface com o usuário, é desenvolvido geralmente por especialistas, ou como no caso do projeto Escrow, pelo próprio contratante do projeto.

É comum as equipes dividirem o tempo com mais de um projeto. A substituição de pessoas da equipe durante um projeto é um fator de preocupação, no entanto, acontece com freqüência nas empresas visitadas. Como forma de amenizar esses impactos as empresas procuram manter uma equipe básica, composta pelo gerente

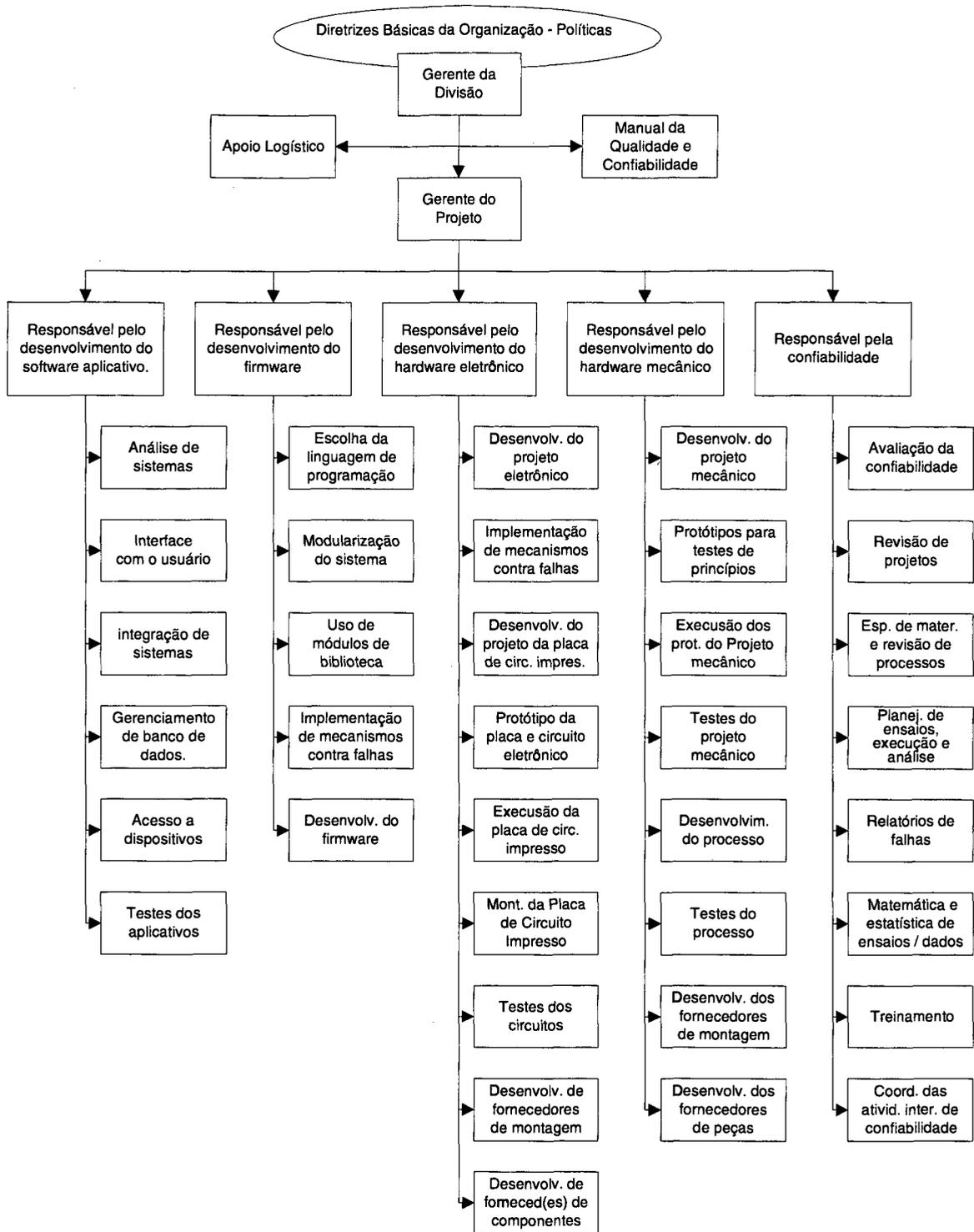


Figura 4-4– Atribuições básicas da equipe de projeto de produtos mecatrônicos.

de projeto e responsáveis pela mecânica e eletrônica, o que garante uma certa estabilidade à equipe. No entanto, pôde-se verificar atrasos e perdas de continuidade, com a saída de pessoas no meio de um desenvolvimento de produto.

4.2.2 FONTES DE INFORMAÇÃO

Uma boa fonte de informações no desenvolvimento de um produto é os produtos da

concorrência, que efetuam as mesmas funções do produto a ser desenvolvido. No entanto, quando a empresa já apresenta um histórico de confiabilidade, com vários produtos desenvolvidos, as referências passam a ser mais internas do que externas, já que uma boa parte dos novos desenvolvimentos, são derivados de outras soluções já conhecidas, são as chamadas soluções de prateleira.

É importante que essas soluções já conhecidas, estejam devidamente documentadas, incluindo os seus parâmetros de confiabilidade. Dessa forma, pode-se compor uma solução confiável, em curto espaço de tempo, somente adaptando soluções já conhecidas e testadas.

Outras fontes de informações, principalmente para projetos novos, são as tradicionais, tais como: patentes, dissertações, teses, publicações, internet, e outras.

4.2.3 LABORATÓRIOS

Entende-se aqui como laboratório, além das instalações físicas, com temperatura e umidade controladas e registradas, mas principalmente, os instrumentos de medida e equipamentos de ensaio, com pessoal capacitado na sua operação.

Na busca pela confiabilidade é importante uma estrutura laboratorial mínima dentro da empresa, para atender a agilidade necessária no desenvolvimento de produtos. Muitas das medições exigem respostas em curto espaço de tempo, para que importantes decisões de projeto sejam tomadas. Sendo assim, a empresa não pode sujeitar-se a entrar em uma programação de um laboratório de terceiro, muitas vezes distante de onde o projeto está sendo desenvolvido. Para ensaios mais elaborados, que exigem altos investimentos em equipamentos de ensaios e instrumentos de medida, justifica-se a contratação de laboratórios de terceiros. Pode-se citar entre estes, ensaios de interferência e compatibilidade eletromagnética, ensaios climáticos e pesquisas da física de falhas.

A decisão de quais instrumentos adquirir deve ser uma solução de compromisso entre os valores a serem investidos, as facilidades de ter os instrumentos a disposição e a real utilização anual do instrumento. Quando da aquisição de um instrumento deve-se considerar os custos de calibração e pessoal capacitado para a operação.

Na especificação do sistema de medição ou instrumentos, deve-se atentar para alguns parâmetros tais como: 1) Faixa de medição; 2) Estabilidade nas condições

ambientais de utilização; 3) Resolução; 4) Incerteza de medição; 5) Tendência; 6) Repetitividade, 7) Exatidão e 8) Resposta dinâmica [28]. Os parâmetros dos instrumentos são determinados em função dos requisitos de medida, tais como: 1) Grandeza a ser medida; 2) Faixa de variação do mensurando; 3) Condições ambientais de utilização e 4) Limites de tolerância requeridos pela aplicação [29].

A tendência é sistemas de aquisição de dados, baseados em uma plataforma computadorizada. São diversas as configurações possíveis, onde placas dedicadas para determinadas medições, são utilizadas dependendo do caso. Os sistemas computacionais (software), permitem a criação de instrumentos virtuais, onde todas as funções do instrumento são representadas através de ícones na tela do computador. Instrumentos individuais também podem ser interligados ao sistema de aquisição de dados computadorizado, através da interface GPIB (*general purpose interface bus*) barramento de interfaceamento de propósitos gerais. Assim, com um sistema de aquisição de dados, pode-se automatizar completamente um ensaio. As diversas placas permitem a medida de diferentes parâmetros mecânicos e elétricos, inclusive a aquisição de imagens pode ser feita.

Em um sistema de aquisição de dados, o item que mais facilita a utilização, é o software, onde a programação será desenvolvida. A existência de uma boa biblioteca de softwares já desenvolvidos facilita grandemente o uso. A tendência é uma programação orientada a objetos, onde a programação possa ser facilmente criada. Maiores detalhes podem ser obtidos nos catálogos dos fabricantes, tais como, National Instruments NI [30] e Hewlett Packard - HP.

No uso de sistemas de aquisição de dados deve-se considerar as incertezas das medições e verificar se são compatíveis com as grandezas a serem medidas. Normalmente, há uma certa dificuldade em se levantar dados de incertezas dos sistemas de aquisição de dados, isso se deve a uma falta de tradição dos fabricantes em divulgarem dados que possibilitem os cálculos de incerteza.

Das empresas visitadas, pode-se dizer que de uma maneira geral, o suporte em termos laboratoriais era muito fraco, com poucos instrumentos de ensaio. Os instrumentos disponíveis eram para medições básicas. Sistemas de aquisição de dados e instrumentos programáveis não foram encontrados.

4.2.4 FERRAMENTAS DE DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS

Atualmente, os softwares de desenvolvimento são as ferramentas que mais auxiliam os projetistas, no desenvolvimento de novos produtos.

Dentro da mecânica, destacam-se os sistemas CAD e CAE com os quais pode-se fazer os projetos e as simulações necessárias. Alguma infra-estrutura em termos de ferramentas mecânicas para a confecção de protótipos é desejável. Algumas empresas chegam mesmo a desenvolver os próprios moldes de injeção, já que normalmente estes moldes são caros e podem constituir um dos gargalos nos projetos. Boa parte da qualidade dos novos produtos está relacionada à precisão dos moldes de injeção.

Na eletrônica os sistemas para roteamento de placas impressas, sistemas para desenho de circuitos eletrônicos, análise e simulação de circuitos, simulações de EMI / EMC e outros são utilizados. A confecção das placas impressas é normalmente delegada a empresas especializadas, que às vezes, podem estar dentro da mesma planta. Mesmos protótipos podem ser feitos por fornecedores confiáveis, em curto período de tempo. A montagem de placas protótipos pode também ser delegada a terceiros, principalmente quando envolve componentes SMD.

No desenvolvimento do software em nível operacional (firmware), normalmente a linguagem de programação C é utilizada, outras alternativas são o Visual Basic e o próprio *assembler*¹. Recomenda-se sempre que possível, a não utilização da linguagem *assembler*, por dificultar muito a documentação do software, tornando-o mais susceptível a falhas. Sistemas de emulação de micro-processadores são utilizados para depuração do software.

Todos os sistemas descritos acima fazem parte dos setores de desenvolvimento de produtos das empresas visitadas, com exceção dos sistemas mecânicos de análise de solicitações e sistemas mais complexos de simulações ou mesmo sistemas CAM.

4.2.5 METROLOGIA

As principais melhorias em confiabilidade metrológica são conseguidas através do

¹ Assembler: Linguagem de programação de baixo nível, específica para cada tipo de processador.

treinamento do pessoal. São os operadores que podem incrementar a confiabilidade sem muitos investimentos em instrumentos, apenas tomando cuidados metrológicos básicos e conhecendo os principais fatores de incertezas presentes nas medições. O capítulo 6, na parte que trata de medições gerais, descreve alguns dos cuidados metrológicos básicos.

Um importante aspecto na confiabilidade metrológica é a calibração dos instrumentos de medida. A periodicidade das calibrações deve ser indicada pelo fabricante, caso haja uma comprovação prática que os intervalos de calibração são muito freqüentes, pode-se aumentar estes intervalos, mantendo-se sempre um acompanhamento de possíveis desvios. Todas as calibrações devem ser feitas por comparação com padrões devidamente rastreados. Nas empresas visitadas as exigências em termos metrológicos, eram mais para atender os requisitos das normas ISO 9000.

4.2.6 PROCESSOS DE MANUFATURA

A Figura 4-5 ilustra os diversos processos de manufatura. É através da qualidade desses processos, que o produto espelhará a real intenção do projetista, adquirindo maior ou menor qualidade de acordo com a adequação do processo, com o material e o tipo de trabalho a ser feito.

Para os metais há três maneiras de pré-forma: 1) no estado líquido com o uso de moldes; 2) no estado plástico abaixo do ponto de fusão; 3) no estado sólido, como é feito com folhas, barras e tubos. Todos os processos de pré-forma exigem moldes, matrizes ou equipamentos especiais, dos quais depende boa parte da qualidade das peças obtidas, maiores informações podem ser obtidas em Lesko [31].

No caso de corte de metais, modernas máquinas de corte controladas por CNC (*computer numerical control*), permitem altos padrões de acabamento e precisão. Entre os processos de corte, destacam-se as tecnologias de corte laser / arco de plasma. Normalmente essa tecnologia somente é utilizada em protótipos, devido ao alto custo, somente justificável pela rapidez na programação e obtenção do protótipo.

A maioria dos processos descritos acima se aplica a todos os tipos de materiais, tais com metais, plásticos, borrachas, elastômeros, cerâmicas, naturais etc. A tecnologia empregada nos processos pode garantir uma maior ou menor confiabilidade do

PROCESSOS DE MANUFATURA													
Pré-formagem			Corte				União de materiais			Acabamento			
Estado líquido	Estado plástico	Estado sólido	Corte de chapas, guilhotina, punção, etc	Pré-forma com ferramenta de corte, disco, bit, etc	Pré-forma sem ferramenta, químico, eletro-químico	Térmico a Chama e laser	Soldagem próprio material	Soldagem (c/ 3 ^{ra} mat. solda)	Adesivo	Mecânico	Pré-formados	Mecânico / químico	Pintura

Figura 4-5 – Principais processos de manufatura e suas possíveis formas de execução (baseado em [31]).

produto final.

No caso de placas eletrônicas os processos são mais definidos, com a tendência do uso de componentes SMD e placas de várias camadas.

Os processos de inserção automática de componentes diminuem as probabilidades de erros de montagem e falhas de soldagem, aumentando a confiabilidade das placas. A confecção das placas de múltiplas camadas exige processos mais sofisticados, devendo-se assim, ter-se fornecedores qualificados. Há uma tendência na indústria de mecatrônicos de, a exemplo das indústrias automobilísticas, trazer fornecedores de placas impressas para a própria planta da empresa.

A montagem das placas também é uma outra área onde há uma forte tendência de terceirização. Altos investimentos precisam ser feitos, quando envolvem sistemas de inserção automática. Outra tecnologia muito usada para diminuição de custos é a dos *chips on board*, onde chips sem encapsulamento, que desenvolvem várias funções, são montados diretamente nas placas com os outros componentes.

Nas empresas visitadas constata-se que a área de produção é de certa forma privilegiada em termos de investimentos, quando comparada com investimentos no desenvolvimento (principalmente treinamento de pessoal). Modernas máquinas de inserção automática de componentes, máquinas injetoras, modernos sistemas de pintura a seco, corte de chapas e muitos outros. Isso indica altos investimentos em infra-estrutura de produção, as vezes muito acima dos investimentos em desenvolvimento. O que no entendimento do autor é uma visão equivocada, já que um projeto bem feito, pode economizar o equivalente a muitas máquinas.

Das empresas visitadas, notaram-se basicamente dois tipos de abordagem quanto a manufatura, as empresas horizontalizadas e as empresas verticalizadas. As empresas horizontalizadas estão mais relacionadas a uma administração moderna,

estão localizadas em centros maiores onde os recursos tecnológicos estão mais disponíveis. Não foi possível fazer uma correlação entre, confiabilidade e nível de terceirização das tarefas de manufatura.

4.2.7 CONTROLE DA QUALIDADE DA PRODUÇÃO

Os sistemas de aquisição de dados, descritos nos instrumentos de medição, podem ser utilizados na automatização do controle da qualidade da produção. Pode-se assim ter um sistema rápido e eficiente no controle da qualidade.

A grande questão no controle da qualidade, feito na forma de inspeções, está em determinar quais os parâmetros que necessitam de inspeção, neste sentido o trabalho de Pfeiffer [32], apresenta uma metodologia para otimização das inspeções. A determinação dos chamados parâmetros críticos pode ser feita com base em:

- Documentos gerados no projeto, revisões de projetos e FMEA;
- Caderno de encargos;
- Documentos gerados no desenvolvimento de produtos similares;
- *Feedback* de campo de produtos similares ou de gerações anteriores;
- Profissionais experientes em projeto e processos de produtos similares.

Existem várias normas utilizáveis na inspeção da qualidade, as normas definem, com base em riscos aceitáveis, os chamados planos de amostragem. A norma mais utilizada é a ABC-STD-105, revisão da norma militar MIL-STD-105, outras normas podem ser utilizadas, tais como: DIN 40080, MIL 414, DIN/ISO 2859 e DIN/ISO 3951.

No caso da eletrônica e das placas impressas, alguns testes de controle da qualidade já são característicos. Os testes podem ser classificados nas seguintes categorias: a) Teste de componentes (normalmente feitos pelo próprio fornecedor); b) Teste de placa, de dois tipos, curto entre trilhas e espessura de camada; c) Teste de placas montadas, onde determinados pontos de teste são checados; d) Testes funcionais, feitos com as placas interligadas a outros sistemas tais como fontes, etc. Com a facilidade dos circuitos microprocessados, os testes funcionais podem ser incluídos no próprio software (firmware), a ser ativado quando da verificação do produto. Em circuitos eletrônicos são comuns os ensaios de *burn-in*, onde se busca através do aumento da temperatura, precipitar falhas que somente ocorreriam em campo.

Nas empresas visitadas, o método mais utilizado era o do controle dos parâmetros críticos. Problemas das peças mecânicas eram facilmente detectados na montagem, pois às vezes chegavam mesmo a impedir a montagem. Peças mais críticas, onde os defeitos da qualidade não eram facilmente detectáveis, exigiam alguns ensaios para verificação da conformidade das peças. A tendência das empresas fortemente terceirizadas é o desenvolvimento de uma parceria de confiança com os fornecedores, de forma a evitar ou minimizar as inspeções.

4.2.8 REDE DE ASSISTÊNCIA TÉCNICA

A maioria das assistências técnicas é executada por pessoal terceirizado das empresas. Isso pode ser um problema na medida que não haja um adequado treinamento para o pessoal das assistências técnicas. A intensificação do treinamento do pessoal feita através de cursos, apostilas e outros materiais de apoio, pode uniformizar o atendimento e assegurar que a confiabilidade dos produtos não será comprometida por assistências técnicas mal feitas.

É papel de um bom planejamento da confiabilidade, para a assistência técnica, assegurar meios de realimentação dos dados das assistências para o projeto. Nota-se que muitas empresas não realimentam devidamente os dados das assistências técnicas. É importante enfatizar que os dados devem ser gerados de forma correta, com todos os detalhes necessários. É comum a falta de sistemas computacionais que possam rastrear todos os dados dos produtos. Os erros mais comuns das assistências técnicas são a falta de dados ou imprecisões tais como: 1) Especificação imprecisa do tipo de falha; 2) Tempo de vida do produto; 3) Data da venda; 4) Tipo de ambiente a que o produto estava exposto.

É preciso antes da obtenção dos dados, saber qual o destino dos dados e de preferência estudar meios para que os dados possam chegar sem distorções até a equipe de projeto e de confiabilidade, para as devidas análises. Meios apropriados para incentivar a assistência técnica a retornar os dados de falhas de forma sistematizada para o projeto, devem ser buscados, eles podem ser feitos na forma de créditos em peças de reposição para as assistências técnicas e outras formas. Cuidados devem ser tomados com possíveis mascaramentos de falhas, com troca de componentes em bom estado, para recebimento das importâncias relativas a garantia.

A grande tendência em produtos mecatrônicos, como forma de evitar o registro incorreto de tempos de falha, é o registro de dados pelo próprio *firmware* do produto. Assim, o tempo de uso do produto e demais parâmetros, dependendo da existência de sensores, podem ser armazenados para uma posterior análise de falhas.

4.2.9 BANCO DE DADOS DE PROJETOS

Um importante aspecto no desenvolvimento de um produto é a documentação. A quantidade de informação gerada em um desenvolvimento, mesmo de um projeto de pequeno para médio porte, é assustadora e pode facilmente fugir do controle da gerência de projeto.

Um importante aspecto é a correta documentação dos ensaios, com dados tais como, procedimento seguido, propósitos, dados obtidos, características do produto ensaiado, medições a serem feitas e outros (mais detalhes capítulo 6).

A confiabilidade baseia-se muito na tradição adquirida ao longo de vários projetos com o passar dos anos. Assim, todo esse histórico precisa ser preservado, para que novos projetos possam ser baseados nas experiências dos anteriores.

Os principais tópicos a serem documentados, além dos ensaios, são os relacionados a desenhos de projetos mecânicos, esquemáticos dos circuitos eletrônicos, esquemático das fiações, diagramas e procedimentos de montagens, relatórios dos ensaios, atas de reuniões, desenvolvimento do software, e muitos outros.

Um grande problema de documentação é o software, mesmo linguagens de alto nível como “C”, dependendo da forma como o programa é elaborado, tornam-se verdadeiras caixas pretas. Um treinamento adequado dos programadores de forma a sistematizar a programação, através de módulos estanques deve ser uma rotina das empresas.

Nas empresas visitadas, pôde-se observar que a documentação dos desenvolvimentos ainda precisa ser melhorada. Normalmente, o projetista é avesso a documentações formais, deve-se buscar formas automatizadas de documentação de forma a não tomar muito tempo dos projetistas. Recomenda-se que nos projetos, sempre haja alguém encarregado da documentação, que ficaria responsável pela divulgação de boletins semanais sobre o andamento do projeto, como forma de manter a equipe informada.

4.3 ASPECTOS OPERACIONAIS DA CONFIABILIDADE

A metodologia exerce o papel de encadeamento e união dos esforços operacionais a serem realizados. A metodologia MEGACOM a ser apresentada no capítulo 5, faz referência a documentos (Dx), ferramentas (Fx) e ensaios (Ex). No caso são documentos, ferramentas e ensaios indicados para serem gerados, ou aplicados na execução das tarefas recomendadas.

O capítulo 5 apresenta os documentos e ferramentas sugeridas, assim como o propósito dos mesmos. Cabe às empresas a sistematização desses documentos, ferramentas e ensaios, que são os verdadeiros operadores da confiabilidade. O trabalho de Maribondo [16] apresenta a sistematização de algumas das ferramentas e documentos propostos.

CAPÍTULO 5

METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS COM ÊNFASE NA CONFIABILIDADE

Este capítulo apresenta uma proposta de “Metodologia para garantia da confiabilidade no desenvolvimento de produtos mecatrônicos” (MEGACOM), fase 5 do trabalho. Relembrando as fases do trabalho até aqui desenvolvidas tem-se:

1. Pesquisas bibliográficas sobre temas relacionados ao trabalho (capítulo 2), considerações bibliográficas da pesquisa;
2. Acompanhamento de um projeto mecatrônico (capítulo 3), considerações práticas da pesquisa;
3. Prática de desenvolvimento de produtos nas empresas (capítulo 3) e metodologia de confrontação, considerações práticas da pesquisa;
4. O processo da confiabilidade nas empresas (capítulo 4), levantamento dos principais aspectos da confiabilidade nas empresas.

Com os conhecimentos adquiridos da bibliografia, do acompanhamento do projeto Escrow e da prática das empresas visitadas, a metodologia de confrontação foi devidamente detalhada, nas suas etapas e tarefas pertinentes. Esse detalhamento da metodologia deu origem a várias versões da metodologia, que foram aprimoradas a cada versão com sugestões dos especialistas das empresas visitadas e a partir de novas constatações práticas.

5.1 DIRETRIZES DA METODOLOGIA MEGACOM

Esse trabalho adota sete fases no desenvolvimento de um produto com o intuito de

uma cobertura completa do desenvolvimento, uma vez que importantes tarefas para a confiabilidade, também são propostas nas fases 5, 6 e 7.

Seguindo a linha de pesquisa do NEDIP (Núcleo de desenvolvimento integrado do produto) – UFSC, a metodologia possui a chamada fase de projeto informacional, onde informações a respeito do projeto são buscadas e as principais especificações definidas.

A Figura 5-1 ilustra as sete fases da metodologia MEGACOM, que engloba todo o ciclo de vida do produto e a forma como o desenvolvimento é conduzido, se integrado ou separado nas diferentes tecnologias mecânica, eletrônica e software.

Algumas diretrizes teóricas que seguem tendências tecnológicas e práticas serviram de balizamento para a elaboração da metodologia:

- Enfocar a metodologia sob o aspecto da engenharia da confiabilidade, atividades de outras áreas, tais como marketing, gerência e outras, não são detalhadas;
- Propor uma metodologia que não pretende ser a metodologia de desenvolvimento da empresa, mas sim ser integrada à metodologia da empresa, muito mais abrangente e adequada às suas necessidades;
- Utilizar a metodologia na forma seqüencial, embora que muitas vezes, retornos a fases anteriores sejam necessários, para re adequação do projeto;

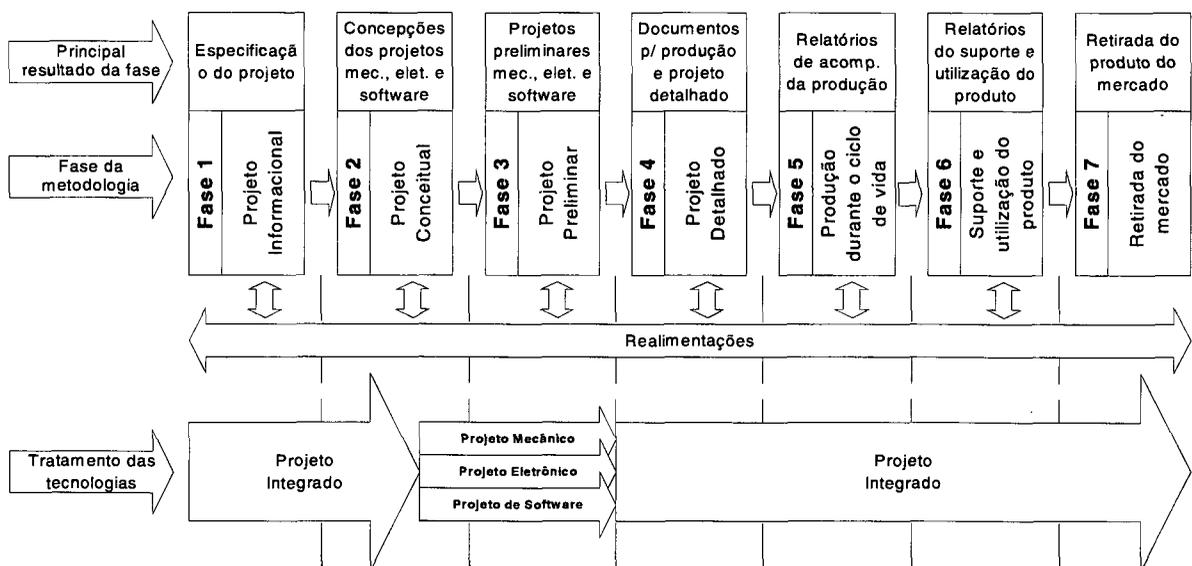


Figura 5-1 – Fases da metodologia MEGACOM, indicando realimentações e a forma como as tecnologias são tratadas (separadas ou integradas).

- Recomendar técnicas de DFX (design for x) [33], embora que o principal enfoque seja a confiabilidade;
- Usar a simbologia apresentada na Figura 5-2;
- Seguir padronização do NEDIP, apub Maribondo [16], ou seja estruturação da metodologia na forma de fases, etapas e tarefas.
- Recomendar revisões de projeto a cada fase, como forma de rediscutir as decisões tomadas até então. As revisões de projeto possibilitam a participação de pessoas diferentes da equipe de projeto e permitem uma análise mais imparcial das decisões tomadas.

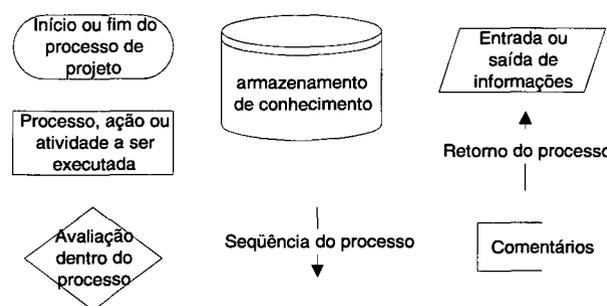


Figura 5-2 – Simbologia utilizada na metodologia MEGACOM.

5.2 RECURSOS BÁSICOS

Na aplicação da metodologia referências são feitas a documentos, ferramentas e ensaios. Os documentos e ferramentas citadas foram considerados necessários para uma melhor sistematização do desenvolvimento e orientação para os aspectos da confiabilidade. Outros documentos e ferramentas podem ser necessários dependendo da empresa e produtos desenvolvidos. Os ensaios aqui determinados encontram-se detalhados, juntamente com os principais aspectos metrológicos, no capítulo 6 do trabalho.

5.2.1 DOCUMENTOS

Os documentos possibilitam analisar como foi o desenvolvimento de um determinado produto. Portanto, devem ser gerados em pontos estratégicos para que possam indicar os caminhos que foram tomados.

Na fase inicial de desenvolvimento (projeto informacional), muitos documentos devem ser gerados, pois é nesta fase que importantes decisões são tomadas.

A Figura 5-3 detalha os documentos recomendados durante o desenvolvimento, em alguns casos são feitas referências bibliográficas, para um maior aprofundamento no assunto, que foge ao escopo dessa tese.

Classificação	Código do Instrumento de apoio	Documentos / Ensaio e Ferramentas de apoio	Comentários
Gerencial	D15	Catálogo de informações de mercado	Documento destinado a registrar as informações de mercado sobre o produto objeto em estudo. Visa mapear mercados, principais concorrentes, produtos alternativos, participações no mercado etc.
	D17	Auditoria de projetos	Documento destinado a um trabalho de auditoria feita por equipe independente com o intuito de corrigir falhas e aprimorar o processo de projeto.
	D18	Acompanhamento de projetos	Documento destinado acompanhar o projeto em suas diversas fases, verificar o cumprimento de metas orçamentárias e prazos.
	D20	Base de conhecimentos do projeto	Meio físico ou eletrônico que reúne todas as informações a respeito do projeto.
	D22	Linha de prod., tecnologias utilizadas	Documento destinado a mapear as tecnologias de domínio da empresa. Visa também determinar programas para o domínio de novas tecnologias.
	D34	Estratégias de projeto	Documento destinado a registrar as principais estratégias de projeto tais como ambiente operacional, tolerâncias, solicitação das peças, embalagem, transporte, armazenagem, ciclo de vida, garantias etc.
Econômico	D9	Análise econômica	Documento destinado a orientar formas e pontos para verificação do fluxo de caixa do projeto. Estabelece desembolsos e retornos esperados.
Pesquisa	D2	Ciclo de vida do produto	Determina os vários clientes envolvidos no ciclo de vida de um produto e suas necessidades (baseado em [16]), também verifica etapas percorridas até o descarte.
	D4	Formulário de identificação de oportunidades	Documento destinado a registrar as oportunidades técnicas e comerciais para o lançamento de um produto (vide [16]).
	D6	Questionário estruturado de pesquisa	Técnica de levantamento de dados ou informações. Consiste em questionários ordenados logicamente, exigindo pesquisa sobre o assunto e estudo de uma estratégia de perguntas (vide [16]).
	D8	Normas técnicas	Relaciona as diversas normas técnicas a que o produto atende, principais requisitos e futuras normas as quais o produto deverá se enquadrar.
Documentação	D1	Ordem de serviço	Documento destinado a registrar as primeiras declarações sobre o que se deseja projetar (vide [16]).
	D3	Catálogo de informações técnicas	Documento destinado a registrar e organizar as informações técnicas sobre o projeto em estudo, visando facilitar a busca e o uso de informações úteis para o desenvolvimento do novo produto (vide [16]).
	D5	Definição do problema de projeto	Documento no qual a equipe de projeto registra o objetivo e as metas a serem atingidas com o desenvolvimento do projeto (vide [16]).
	D7	Quadro de especificações do projeto	Documento destinado a registrar de modo explícito como cada requisito de projeto deve ser atendido (vide [16]).
	D28	Solicitação de alteração de projeto	Documento destinado ao pessoal da produção, assistência técnica, marketing e outros solicitando modificações no projeto com o intuito de melhorar a manufatura, atender melhor o mercado, evitar falhas, etc.
Projeto	D31	Módulos / Diag. estado proj do soft.	Documentação do projeto de software, diagramas em blocos, funções, diagramas de estado, versões do sw, etc..
	D32	Desenhos / dimens./ mat./ proces. / proj mec.	Documentação do projeto mecânico, desenhos, cálculos, materiais selecionados, lista de componentes (fornecedores), processos de fabricação, versões do projeto.
	D33	Diagramas elétricos / circuitos / placas proj elet	Documentação do projeto eletro - eletrônico, diagramas, lay out de placas impressas, fiações, lista de componentes (fornecedores), etc.

Figura 5-3 – Detalhamento dos documentos sugeridos na metodologia MEGACOM (continua).

Classificação	Código do Instrumento de apoio	Documentos / Ensaios e Ferramentas de apoio	Comentários
Análise de falhas	D10	Análise de falhas e ações corretivas	Processo como são feitas as correções de falhas, realimentações no projeto.
	D13	Documentação de falhas internas	Forma como as falhas no processo interno de fabricação são documentadas.
	D19	Banco de dados de falhas e análise de confiabilidade	Forma como as informações sobre falhas de confiabilidade do produto são armazenadas e acessadas em futuras consultas.
	D27	Metas de melhoria da confiabilidade	Visa estabelecer metas, que devem ser amplamente difundidas internamente e entre fornecedores, sobre futuros níveis de confiabilidade dos produtos.
Fornecedores	D16	Seleção auditoria acomp de fornecedores	Estabelece como selecionar fornecedores e como estes serão monitorados.
	D25	Critério de amostragem de fornecedores	Estabelece níveis de amostragem dos fornecedores de acordo com a confiança que a empresa possui no fornecedor, quanto maior a confiança menor a amostragem.
Fabricação e montagem	D12	Documentação do processo	Documenta todos os procedimentos do processo, ferramentas, níveis de regulagens de máquinas, quantidades produzidas, parâmetros funcionais, etc.
	D36	Acompanh. da produção	Documenta como será feito o controle da produção, que parâmetros monitorar, amostragem, etc.
	D23	Disponibilidade dos processos de manufatura	Quantifica qual a disponibilidade da empresa em termos de máquinas, pessoal e atividades de apoio à produção.
	D24	Treinamento de pessoal da manufatura	Estabelece a forma como será feito o treinamento dos operadores de manufatura, o que ensinar, que parâmetros controlar mais atentamente, etc.
	D26	Parâmetros críticos	Estabelece quais são os parâmetros funcionais do produto, para os quais desvios podem comprometer a qualidade e a confiabilidade do produto.
Assistência técnica	D11	Manual de oper. assist. técnica e mand. do produto	Manuais orientativos do consumidor, assistência técnica e manutenção do produto.
	D14	Plano trein. de pessoal da assist. técnica	Visam dar condições de rápida solução de problemas em campo pelas assistências técnicas espalhadas.
	D35	Plano de assist. técnica	Estabelece como será executada a estratégia de assistência técnica estabelecida, quais os pontos fortes e fracos.
	D21	Doc. de falhas de campo	Documenta com rigor de detalhes quais foram as falhas de campo, geralmente, relatadas pelas assistências técnicas.
	D30	Registro de reclamações do cliente	Documenta a reclamação do cliente, em nível de detalhes importantes, tais como condições de uso, tempo de uso, impressão sobre o produto e outros.
Retirada do mercado	D29	Plano de retirada do produto do mercado	Documenta como será feita a retirada do produto do mercado, transição, produto substituído, fornecimento de peças de reposição, imagem perante o mercado, etc.

Figura 5-3 - Detalhamento dos documentos sugeridos na metodologia MEGACOM (continuação).

5.2.2 FERRAMENTAS

Possibilitam o uso de técnicas especiais para se chegar de forma sistematizada, a determinadas respostas, que se precisa ao longo do desenvolvimento de um produto. Por exemplo, o mapeamento dos tipos de falhas que podem ocorrer em um

determinado tipo de produto, com o uso de uma ferramenta conhecida como árvore de falhas.

A Figura 5-4 apresenta as ferramentas sugeridas, para uso no desenvolvimento de um produto mecatrônico, de acordo com a metodologia MEGACOM.

Classificação	Código do Instrumento de apoio	Documentos / Ensaios e Ferramentas de apoio	Comentários
Auxiliares do desenvolvimento	F1	Tradutor das nec. dos clientes em requ. de proj.	Ferramenta destinada a capturar e interpretar os desejos e necessidades dos clientes. Pegar as respostas brutas dos clientes transformando-as em informações úteis ao desenv. do projeto (baseado em [16]).
	F2	Análise de produtos concorrentes	Ferramenta destinada a auxiliar a equipe de projeto a fazer uma análise de valor dos produtos concorrentes com respeito a determinados requisitos do cliente (maiores informações em [16]).
	F3	Matriz casa da qualidade	Ferramenta de auxílio à equipe de projeto no relacionamento das necessidades dos clientes com as características técnicas do produto. Permite comparações com concorr. e hierarquização de requisitos [34].
	F4	Síntese funcional	Ferramenta que visa formular um problema exposto verbalmente em uma função global e suas variantes, assim como a estrutura de funções, modularizadas ou não (baseado em [16]).
	F5	Geração de alternativas de projeto	Ferramenta baseada na síntese funcional que proporciona determinar produtos derivados e portfólio de produtos, de acordo com a estratégia da empresa (vide BACK [25]).
	F6	Avaliação de alternativas de projeto	Ferramenta que consiste em estabelecer critérios de comparação entre as alternativas de projeto atribuindo-se notas a cada um dos critérios.
	F7	Projetos (para):	Consiste na consideração de alguns aspectos específicos de projetos, de acordo com o caso, tais como: Confiabilidade (DFR); Modulares (DFM); Manufatura e montagem (DFMA); Armazenagem e distribuição (DFSD); Controle dimensional (DDC); Compatibilidade eletromagnética (EMC / EMI); Qualidade (DFQ); Manutenibilidade; Ergonomia; Impacto ambiental; e outros (vide HUANG [33]).
	F8	Diagrama de blocos	Diagramas dos tipos: hierárquico; funcionais; da confiabilidade; que possibilitam uma visão geral do projeto sob determinados aspectos, facilitando com isto a análise e representação do projeto.
	F9	FMEA, FTA	Ferramentas muito difundidas que possibilitam a análise da confiabilidade e riscos de um sistema (vide O'CONNOR [26], IRESON [11] e RAC [52]).
	F10	Projeto de tolerâncias	Várias são as formas de análise de tolerâncias. O livro do Creveling [35] apresenta uma abordagem utilizando-se a experimentação e métodos de Taguchi, que deve ser considerada quanto a viabilidade de aplicação.
	F11	Controle estatístico do processo (CEP)	Vários autores tratam de CEP e da manutenção dos parâmetros críticos do produto, recomenda-se Montgomery [10].
	F12	Softwares de simulação (CAE)	Softwares de simulação de esforços e interferências no projeto mecânico, de simulação de sinais e ruídos em circuitos eletrônicos.
	F13	Softwares de cálculos da confiabilidade	Diversos software podem ser usados na análise da confiabilidade de sistemas. Recomenda-se o software Weibull 6 da Reliasoft [36]. Vide exemplo prático Machado [37].
	F14	Revisões de projeto	Ferramenta de revisões de projeto realizadas em pontos estratégicos do desenvolvimento do produto, envolvendo diferentes áreas da empresa. Referência Ichida [38].
	F15	Software para ensaios acelerados	Software para realização de ensaios acelerados que forneça opções de modelamento de acordo com as solicitações que o produto é mais sensível. Recomenda-se Software da Reliasoft Alta [39].
	F16	Software para cálculos estatísticos	Software para modelamentos estatísticos ou ensaios de Taguchi, existem muitas opções no mercado.

Figura 5-4 – Ferramentas sugeridas no desenvolvimento de um produto mecatrônico de acordo com a metodologia MEGACOM.

5.2.3 ENSAIOS

Os ensaios são as formas pelas quais pode-se analisar as características dos produtos. Neste ponto do trabalho os ensaios são somente apresentados, para o completo entendimento da metodologia MEGACOM.

Devido à importância dos ensaios, o capítulo 6 é totalmente dedicado aos nove tipos de ensaios, assim como os seus aspectos metrológicos.

A Figura 5-5 apresenta os nove tipos de ensaios sugeridos pela metodologia, assim como a descrição das suas principais características.

Classificação	Código do instrumento de apoio	Documentos / Ensaios e Ferramentas de apoio	Comentários
Ensaio e medições (maiores detalhes capítulo 6)	E1	Ensaio s funcionais	Ensaio s para: 1) Verificar funcionamento e integração entre mec/ele/sw; 2) Atendimento a normas de segurança; 3) Interação com usuário; 4) Verificar parâmetros funcionais; e outros vide MACHADO [40] [37].
	E2	Ensaio s de materiais	Avaliar os diversos tipos de materiais e suas ligas, vide MACHADO [40] [37].
	E3	Ensaio s para o projeto de parâmetros (DOE)	Engloba os ensaios de Taguchi e clássicos, busca-se o melhor arranjo das variáveis controladas com base em uma característica de qualidade. Vide MACHADO [40] [37], Fowkes [24], ASI [41][42][43] e Montgomery [44].
	E4	Ensaio s acelerados	Visam determinar o desempenho de uma peça ou produto usando-se uma ou mais solicitações ambientais em nível superior aos usuais. Vide software [39], Ireson [11], MACHADO [40][37].
	E5	Ensaio s ambientais	Visam simular em laboratório, geralmente, as condições extremas a que o produto será submetido. Vide MACHADO [40][37] e DOD [45].
	E6	Ensaio s de confiabilidade (ECC)(EDC)	Visam apresentar métodos padronizados para determinação e verificação da conformidade da confiabilidade. Vide normas brasileiras [3], [46], [47], [48], [49], [50] e MACHADO [40] [37].
	E7	Ensaio s de manut. da confiabilidade da produção	Visam garantir a confiabilidade da produção enquanto o produto estiver no mercado. Vide MACHADO [40][37].
	E8	Ensaio s de pré-envelhecimento	Visam eliminar populações anômalas que possam apresentar falhas prematuras. Vide MACHADO [40][37].
	E9	Ensaio s de manutenibilidade	Visam quantificar as características de projeto que determinam fácil acesso, precisão, oportunidade e ações econômicas de manutenção. Vide Blanchard [51] e MACHADO [40][37].

Figura 5-5 – Ensaios sugeridos pela metodologia MEGACOM.

5.3 METODOLOGIA PARA GARANTIA DA CONFIABILIDADE NO DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS MECATRÔNICOS - MEGACOM

A metodologia está organizada na forma de fases (7), etapas (69) e tarefas (219). A apresentação será feita dividida nas suas diferentes fases.

Não é objetivo detalhar todas as tarefas propostas (219). No entanto, algumas tarefas mais importantes sob o ponto de vista da confiabilidade, merecerão um

detalhamento a título explicativo, ao longo da apresentação das fases da metodologia.

A metodologia segue as sete fases anteriormente determinadas, quando da apresentação do estudo de metodologias no capítulo 2.

5.3.1 VISÃO GERAL DA METODOLOGIA

A metodologia é apresentada de forma macro na Figura 5-6, inicialmente detalhada nas suas fases com os respectivos documentos, ensaios e ferramentas demandadas. Visando a confiabilidade é importante o acompanhamento das atividades de suporte (fase 6), pois através dessas pode-se melhorar o projeto atual e os futuros.

A Figura 5-7 apresenta uma proposta de encadeamento das tarefas do projeto, para um projeto mecatrônico padrão, bem como os tempos de projeto. A proposta é baseada em observações práticas enfatizando os ensaios. Essa proposta de encadeamento ilustra, com base no que seria desejável, em termos de tempo de projeto, sabe-se que esses tempos podem variar muito por vários fatores.

Observa-se um tempo total estimado de projeto, de pouco menos de 15 meses (59 semanas). As fases de projeto informacional, conceitual, preliminar e detalhado ocupam respectivamente 12 semanas, 6 semanas, 13 semanas e 28 semanas. Observa-se também um forte enfoque na experimentação, etapa 4.2, para a qual foi reservado um período de 16 semanas.

5.3.2 PROJETO INFORMACIONAL

A Figura 5-8 apresenta a metodologia na fase de projeto informacional. Na fase de projeto informacional é feita toda a pesquisa, que tem por objetivo caracterizar o problema. Como resultados da fase tem-se, entre outros, as especificações de projeto, o conhecimento do mercado, o conhecimento da concorrência, o conhecimento das tecnologias de projeto e do processo que serão necessárias, o ciclo de vida do produto, a especificação da confiabilidade, a estratégia de ensaios do produto etc. Dentre as principais tarefas propostas (sob o enfoque da confiabilidade) estão: a Tarefa 1.4.1 - Definir o ambiente operacional; Tarefa 1.4.3 – Definir os níveis de EMI / EMC; e Tarefa 1.4.11 – Definir a confiabilidade do produto.

A) DEFINIÇÃO DO AMBIENTE OPERACIONAL

Na tarefa de definição do ambiente operacional procura-se, definir as condições de operação que o produto irá encontrar na prática. Essa definição pode ser feita a partir de produtos similares existentes no mercado, ou da própria experiência da empresa. A correta caracterização do ambiente operacional, é uma tarefa até certo ponto fácil de ser realizada, mas devido a sua negligência, muitos produtos têm

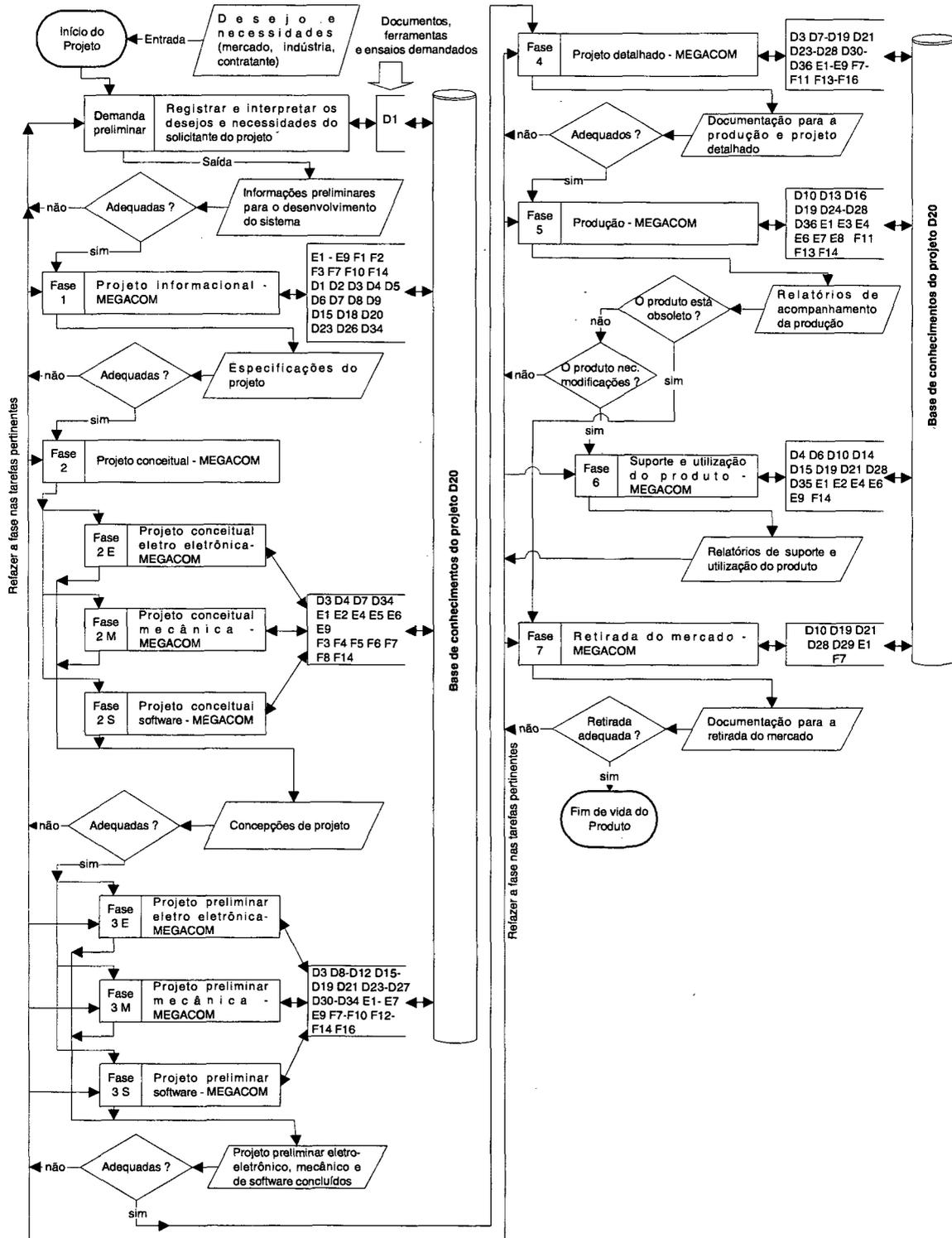


Figura 5-6 – Visão geral da metodologia MEGACOM destacando-se as fases, documentos, ensaios e ferramentas sugeridos.

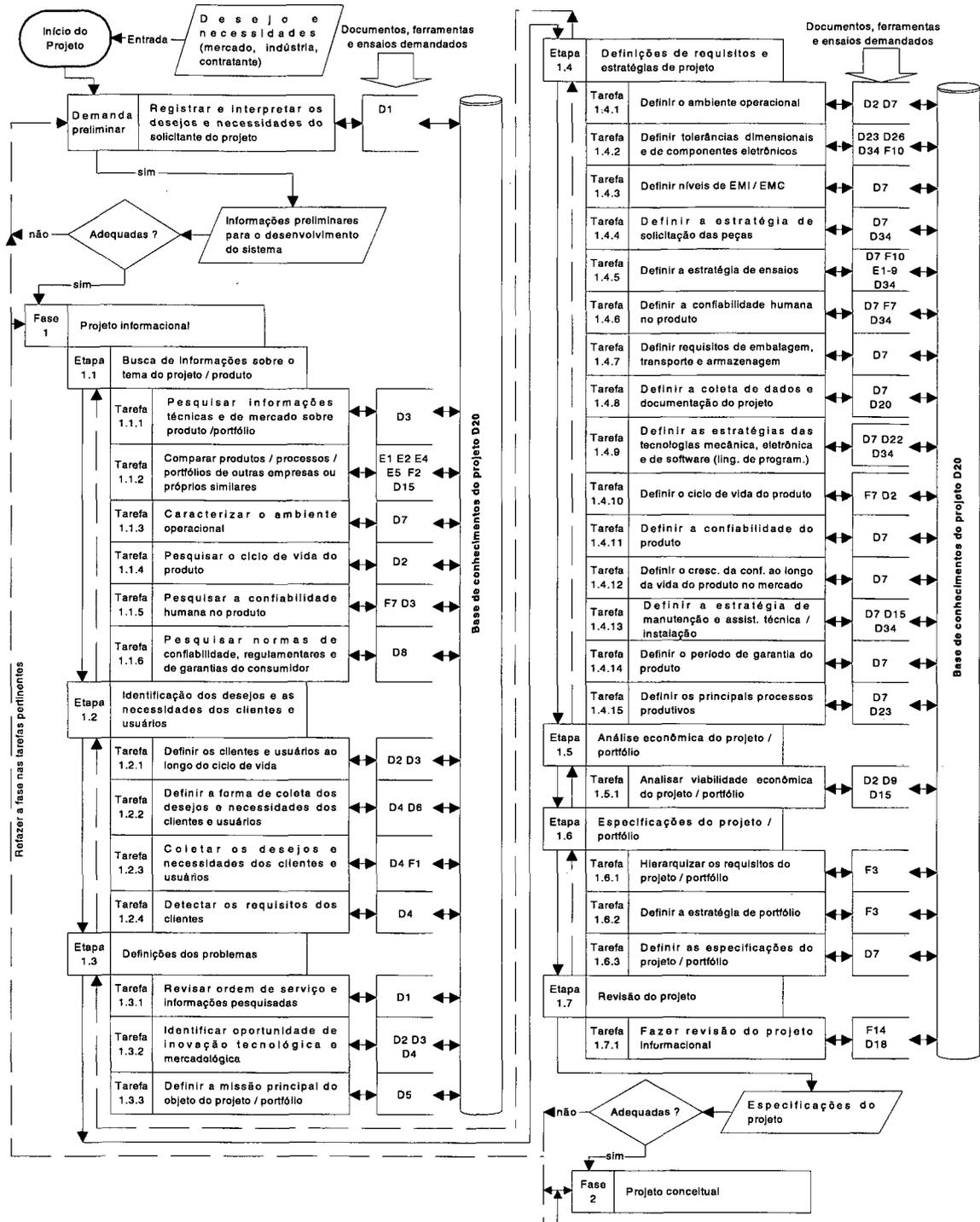


Figura 5-8 – Fase 1 Projeto informacional – “Metodologia MEGACOM”.

apresentado problemas em campo. Muitas podem ser as estratégias contra um ambiente hostil. Algumas medidas poderiam ser: proteção contra corrosão; diminuição das tolerâncias; blindagem térmica; sistemas de amortecimentos contra vibrações; análise de materiais; e muitas outras.

Uma definição de ambiente operacional pode incluir, entre outras: tensão de alimentação (com níveis de flutuação da rede); temperaturas de operação; umidade

relativa; variações bruscas de temperatura; nível de poeira; choques mecânicos; presença de água; etc.

B) DEFINIÇÃO DOS NÍVEIS DE EMI / EMC

Definir os níveis de EMI / EMC, essa tarefa é vital para produtos mecatrônicos, onde se têm diferentes tecnologias operando, como um só produto. A mecânica muito mais robusta pode contribuir para degradação do ambiente eletromagnético, através de motores e solenóides (dispositivos eletromecânicos) que interferem nos circuitos eletrônicos de controle do próprio produto. Essa interferência gerada, mesmo que não interfira no produto, pode interferir em produtos próximos ou ligados à mesma rede. O produto pode por vezes, ser muito susceptível a ruídos externos, que possam desviar o correto processamento das informações pela unidade de controle. Produtos interferentes e susceptíveis adquirem a fama de produtos não confiáveis.

Na maioria das vezes os níveis de EMI / EMC podem ser definidos a partir de normas já consagradas [33]. Para ambientes especiais de operação outros níveis podem ser definidos, a partir de medições nos possíveis locais de operação do produto.

C) DEFINIÇÃO DA CONFIABILIDADE

A definição da confiabilidade do produto é um importante aspecto, com o qual a equipe de projeto deve se habituar. Da mesma forma que parâmetros básicos, tais como, tensão de alimentação, consumo e outros são definidos no início do projeto, o mesmo deve ser feito com relação à confiabilidade. A confiabilidade pode ser definida em função de produtos similares da concorrência, produtos anteriores da empresa, solicitações do mercado e de outras formas. A melhor forma é quando a empresa já habituada com produtos anteriores tem condições de prever com pequena margem de erro, qual a confiabilidade do novo produto. Essa condição de prever a confiabilidade em função de vários fatores tais como tecnologia utilizada, soluções de projeto, processos industriais a serem adotados e outros, é uma situação ideal, que a empresa somente atinge após anos de desenvolvimento de produtos, devidamente documentados com forte ênfase nos ensaios.

A Figura 5-9 exemplifica alguns dos parâmetros que compõem as especificações da fase de projeto informacional de um produto mecatrônico.

Especificações de projeto de um produto mecatrônico genérico
<p>Definição de confiabilidade:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) Aspecto estatístico: Em 99% dos produtos não haverá falhas de operação; 2) Nível de confiança: O resultado será expresso com 90% de confiança; 3) Intervalo de tempo: Primeiras 1000 h de operação; 4) Idade do produto: Após a fabricação; 5) O que é falha: A falha é caracterizada por qualquer fator que leve o produto à indisponibilidade total ou parcial das suas funções; 6) Ambiente de operação: Descrito abaixo; 7) Condições de uso: O produto poderá ser utilizado em regime de até 60 operações por hora.
<p>Definição do crescimento da confiabilidade: O produto não deverá ser lançado no mercado sem a comprovação do índice de confiabilidade estabelecido. Após 6 meses do lançamento o produto deve apresentar uma melhora de 20% na confiabilidade inicialmente admitida.</p>
<p>Estratégia de manutenção: O produto deverá passar por manutenções preventivas de 6 em 6 meses, onde serão verificados os seguintes itens: ... Qualquer manutenção corretiva deverá ser feita pelo pessoal da rede de assistência técnica.</p>
<p>Instalação: O produto poderá ser instalado pelo próprio usuário, desde que sejam observados os requisitos de instalação.</p>
<p>Garantia: O produto é garantido por um período de 12 meses a partir da data aquisição, observadas as condições estabelecidas.</p>
<p>Ambiente operacional, o produto deve suportar:</p> <ul style="list-style-type: none"> Pressão: a baixa pressão, isto é acima de 4.570 m; Alta temperatura: temperaturas até 50° C ; Baixa temperatura: temperaturas de até - 31° C ; Choque térmico: variações de temperatura de 20° C até 50° C no intervalo de não mais do que 10 minutos; Radiação solar: ciclos com intensidade máxima de 1120 W/m² durante 4 h diárias; Chuva: a penetração de gotas de água; Umidade: ciclos com umidade variando de 59 a 95 % ; Fungos: o aparecimento moderado de fungos devido às condições de temperatura e umidade; Névoa salina: ao NaCl com concentração de até 6%; Areia / Poeira: O produto deverá ser operado em ambiente fechados, isento de poeiras e areias (partículas com 149 até 850 micro metro); Atmosfera explosiva: vapores explosivos sem ocasionar ignição; Imersão em líquidos: imersão parcial em líquidos sem danos maiores; Vibração: vibrações de até 0,1 g² / Hz;
<p>EMI / EMC: O produto não deve interferir ou ser interferido por produtos próximos de acordo com diretiva 89/336/EEC.</p>
<p>Processos de fabricação e tecnologias: peças injetadas; chapa estampada; placas impressas multi camadas com componentes SMD; fonte de alimentação chaveada, programação em software linguagem C, processador Z 8; memória flesch; sensores infra vermelho reflexivo com prisma; atualização de software via interface serial; etc.</p>
<p>Ciclo de vida do produto: fabricação com processos e tecnologias definidas, a venda será através de representantes mundiais da marca, o produto será feito para uso em ambientes internos, após a sua vida útil este será reciclado em todas as suas partes que se encontram devidamente separadas.</p>
<p>Estratégia de solicitação das peças: As peças críticas tais como motores e seus controles eletrônicos serão super dimensionadas. Haverá sensores redundantes na medida da disponibilidade física.</p>
<p>Estratégia de ensaios:</p> <ul style="list-style-type: none"> Ensaio funcionais serão feitos à exaustão, levando-se em conta o aspecto de segurança para o usuário e burla do sistema; Ensaio ambientais serão prescritos a medida da necessidade; Ensaio de confiabilidade serão feitos nas peças mais críticas do produto de forma independente, levando-se em conta um nível de confiança de 90% nos resultados; Ensaio de manutenção da confiabilidade serão determinados quando do detalhamento da produção; Ensaio de pré envelhecimento serão feitos em 100% das placas eletrônicas, acelerando o ensaio com a temperatura; Ensaio de manutenibilidade não serão feitos.

Figura 5-9 – Algumas das especificações características de um projeto de produto mecatrônico com ênfase na confiabilidade.

5.3.3 PROJETO CONCEITUAL

A Figura 5-10 apresenta a metodologia na fase de projeto conceitual. Nessa fase o produto começa integrado e sai dividido em pelo menos três sub projetos, que exigem diferentes habilidades. A divisão em três subprojetos distintos dá-se após a etapa 2.5, quando da alocação das funções às tecnologias.

Algumas tarefas sugeridas pela metodologia direcionam para um projeto com concepções modulares, pelas facilidades de fabricação, montagem e

mantenabilidade.

O principal objetivo dessa fase é determinar as diferentes funções do produto mecatrônico e os possíveis princípios de implementação. Da combinação das diversas possibilidades de implementação, é escolhida a combinação mais adequada aos objetivos do projeto. Um dos critérios para a escolha da combinação mais adequada será com certeza a confiabilidade da combinação escolhida. As tarefas sugeridas orientam com a finalidade de um produto final confiável.

Tomando como referência a confiabilidade, para escolha da melhor combinação de formas de implementação, das funções de projeto, deve-se levar em consideração a tendência dos produtos mecatrônicos. Qual seja, de substituição das funções implementadas por sistemas mecânicos, para funções implementadas por sistemas eletrônicos e pelo software. A tecnologia eletrônica com seus programas de confiabilidade já executados consegue atualmente superar com vantagens as funções implementadas mecanicamente.

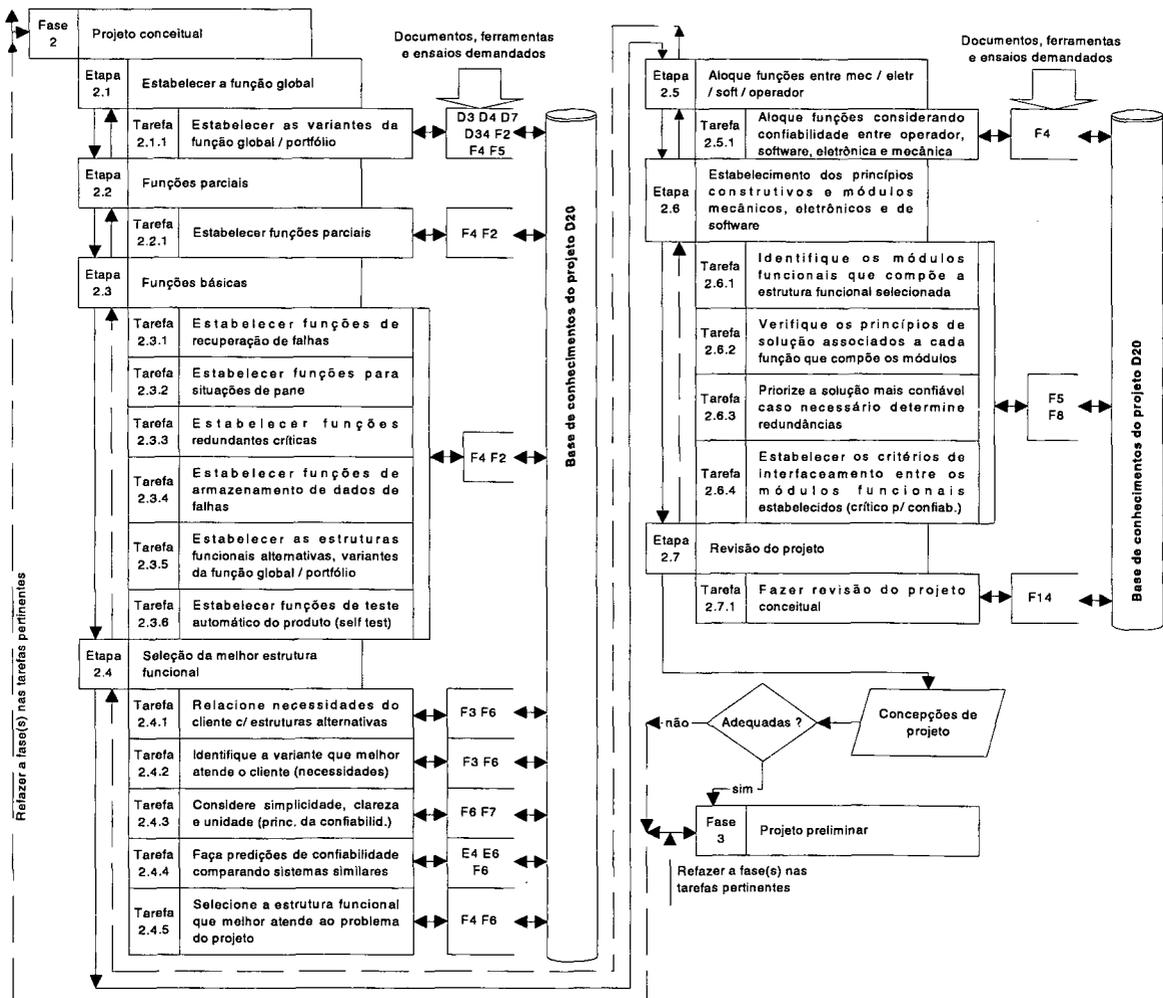


Figura 5-10 – Fase 2 Projeto Conceitual – “Metodologia MEGACOM”.

Prever funções de teste nos produtos é uma forma de facilitar a manutenção dos produtos, aumentando a sua disponibilidade. As funções de teste (self test) podem ser acionadas também como forma de checar as funções do produto após a montagem final, encurtando os tempos de teste da produção, padronizando os ensaios e evitando a aleatoriedade característica dos testes feitos, função a função por operadores humanos.

Na determinação das funções do produto mecatrônico, é importante considerar desde já, funções redundantes para as funções mais críticas do projeto. Uma forma a baixo custo de implementar redundâncias é através do software, por exemplo, a realização de várias leituras de um sensor antes de tomar uma decisão, é uma solução a custo zero que pode evitar problemas de ruídos no produto.

No projeto de um produto baseado em similares da concorrência, pode-se fazer o processo inverso, de a partir das funções determinar o produto, mas sim, a partir do produto determinar as funções, inventando novas funções e formas de concepção que agreguem valor ao produto, por exemplo, confiabilidade.

A) ALOCAÇÃO DE FUNÇÕES

Antes da especificação dos princípios construtivos, deve-se alocar funções para cada uma das três tecnologias, mecânica, eletrônica ou software. Nessa alocação algumas funções podem ser deixadas para o operador. O fator confiabilidade deve ser o preponderante nessa alocação.

No caso de produtos mecatrônicos, um dos elementos vitais para o correto funcionamento do produto, são os sensores. Deve-se evitar sensores frágeis mecanicamente, sempre que possível, deve-se usar sensores óticos e magnéticos, muito confiáveis. Sempre que possível é desejável incluir redundâncias nos principais sensores, o que possibilita formas mais sofisticadas de validação do acionamento pelo software. Nas funções deixadas a cargo do operador do sistema, deve-se considerar falhas devido a erros humanos na operação. Com objetivo de melhorar a confiabilidade, o mínimo indispensável de funções deve ser deixado a cargo do operador.

5.3.4 PROJETO PRELIMINAR ELETRO-ELETRÔNICO

A Figura 5-11 apresenta a metodologia na fase de projeto preliminar eletro-

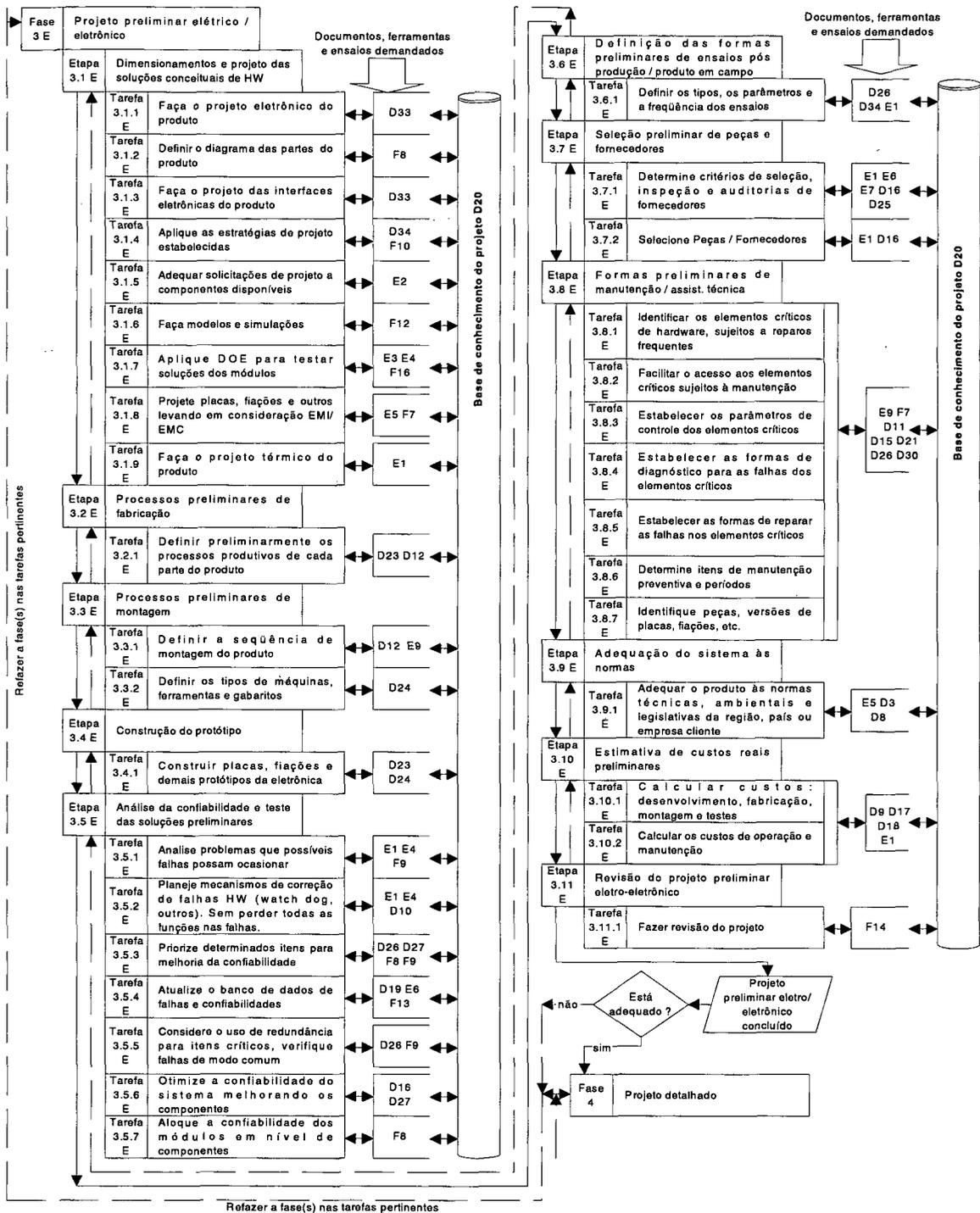


Figura 5-11 – Fase 3 Projeto preliminar eletro/eletrônico – “Metodologia MEGACOM”.

eletrônico. O projeto segue separado nas áreas eletrônica, mecânica e software. É importante a separação da metodologia nesta fase do projeto, pois cada uma das áreas (mecânica, eletrônica e software) apresenta características próprias e tarefas específicas que podem ser utilizadas para melhoria da confiabilidade. A tendência atual é o uso nos produtos mecatrônicos, de micro processadores (ou micro controladores), componentes SMD e placas de múltiplas camadas. Os

processadores atuais já apresentam sistemas de “watch dog”¹, o que elimina uma grande fonte de preocupação dos antigos microprocessadores.

A) PROJETO DE PLACAS, FIAÇÕES E OUTROS CONSIDERANDO EMI / EMC

No caso da tarefa 3.1.8 – Projete placas, fiações e outros levando em consideração EMI / EMC (interferência e compatibilidade eletromagnética). A compatibilidade eletromagnética é a habilidade de um equipamento eletrônico funcionar sem causar interferência ou ser interferido. A EMC pode ser convenientemente dividida em dois aspectos:

1. Emissões eletromagnéticas, onde o equipamento é a fonte de interferência eletromagnética;
2. Imunidade eletromagnética, onde o equipamento é interferido por energia eletromagnética em seu ambiente.

A EMC também pode ser classificada de acordo com o caminho que a interferência tomar. Interferências conduzidas se propagam através de cabos, enquanto interferências irradiadas se propagam pelo espaço entre a fonte e a vítima. A interferência conduzida é mais preocupante em baixas frequências (abaixo de 30 MHz) e a interferência irradiada em altas frequências.

A estratégia comum em projetos mecatrônicos é não fazer nada a respeito de EMC até o produto estar pronto, então testar e corrigir problemas que forem encontrados. Embora se possa economizar tempo e esforço no projeto de EMC, caso o produto passe no ensaio na primeira tentativa, o re projeto e novos ensaios podem custar caro. Foi estimado que somente 15% dos produtos não projetados para EMC, passam em ensaios na primeira tentativa [33].

Além do mais, problemas descobertos em estágios avançados têm poucas e caras alternativas, para problemas de EMI/EMC, tal como blindagem metálica, para problemas que poderiam ter sido resolvidos com um correto *lay out* da placa de circuito impresso.

¹ Watch dog: Sistema de proteção contra a perda da seqüência lógica do processador, que devido a ruídos pode perder a indexação à memória de programa.

Princípios de Projeto para EMI / EMC

A Figura 5-13 mostra alguns dos fatores que afetam a EMI / EMC e quais as principais estratégias de projeto para minimizar os seus efeitos. A figura foi dividida pelos principais itens do sistema eletro / eletrônico, aos quais se aplica a estratégia.

B) MECANISMOS DE CORREÇÃO DE FALHAS

Quanto as tarefas 3.5.2 E, 3.3.2 S (Figura 5-17) e 3.7.2 M – Planeje mecanismos de correção de falhas HW e SW (watch dog, outros). Vários são os artifícios para evitar-se as falhas, mas caso mesmo assim elas ocorram, não devem levar a uma pane do sistema, com perda de todas as suas funções. Entre os mecanismos para evitar-se falhas, nas várias partes de um circuito eletrônico, estão os indicados na Figura 5-12.

Outros mecanismos para evitar falhas são softwares com mudança automática de parâmetros, que compensam o desgaste da parte mecânica. Mecanismos de correção de falhas, que previnem certas falhas, tais como trancamentos (tipo vai e volta) ou ainda o tradicional *time out*.

Unidades	Medidas para monitoramento de falhas
CPU	<ul style="list-style-type: none"> • Testes padrões da CPU; • Teste da CPU com monitoramento das unidades periféricas;
Unidades periféricas	<ul style="list-style-type: none"> • Watchdog; • Comparadores; • Sistemas tipo votação, a maioria vence;
ROM	<ul style="list-style-type: none"> • Teste de paridade;
RAM	<ul style="list-style-type: none"> • Técnica de múltiplos bits redundantes; • Técnicas de checagem por hardware; • Técnica do uso de RAM dobrada com comparações por software e hardware;
Dados de entrada e saída	<ul style="list-style-type: none"> • Teste cíclico das unidades de entrada e saída; • Checagem de códigos de dados de entrada e saída; • Reescrita nos dispositivos periféricos;
Transferência interna de dados	<ul style="list-style-type: none"> • Um bit redundante de hardware; • Estrutura de barramento dobrado; • Redundância por tempo
Fontes de energia	<ul style="list-style-type: none"> • Monitoramento da fonte de energia; • Monitoramento do sistema de refrigeração;
Outros dispositivos	<ul style="list-style-type: none"> • Teste de sensores; • Teste de atuadores;
Software	<ul style="list-style-type: none"> • Monitoramento por tempo das seqüências do programa (watchdog); • Monitoramento lógico das seqüências do programa;

Figura 5-12 – Principais medições para serem monitoradas no combate a falhas.

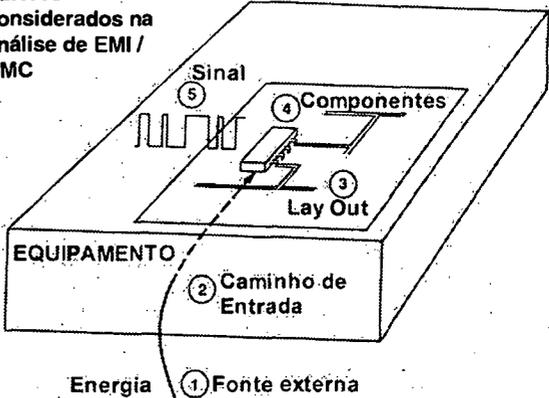
PARTE DO SISTEMA ELETRO / ELET.	PRINCÍPIOS DE PROJETO PARA EMI / EMC, SEPARADAS PELAS PARTES DO SISTEMA	
<p>Placa impressa / Lay out</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Deixar espaços nos circuitos para possíveis proteções contra EMI. As proteções podem ser planejadas, mas não necessariamente utilizadas, dependendo da necessidade; • O lay out do circuito, o comprimento e largura das trilhas do circuito impresso, posição dos componentes, se existe um plano de terra, são alguns dos fatores; • Todos os circuitos de terra devem estar a mesmo potencial durante a operação do circuito. Isso é particularmente importante para sistemas digitais de alta frequência; • Uma boa prática para EMC é colocar os microprocessadores, no centro das placas; • Separar parte lógica da parte de controle de potência. 	
<p>Componentes</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Os componentes, a família lógica no caso de circuitos digitais, a largura de banda e não linearidades para circuitos analógicos; • Capacitores de desacoplamento próximos aos circuitos, normalmente de tântalo nos valores de 0,01 micro F para desacoplamento das altas frequências dos CI's e 1 micro F para desacoplamento das flutuações da fonte de alimentação; • Contatos devem ser escolhidos para minimizar EMI, caso possível utilize relês de estado sólido ou filtros; • Evite sensores de baixo sinal de saída; • Filtros. 	
<p>Frequência e níveis de sinal</p>	<ul style="list-style-type: none"> • O sinal, a velocidade do clock e software para digitais, e o nível do sinal e largura de banda para analógicos. 	<p>Fatores considerados na análise de EMI / EMC</p> 
<p>Cabos</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Cabos são importantes para EMC irradiada, porque atuam como antenas, deve-se usar cabos blindados; • Blindagens de cabos e placas; • Blindagens, qual o tamanho das aberturas. 	
<p>Fontes</p>	<ul style="list-style-type: none"> • A fonte de alimentação é linear ou chaveada. 	
<p>Software</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Um software bem escrito pode reforçar a imunidade do sistema com respeito a EMI. Acessos contínuos a periféricos geram altos níveis de ruídos, deve-se restringir o acesso aos periféricos ao mínimo. Precauções simples como prever rotinas de erros para todas as interrupções não utilizadas. Ruídos impulsivos em entradas podem ser neutralizados, fazendo-se várias leituras coincidentes antes de tomar uma decisão. A habilidade do sistema em recuperar-se de uma falha do processador, é importante em muitos sistemas e dependente do projeto do software de controle. 	
<p>Ferramentas de projeto</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Sistemas CAE para projeto de EMC incluem ferramentas de predição, que requerem computadores potentes e custam muito. Outras ferramentas baseadas em conhecimentos, incluem verificações de regras de projeto. 	
<p>Gerais</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Uma importante parte da teoria eletromagnética é o teorema da reciprocidade, que aplica-se aos fatores 2 e 3 da Figura. Ou seja, caso o lay out e a blindagem forem projetados para reduzir emissões, então a imunidade também será alta. Contudo a reciprocidade não se aplica aos fatores 4 e 5. Ou seja, uma família lógica de baixa potência, possui baixa emissão, mas isto pode resultar em imunidade ruim (menos energia é necessária para produzir espúrios de transição). 	

Figura 5-13– Estratégias de projeto separadas pelas partes do sistema eletro-eletrônico.

5.3.5 PROJETO PRELIMINAR MECÂNICO

A Figura 5-14 apresenta a metodologia MEGACOM na fase de projeto preliminar mecânico. O principal objetivo dessa fase é ter ao seu final, o projeto mecânico em sua versão preliminar, com ênfase na confiabilidade.

As principais tecnologias utilizadas em produtos mecatrônicos ligadas ao processo são chapas estampadas, que servem de suporte mecânico, muitas peças injetadas, motores tipo DC ou de passos. Uma série de outros materiais também pode ser utilizada, no entanto os mais comuns são os polímeros e metais.

Normalmente a redundância mecânica é difícil de ser aplicada em sistemas mecatrônicos, já que os custos aumentariam demais, assim como as dimensões dos produtos. Sendo assim, componentes mecânicos críticos devem apresentar alta confiabilidade é o caso clássico dos motores.

A) EXPERIMENTAÇÃO DAS ALTERNATIVAS DE PROJETO

O projeto mecânico, ao contrário dos projetos eletrônicos já sistematizados em módulos, depende muito da experiência e criatividade dos projetistas (inúmeras soluções podem ser adotadas para as mesmas funções).

Nesse contexto a experimentação das diversas alternativas de projeto, através da tarefa 3.1.5 M, é uma solução de compromisso entre custos, confiabilidade, aspectos estéticos, tempo de desenvolvimento, facilidades de manufatura, etc.

As diversas alternativas de projeto a serem experimentadas podem ser: diferentes forças de uma mola, diferentes tensões / correntes de acionamento de motores, diferentes materiais, diferentes tolerâncias das peças, diferentes mecanismos, etc. A combinação de todas estas diferentes alternativas, determina diversas respostas de uma característica escolhida como característica da qualidade do produto. Para um bom projeto mecânico sob o aspecto da confiabilidade, essas diferentes alternativas de projeto devem ser conhecidas para que se escolha a mais confiável.

B) ADEQUAÇÃO DAS SOLICITAÇÕES AOS MATERIAIS

A tarefa 3.2.1, adequar solicitações de projeto aos materiais disponíveis, consiste na escolha dos materiais adequados ao tipo de solicitação do projeto.

A Figura 5-15 apresenta várias considerações que podem ajudar na confiabilidade de produtos, indicando tipos de materiais, para condições de não operação dos produtos. A figura apresenta também vários aspectos relacionados a características de projetos eletrônicos, não só mecânicos.

Na escolha das peças que comporão o produto, os aspectos relacionados na Figura 5-16 são importantes de serem considerados.

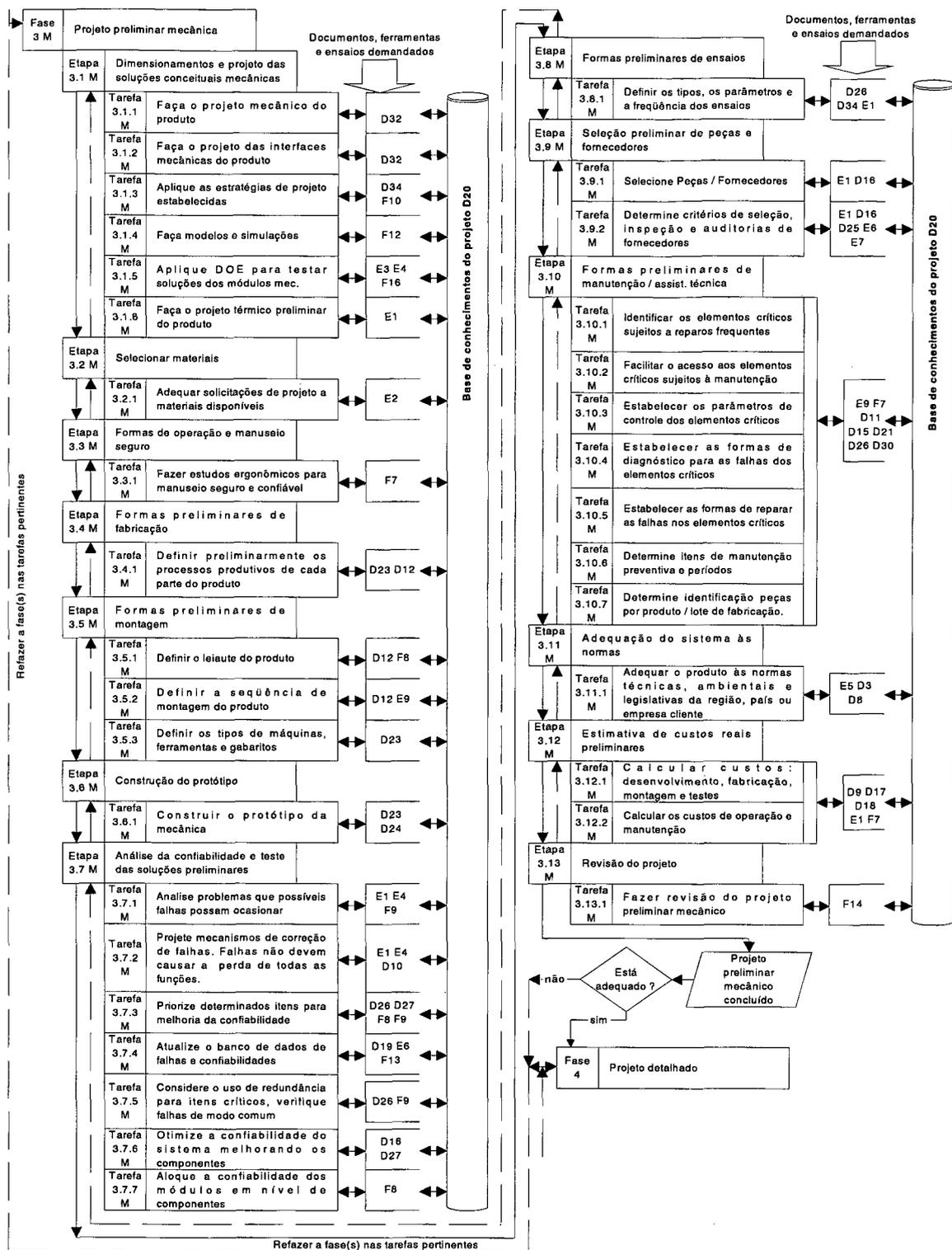


Figura 5-14 – Fase 3 Projeto preliminar mecânico – “Metodologia MEGACOM”.

Guias para a confiabilidade dos produtos	
Considerações da não operação	
Relacionadas ao projeto	<ul style="list-style-type: none"> • Use peças e componentes que não mudem os níveis de tolerância com o tempo • Evite semicondutores e micro circuitos que utilizem resistores de níquel cromo depositado • Use peças e componentes que não possuam metalização para evitar corrosão galvânica • Evite o uso de componentes de atuação variável, tolerância e corrosão são problemas com peças tais como potenciômetros • Use relés e chaves de estado sólido para evitar corrosão e problemas de contato • Use acabamentos resistentes à umidade e materiais não absorventes em vedações • Superfícies lubrificadas e montagens requerem selos e drenagem para o excesso de umidade • Impregnar enrolamentos com vernizes, encapsulamento ou selos herméticos • Use materiais isolantes não porosos • Impregnar bordas cortantes com plástico resistente a umidade
Relacionadas às solicitações	<ul style="list-style-type: none"> • Solicitações mecânicas podem ser reduzidas com o uso de isoladores de choques e vibrações • Solicitações térmicas podem ser reduzidas minimizando-se a temperatura ambiente, ou controlando-se os ciclos e mudanças de temperatura • Corrosão química pode ser controlada por encapsulamento, selagem ou reduzindo a umidade • Defeitos de manufatura podem ser reduzidos, por ensaios de solicitações ou inspeção rígida dos materiais • Materiais sensíveis ao calor e a deformações devem ser evitados • Materiais higroscópicos devem ser evitados, ou protegidos contra umidade • A resistência de contato pode ser reduzida com o controle da umidade.
Relacionadas a longos períodos de transporte e armazenagem	<ul style="list-style-type: none"> • Evite o uso de lubrificantes • Use grafite se necessário • Evite teflon ou borracha de vedação • Use vedações de silicone • Desconecte todas as fontes e terras dos componentes • Mantenha uma temperatura constante entre -5°C a 25°C • Use amortecedores de impacto nas embalagens, para reduzir o choque e vibrações • Controle a umidade relativa entre 50% ± 5% para reduzir a corrosão e falhas por descargas eletrostáticas • Re carregue as baterias a cada 60 dias ou as remova • Proteja contra roedores usando blindagens, venenos, detectores, etc.

Figura 5-15 – Uso de materiais considerando as solicitações de projeto para melhorar a confiabilidade (adaptado de [52]).

- Seleção de peças obsoletas;
- Possibilidade de super estimar alguns fornecedores;
- Uso de tecnologias imaturas ou sem prévio teste;
- Incompatibilidade com o processo de manufatura;
- Aumento dos itens de estoque da empresa e aumentos de custos;
- Controle da qualidade difícil devido ao aumento do número de fornecedores;
- Perda de oportunidades "just in time" ou "ship to stock";
- Dificultar economia de escala na compra de componentes;
- Aumentos de custos e atrasos de programação;
- Métodos de montagem e equipamentos adicionais;
- A confiabilidade do produto pode decrescer devido a incertezas com novas peças;
- Os esforços de automatização podem ser comprometidos.

Figura 5-16 – Efeitos de uma escolha inadequada de peças [52].

5.3.6 PROJETO PRELIMINAR SOFTWARE

A Figura 5-17 apresenta a metodologia na sua fase de projeto preliminar de software. As tarefas da metodologia são voltadas ao software tipo *firmware*, normalmente armazenado em uma memória ROM. No desenvolvimento do *firmware* deve-se priorizar o software modular, se possível com o uso de módulos de bibliotecas de produtos anteriores. Uma das maiores dificuldades do software está

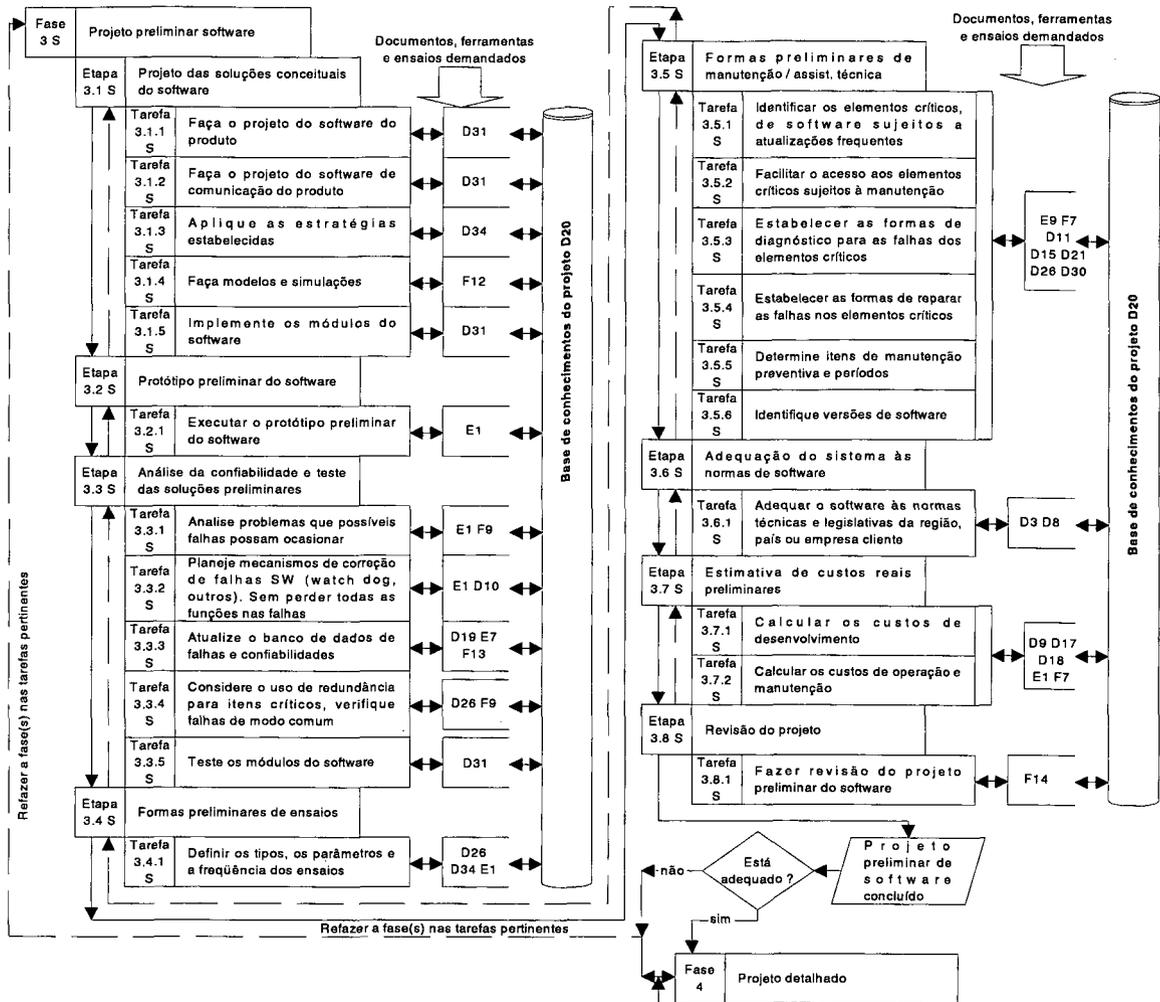


Figura 5-17 – Fase 3 Projeto preliminar do software – “Metodologia MEGACOM”.

na documentação. Não é raro, ao longo de um desenvolvimento, ter-se várias versões de software, que incorporam pequenas modificações, chegando-se a um ponto, de não se saber qual versão encontra-se em um determinado produto.

Assim, uma documentação criteriosa das versões do software, indicando que tipos de problemas determinaram aquelas modificações e quais foram os resultados, é necessária para que melhoramentos da confiabilidade possam ser introduzidos com segurança.

No caso de uma documentação precária pode-se chegar à situação em que determinadas versões de software, sejam indicadas somente quando as partes (peças) forem de um determinado fornecedor. Deve-se evitar essa situação de várias versões de software para um mesmo produto, procure uniformizar os fornecedores das partes, para que o produto torne-se operacional com uma só versão de software.

ORIENTAÇÕES GERAIS

No projeto do software (firmware) o uso de variáveis globais dentro do programa, pode dificultar o seu entendimento; use variáveis de projeto padronizadas. Construa módulos estanques com funções bem definidas.

Caso a CPU apresente uma modificação dos seus registros, por ruídos externos, por exemplo, o contador do programa perde a sua informação, o controle do sistema não deve ser perdido. Os softwares devem prevenir problemas devido a interferências, que causam modificações dos registros, ou do contador do programa.

Outras práticas recomendadas são:

- verifique regularmente dados vitais armazenados na memória RAM;
- controle o fluxo do programa;
- preencha as posições de memória não utilizadas;
- use pontos de checagem para controlar o fluxo de tarefas, os pontos devem ser incluídos no início e fim de cada tarefa.

O fluxo do programa também pode ser monitorado pelo controle do tempo de duração das sub rotinas, por exemplo, pela leitura de um valor de tempo no início e fim de uma tarefa. Na verificação dos conteúdos da memória RAM, determinados endereços podem ser checados para detectar possíveis variações causadas por ruídos. Os registradores de controle dos periféricos devem ser reinicializados regularmente dentro da rotina principal.

Escrever um software que funcione é relativamente fácil, difícil é fazer um software que funcione com confiabilidade, prevendo todas as situações de falhas que possam ocorrer. Existem na literatura, muitos casos de sistemas que pararam de operar devido à falhas de software, nos casos os softwares não previram que determinadas situações futuras pudessem ocorrer (tipo bug do milênio).

5.3.7 PROJETO DETALHADO

A Figura 5-18 apresenta a metodologia MEGACOM, para a fase de projeto detalhado. É no projeto detalhado que as tecnologias mecânica, eletrônica e software são integradas, para constituir o projeto final.

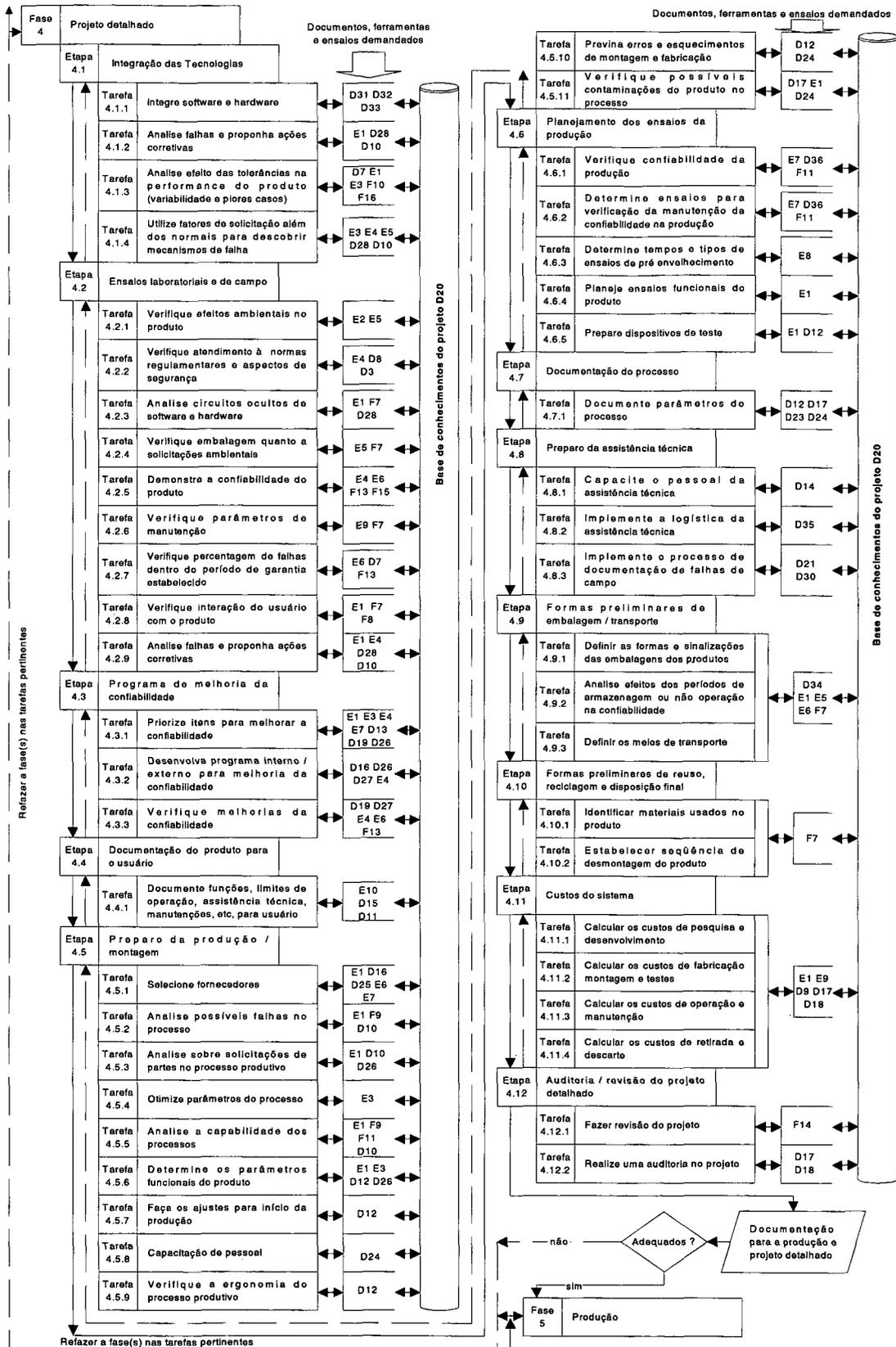


Figura 5-18 – Fase 4 Projeto detalhado – “Metodologia MEGACOM”.

Quando as tecnologias mecânica, eletrônica e de software, desenvolvidas por diferentes pessoas, são integradas, ajustes precisam ser feitos, para que o produto

final, desempenhe as funções para as quais foi concebido.

Normalmente, tenta-se fazer os ajustes através de modificações no software, modificações da mecânica e eletrônica são mais complicadas e envolvem custos maiores.

Ajustes também precisam ser feitos, em função dos resultados dos ensaios feitos com os protótipos. A fase de projeto detalhado é a fase onde se tem a maior oportunidade para ensaios, pois somente nesta fase tem-se um produto integrado. No entanto a ênfase nos ensaios deve ser dada, principalmente, nas fases iniciais de projeto, onde as modificações são mais facilmente realizadas.

SELEÇÃO DE FORNECEDORES

É normal os projetistas e engenheiros de compras, usarem os componentes daqueles fornecedores dos quais eles possuem maior confiança. Essa confiança pode advir de experiências passadas e ensaios de confirmação. A seleção deve basear-se, sobretudo no ambiente em que as peças irão operar, bem como nas condições em que essas serão expostas durante a manufatura, armazenamento e transporte. Também é importante conhecer como é a variação da taxa de falhas, em função do desgaste durante a vida útil da peça. Qual o impacto dessa variação para as condições específicas da aplicação.

Para assegurar peças adequadas, os fornecedores devem ser controlados. Os fornecedores / tecnologias podem ser qualificados de acordo com critérios tais como:

- a)** Limitações de desempenho (prática não robusta);
- b)** Limitações de confiabilidade (materiais e componentes com limitações de vida ou requisitos de sub solicitação não reais);
- c)** Histórico dos fornecedores (entregas atrasadas, problemas de confiabilidade);
- d)** Tecnologia ultrapassada, obsolescência (problemas de desempenho);
- e)** Tecnologia nova, peças fabricadas usando-se tecnologia não madura.

Os fornecedores podem ser avaliados pelo acompanhamento e análise dos seus projetos, manufatura, qualidade e práticas de confiabilidade. Uma auditoria pode confirmar se existe um sistema da qualidade documentado e se este é utilizado. Adicionalmente, demonstrações por ensaios da confiabilidade, de um produto

manufaturado, podem ser feitas. A Figura 5-19 apresenta algumas questões para serem investigadas de um possível fornecedor.

- Existe um programa de qualidade definido e implementado ?
- Potenciais mecanismos de falha foram identificados ?
- Quais ações corretivas foram colocadas em prática ?
- Os materiais e processos de manufatura estão documentados ?
- Há controles de processo em uso ?
- As peças são fabricadas continuamente ou a produção é intermitente ?
- Qual o nível de defeitos presente ?
- Há uma meta a ser alcançada com melhoramentos contínuos ?
- Há mecanismos de falha que limitem a vida das peças ?
- Os mecanismos de falha não se manifestam durante a vida útil esperada do produto ?
- Há esforços para identificar mecanismos de falha e melhorar o processo de manufatura ?
- O processo de separação de peças defeituosas é eficiente ?
- As regras de projeto usadas resultam em alta qualidade e confiabilidade ?
- As mudanças de projeto são feitas somente após análise dos impactos na confiabilidade e qualidade ?
- O cliente é notificado de mudanças significativas ?
- O fornecedor entrega nos prazos ?

Figura 5-19– Questões para análise de possíveis fornecedores [52].

5.3.8 PRODUÇÃO

A Figura 5-20 apresenta a metodologia MEGACOM na fase de produção. As tarefas planejadas para essa fase, se estendem enquanto o produto estiver no mercado. Dificuldades de adequação dos processos produtivos, embora que tardias, devem ser relatadas ao projeto para que modificações sejam feitas, neste e nos próximos projetos da empresa.

Muitas vezes pequenas modificações dos projetos, determinam um ganho de tempo muito grande na fabricação, através da simplificação dos processos produtivos.

Os processos de manufatura de placas eletrônicas são mais padronizados que os processos mecânicos, que variam muito de acordo com o tipo de produto.

PROGRAMA DE MELHORIA DA CONFIABILIDADE

Durante a produção pode ser necessário melhorar a confiabilidade do produto. Para que isto seja feito, um programa de melhoria da confiabilidade pode ser implementado. Participam de um programa de melhoria da confiabilidade, os fornecedores das partes mais críticas do produto.

A partir de um diagrama de blocos da confiabilidade determina-se quais as peças mais críticas e metas de confiabilidade são estabelecidas. Por vezes os programas de confiabilidade, devem ser conduzidos atuando-se principalmente, nos processos internos, é o caso de empresas verticalizadas. Os ensaios de confiabilidade são a

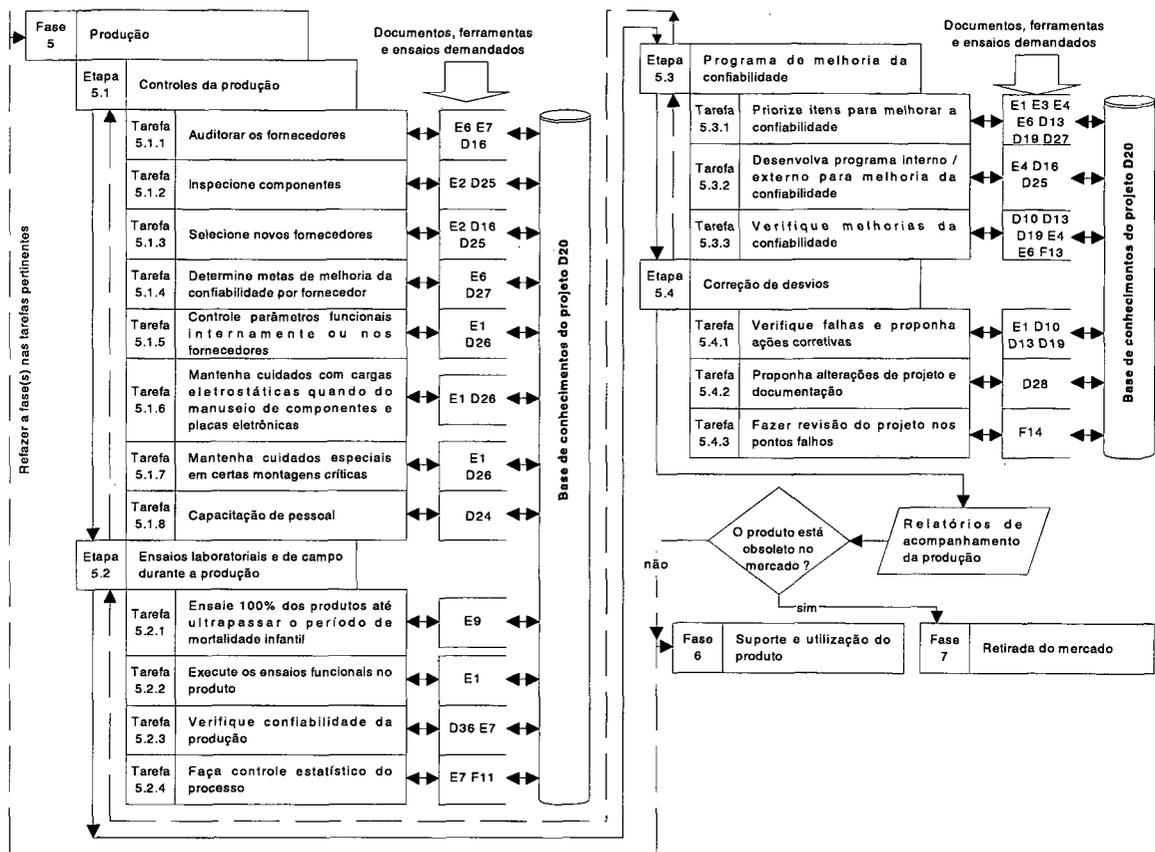


Figura 5-20 – Fase 5 Produção durante a vida do produto – “Metodologia MEGACOM”.

forma clássica de verificar as melhorias de confiabilidade, formas alternativas podem ser buscadas, monitorando-se alguns parâmetros críticos do produto.

5.3.9 SUPORTE E UTILIZAÇÃO DO PRODUTO

A Figura 5-21 ilustra a metodologia MEGACOM na fase de suporte e utilização do produto. Durante a fase de suporte e utilização do produto espera-se que as manutenções do produto sejam feitas de forma a não comprometer a confiabilidade do produto e que eficientes mecanismos de realimentação das assistências técnicas, possam trazer os problemas até a equipe de projeto, para que modificações possam ser feitas, neste e nos próximos projetos da empresa.

COLETA DE DADOS DE CAMPO

Na coleta de dados de campo, deve-se ter muito cuidado para a perda de, importantes informações necessárias na análise das falhas.

É comum que informações tais como: período de armazenagem, número de horas de vida, tipo de falha observada, condições de operação do produto, ações de

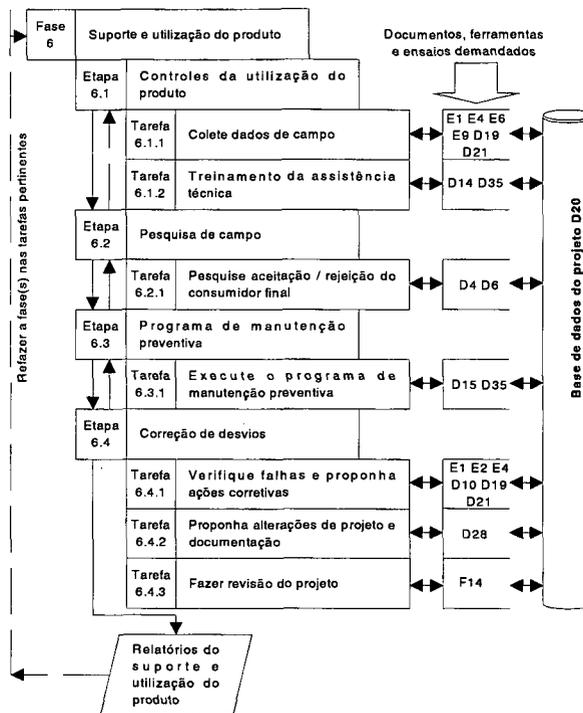


Figura 5-21 – Fase 6 Suporte e utilização do produto – “Metodologia MEGACOM”.

manutenção implementadas, tempos necessários para a manutenção e outras, sejam perdidas na interface entre a assistência técnica e o projeto. Sistemas computacionais precisam ser implementados de forma a rastrear 100% dos produtos que saem da fábrica, pode-se assim, acompanhar todas as etapas que o produto passa até chegar às mãos do consumidor.

A situação ideal é o controle dos parâmetros de falhas dos sistemas mecatrônicos, através de informações que são armazenadas diretamente nas memórias internas dos produtos, sem a necessidade de relatórios e formulários. Essa é a situação ideal, embora que a monitoração de todas as funções do produto (tipo caixa preta de avião), devido aos altos custos demandados com sensores e aumento da complexidade, é uma tarefa inviável para produtos de baixo custo. No entanto, parâmetros básicos tais como horas de uso, podem ser facilmente armazenados com soluções de software.

5.3.10 RETIRADA DO MERCADO

A Figura 5-22 apresenta a última fase da metodologia MEGACOM, que trata da retirada do produto do mercado. O acompanhamento dessa atividade é importante sob o aspecto da confiabilidade, para que a empresa possa suprir o mercado com peças de reposição, durante um determinado período de tempo, bem como preparar

o produto substituto. Durante essa fase de transição é importante a empresa manter o bom nome de confiabilidade dos seus produtos, não deixando o cliente sem o devido amparo. O novo produto, na medida do possível e do nível de inovação introduzida, deve seguir a mesma linha tecnológica com a qual clientes e assistência técnica já estão habituados. Isso garante geração a geração produtos com melhores confiabilidades a menores custos.

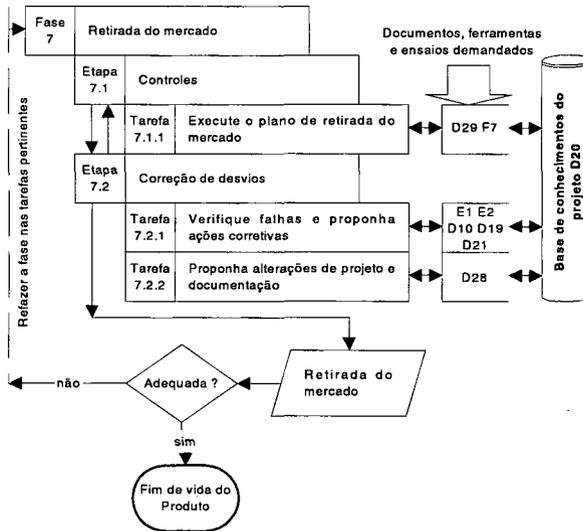


Figura 5-22 – Fase 7 Retirada do mercado – “Metodologia MEGACOM”.

CAPÍTULO 6

ENSAIOS PARA A GARANTIA DA CONFIABILIDADE NO DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS MECATRÔNICOS

Neste capítulo passa-se à fase 6 do trabalho, onde os ensaios que podem auxiliar a confiabilidade durante o desenvolvimento de um produto mecatrônico, são sistematizados.

Como se apresentou no capítulo 5, a metodologia MEGACOM faz referência a vários ensaios (E1 até E9), que podem ser utilizados para melhorar a confiabilidade do produto mecatrônico durante o desenvolvimento. Esse capítulo detalha os ensaios contribuindo para a operacionalização da metodologia, pelo aspecto mais importante, que são os ensaios, pelos quais obtém-se as informações sobre o comportamento do produto mecatrônico que está sendo desenvolvido.

A necessidade de ensaios observada nas empresas e destacada na bibliografia serviu de base para determinação de quais ensaios seriam adequados durante o desenvolvimento de um produto mecatrônico. Alguns casos práticos foram transformados em estudos de caso apresentados nesse capítulo. Deve-se mencionar a grande carência das empresas visitadas no requisito ensaios.

Sendo assim esse capítulo está dividido:

- No item 6.1 que trata sobre medições gerais, usadas em todos os ensaios, pois trata de importantes aspectos a serem considerados, quando da medida de parâmetros. Contém a base metrológica para todos os ensaios. Um procedimento para medições foi elaborado, como forma de ordenar os diversos passos necessários, para medições genéricas;

- O item 6.2 trata de planejamento de experimentos, foi incluído com o objetivo de servir de base a qualquer tipo de ensaio a ser elaborado. A apresentação é feita na forma de um fluxograma contendo as principais etapas no planejamento de um experimento;
- Nos itens 6.3 até 6.11 apresentam-se os principais ensaios, que visam uma melhor confiabilidade durante o desenvolvimento de produtos mecatrônicos. Os principais tipos de ensaios foram divididos em nove tipos, de acordo com as características e objetivos do ensaio.

Os nove tipos de ensaios são detalhados nos seus aspectos diversos, relacionados à confiabilidade e em procedimentos específicos, para elaboração de um ensaio.

6.1 MEDIÇÕES GERAIS

As medições são a base de todos os ensaios. Qualquer ensaio precisa ser feito de forma a otimizar o tempo de ensaio e levar a conclusões confiáveis. Para isto são necessários cuidados metrológicos na hora de elaborar medições, seja qual for o seu propósito.

As medições podem ser realizadas nos laboratórios da empresa, ou encomendados a instituições de pesquisa e desenvolvimento especializadas. As medições mais comuns, tais como: medições dimensionais de formas simples, medições de grandezas físicas simples e medições elétricas / eletrônicas, geralmente, são feitas nas empresas, uma vez que não exigem grandes investimentos e agilizam o processo de desenvolvimento.

6.1.1 CONSIDERAÇÕES IMPORTANTES

Neste subitem descreve-se características importantes de medições, que devem ser levadas em consideração, quando se fazem medições. Cuidados básicos na elaboração de medições devem estar presentes, de forma a otimizar as medições, selecionar amostras e conhecer as limitações dos resultados obtidos.

A) ESTIMAÇÃO

Durante o desenvolvimento de um produto, amostras são extraídas para fornecer

informações sobre as populações de interesse e cálculos estatísticos são utilizados na estimativa dos parâmetros populacionais de interesse. Muitas populações podem ser completamente caracterizadas por poucos parâmetros, tais como, a média e o desvio padrão para populações Normais. O conhecimento desses parâmetros da população possibilita um completo conhecimento a respeito do que se está medindo.

É comum durante o desenvolvimento de produtos estimativas pontuais, na qual o parâmetro da população é estimado por um único número, calculado a partir de uma amostra.

Um bom estimador (boa estimativa do valor medido) pode ser obtido para os principais parâmetros populacionais. Os principais estimadores de parâmetros populacionais estão indicados na Figura 6-1, obtidos a partir de várias medidas e válidos para distribuições Normais.

Parâmetro Populacional	Estimador
Média (μ)	$\hat{\mu} = \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$
Variância (σ^2)	$\hat{\sigma}^2 = S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$
Desvio padrão (σ)	$\hat{\sigma} = S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$
Proporção de elementos que possuem uma característica (p)	$\hat{p} = \bar{p} = \frac{y}{n}$ <i>y = número de elementos da amostra</i> <i>n = tamanho da amostra</i>
Índice de capacidade C_p	$\hat{C}_p = \frac{LSE - LIE}{6\hat{\sigma}}$ <i>LSE = limite superior extremo</i> <i>LIE = limite inferior extremo</i>
Índice de capacidade C_{pk}	$\hat{C}_{pk} = \text{MIN} \left[\frac{LSE - \hat{\mu}}{3\hat{\sigma}}, \frac{\hat{\mu} - LIE}{3\hat{\sigma}} \right]$

Figura 6-1 – Principais estimadores dos parâmetros de uma população Normal [53].

B) INTERVALO DE CONFIANÇA

A deficiência da estimação pontual de parâmetros de projeto reside no fato de desconhecer-se a magnitude do erro, que se está cometendo ao tomar-se o parâmetro “ K ” de interesse, pelo parâmetro estimador “ \hat{K} ”. Suprindo essa deficiência da estimativa pontual, o intervalo de confiança estabelece um intervalo no qual o parâmetro se encontra, com um determinado percentual de confiança.

O número $(1-\alpha)$ é denominado coeficiente de confiança [53] e representa a probabilidade de que “ K ” esteja dentro do intervalo determinado. Em confiabilidade, normalmente, trabalha-se com intervalos de confiança de 90%, ou seja $100(1-\alpha)\% = 90\% \therefore \alpha = 0,1 \therefore P(I \leq K \leq S) = 100(1-\alpha)$.

O cálculo do intervalo de confiança depende da distribuição que se admite para a população. Para medições genéricas a distribuição Normal é a mais utilizada. Para medições de confiabilidade utiliza-se em medições discretas as distribuições de Bernoulli, Binomial, Geométrica, Pascal, Hipergeométrica e Poisson, enquanto que medições contínuas, utilizam as distribuições exponencial, normal, log normal e Weibull (2 e 3 parâmetros).

A Figura 6-2 mostra como obter o intervalo de confiança e o tamanho da amostra para vários parâmetros de uma população Normalmente distribuída.

C) TAMANHO DA AMOSTRA

Antes da construção de um intervalo de confiança, deve ser feito um planejamento adequado do tamanho da amostra (n), ao invés de se empregar um tamanho de amostra escolhido de forma arbitrária. Note que, se o tamanho da amostra for determinado arbitrariamente, podem ocorrer duas situações indesejadas [53]:

- O intervalo de confiança obtido é mais estreito do que o necessário, o que indica que a amostra utilizada foi muito grande, implicando então em desperdício de tempo e dinheiro, para a obtenção de uma precisão maior do que era necessário;
- O intervalo de confiança é muito amplo, impossibilitando a tomada de uma decisão sobre o problema, o que significa que a amostra empregada foi muito pequena. Observe que nesse caso, pode ser mais caro e trabalhoso,

Indicado para cálculo do intervalo de confiança	Intervalo de confiança para nível de confiança de 100(1-α)%	Tamanho da amostra para 100(1-α)% de confiança, para que o erro de estimação seja inferior a E
da média para n > 30	$\bar{x} \pm z_{\alpha/2} \frac{S}{\sqrt{n}}$	$n = \left(\frac{z_{\alpha/2}\sigma}{E}\right)^2$ tendo-se uma estimativa do σ
da média para n ≤ 30	$\bar{x} \pm t_{\alpha/2;n-1} \frac{S}{\sqrt{n}}$	$n = \left(\frac{z_{\alpha/2}\sigma}{E}\right)^2$ população com distribuição normal
do desvio padrão	$\sqrt{\frac{(n-1)s^2}{\chi^2_{\alpha/2;n-1}}} \leq \sigma \leq \sqrt{\frac{(n-1)s^2}{\chi^2_{1-\alpha/2;n-1}}}$	
do índice de capacidade C _p	$\hat{C}_p \sqrt{\frac{\chi^2_{1-\alpha/2;n-1}}{n-1}} \leq C_p \leq \hat{C}_p \sqrt{\frac{\chi^2_{\alpha/2;n-1}}{n-1}}$	
da proporção válido quando np ≥ 5 e n(1-p) ≥ 5	$\bar{p} - z_{\alpha/2} \sqrt{\frac{\bar{p}(1-\bar{p})}{n}} \leq p \leq \bar{p} + z_{\alpha/2} \sqrt{\frac{\bar{p}(1-\bar{p})}{n}}$	$n = \left(\frac{z_{\alpha/2}}{E}\right)^2 p(1-p)$
σ = desvio padrão n = número de amostras p = probabilidade S = variância E = erro máximo provável α = coeficiente de segurança		

Figura 6-2– Cálculo dos intervalos de confiança e número de amostras.

ou até mesmo impossível, aumentar o tamanho da amostra posteriormente.

Na Figura 6-2 são indicadas as fórmulas para cálculo do tamanho das amostras, neste cálculo precisa-se arbitrar o valor de erro máximo permitido E. Esse parâmetro determina qual o erro máximo permitido para um determinado nível de confiança, ou seja, $E = z_{\alpha/2} \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$ com o qual pode-se obter o número de amostras,

$n = \left(\frac{z_{\alpha/2}\sigma}{E}\right)^2$. No caso do desenvolvimento de produtos quase sempre o número de amostras é o número disponível, normalmente insuficiente para intervalos de confiança estreitos.

D) AMOSTRAGEM

No uso da amostragem, ferramenta usada para estimar os parâmetros da população, deve-se tomar cuidados com a extensão para toda a população, de conclusões tiradas a partir de uma amostra.

Os elementos da amostra devem ser independentes, ou seja, não são influenciados pela inclusão (ou rejeição) de outros elementos da amostra e o valor medido em um

elemento, não é influenciado por nenhum outro elemento.

Atenção para esquemas de amostragem que rotineiramente excluem algumas medições, porque elas não são usuais, ou fora dos limites de especificação. Assim como amostragens feitas somente em determinadas situações.

Agregar dados é conveniente, mas os dados brutos contém mais informações a respeito da população. O quanto possível tome os dados brutos e os agregue após um exame preliminar dos dados.

Uma das principais razões para um exame preliminar dos dados é detectar pontos que provavelmente não pertencem àquela população (*outliers*). Por vezes sistemas de análise computacionais, agregando esses valores (*outlier*), podem distorcer gravemente os resultados. Verifique duas situações possíveis para explicar *outliers*: 1) A distribuição assumida é realmente a correta? Caso a suposição sobre a distribuição seja incorreta, os supostos *outliers* podem não ser; 2) Os *outliers* são explicados pela contaminação dos dados, por diversas causas.

Histogramas podem dar uma representação visual dos dados de uma amostragem. Além de mostrar a média e a dispersão dos dados da amostra, o histograma pode ser usado para descartar, ou confirmar suposições sobre as amostras. A mistura de múltiplas populações fica aparente em um histograma, verifique Figura 6-3. Outras ferramentas podem ser encontradas em Montgomery [10].

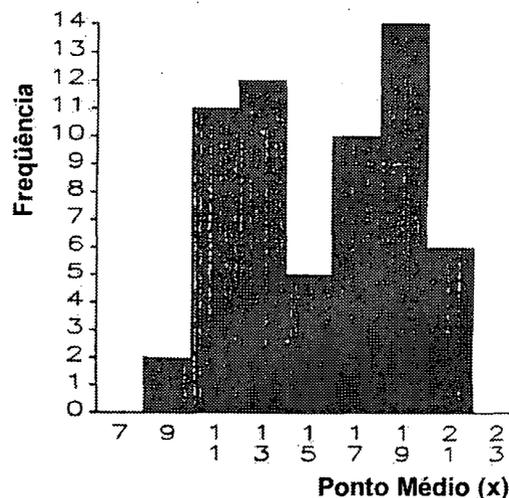


Figura 6-3 - Histograma mostrando duas distribuições diferentes, ou seja há uma mistura de elementos de diferentes distribuições [54].

6.1.2 PLANEJAMENTO DE MEDIÇÕES

Medições de parâmetros em um projeto é um ato comum para a equipe de projeto. No entanto deve-se considerar que, caso aspectos básicos não sejam levados em consideração, as conclusões a respeito dos parâmetros, podem ser totalmente erradas. Assim mesmo parâmetros simples, devem ser estimados a partir de um procedimento claro e seus resultados e conclusões documentados. Um procedimento geral de medições deve ter os passos indicados na Figura 6-5.

A Figura 6-6 mostra os procedimento para o cálculo das incertezas Tipo A, ou melhor o intervalo de confiança, considerando-se distribuição normal ou binomial conforme o caso.

Na execução do passo 10 da Figura 6-5, as principais fontes de incertezas estão relacionadas às variações ambientais que podem alterar significativamente tanto o mensurando como o instrumento de medida. Assim, é uma boa prática (nem sempre possível), manter pelo menos o instrumento de medida a temperatura constante, geralmente 20°C, outros fatores como umidade relativa e pressão atmosférica, também podem influir nos resultados.

A consulta do manual do fabricante ou certificado de calibração do instrumento, fornece dados para o cálculo das incertezas tipo B. A Figura 6-4 apresenta as principais fontes de incertezas em medições e ensaios.

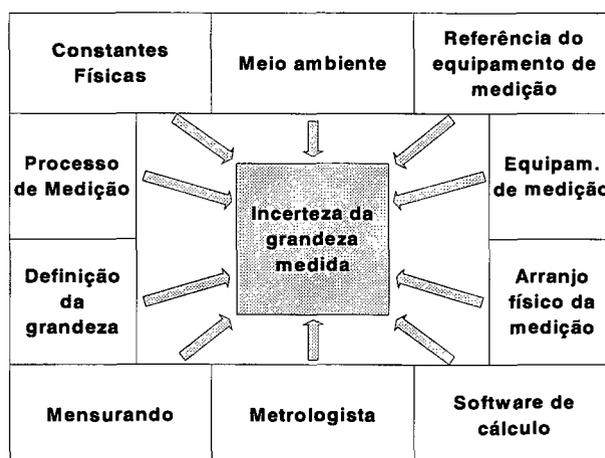


Figura 6-4 – Fontes de incertezas em medições e ensaios [55].

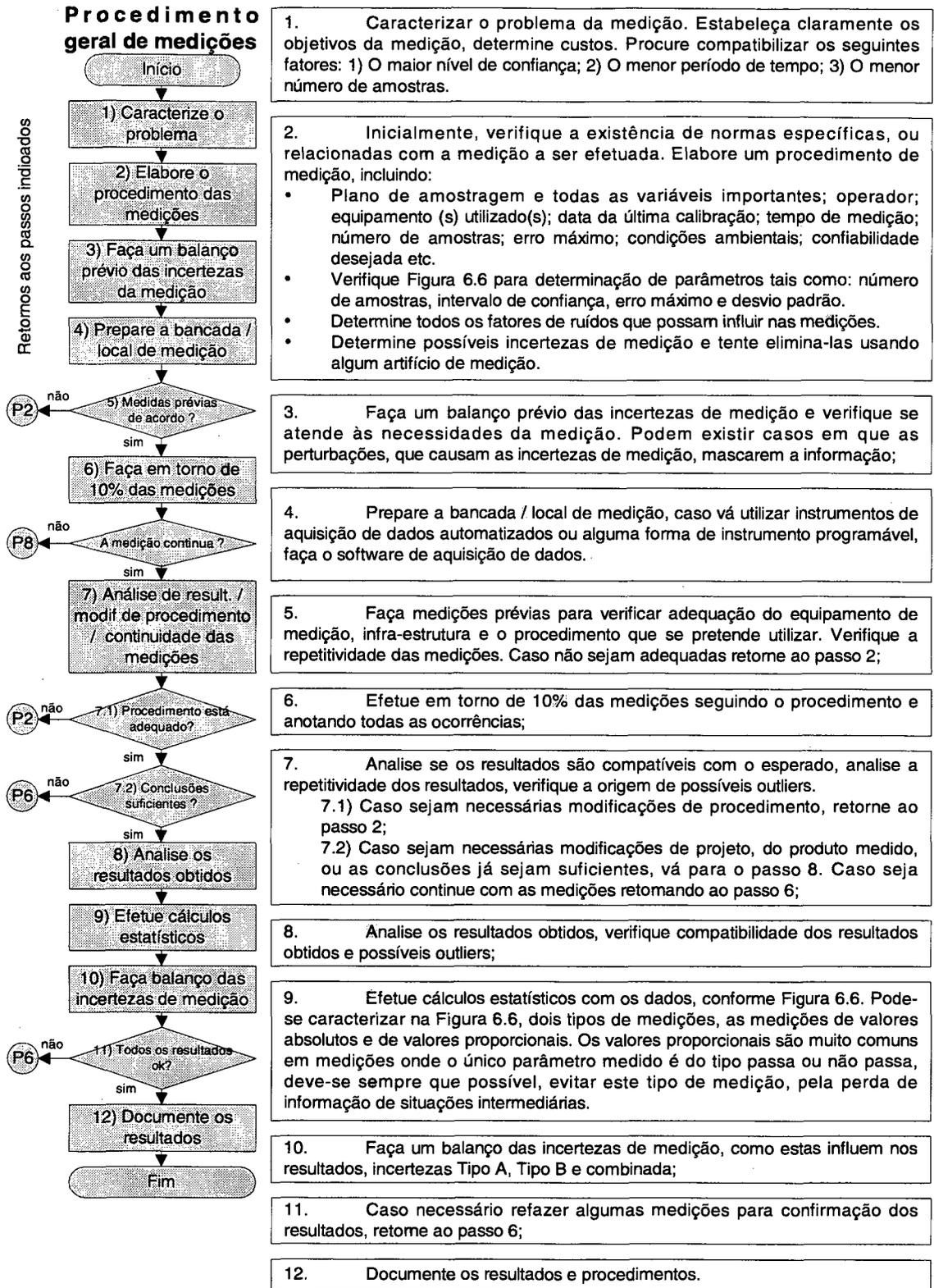


Figura 6-5 - Procedimento geral para medições feitas durante o desenvolvimento de um produto.

Cálculos estatísticos admitindo-se distribuição normal

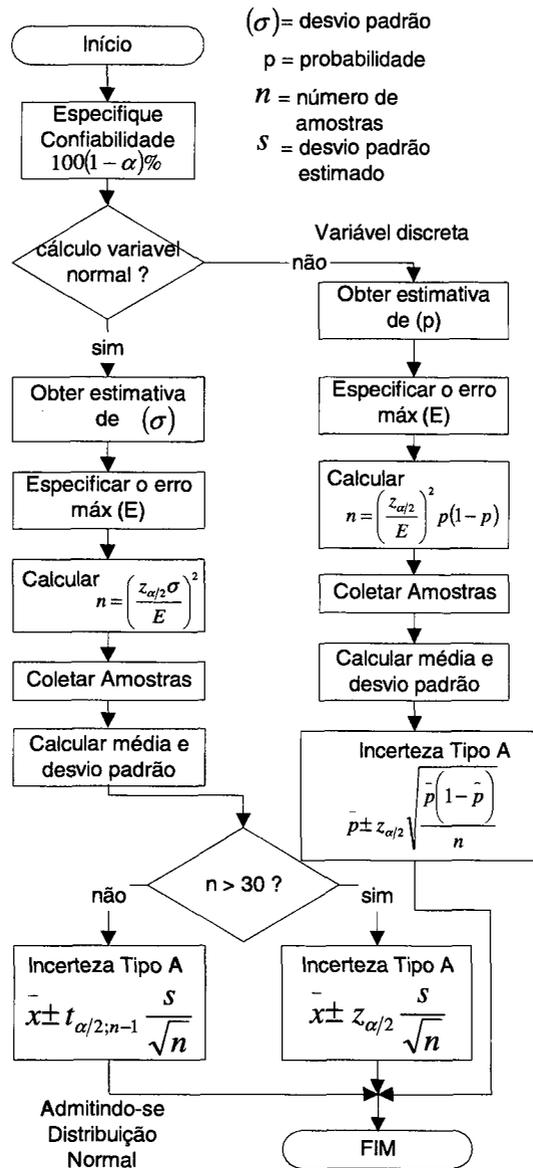
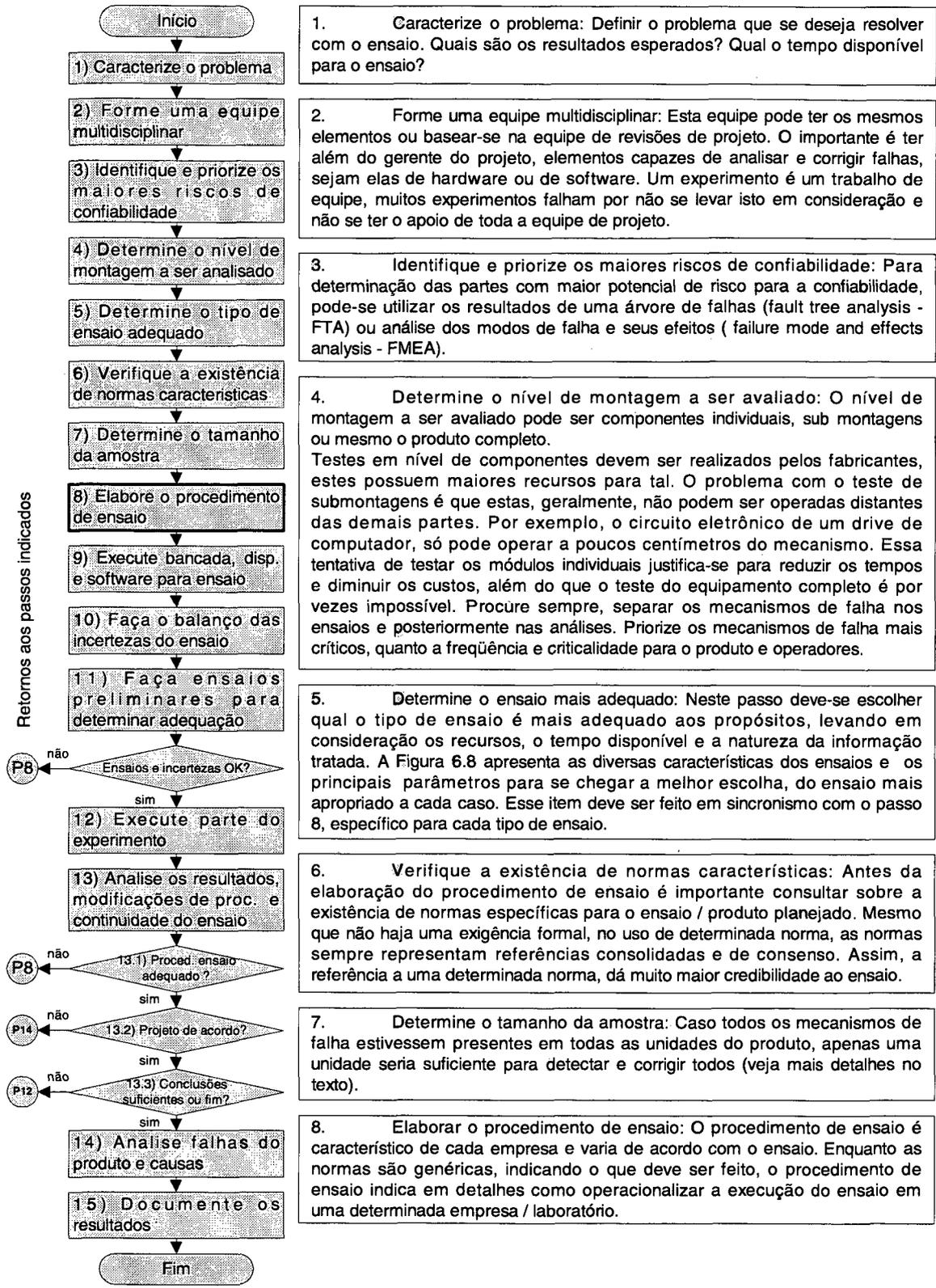


Figura 6-6 – Procedimento para cálculo das incertezas Tipo A e demais variáveis para medições.

6.2 PLANEJAMENTO DE ENSAIOS DE PRODUTOS MECATRÔNICOS

Este item estabelece uma série de passos comuns, no planejamento de um ensaio para produtos mecatrônicos. A Figura 6-7 ilustra através de um fluxograma com o devido detalhamento ao lado, os passos do planejamento de um experimento.

Os passos do planejamento padrão são adequados à maioria dos ensaios, sendo o “procedimento de ensaio” (passo 8), específico para cada tipo de ensaio.



Retornos aos passos indicados

1. **Caracterize o problema:** Definir o problema que se deseja resolver com o ensaio. Quais são os resultados esperados? Qual o tempo disponível para o ensaio?

2. **Forme uma equipe multidisciplinar:** Esta equipe pode ter os mesmos elementos ou basear-se na equipe de revisões de projeto. O importante é ter além do gerente do projeto, elementos capazes de analisar e corrigir falhas, sejam elas de hardware ou de software. Um experimento é um trabalho de equipe, muitos experimentos falham por não se levar isto em consideração e não se ter o apoio de toda a equipe de projeto.

3. **Identifique e priorize os maiores riscos de confiabilidade:** Para determinação das partes com maior potencial de risco para a confiabilidade, pode-se utilizar os resultados de uma árvore de falhas (fault tree analysis - FTA) ou análise dos modos de falha e seus efeitos (failure mode and effects analysis - FMEA).

4. **Determine o nível de montagem a ser avaliado:** O nível de montagem a ser avaliado pode ser componentes individuais, sub montagens ou mesmo o produto completo. Testes em nível de componentes devem ser realizados pelos fabricantes, estes possuem maiores recursos para tal. O problema com o teste de submontagens é que estas, geralmente, não podem ser operadas distantes das demais partes. Por exemplo, o circuito eletrônico de um drive de computador, só pode operar a poucos centímetros do mecanismo. Essa tentativa de testar os módulos individuais justifica-se para reduzir os tempos e diminuir os custos, além do que o teste do equipamento completo é por vezes impossível. Procure sempre, separar os mecanismos de falha nos ensaios e posteriormente nas análises. Priorize os mecanismos de falha mais críticos, quanto a frequência e criticalidade para o produto e operadores.

5. **Determine o ensaio mais adequado:** Neste passo deve-se escolher qual o tipo de ensaio é mais adequado aos propósitos, levando em consideração os recursos, o tempo disponível e a natureza da informação tratada. A Figura 6.8 apresenta as diversas características dos ensaios e os principais parâmetros para se chegar a melhor escolha, do ensaio mais apropriado a cada caso. Esse item deve ser feito em sincronismo com o passo 8, específico para cada tipo de ensaio.

6. **Verifique a existência de normas características:** Antes da elaboração do procedimento de ensaio é importante consultar sobre a existência de normas específicas para o ensaio / produto planejado. Mesmo que não haja uma exigência formal, no uso de determinada norma, as normas sempre representam referências consolidadas e de consenso. Assim, a referência a uma determinada norma, dá muito maior credibilidade ao ensaio.

7. **Determine o tamanho da amostra:** Caso todos os mecanismos de falha estivessem presentes em todas as unidades do produto, apenas uma unidade seria suficiente para detectar e corrigir todos (veja mais detalhes no texto).

8. **Elaborar o procedimento de ensaio:** O procedimento de ensaio é característico de cada empresa e varia de acordo com o ensaio. Enquanto as normas são genéricas, indicando o que deve ser feito, o procedimento de ensaio indica em detalhes como operacionalizar a execução do ensaio em uma determinada empresa / laboratório.

Figura 6-7 – Planejamento geral de ensaios no desenvolvimento de produtos mecatrônicos (continua).

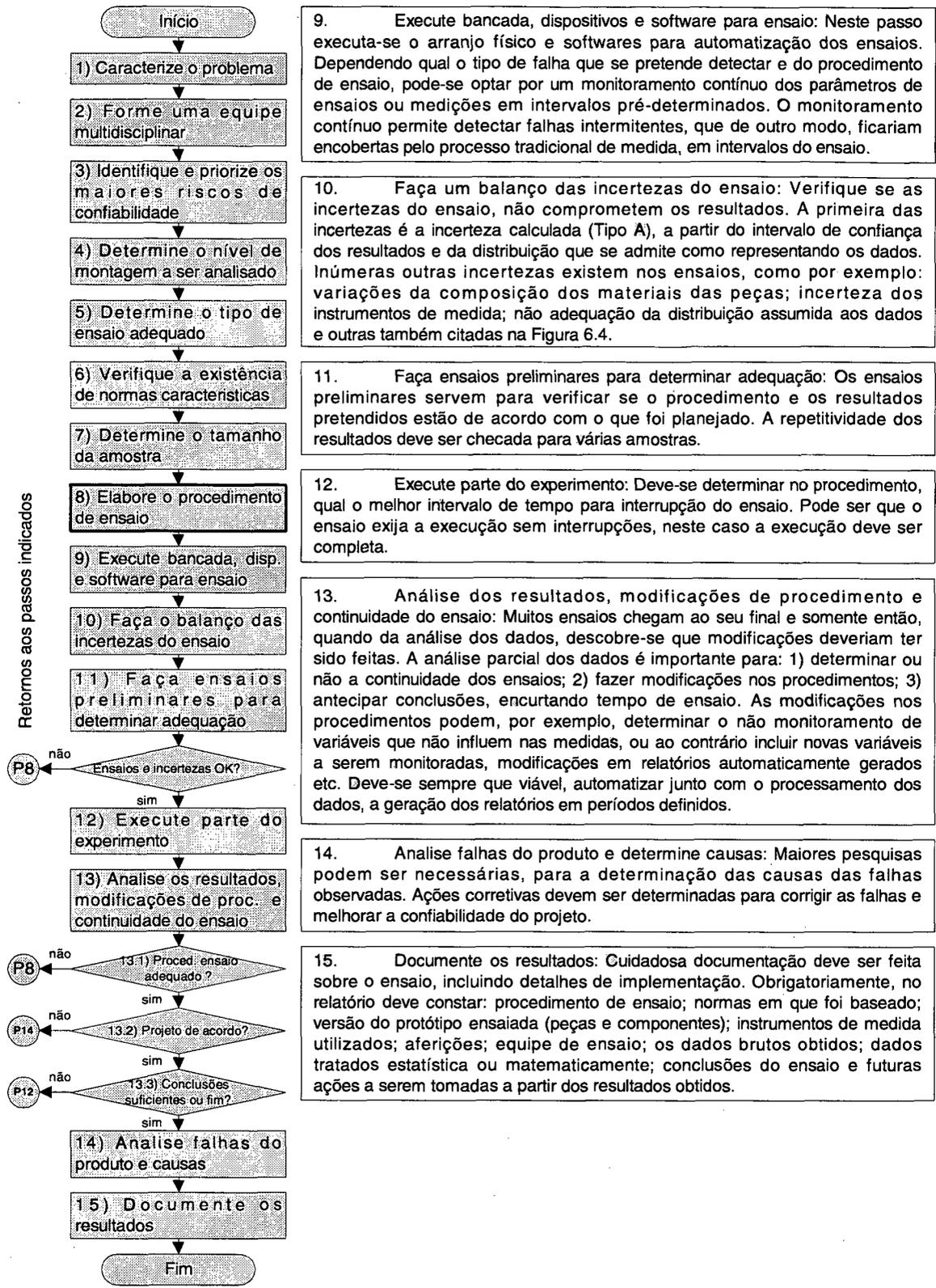


Figura 6-7- Planejamento geral de ensaios no desenvolvimento de produtos mecatrônicos (continuação).

O detalhamento do passo 8 encontra-se nos itens 6.3 até 6.11, para os nove tipos de ensaios descritos. Nem sempre o detalhamento é na forma de uma receita, devido a grande variedade de tipos de ensaios.

Tipo de ensaio	Indicação / definição	Equipamentos necessários	Incertezas do ensaio
1) Ensaio funcionais	1) Verificar correto funcionamento 2) integração da mec. eletr. e soft; 3) Atendimento a normas de aspectos de segurança e outras; 3) Interação de usuário final com o produto; 4) Funcionamento após a produção (run-in); 5) Atendimento a parâmetros de projeto; 6) Funcionamento do produto com os diversos tipos de ruídos não ambientais.	instrumentos de registro tais como osciloscópios, registradores gráficos, filmagem com câmeras especiais, ou sistemas de aquisição de dados	distinguir as diversas situações operacionais e cargas do produto
2) Ensaio de materiais	São ensaios realizados para determinação de propriedades físicas, mecânicas, químicas e a composição dos materiais. Visam determinar a adequação do material às solicitações exigidas pelo prejeito.	microscópio óptico / eletrônico, espectrografo, equip. para ensaios de tração, equip. para determ. de diversas propriedades físicas e mecânicas	variabilidade dos materiais
3) Ensaio para o projeto de parâmetros	O projeto de parâmetros consiste na melhor escolha dos níveis de uma série de variáveis controladas, baseando-se em uma "característica de qualidade" tomada como saída. Pode ser utilizado no projeto do produto e no processo produtivo para otimizar a resposta.	Equipamentos normais de medidas, tensão, corrente, forma de onda, dimensões, força etc.	diferenças dos protótipos, equip de medida, ajuste dos níveis
4) Ensaio acelerados	O propósito dos ensaios acelerados é determinar a performance de uma peça ou produto, usando-se uma variedade de solicitações ambientais, elétricas, ou de regime de operação em nível superior do que os usuais. Consequindo-se assim diminuir os tempos de ensaio.	vibrador, equip. eletro-hidráulicos, câm. de temp e umidade prog, câm. de névoa salina, variador de I ou V elétrica, med de temp., pressão, vácuo, umidade, etc.	estimativa do fator de aceleração, estabilidade ambiental da solicitação
5) Ensaio ambientais	Os ensaios ambientais visam verificar a susceptibilidade do produto a condições ambientais extremas, antecipando assim prováveis situações encontradas em campo. São realizados principalmente no desenvolvimento do produto, fase de projeto detalhado, para indicar a sua adequação ao ambiente operacional e corrigir falhas.	vibrador, equip. eletro-hidráulicos, câm. de temp e umidade prog, câm. de névoa salina, variador de I ou V elétrica, med de temp., pressão, vácuo, umidade, etc.	controle das solicitações ambientais.
6) Ensaio de confiabilidade	São ensaios realizados para determinação, ou confirmação da confiabilidade de um produto. Pode-se classificar inicialmente os ensaios de confiabilidade em: 1) Ensaio de conformidade da confiabilidade - ECC e 2) Ensaio de determinação da confiabilidade - EDC.	equipamentos normais de medidas tensão, corrente, forma de onda, dimensões, força etc. Um sistema de aquisição de dados programável.	distribuição da taxa de falhas atribuída, IC, erros alfa e beta em planos de ensaios
7) Ensaio de manutenção da confiabilidade da produção	Ensaio de manutenção da confiabilidade da produção são feitos para acompanhar qualquer degradação do produto, durante o período em que este for produzido.	equipamentos normais de medidas tensão, corrente, forma de onda, dimensões, força etc. Um sistema de aquisição de dados programável.	erros da distribuição e s o l h i d a , amostragem, erros alfa e beta
8) Ensaio de pré-envelhecimento	São feitos para evitar o efeito já conhecido, da maioria dos produtos sejam eles eletrônicos, eletromecânicos ou mecânicos apresentam, de quantidade desproporcional de falhas no período inicial de seu uso. Ensaia-se o produto até ele atingir a região de maturidade.	câmaras climáticas, instrumentos usuais de medidas	intervalo de confiança da distribuição, erro da distribuição resultante atribuída
9) Ensaio de manutenção	Manutenabilidade é a característica de projeto que determina fácil acesso, precisão, oportunidade e ações econômicas de manutenção. Dado que essa característica é multidimensional, tem numerosas medidas: tempos decorridos, horas de trabalho e taxas, custos de manutenção, frequência e relevantes fatores logísticos de suporte.	instrumentos usuais de medidas de medidas de tempos	simulação das falhas, operadores, erro da distribuição, erros alfa e beta

Figura 6-8 – Quadro resumo dos principais ensaios presentes no desenvolvimento de produtos mecatrônicos.

Os itens 13 e 15 de análise e documentação, também possuem especificidades relativas a cada um dos nove tipos de ensaios. O item 7 do tamanho da amostra, também pode sofrer alterações em função do procedimento de ensaio (passo 8), níveis de confiabilidade e tempos disponíveis.

A Figura 6-8 apresenta um quadro resumo das principais características dos nove tipos de ensaios que podem ser empregados no desenvolvimento de um produto. A figura facilita a escolha do ensaio mais adequado a cada caso.

Produtos em desenvolvimento apresentam altas taxas de falhas, sendo que em torno de 20% dos mecanismos de falha correspondem a 80% das falhas (princípio de Pareto), sendo necessário, portanto, vários ensaios para corrigir todos os mecanismos.

Geralmente, nos ensaios de protótipos, não se dispõe de uma quantidade apropriada de amostras. Uma quantidade pequena de amostras determina, como foi apresentado para medições gerais, um intervalo de confiança amplo e conseqüentemente maior incerteza nos resultados.

6.3 ENSAIOS FUNCIONAIS

Os ensaios funcionais são realizados para:

- Verificar o correto funcionamento e correção das falhas de projeto;
- Integrar a mecânica com eletrônica e o software na fase inicial de projeto detalhado;
- Atender a normas de aspectos de segurança tal como a IEC 3351 e outras;
- Verificar a interação do usuário final com o produto;
- Verificar o funcionamento após a produção (*run-in*);
- Verificar o atendimento a parâmetros de projeto;
- Verificar o funcionamento do produto com os diversos tipos de ruídos não ambientais.

Em determinadas situações a constatação do funcionamento é mais visual, não exigindo qualquer tipo de medida. Nesses casos, pode-se inclusive filmar o funcionamento do equipamento, para análises técnicas mais detalhadas.

Os ensaios funcionais podem contribuir para a melhoria da confiabilidade:

- Na execução de um benchmarking na fase de projeto informacional;
- Na verificação da solicitação das peças na fase de projeto preliminar;
- Na análise de circuitos ocultos (condições operacionais não usuais) na fase de projeto detalhado;

Os ensaios funcionais são realizados pelos integrantes da equipe de projeto, usuários finais também participam de simulações sobre a supervisão da equipe de projeto. São realizados nas condições ambientais a que o produto estará submetido em sua operação normal.

6.3.1 PLANEJAMENTO DE ENSAIOS FUNCIONAIS

Ensaio funcionais nas fases iniciais de desenvolvimento (protótipos), não devem ser muito demorados, nem envolver diversos parâmetros, pois provavelmente o futuro produto ainda passará por muitas modificações. Nas fases iniciais de desenvolvimento o mais importante é verificar a viabilidade de determinadas soluções utilizadas. O procedimento de um ensaio funcional deve incluir:

- características do produto a ser ensaiado, versão do projeto, tipos de soluções utilizadas (versão do software);
- as principais dúvidas quanto ao desempenho do produto;
- as metas do ensaio, quais os objetivos;
- operador (es);
- variáveis importantes de serem monitoradas;
- condições ambientais;
- regime de operação;
- duração do ensaio;
- custos;
- responsáveis pelas análises das falhas etc.

Nos ensaios funcionais deve-se mapear inicialmente as diversas formas possíveis de operação do produto. Por exemplo:

- Diversas seqüências de acionamentos feitas pelo operador (diferentes possibilidades que o operador tem de acionar o sistema);
- Diferentes insumos básicos (por exemplo, diferentes papeis que podem ser usados em uma impressora);

- Diferentes posições de entrada do insumo básico (por exemplo, diferentes posições do papel na bandeja de uma impressora);
- Diferentes funções do produto;
- Diversos caminhos possíveis do software;
- Diversos circuitos ocultos de software e hardware;
- Diversas condições assumidas quando da falta de energia e após o seu retorno;
- Possível susceptibilidade ou interferência eletromagnética;
- Aspectos de segurança do operador do sistema;
- Inviolabilidade, burla em produtos que efetuam transações monetárias ou de segurança;

Cada uma das possíveis formas de operação pode determinar diferentes respostas de saída, elas podem determinar erros, caso sejam consideradas indistintamente. Como normalmente a preocupação é com o funcionamento, os principais cuidados metrológicos estão relacionados a incertezas tipo A, descritas em “medições gerais” e no cuidado de separar as diferentes formas de operação do produto.

6.4 ENSAIOS DE MATERIAIS

São ensaios realizados para determinação de propriedades físicas, mecânicas, químicas e a composição dos materiais. Visam determinar a adequação do material às solicitações exigidas pelo projeto.

Os ensaios de materiais podem contribuir para a melhoria da confiabilidade:

- No benchmarking no projeto informacional;
- Na avaliação de alternativas no projeto preliminar;
- Na análise de falhas no projeto preliminar e detalhado;
- Na avaliação de peças de fornecedores na produção.

Devem ser conduzidos pela equipe de projeto, ou por fornecedores interessados em atender à demanda do novo produto.

Laboratórios especiais são necessários para alguns ensaios de composição química de determinadas ligas ou espectrometria.

Os materiais podem ser classificados de acordo com o tipo, conforme indica a Figura 6-9. Todos os materiais indicados na Figura 6-9, podem ser encontrados em

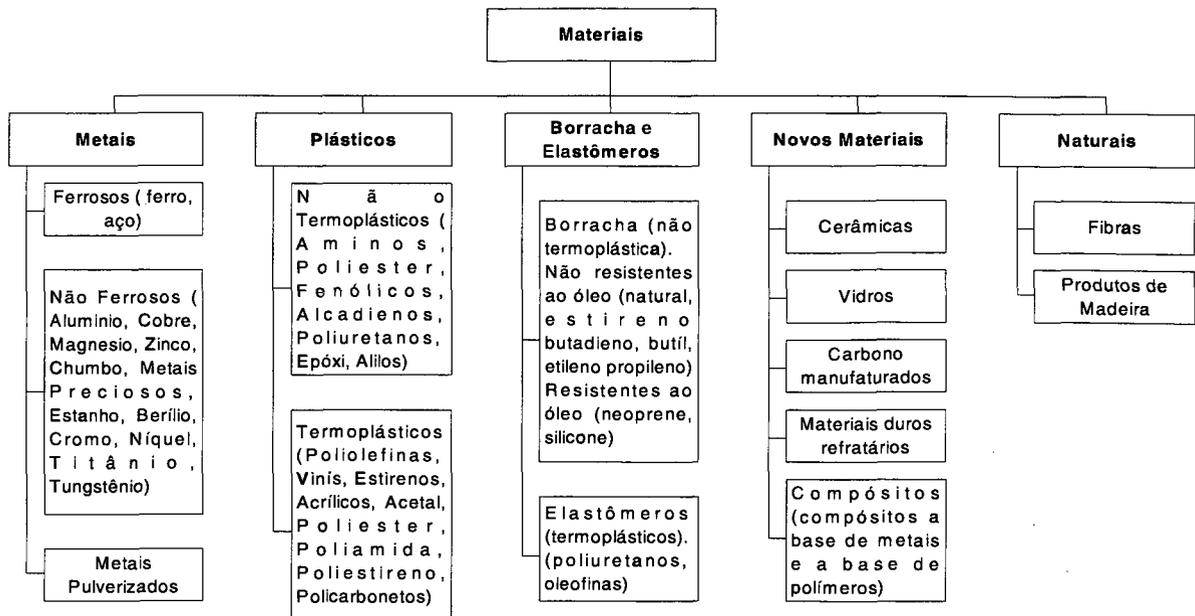


Figura 6-9– Classificação dos materiais de acordo com o tipo (baseado em [31]).

produtos mecatrônicos, com tendência a aumentar as partes plásticas em produtos de grande consumo. No projeto de produtos mecatrônicos, necessita-se um bom conhecimento de materiais disponíveis, de forma a possibilitar a melhor escolha, considerando-se vários aspectos. Os principais fatores na escolha dos materiais que compõem o produto são: custo, confiabilidade, estética, facilidade de fabricação das peças, facilidade de montagem, necessidades de ferramentas / máquinas especiais, compatibilidade ambiental e outras.

Há dois tipos de propriedades nos materiais (exceto as químicas menos utilizadas para o caso), as mecânicas e as físicas. As principais propriedades mecânicas e físicas, mais diretamente relacionadas com a confiabilidade, estão indicadas na Figura 6-10 [31].

As propriedades físicas são aspectos dos materiais que não são facilmente alterados. As propriedades físicas permanecem inalteradas, enquanto as mecânicas são alteradas por tratamentos térmicos.

As propriedades físicas e mecânicas determinam o melhor material para cada aplicação, por exemplo, para produtos expostos a ambientes corrosivos, deve-se ter preocupações com a facilidade de corrosão do material ou ainda com a pintura do material. A incompatibilidade do material com a aplicação pode levar a falhas prematuras do produto.

PROPRIEDADES MECÂNICAS	Definição
Dureza	é a propriedade do material suportar a penetração ou ser arranhado por outro material;
Fragilidade	é o oposto de maleabilidade o vidro é um bom exemplo de material frágil;
Maleabilidade	é a propriedade do material suportar uma deformação sem se romper;
Compressão	é uma medida do quanto um material se deforma sobre uma carga compressiva, antes da ruptura;
Capacidade de dobra	é caracterizada pelas fibras externas serem submetidas à tensão e as fibras internas serem submetidas à compressão;
Resistência a torção	é a aplicação de um torque de forma a causar um giro sobre o seu eixo longitudinal;
Resistência ao cisalhamento	corresponde à máxima carga que um material pode suportar sem se romper, quando submetido a uma força de cisalhamento;
Solicitação de tração ou compressão	causam mudanças no material. Metais exibem comportamento elástico até uma determinada solicitação, após a qual o comportamento passa a ser plástico e as deformações permanentes. Medidas como: 1) resistência à solicitação máxima corresponde à máxima solicitação que o material pode suportar antes da fratura, 2) resistência de escoamento é a máxima solicitação na qual o material não apresenta deformações permanentes, 3) percentagem de alongamento é o aumento do comprimento em relação ao comprimento original;
PROPRIEDADES FÍSICAS	Definição
Condutividade elétrica	facilidade com que conduz a corrente elétrica;
Condutividade térmica	facilidade de transmitir o fluxo de calor através do material;
Expansão térmica	expressa em $1/^\circ\text{C}$. Geralmente, o coeficiente de expansão térmica é inversamente proporcional ao ponto de fusão do material, ou seja material com altos pontos de fusão tem menores expansões;
Resistência a corrosão	habilidade de resistir a deterioração da superfície causada por oxigênio, químicos e outros agentes. A degradação em plásticos pode ser causada por luz ultra violeta, umidade e outros fatores.

Figura 6-10 – Principais propriedades mecânicas e físicas dos materiais.

6.4.1 POLÍMEROS MOLDADOS

As principais propriedades mecânicas e físicas dos polímeros moldados, materiais cada vez mais usados em produtos mecatrônicos para reduzir custos, são apresentadas na Figura 6-11. Todas as propriedades físicas são importantes sob o ponto de vista da confiabilidade, destacando-se a ação da radiação ultravioleta sobre materiais plásticos, que pode além de descolorir o material plástico, enfraquece-lo e levá-lo á ruptura. Para prevenir falhas, existem ensaios de resistência à radiação ultravioleta normalizados. Destaca-se também a propriedade de resistência a impacto, que deve receber atenção especial em produtos mecatrônicos sujeitos a impactos freqüentes no transporte e uso.

Ensaios de tensão para termoplásticos rígidos são descritos pelas normas ASTM D 638 e ISO 527 e para plásticos macios e materiais elastômeros pela norma ASTM D 412.

PROPRIEDADES MECÂNICAS DE POLÍMEROS MOLDADOS	
PROPRIEDADE	DEFINIÇÃO
Viscoelasticidade	Plásticos têm uma natureza dual, apresentando propriedades de um líquido viscoso e de mola como elastômeros. Com pequenas cargas e deflexões à temperatura ambiente, os plásticos respondem como molas, retornando à sua forma original após a remoção da carga. Muitas resinas apresentam um comportamento viscoso sobre cargas grandes aplicadas por tempos longos. O comportamento viscoso típico, mostra um aumento da deformação com o tempo, quando uma solitação constante é aplicada;
Deformação Residual	Uma das conseqüências da viscosidade dos plásticos é a deformação residual (creep), onde após um determinado tempo um material submetido a uma força constante apresenta um aumento de deformação sem o aumento da força aplicada.
Relaxamento da Solitação	Outro fenômeno da viscoelasticidade é a diminuição da força para uma mesma deformação, após decorrido um tempo de aplicação da força .
Propriedades de Flexibilidade	Relacionam a habilidade dos plásticos de serem dobrados ou resistirem. Na norma ASTM D 790 e ISO 178 uma barra do material sob teste, é colocada entre dois suportes e submetida a uma força no meio, a uma taxa constante de 2mm/mm para materiais reforçados a base de fibra de vidro e 20mm/mm para plásticos ocios.
Resistência a compressão	O oposto da resistência à tração onde uma amostra do material é medida quanto a resistência à compressão;
Resistência a impacto	A habilidade de absorver e dissipar impactos varia com a forma, espessura e temperatura. Os ensaios mais comuns são ASTM D 1822 ou ISO 8256; os ensaios de impacto de Izod, descritos na ASTM D 256, D 4812 ou ISO 180; e os ensaios de impacto de Charpy, descritos na ISO 179. Verifique figura no texto que ilustra os três tipos de ensaios de impacto.
Dureza	Os ensaios mais comuns são de Rockwell descritos na ASTM D 785 ou ISO 2039-2, e teste de dureza segundo a ASTM 2240 ou ISO 868 pontalete A para materiais macios e pontalete D para materiais duros. Nesses ensaios uma esfera é forçada contra a superfície do material, sendo a profundidade de penetração na superfície medida e usada para propósitos de comparação.
PROPRIEDADES FÍSICAS DE POLÍMEROS MOLDADOS	
Comportamento Térmico	<ol style="list-style-type: none"> 1. Temperatura de Deflexão sob Carga: Determina a temperatura de deflexão do material quando submetido a uma carga, sob determinada temperatura. A norma ASTM D648 descreve o teste de DTUL (deflection temperature under load). 2. Arqueamento com a temperatura. É um fator importante para peças que serão pintadas e expostas a altas temperaturas. A ASTM D 3769 descreve o ensaio, que é feito comparando-se o arqueamento de diferentes amostras submetidas à mesma temperatura em diferentes tempos.
Resistência a Arcos Voltaicos	Mede o tempo que uma amostra plástica plana irá resistir à formação de um caminho condutivo, enquanto submetida a uma tensão de alta voltagem. Aquecimento, carbonização, incandescência ou ruptura da superfície do material, determinam o ponto de falha. Nos testes padrões da UL 746 A e ASTM D 495, eletrodos tem suas tensões aumentadas até ocasionar a falha do material.
Propagação de Chamas	Com exceção de poucas resinas, a maioria dos plásticos requerem aditivos para alcançar altas taxas de resistência a chama. Por causa desses aditivos, pode-se aumentar os custos dos materiais e causar problemas de moldagem. As normas ASTM F 84 e UL 746 C, estabelecem tempos mínimos de não propagação de chamas, para a classificação dos materiais.
Absorção de Água	Muitas resinas são higroscópicas, ao longo do tempo elas absorvem água. Muita umidade na resina termo plástica durante a moldagem, pode degradar o plástico e diminuir a sua performance mecânica. Quando se projeta peças para prolongadas exposições à água ou alta umidade, deve-se verificar dados de degradação higroscópica.
Efeitos Ambientais e Radiação UV	Os efeitos do ambiente externo, particularmente, radiação UV na aparência e propriedades, podem variar simplesmente de uma mudança de cor, até tomar o material quebradiço. Após alguns anos de exposição ao sol, algumas resinas apresentam redução de resistência ao impacto, diminuição da performance mecânica e mudanças na aparência.
Exposição a elementos químicos	Os efeitos podem variar de mudanças mecânicas mínimas até falhas catastróficas. O grau do ataque químico depende de um número de fatores tais como: o tipo de resina, a química em contato, concentração, temperatura, tempo de exposição e nível de solitação na moldagem.

Figura 6-11 – Principais propriedades mecânicas e físicas de polímeros moldados.

Outros fatores alteram as propriedades dos materiais plásticos. Variáveis do processo como velocidade de injeção, temperatura do molde, temperatura do material e pressão sobre o molde, determinam as propriedades de resistência da

peça. A peça apresentará maior resistência no sentido das linhas de injeção, do que no sentido transversal a estas. Deve-se tomar cuidados para uma boa circulação do material no interior do molde, evitando-se pontos falhos, que podem ser causados, quando do encontro de duas linhas de injeção no interior do molde. Essas linhas podem, não se unirem devidamente, ocasionando falhas. O esfriamento do molde deve ser uniforme, assim como o seu preenchimento, evitando-se deformações e áreas de elevada sollicitação na peça.

6.4.2 LIGAS METÁLICAS

Os três principais tipos de ensaios, específicos para ligas metálicas, são [56]:

- a) **Ensaios mecânicos:** Os ensaios mecânicos visam determinar valores numéricos que caracterizam as propriedades mecânicas do material. Os resultados obtidos representam as propriedades mecânicas do material, do qual a peça é feita e não propriamente as da peça em si, como um todo. Os ensaios mais comuns são os de tração, dobramento, dureza, resistência ao choque, flexão, torção, desgaste, pressão interna, fadiga e compressão (esmagamento ou achatamento).
- b) **Análise química:** A análise química determina a composição do material. Para os aços comuns determinam-se as percentagens de carbono, silício, manganês, fósforo e enxofre e para ferros fundidos além destas, a do carbono no estado de grafita. Com o auxílio da espectrografia pode-se fazer análises mais rápidas e simultâneas de numerosos elementos, detectando qualquer metal estranho que entre na composição do material examinado, mesmo que seu teor seja relativamente pequeno.
- c) **Exame metalográfico:** O exame metalográfico analisa o metal sob o ponto de vista de sua estrutura, procurando relaciona-la às propriedades físicas, composição, processo de fabricação, etc., de modo a poder esclarecer, ou prever seu comportamento numa determinada aplicação. O exame pode ser feito à vista desarmada (exame macrográfico, ou macrografia), ou com o auxílio de um microscópio (exame micrográfico ou micrografia). Esses exames são feitos em secções do material, polidas e atacadas com reativos adequados. Pela macrografia obtêm-se informações de caráter geral, um aspecto de conjunto sobre a homogeneidade do material da peça, a

distribuição, natureza e quantidade de certas impurezas, processos de fabricação, etc. Pela micrografia pode-se observar a granulação do material, a natureza, quantidade, distribuição e forma dos diversos constituintes, certas inclusões, etc., que em seu conjunto conduzem a uma série de conclusões interessantes e de utilidade prática.

6.4.3 PLANEJAMENTO DE ENSAIOS DE MATERIAIS

Dispositivos especiais podem ser necessários dependendo do ensaio. Normas, em geral, estão disponíveis para a maioria dos ensaios de materiais.

A principal fonte de incerteza dos ensaios de materiais está relacionada à variabilidade do material. Deve-se assim fazer um detalhado plano de amostragem procurando mapear todas as fontes de variações existentes no processo, tais como: 1) Diferentes máquinas que produzem as peças; 2) Diferentes operadores; 3) Diferentes turnos; 4) Diferentes fornecedores; e outros. A verificação da repetitividade dos resultados deve ser considerada.

Como a maioria dos ensaios de materiais são comparativos, deve-se considerar portanto a incerteza dos padrões utilizados.

6.5 ENSAIOS PARA O PROJETO DE PARÂMETROS

Na modelagem do projeto de parâmetros têm-se quatro fatores: Fator de sinal (estático ou dinâmico – entrada do sistema), Fatores de ruído (variáveis não controladas), Fatores de controle (variáveis sobre as quais tem-se controle e pode-se fazer ajustes) e Característica de qualidade (saída do sistema, parâmetro no qual se baseia a análise para ajuste dos fatores de controle – pode ser estática ou dinâmica). Veja Figura 6-12 lado direito.

O projeto de parâmetros consiste na melhor escolha dos níveis de uma série de variáveis controladas (fatores de controle), baseando-se em uma saída característica denominada de característica de qualidade ¹ (saída do processo). Pode ser utilizado no projeto do produto e do processo produtivo.

¹ Característica de qualidade: Saída selecionada do sistema, baseada na qual são feitas as alterações das variáveis controladas.

O projeto de parâmetros difere do método de tentativa e erro, por otimizar a sistemática da melhor escolha dos níveis ² das variáveis de controle e com menor número de ensaios chegar à resposta desejada.

O projeto de parâmetros pode trazer os seguintes benefícios ao produto ou processo:

- Melhorar o desempenho;
- Reduzir os custos de produção;
- Diminuir o tempo de desenvolvimento;
- Flexibilizar tolerâncias;
- Selecionar os materiais mais baratos;
- Controlar os fatores críticos;
- Reduzir significativamente os tempos de ensaio;
- Melhorar a confiabilidade.

O planejamento de experimentos para a otimização de parâmetros é feito pela equipe de projeto, pois somente ela está capacitada a decidir quais fatores devem participar do experimento. Sendo assim, um treinamento da equipe de projeto na aplicação das técnicas é necessário. Como na maioria das vezes não requer equipamentos especiais, pode ser feito na própria empresa o que facilita a execução.

O projeto de parâmetros pode ser aplicado em diversas fases do desenvolvimento do produto, com destaque para as fases de projeto preliminar, projeto detalhado, preparo da produção e produção.

Muitas vezes é difícil relacionar diretamente o experimento que está sendo planejado com a confiabilidade e muitas vezes, a confiabilidade não necessariamente melhora quando uma resposta é ajustada.

Phadke [22] apresenta um caso onde a confiabilidade das ferramentas de um torno mecânico foi estudada. A confiabilidade foi definida, com critérios tais como, o tipo de cavaco gerado e eventual quebra das ferramentas. A partir da variação de fatores tais como, velocidade de rotação, tipos de ferramenta, avanço etc, a confiabilidade das ferramentas foi determinada. Nesse caso, a relação dos fatores de controle com

² Níveis das variáveis de controle: Diversas possibilidades de ajuste das variáveis controladas.

a confiabilidade foi diretamente estabelecida.

Em outros casos, essa relação não é direta, pode-se ter uma melhora na eficiência do produto e conseqüentemente esta melhora da eficiência, leve a uma maior confiabilidade. Um dos limitantes principais de medir-se diretamente a confiabilidade, são os tempos de ensaios quase sempre longos. A utilização de algum fator de aceleração em conjunto com o projeto de parâmetros, encurta os tempos de ensaios e possibilita medir diretamente parâmetros relacionados com a confiabilidade.

Deve-se sempre analisar o comportamento da confiabilidade quando da otimização de parâmetros. Verificar se a resposta medida (característica de qualidade) permite concluir que, a confiabilidade também ira melhorar, após o projeto de parâmetros.

6.5.1 TIPOS DE PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS (DOE)

No projeto de parâmetros utiliza-se o planejamento dos experimentos (DOE – *design of experiments* ou delineamento de experimentos como alguns autores preferem). Existem basicamente dois tipos de (DOE – *design of experiments*) planejamento de experimentos para o projeto de parâmetros: planejamento de experimentos utilizando-se técnicas de Taguchi e planejamento de experimentos utilizando-se DOE clássico (Fisher). Pode-se ainda subdividir o planejamento de experimentos, segundo Taguchi, em planejamento de experimentos para parâmetros relacionados a tolerâncias e parâmetros não relacionados a tolerâncias. A Figura 6-12 ilustra as classificações dos métodos.

Maiores informações sobre Taguchi aplicado a parâmetros de tolerâncias consulte Creveling [35] ou [24].

A distinção feita por alguns autores, que utilizam Taguchi, entre parâmetros relacionados ou não a tolerâncias, deve-se ao fato que normalmente, há um acréscimo dos custos quando as tolerâncias são diminuídas.

Recomenda-se que se faça o ajuste dos parâmetros usuais de projeto, tais como regulagens, escolhas de materiais, parâmetros de software e outros, antes de partir para a otimização (diminuir ou aumentar) as tolerâncias [35]. Isso se deve ao fato que muitas vezes, só o ajuste dos parâmetros de controle normais, são suficientes para estabilizar a resposta do sistema, não necessitando, portanto, gastos adicionais com a diminuição das tolerâncias dos parâmetros.

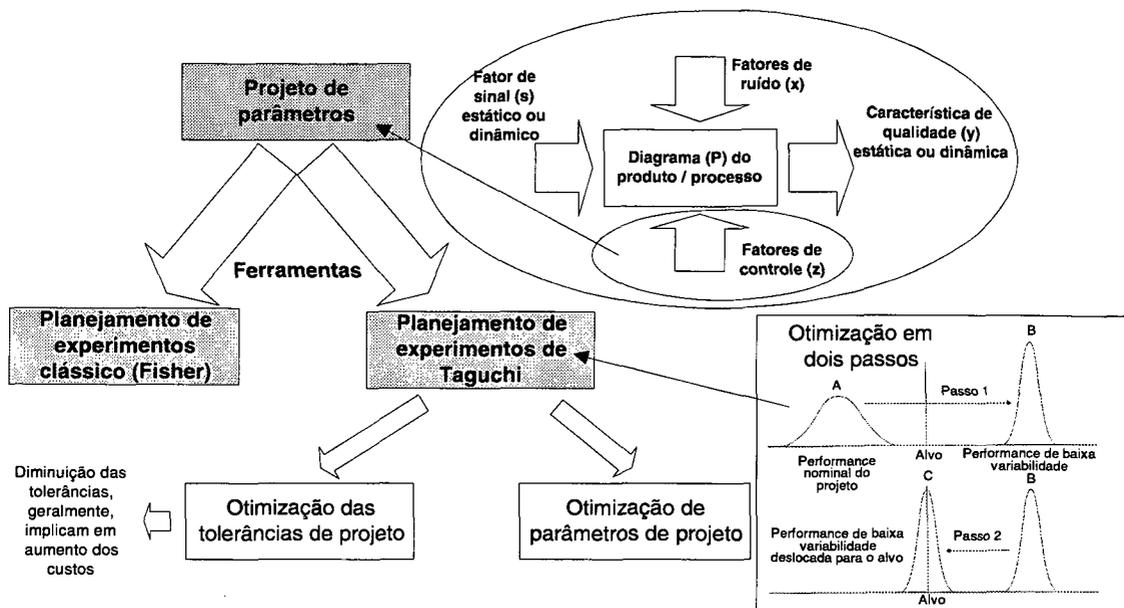


Figura 6-12 – Classificação das formas de projeto de parâmetros e principais sistematizações, Taguchi e clássica (Fisher).

Outra diretriz da metodologia de Taguchi é o ajuste do sistema em dois passos, veja Figura 6-12. No primeiro passo, o objetivo maior é a redução da variabilidade da característica de qualidade, sem preocupações se a resposta está no seu valor nominal. No segundo passo, o objetivo é colocar a resposta do sistema no seu valor nominal, atuando sobre os parâmetros que comprovadamente têm pouca influência na variabilidade, mas grande influência no deslocamento do valor nominal.

No método clássico de projeto de parâmetros, não há distinção entre os fatores de controle relacionados e não a tolerâncias. Existem várias estratégias de DOE clássicas, incluindo fatorial completo, fatorial fracionado, Plackett-Burman e Box-Burman.

A experimentação fatorial fracionada é muito mais racional, já que diminui grandemente a quantidade de ensaios, o tempo despendido e os custos envolvidos. Por vezes a execução do fatorial completo é totalmente inviável de ser executada, seja pelos limites de tempos impostos, ou pelos custos envolvidos. A simplificação, normalmente, dá-se ao preço da redução do estudo das interações [57]. O chamado método clássico de DOE é composto, principalmente, pelos ensaios fatoriais.

6.5.2 PLANEJAMENTO DE ENSAIOS DE PROJETO DE PARÂMETROS

Apresenta-se neste item os diferentes procedimentos de projeto de parâmetros, quando se segue a metodologia de Taguchi e a metodologia clássica.

A) PROJETO DE PARÂMETROS SEGUNDO TAGUCHI

A Figura 6-13 mostra os passos que devem constar de um procedimento de ensaio segundo Taguchi, ao lado maiores explicações para a execução dos mesmos.

B) PROJETO DE PARÂMETROS SEGUNDO A EXPERIMENTAÇÃO CLÁSSICA

Deve conter os seguintes passos conforme mostra a Figura 6-14. Pode-se observar que basicamente os passos são os mesmo da metodologia de Taguchi.

Deve-se além disto, preocupar-se com possíveis interações entre os fatores. À medida que se caminha do fatorial completo para fatoriais fracionados, diminui-se o

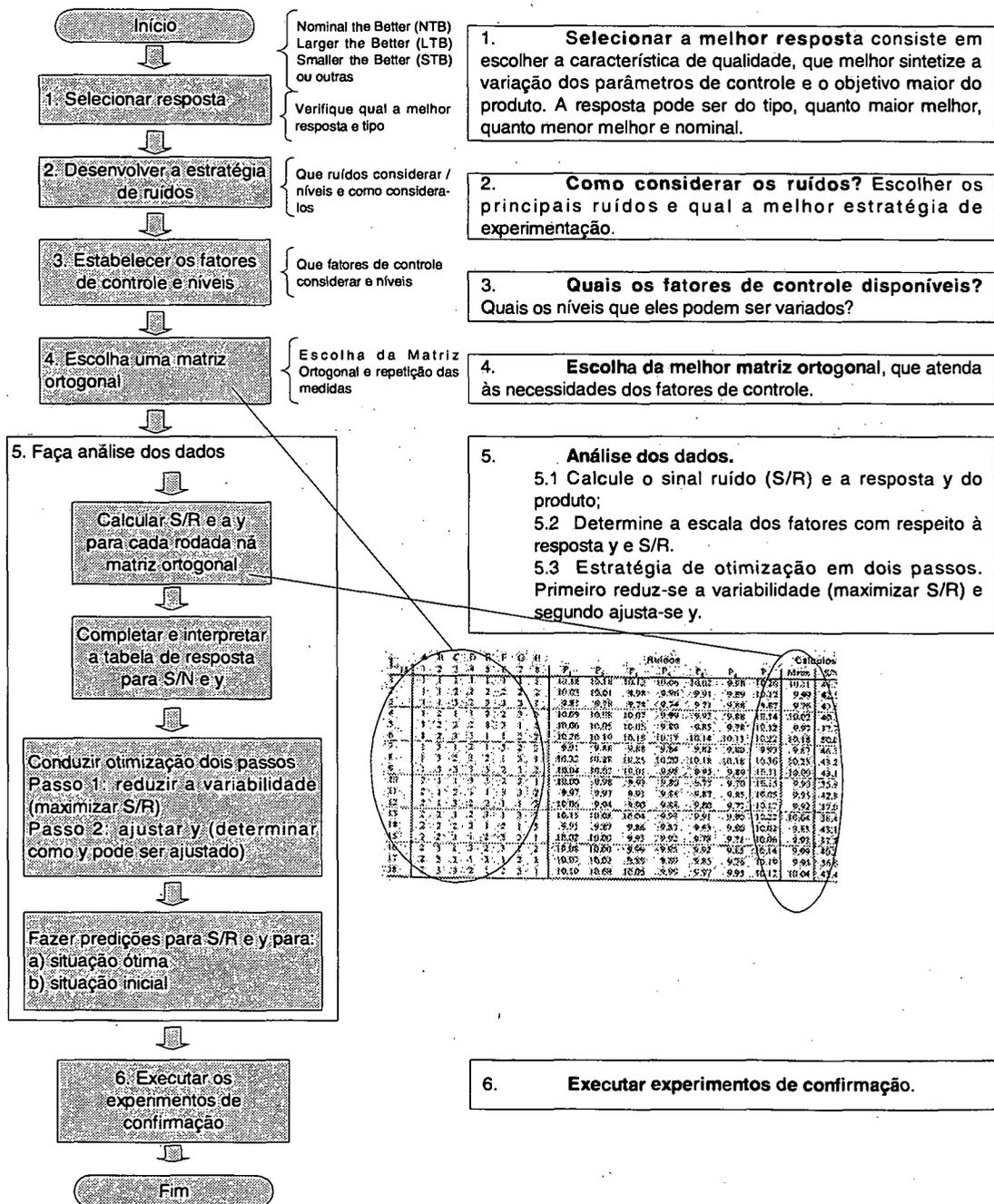


Figura 6-13 – Passos para execução de experimentação por Taguchi (vide [41]).

tamanho dos ensaios, perdendo-se informação sobre as interações, no caso extremo fica-se somente com os fatores principais.

Existem vários outros métodos clássicos para otimização de parâmetros, o mais preciso é o método de análise da superfície. Maiores informações podem ser obtidas em Montgomery [44]. Diversos softwares facilitam a análise dos dados, através de gráficos que ilustram a resposta do sistema, em função dos parâmetros de controle.

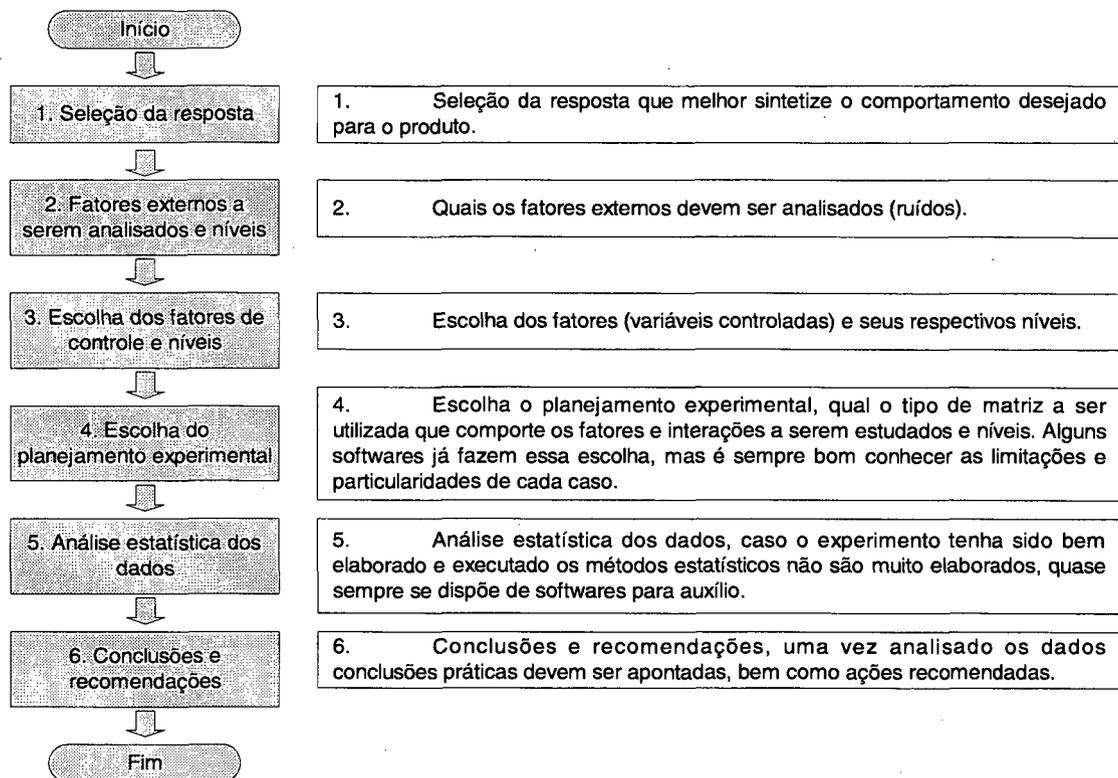


Figura 6-14 – Passos para execução de experimentos utilizando DOE clássico.

6.6 ENSAIOS ACELERADOS

O propósito dos ensaios acelerados é determinar o desempenho de uma peça ou produto, usando-se uma variedade de solicitações ambientais ou elétricas, em nível superior do que os usuais. Conseguindo-se assim diminuir os tempos de ensaio.

Ensaio acelerados durante o desenvolvimento de um produto têm a intenção de causar falhas, quando isto for feito em conjunção com análise de falhas e ações corretivas, a confiabilidade do produto pode ser melhorada.

Esse tipo de ensaio pode identificar falhas de projeto e manufatura. Deve-se, no entanto cuidar com solicitações intensas que possam danificar o produto, precipitando falhas que não ocorrem no uso normal.

Ensaios acelerados são definidos por uma ou mais solicitações, tais como: temperatura, vibração, umidade, tensão, etc.

Os ensaios acelerados não são apropriados para detectar erros de firmware e software, embora que estes possam se manifestar durante um ensaio acelerado.

Existem dois tipos de ensaios acelerados, os ensaios em que se mantém uma solicitação constante e ensaios em degraus. Os ensaios em degraus começam próximos ao limite superior de operação normal do produto, após um intervalo, a solicitação é aumentada até o próximo degrau. O procedimento em degraus termina quando todas as unidades falharem, ou o número de degraus planejados forem executados.

Os equipamentos para execução dos ensaios variam de acordo com a solicitação. Os principais são: vibradores, equipamentos eletro-hidráulicos, câmaras de temperatura e umidade programada, câmara de névoa salina ou similares, variadores de corrente ou tensão elétrica, temporizadores, seqüenciadores, limitadores, pressóstatos, vacuômetro, medidores de temperatura, pressão, vácuo, umidade, etc.

As conseqüências econômicas da execução de ensaios acelerados devem ser analisadas. Por exemplo, o número de unidades em teste dobra, pelo menos. Os recursos para os ensaios são altos. A pressão por reduzir os tempos de ensaios obriga a aumentar o número de unidades em teste, normalmente, não disponíveis em fase de desenvolvimento. Por último a filosofia de forçar falhas através de ensaios acelerados, analisar e corrigir suas causas, irá aumentar a confiabilidade grandemente, sem contudo, conhecer-se o fator de aceleração.

6.6.1 PLANEJAMENTO DE ENSAIOS ACELERADOS

Um problema dos ensaios acelerados, é que cada parte do sistema responde diferentemente à solicitação aplicada, assim não se tem um único fator de aceleração. Cada componente tem muitos mecanismos de falhas diferentes e cada mecanismo responde de forma diferente à solicitação. Dessa forma a correlação através de um único fator de aceleração com a operação normal, para determinar-se a percentagem de falhas, por exemplo, pode ser perigosa.

Deve-se observar que caso o procedimento preveja que o produto não esteja operando, quando do ensaio, falhas operacionais não serão detectadas. Inclui-se

entre estas, falhas de software, problemas de sincronismos, efeitos da dissipação de potência e mudanças temporárias com a temperatura. Os únicos defeitos detectados são expansões térmicas, que causam fraturas e desvios permanentes de parâmetros de componentes.

Os principais passos específicos de um procedimento de um ensaio acelerado são:

a) Selecione a solicitação: Não há nenhuma solicitação padrão, cada produto irá apresentar diferenças.

O uso de uma solicitação de faixa larga resolve o problema da seleção da solicitação apropriada. Esse procedimento utiliza uma grande variedade de solicitações simultaneamente ou em seqüência. A escolha das solicitações a serem aplicadas depende das falhas mais esperadas, assim a Figura 6-15 apresenta as solicitações e os mecanismos tradicionais de falhas primárias.

O uso de múltiplas solicitações irá maximizar o número de modos de falhas, que podem ser descobertos em um curto tempo. Mesmo porque alguns modos de falha podem ficar encobertos quando uma só solicitação é utilizada.

Uma solicitação de faixa larga deve conter:

- temperatura (com mudanças rápidas entre temperaturas e permanências nos extremos – ciclos térmicos);
- vibração aleatória (simples ou multieixos);
- variações da rede de alimentação (frequência ou tensão elétrica);
- variações da fonte de tensão interna;
- variações da frequência de clock;
- algoritmos de piores casos no software;
- carga máxima ou condições de máxima dissipação de potência.

Deve-se tomar cuidado com a exclusão de solicitações que aparentemente não produzem falhas, pode ser que estas se manifestem futuramente, com as variações do processo.

b) Selecione a metodologia de detecção de falhas: Pode-se efetuar medições continuamente durante o ensaio do produto, ou fazer medições intermitentes durante os intervalos dos ensaios.

Medições contínuas possibilitam detectar falhas intermitentes que de outra forma permaneceriam encobertas. Um exemplo é componentes que variam os seus

SOLICITAÇÃO	MECANISMOS / ELEMENTOS TRADICIONAIS DE FALHAS
Umidade	<ul style="list-style-type: none"> • Falhas de selos herméticos; • Corrosão; • Crescimento de dendrites (formações irregulares fossilizadas); • Migração iônica; • Estabilidade de circuitos de alta impedância;
Temperatura elevada	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento da taxa de reações químicas; • Migração iônica; • Mudança das margens dos tempos digitais; • Aumento do processo de difusão do silício;
Ciclos de temperatura	<ul style="list-style-type: none"> • Estabilidade térmica do circuito; • Taxa de expansão diferencial; • Contaminação química; • Qualidade de soldagem; • Projeto de transferência de calor; • Trincas; • Curtos ou circuitos abertos nas metalizações; • Laços de fios: quebrados, erguidos, grudados; • Combate de efeitos com causas comuns; • Defeitos passivos; • Corrosão bimetálica; • Imperfeições em cristais;
Vibração aleatória	<ul style="list-style-type: none"> • Falhas devido a inércia de componentes grandes; • Fadiga; • Falhas devido a fixação de dissipadores de calor; • Falhas devido a qualidade da soldagem;
Variação da tensão da rede	<ul style="list-style-type: none"> • Falhas devido às margens de projeto do circuito; • Falhas de dissipação de potência; • Falhas devido a regulação de saída;
Ciclo de potência	<ul style="list-style-type: none"> • Falhas na proteção do circuito contra transientes; • Falhas de dissipação de potência; • Falhas da resposta de corrente a transientes;
Monitoramento do produto	<ul style="list-style-type: none"> • Falhas de operação do produto; • Falhas de firmware; • Falhas intermitentes;
Máxima carga de saída	<ul style="list-style-type: none"> • Maximização da subida da temperatura interna dos componentes e níveis de dissipação de potência;

Figura 6-15– Solicitações e seus mecanismos primários de falhas [11].

parâmetros além dos limites conhecidos, causando falhas sob a condição de solicitação, mas que voltam aos seus valores normais quando as solicitações são removidas. Assim medições intermitentes somente conseguem detectar falhas permanentes (*hard failures*), enquanto falhas intermitentes ou temporárias (*soft failures*) permanecerão encobertas, trazendo problemas futuros.

- c) **Avalie falhas do sistema de ensaio e produto:** Além de avaliar as falhas do sistema de ensaio, ainda tem-se que avaliar falhas das unidades em teste e falhas relacionadas com o regime de solicitação.
- d) **Valide o produto a ser ensaiado:** O desempenho do produto a ser ensaiado deve ser validado, antes de qualquer ensaio acelerado ser

executado. Isto pode ser feito com um pequeno número de amostras sob solicitação normal. Um exemplo é usar a temperatura ambiente normal, umidade, altitude, fonte de alimentação com tensão nominal e todas as outras condições similares as normais.

e) Caracterize as falhas do produto ensaiado:

- Deve-se caracterizar as fronteiras de operação do produto, sobre as solicitações escolhidas e à medida que modificações são feitas no produto as fronteiras de operação se ampliam.
- Determine pela análise de falhas, as causas para todas as falhas. A maioria das falhas é causada por falhas no projeto, componentes ou no processo de manufatura. Algumas falhas são devido ao sistema de ensaio, ou sobre solicitações durante o ensaio. Por vezes falhas que ocorreram um pouco acima dos limites especificados para os produtos, não podem ser classificadas como falhas devido à sobre solicitação, análises precisam ser feitas, pois existe a possibilidade que, unidades dentro dos limites extremos, apresentem os mesmos problemas. Ensaio acelerados encurtam os tempos de falhas, mas podem levar a modos de falhas, que de outra forma não apareceriam.
- Execute ações corretivas. Uma vez descoberta uma causa de falhas, deve-se gerar idéias para elimina-la. As soluções podem ser, simplesmente, a substituição das peças por peças mais robustas, até modificações de projeto, dependendo do tempo e recursos disponíveis.

f) Avalie o regime de solicitações:

Uma alternativa à solicitação de faixa larga, é testar o produto dentro dos limites habituais especificados, esta prática pode ser errada, pois à medida que se dispõe de poucas unidades para teste, deve-se aproveitar ao máximo a oportunidade para testar os limites das especificações do produto. Pode-se com as sobre solicitações maximizar os modos de falha, sem criar modos de falha irreais.

O uso de múltiplas solicitações deve sempre que possível, ser feita com a combinação dos fatores de solicitação em seus valores máximos e mínimos. Consegue-se com isto, ampliar as condições de solicitação, evitando-se ensaios mais conservadores, tais como o de um fator por vez, com os outros fatores mantidos em seus valores nominais. A combinação das condições extremas dos

fatores pode determinar novos modos de falha, por exemplo, umidade e tensão podem ocasionar o aparecimento de dendrites.

g) Determinação do fator de aceleração – modelo de solicitação:

No cálculo do fator de aceleração deve-se ter em mente que, infelizmente, nem todo mecanismo de falha é acelerado pelo mesmo fator, para uma dada solicitação. Caso exista suficiente informação sobre cada mecanismo de falha (um mínimo de cinco falhas em cada nível de solicitação), então um fator de aceleração por mecanismo de falha pode ser estimado. Outra forma é combinar todas as falhas do ensaio em um grupo e determinar um fator de aceleração médio, alternativa normalmente indicada, na falta de dados suficientes sobre particulares mecanismos de falha.

O fator de aceleração é obtido, para uma determinada distribuição (por exemplo, Weibull), observando-se os tempos da situação com solicitação acelerada e sem solicitação, para uma percentagem de falhas selecionada, a razão entre os dois tempos determina o fator de aceleração. Caso haja vários dados de ensaios, pegue percentagens de 50% ou maiores, veja Equação 6-1. Para uso de percentagens baixas, como 10%, deve-se ter no mínimo cinco falhas.

$$\text{Fator de aceler.} = \frac{\% \text{ de vida } X\text{ésima (solicitação normal)}}{\% \text{ de vida } X\text{ésima (solicitação acelerada)}} \quad \text{Equação 6-1}$$

Outra forma de determinação do fator de aceleração é através de um modelo de solicitação acelerada. A escolha de um modelo de solicitação deve ser feita em função do mecanismo de falha predominante que se deseja analisar. Entre os modelos mais conhecidos tem-se Arrhenius, para quando o modo de falha predominante é relacionado à temperatura.

O software Alta 1.0 [39] da empresa Reliasoft possui entre as suas funções alguns modelos de solicitação, a Figura 6-16 ilustra os principais modelos e os componentes e efeitos de degradação para os quais são indicados.

h) Principais fontes de incertezas nos ensaios:

As principais fontes de incertezas nos ensaios acelerados estão relacionadas aos fatores de aceleração que se deve atribuir ao ensaio, sob as condições aceleradas. Também a dispersão de parâmetros de difícil controle tais como temperatura, umidade e outros fatores ambientais, como será tratado mais adiante nos ensaios ambientais. Outro fator é a distribuição que modela o comportamento dos produtos

Modelo de solicitação acelerada	Recomendado para componentes / ou componentes que se degradam devido a:
Eyring	<ul style="list-style-type: none"> • temperatura; • umidade com limitações;
Arrhenius	<ul style="list-style-type: none"> • semicondutores e componentes de estado sólido • dielétricos e isoladores elétricos; • pilhas, baterias e acumuladores elétricos; • transformadores e reguladores de tensão; • lâmpadas incandescentes; • difusão metálica (semicondutores); • plásticos e termoplásticos, inclusive colas condutoras; • lubrificantes e graxas; • rolamentos e mancais; • fadiga de metais, fluência e desgaste; • corrosão química e eletroquímica.
Potência inversa	<ul style="list-style-type: none"> • tensão elétrica; • tensão mecânica; • vibrações; • choques; • pressão; • vácuo; • rotação.
Temperatura - umidade	<ul style="list-style-type: none"> • temperatura; • umidade; • corrosão.
Térmico - não térmico	<ul style="list-style-type: none"> • temperatura; • tensão elétrica; • tensão mecânica; • pressão / vácuo; • vibração / choque; • temperatura e tensão elétrica.

Figura 6-16 – Modelos de solicitação do software Alta 1.0 da Reliasoft e correspondentes indicações de uso de acordo com a solicitação.

para uma determinada solicitação.

6.6.2 ESTUDO DE CASO DE UM ENSAIO ACELERADO

Como forma de ilustrar a aplicação dos ensaios acelerados apresenta-se um caso prático, onde a análise foi feita com auxílio do software Alta da Reliasoft [39] e [36]. Os dados do caso foram obtidos a partir de exemplo real da literatura, moldados de acordo com as propostas do trabalho [39].

Os passos do exemplo seguem a metodologia de planejamento de ensaios sugerida na Figura 6-7.

PASSO 1 – CARACTERIZAR O PROBLEMA: Um novo produto foi testado com relação a sua confiabilidade. Como a vida esperada desse produto em condições normais de uso é de mais de 15.000 horas, testá-lo nestas condições não é viável, em função do tempo gasto. Por esta razão, decidiu-se realizar um ensaio acelerado. Sua temperatura de operação normal é de 323 K (50° C).

Outra razão que levou a opção por um ensaio acelerado era a disponibilidade de uma quantidade razoável de peças do produto, bem como facilidades de equipamentos para aceleração dos ensaios.

PASSO 2 – EQUIPE MULTIDISCIPLINAR: Uma equipe multidisciplinar foi formada para realizar o ensaio. A equipe foi baseada na equipe que executou as revisões ao longo do desenvolvimento do produto, com participação direta dos projetistas.

PASSO 3 – IDENTIFIQUE PONTOS FRÁGEIS: Através de uma árvore de falhas e ensaios preliminares determinou-se que o mecanismo de falha predominante era o curto circuito de um tiristor que comanda a velocidade de um motor AC. No entanto, ainda não se sabia qual a taxa de falhas do componente, nem se estava abaixo ou acima do especificado.

PASSO 4 – NÍVEL DE MONTAGEM A SER ANALISADA: Decidiu-se ensaiar o produto por completo. Sabe-se por dados anteriores, que o produto se encontra em uma fase de maturidade e o mecanismo de falha predominante é o tiristor. A opção de testar o produto completo ao invés de separar o tiristor, se justifica pela não necessidade de confeccionar circuitos especiais para simular as condições do circuito e também que diferentes modos de falha até então desconhecidos, poderão aparecer nas outras peças do produto, mesmo que não sejam o objetivo do ensaio.

PASSO 5 – TIPO DE ENSAIO ADEQUADO: O ensaio acelerado demonstrou-se viável, já que existe um mecanismo de falha predominante em relação aos demais e facilidades já mencionadas para realizar o ensaio acelerado. Deseja-se assim saber, a necessidade de substituir o tiristor por outro com diferentes características, ou se o presente tiristor já atende às especificações de projeto em termos de vida.

PASSO 6 – VERIFICAR NORMAS ESPECÍFICAS: Não existem normas específicas para esse tipo de ensaio, sabe-se, contudo, que os dispositivos de estado sólido, aceitam altas temperaturas de solicitação, sem distorcer os mecanismos de falha.

PASSO 7 – TAMANHO DA AMOSTRA: Tem-se disponíveis 30 amostras para ensaio, que serão ensaiadas até o aparecimento da falha do tiristor, ou consideradas suspensas caso ocorram outros modos de falha. O número de amostras disponíveis nesse caso é bastante grande, raro de encontrar-se em ensaios.

PASSO 8 – PROCEDIMENTO DE ENSAIO

Selecione a solicitação: Decidiu-se solicitar o produto, unicamente, através do aumento da temperatura de operação, já que semicondutores e componentes de estado sólido são afetados diretamente pela temperatura. Assim, se escolheu as temperaturas de 393K, 408K e 423K que conforme dados do fabricante, não causam o aparecimento de mecanismos de falhas distintos dos normalmente observados, quando da operação em temperatura normal. Dividiram-se as amostras em três lotes de 10 peças, para o ensaio em cada temperatura.

Forma de detecção de falhas: O ensaio será monitorado 24 horas por um sistema de aquisição de dados, que monitora além da temperatura da câmara climática, a tensão sobre o motor. O ensaio é interrompido, instantaneamente, caso a tensão seja interrompida por um período maior do que 1 minuto, o que caracteriza a falha do tiristor.

PASSO 9 - BANCADA DE ENSAIO: Uma bancada de ensaio foi elaborada, assim como o software do sistema de aquisição de dados.

PASSO 10 – BALANÇO DE INCERTEZAS: As principais incertezas do ensaio são a resposta térmica do produto, que demora a se estabilizar dentro da câmara climática e o modelo de Arrhenius. A determinação das incertezas, principalmente, do modelo necessita um estudo mais aprofundado para determinar a real correspondência do fator de aceleração estimado com a realidade.

PASSO 11 – ENSAIOS PRELIMINARES: Ensaio preliminares determinaram a adequação do planejamento proposto.

PASSO 12 – EXECUÇÃO DO EXPERIMENTO: Uma vez comprovado a adequação do planejamento, o ensaio foi executado sem interrupções. Foram obtidos os dados mostrados na Figura 6-17, em termos de horas até a falha do produto. Todos os produtos falharam não apresentando suspensões.

PASSO 13 – ANÁLISE DOS RESULTADOS: Na avaliação do regime de operação utilizou-se o software Weibul 6 [36] e Alta 1.0 [39] da empresa Reliasoft. Lembrando que os mesmos resultados podem ser obtidos pela plotagem dos pontos obtidos em um gráfico de Weibul, para as três temperaturas de aceleração e transposição linear para a temperatura de operação, através de uma equação de Arrhenius ou Eyring.

Obviamente o software oferece uma série de vantagens e facilidades no trabalho, deve-se, no entanto ter em mente que o planejamento e análise dos resultados são

Solicitação	Tempo até a falha (h)									
393 K	3850	4340	4760	5320	5740	6160	6580	7140	7980	8960
408 K	3300	3720	4080	4560	4920	5280	5640	6120	6840	7680
423 K	2750	3100	3400	3800	4100	4400	4700	5100	5700	6400

Figura 6-17 – Dados obtidos do ensaio acelerado em horas até a falha.

as mais importantes funções da equipe de ensaio.

No software foi selecionado o modelo de Eyring, o mais indicado quando o fator de solicitação é a temperatura. A distribuição escolhida foi a Lognormal, por melhor adaptação aos dados. A Figura 6-18 mostra os gráficos de Lognormal – Eyring para as temperaturas aceleradas de 393K, 408K e 423K. O intervalo de confiança não foi plotado para não sobrecarregar a figura. Observa-se na figura os parâmetros A e B do modelo de Eyring e o desvio padrão da distribuição Lognormal.

Com os parâmetros de vida característica η (63,2% de probabilidade de falha), obtidos dos gráficos acelerados para as três retas traçadas, pode-se obter os

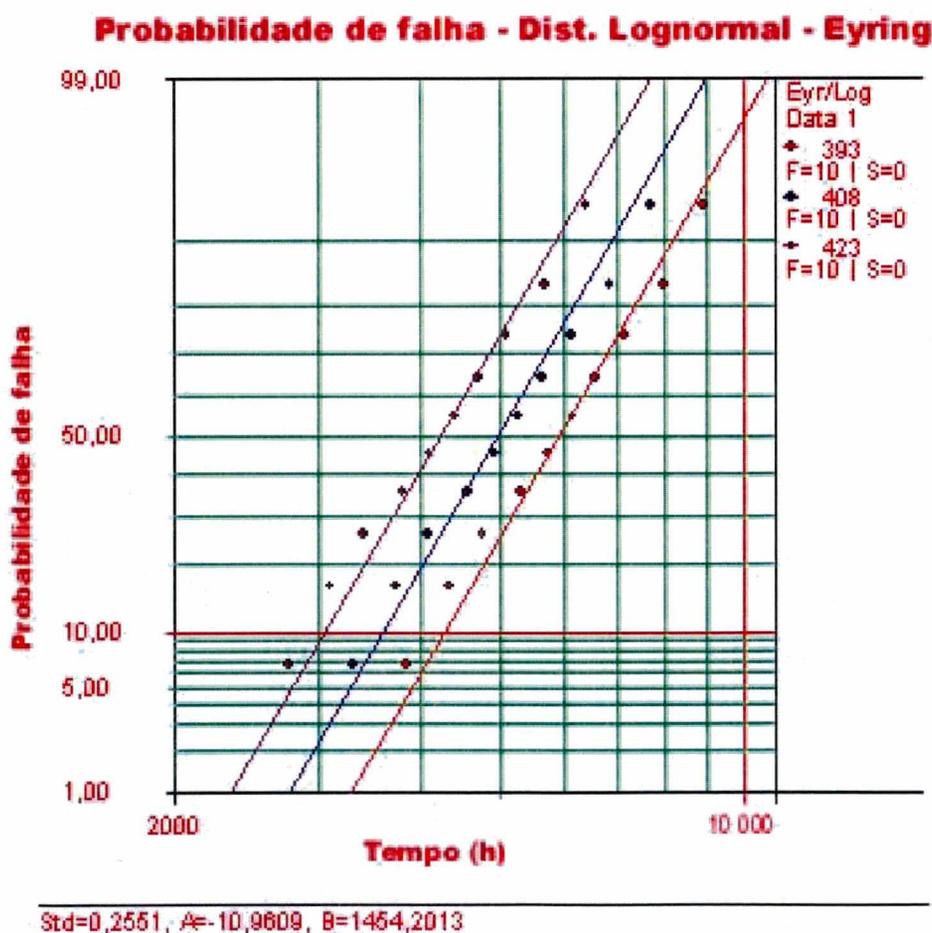


Figura 6-18 – Gráficos das probabilidade de falhas utilizando o modelo de Eyring – Lognormal para as três temperaturas de aceleração.

parâmetros A e B. Com os parâmetros A e B, pode-se obter a curva na temperatura normal de operação 323K, detalhes podem ser obtidos em [39]. Assim a curva da temperatura de operação a 323K, Figura 6-19 é obtida. Graficamente da reta traçada, ou através das facilidades do software [39], pode-se obter para a temperatura de 323 K a probabilidade de falha para 15.000 h de operação de 39% (sendo 96% para o intervalo de confiança unilateral superior de 90%), ou uma confiabilidade de 61%.

O fator de aceleração obtido para a temperatura de 423 K em relação à temperatura de 323 K foi de 3,8 vezes, portanto não houve uma solicitação demasiada dos componentes. A vida média obtida foi de 16.600 h, o que demonstra a pouca informação fornecida pelo parâmetro vida média, onde se tem uma confiabilidade de apenas 45%.

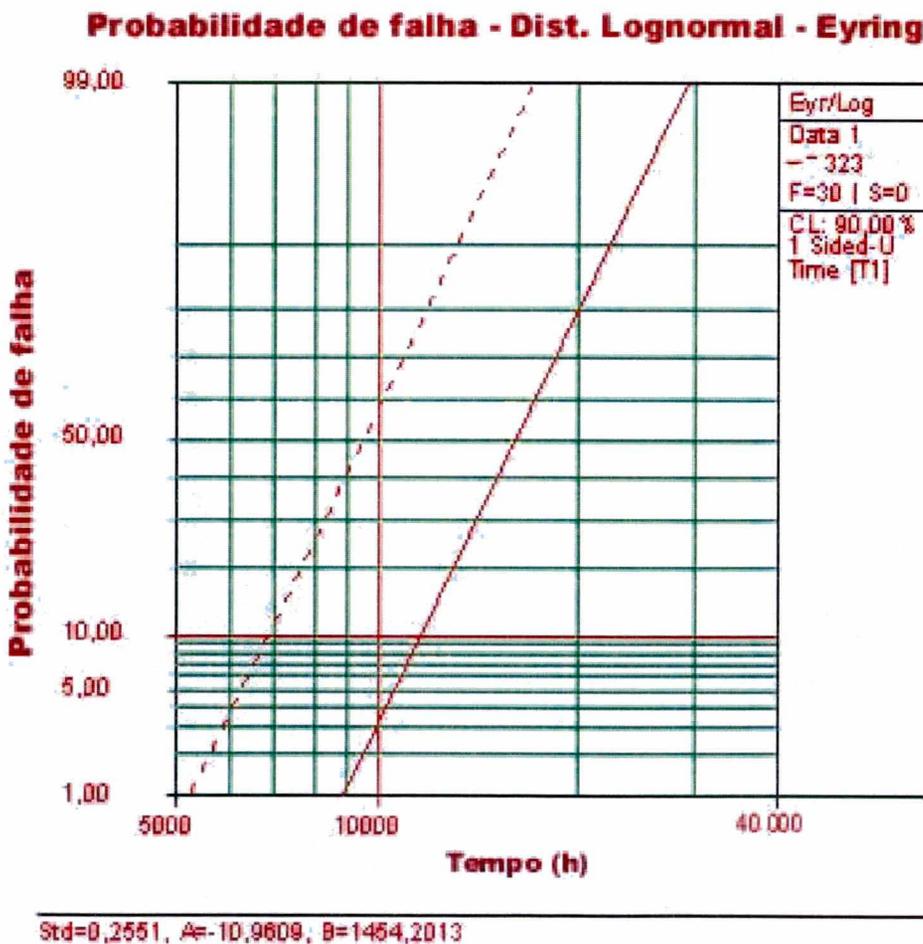


Figura 6-19 – Gráfico da probabilidade de falha utilizando-se o modelo Eyring – Lognormal para a temperatura normal de operação 323K.

PASSO 14 – ANÁLISE DE FALHAS: A confiabilidade de 61% para 15.000 h de operação é insuficiente, esperava-se uma confiabilidade em torno de 99%. Assim como a falha é devido a um componente de terceiro, a decisão é pela troca por outro componente mais robusto do mesmo fabricante, ou de outro fabricante compatível. Ou seja, optou-se por um superdimensionamento do componente, devido às condições de operação demasiadamente severas. Novos ensaios devem ser feitos para comprovação dos resultados esperados.

PASSO 15 – DOCUMENTE OS RESULTADOS: Os resultados e procedimentos de ensaio foram devidamente documentados e servirão de base para futuros desenvolvimentos e ensaios relacionados.

Pôde-se neste caso efetuar um ensaio acelerado devido à grande quantidade de amostras disponíveis. Considerando-se os custos dos ensaios, estes foram razoáveis, devido principalmente aos baixos custos dos componentes eletrônicos.

Pôde-se observar uma pequena inflexão das curvas na sua parte inferior, o que pode indicar uma possível degradação excessiva do componente, embora que o fator de aceleração não seja demasiado. Ou seja, o gráfico pode estar indicando uma mudança de modo de falha, o que pode descaracterizar o estudo. Necessita-se assim, aprofundar os estudos com temperaturas mais brandas e verificar possíveis inflexões nas curvas.

6.7 ENSAIOS AMBIENTAIS

Ensaio ambientais são ensaios onde se aplica, uma ou mais solicitações ambientais sobre o produto e verifica-se o seu comportamento.

Os ensaios ambientais visam verificar a susceptibilidade do produto a condições ambientais extremas, antecipando assim prováveis situações que somente aparecerão em campo.

São realizados principalmente no desenvolvimento do produto, fase de projeto preliminar e detalhado, para indicar a sua adequação ao ambiente operacional e corrigir falhas.

São realizados normalmente em laboratórios de terceiros, já que os equipamentos utilizados requerem altos investimentos em infra-estrutura. O acompanhamento da equipe de projeto é importante tanto na especificação, como na análise dos

resultados.

A Figura 6-20 apresenta os diversos fatores de solicitação e os efeitos esperados nos componentes. Neste item apresentam-se os ensaios ambientais mais comuns entre produtos mecatrônicos.

Com respeito a normas internacionais que tratam de ensaios ambientais, pode-se dizer que a norma MIL-STD-810 *Environmental Test Methods* [45], trata de todos os tipos de ensaios ambientais, com um enfoque para produtos militares, mas pode ser adaptada para as necessidades correntes de produtos mecatrônicos, desconsiderando-se ensaios típicos das forças armadas americanas.

Existem as normas da IEC série 68, por exemplo, 68-2-22 'Tests B: *Dry heat*' de 1974, a 68-2-60 que trata de ensaios de ambientes corrosivos. Normas ETS série 300, também são utilizadas. Com respeito a ABNT, existem as normas de ensaios climáticos básicos e mecânicos, que são praticamente, cópias das IEC (estas informações são baseadas na experiência prática do laboratório de ensaios climáticos do CpQD).

6.7.1 PLANEJAMENTO DE ENSAIOS AMBIENTAIS

Os procedimentos de ensaios são específicos para cada tipo de solicitação ambiental empregada. No caso de produtos mecatrônicos são comuns ensaios combinados, no qual mais de uma solicitação é empregada, assim como os ensaios de interferência e compatibilidade eletromagnética. Outros ensaios ambientais também são utilizados em produtos mecatrônicos, tais como ensaios de choque térmico, variações extremas de temperatura e outros dependendo do produto. No entanto, esse estudo detalha apenas os ensaios citados no parágrafo anterior.

A) ENSAIOS COMBINADOS

- **Propósito:** Acelerar as conclusões sobre o comportamento ambiental do produto.
- **Efeitos esperados:** Consiste na associação dos efeitos característicos das solicitações escolhidas para o ensaio, vide Figura 6-20.
- **Planejamento do ensaio:** A temperatura, normalmente, estará entre os fatores ambientais que irão compor um ensaio ambiental combinado. A escolha da máxima temperatura a ser aplicada é motivo de conflito, entre o

Fator de Solicitação	Efeitos Esperados	Falhas Induzidas	Técnicas de melhorias
Alta Temperatura (32 a 49°C)	<ul style="list-style-type: none"> • Desgaste térmico; • Expansão física; • M u d a n ç a d e parâmetros elétricos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Fadiga ou mudanças nas propriedades dos materiais; • Falhas estruturais ou aumento de desgaste. 	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento da dissipação térmica; • Sistemas de refrigeração ou uso de materiais com melhores propriedades térmicas; • Projeto das margens de segurança; • Solicitação reduzida dos componentes.
Baixa Temperatura (-21 a -24°C)	<ul style="list-style-type: none"> • Desgaste térmico; • Expansão física; • M u d a n ç a d e parâmetros elétricos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Quebra ou fratura; • Mudança das funções elétricas ou mecânicas; • Falha estrutural ou aumento do desgaste. 	<ul style="list-style-type: none"> • Isolação térmica; • Materiais protetores; • Projeto das margens de segurança.
Choque Térmico (30°C / 30 minutos)	<ul style="list-style-type: none"> • Solicitação mecânica. 	<ul style="list-style-type: none"> • Falha estrutural; • Quebras ou fadiga; • Desfolhamento; • Ruptura de selos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Aumentar a resistência do material; • Redução da inércia térmica; • Combinar coeficiente térmico de expansão.
Umidade (90 a 95%)	<ul style="list-style-type: none"> • Absorção de umidade; • Corrosão; • Eletrólise; • Fuga elétrica. 	<ul style="list-style-type: none"> • Fraqueza estrutural; • Perda das propriedades elétricas e mecânicas; • Condução elétrica de isoladores; • Parâmetros de performance. 	<ul style="list-style-type: none"> • Selos herméticos; • Coberturas protetoras; • Propriedades dos materiais; • Desumidificadores; • Grandes tolerâncias.
Névoa Salina	<ul style="list-style-type: none"> • Corrosão; • Eletrólise. 	<ul style="list-style-type: none"> • Perda de propriedades elétricas; • Condução ou perda de isolamento. 	<ul style="list-style-type: none"> • Coberturas protetoras; • Propriedades dos materiais.
Areia e Poeira (20m/s 0,0254 a 0,254 mm de diâmetro)	<ul style="list-style-type: none"> • Abrasão da superfície; • Aumento da fricção; • Entupimento de orifícios. 	<ul style="list-style-type: none"> • Desgaste reduzindo funções; • Sobre solicitação. 	<ul style="list-style-type: none"> • Filtro de ar; • Acabamento de proteção; • Selos, lubrificantes, divisórias, filtros.
Vibração (0,001g2 /Hz)	<ul style="list-style-type: none"> • Solicitação mecânica; • Fadiga; • M u d a n ç a d e parâmetros elétricos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Perda de resistência estrutural; • Quebras, deslocamentos de materiais; • Interferência, perda de sinal. 	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento das margens de segurança; • Materiais especiais; • Margens de projeto, absorção de vibração.
Chuva (1mm por hora)	<ul style="list-style-type: none"> • Absorção de água; • Corrosão. 	<ul style="list-style-type: none"> • Fraqueza estrutural ou dos componentes; • Perda das propriedades elétricas ou mecânicas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Cobertura protetora, selos.
Radiação eletromagnética	<ul style="list-style-type: none"> • Sinais espúrios elétricos; • Interferência. 	<ul style="list-style-type: none"> • Causa de performance errática de outros componentes; • Perda de sinais, interrupção da operação. 	<ul style="list-style-type: none"> • Seleção de peças; • Cuidados no projeto de placas impressas; • Material de blindagem.

Figura 6-20 – Solicitações ambientais e efeitos esperados nos produtos [45].

desejo de rapidamente lançar o produto no mercado e a necessidade de eliminar os pontos falhos do produto. A temperatura mínima do ensaio não deve ser menor do que 5°C acima da temperatura de operação normal do produto. Caso haja liberdade para um regime mais agressivo, a temperatura pode ser de 15 a 25°C acima da máxima especificada [23].

Entre os fatores ambientais combinados, mais comuns em ensaios de produtos mecatrônicos estão: Ciclos térmicos, Vibração aleatória, Ciclos de tensão da rede, Umidade e Máxima carga do sistema. No entanto as solicitações devem ser

selecionadas, de acordo com as falhas esperadas para o sistema e as falhas provocadas pelas solicitações ambientais, a Figura 6-15 detalha os mecanismos de falha de cada uma das solicitações ambientais.

A ordem ou simultaneidade dos ensaios deve ser escolhida de forma a propiciar, o máximo aproveitamento dos ensaios. Normalmente, ensaios de umidade são colocados por primeiro, para maximizar o tempo de observação com respeito à corrosão e cristalizações.

No caso do uso de ciclos térmicos, taxas de variação de temperatura menores do que $1^{\circ}\text{C} / \text{minuto}$, não solicitam o produto suficientemente para acelerar falhas. Um valor recomendado [11], são taxas de variação próximas a $10^{\circ}\text{C} / \text{minuto}$, que efetivamente descobrem falhas latentes sem causar falhas impróprias.

No caso da taxa de variação ideal, pode-se priorizar certos componentes tais como, componentes eletrônicos complexos, ou outros dispositivos. Isto é necessário devido às diferentes massas térmicas dos componentes. Uma boa compreensão da resposta térmica do produto, bem como limitações da câmara climática utilizada e fluxos de ar no seu interior, são fundamentais para a elaboração de um bom procedimento de ensaio. Deve-se evitar massas desnecessárias no interior da câmara, tais como elemento de cobertura e proteção dos equipamentos, que somente dificultam a troca rápida de calor.

B) ENSAIOS DE EMI / EMC

Há três razões porque EMI / EMC são importantes para projetistas e fabricantes de produtos eletro eletrônicos:

- ⇒ Legal – O produto que não obedece à diretiva de EMC, é banido da comunidade europeia ou de outros países;
 - ⇒ Social – Equipamentos que não estão de acordo com EMC, podem ter comportamento falho, ou serem nocivos para a saúde e segurança;
 - ⇒ Comercial – Produtos que sofrem de problemas de EMC têm uma reputação de não confiáveis e são menos competitivos.
- **Procedimento de Ensaio:** Como forma de harmonizar a regulamentação na Comunidade Europeia, a Comissão Europeia adotou a diretiva 89/336/EEC em 1992, que após um período de transição tornou-se a única

legislação aceita em 1º de Janeiro de 1996. Ela é bastante abrangente e restringe a susceptibilidade e a interferência [51].

Outra norma Européia EN61000-3-3 trata de limites para emissão de harmônicos na rede pública de energia.

A diretiva européia para EMC requer que aparelhos sejam construídos de forma que:

- ⇒ Os distúrbios eletromagnéticos gerados não excedam um nível permitido, nível este relacionado com a correta operação dos equipamentos de rádio e telecomunicações;
- ⇒ Existe um nível de imunidade intrínseco, que é adequado para uma operação correta, quando o equipamento é corretamente instalado, mantido e usado para os propósitos adequados;
- ⇒ Equipamentos de segunda mão, para uso médico, para uso militar e para exportação fora da comunidade européia, não são cobertos pela diretiva.

Existem três formas para demonstrar que um equipamento cumpre a diretiva:

- ⇒ A primeira e mais direta é pela própria certificação. Isto envolve a satisfação às normas européias, executando os ensaios ou contratando-se um laboratório de ensaios independente;
- ⇒ A segunda é ter-se arquivos da construção técnica, mostrando que procedimentos apropriados de projeto e teste foram seguidos para assegurar adequação à diretiva. Os arquivos devem incluir relatórios técnicos de uma equipe competente, indicada pelo Departamento de Indústria e Comércio (DTI – Department of Trade and Industry);
- ⇒ A terceira forma é obter um certificado de exame, isto se aplica somente a transmissores de radio comunicação e transceptores.

Uma vez demonstrada a adequação, o fabricante faz a declaração de conformidade e pode afixar a marca “CE” no produto. O produto está agora livre de restrições técnicas, para comércio na comunidade européia.

Equipamentos médicos para implante são cobertos pela diretiva 90/385/EEC e equipamentos médicos em geral pela diretiva 91/C237/03.

Uma outra normalização utilizada principalmente no EUA é a FCC Parte 15 A. O procedimento de ensaio segue a American National Standards Institute - ANSI C 63.4-1992 que trata de métodos para medida de emissões de rádio e ruídos de equipamentos eletro / eletrônicos de baixa tensão, na faixa de 9kHz até 40GHz, publicado pelo Instituto de Engenharia Eletro e Eletrônica (IEEE), Inc em 17 de Julho de 1992 com o número SH 15180. A comissão incentiva o uso desse procedimento para ensaio de equipamentos digitais, emissões intencionais e não intencionais.

6.8 ENSAIOS DE CONFIABILIDADE

São ensaios realizados para determinação, ou confirmação da confiabilidade de um produto. Pode-se classificar inicialmente os ensaios de confiabilidade, conforme a definição em:

- a) Ensaios de conformidade da confiabilidade – ECC, correspondem aos ensaios usados para demonstrar que uma característica de confiabilidade de um produto satisfaz, ou não, as exigências de confiabilidade fixadas como condição de aceitação do produto;
- b) Ensaios de determinação da confiabilidade – EDC, correspondem aos ensaios usados na determinação, de uma característica de confiabilidade de um produto, quando esta não foi anteriormente determinada.

São recomendados nas fases avançadas de projeto detalhado, onde o protótipo do produto já esteja suficientemente maduro. Também pode ser aplicado em produtos similares, para determinação das especificações de projeto.

Dependendo das especificações do ensaio, requer-se o uso de fatores de aceleração climático ou não, normalmente não disponíveis na empresa. A participação da equipe de projeto é fundamental, tanto na especificação do ensaio, como na análise das possíveis falhas e resultados.

6.8.1 CRITÉRIOS GERAIS DE ENSAIOS

Como condições gerais de ensaios, tanto de determinação como de confirmação da confiabilidade, tem-se as estabelecidas na Figura 6-21, que apresenta algumas das considerações a serem feitas, antes do planejamento de um ensaio. Os ensaios de determinação e de conformidade da confiabilidade podem ser classificados quanto

CONSIDERAÇÕES NECESSÁRIAS NA ESPECIFICAÇÃO DE ENSAIOS DE CONFIABILIDADE	
Itens em ensaio e tipos de ensaios	- Tipo de produto a ser ensaiado; - Tipo de ensaio a ser realizado (campo / lab.); - População da qual será retirada a amostra e procedimentos de amostragem.
Características de confiabilidade e procedimentos estatísticos. Obs: pouco aplicável a EDC, não há dados estatísticos anteriores	- Indicação da característica de confiabilidade aplicável, bem como do valor aceitável; - Ensaio de Conformidade (ECC) a ser utilizado; - Testes estatísticos para verificar a validade da hipótese da distribuição estatística considerada.
Condições e ciclos de ensaios	- Condições ambientais e condições de operação, regime de operação e carga e condições de manuseio; - Manutenção preventiva a ser realizada durante o ensaio; - Ciclo de ensaio.
Desempenho dos itens sob ensaio e critérios para caracterizar falha	- Parâmetros funcionais a serem observados durante o ensaio e critérios de caracterização de falhas; - Tipos de falhas que impliquem decisão de rejeição imediata; - Tipos de falhas não relevantes; - Período de ensaio a ser considerado como tempo relevante de ensaio; - Tempo de ensaio ou número de operações mínimo ou máximo, para cada item sob ensaio.
Pré condicionamento e manutenção corretiva	- Testes, ajustes, calibração e depuração dos itens sob ensaio; - Procedimentos de manutenção corretiva a serem utilizados, incluindo indicação de qualquer substituição permitida de partes ou itens que tenham falhado antes do término do ensaio.

Figura 6-21 – Considerações na especificação de ensaios (baseado na NBR 9320 [48]).

ao:

- Critério de conclusão, término dos ensaios;
- Critério de substituição (ou reparo) dos itens falhos.

6.8.2 ENSAIOS DE DETERMINAÇÃO DA CONFIABILIDADE (EDC)

As diferentes classificações dos ensaios de determinação da confiabilidade são apresentadas na Figura 6-22. Inicialmente os ensaios são classificados em completos e incompletos, de acordo com a falha ou não de todos os produtos sob ensaio. Entre os incompletos, existe o critério de término do ensaio, quanto ao número de falhas ou o tempo de duração do ensaio ou misto. Nos ensaios de determinação da confiabilidade, uma importante consideração é o tempo relevante de ensaio, que corresponde à soma dos tempos que o produto foi ensaiado, sem apresentar falhas. A partir do tempo relevante de ensaio e do número de falhas, pode-se estimar o tempo médio entre falhas. A Figura 6-22 também mostra o cálculo dos tempos relevantes acumulados de ensaio, para cada um dos tipos de ensaios.

A Figura 6-23 ilustra a forma de cálculo da estimativa por pontos dos parâmetros de confiabilidade, taxa de falha, tempo médio entre falhas (ou até a falha no caso de itens não reparáveis) e taxa de êxito bem como os intervalos de confiança, a figura é

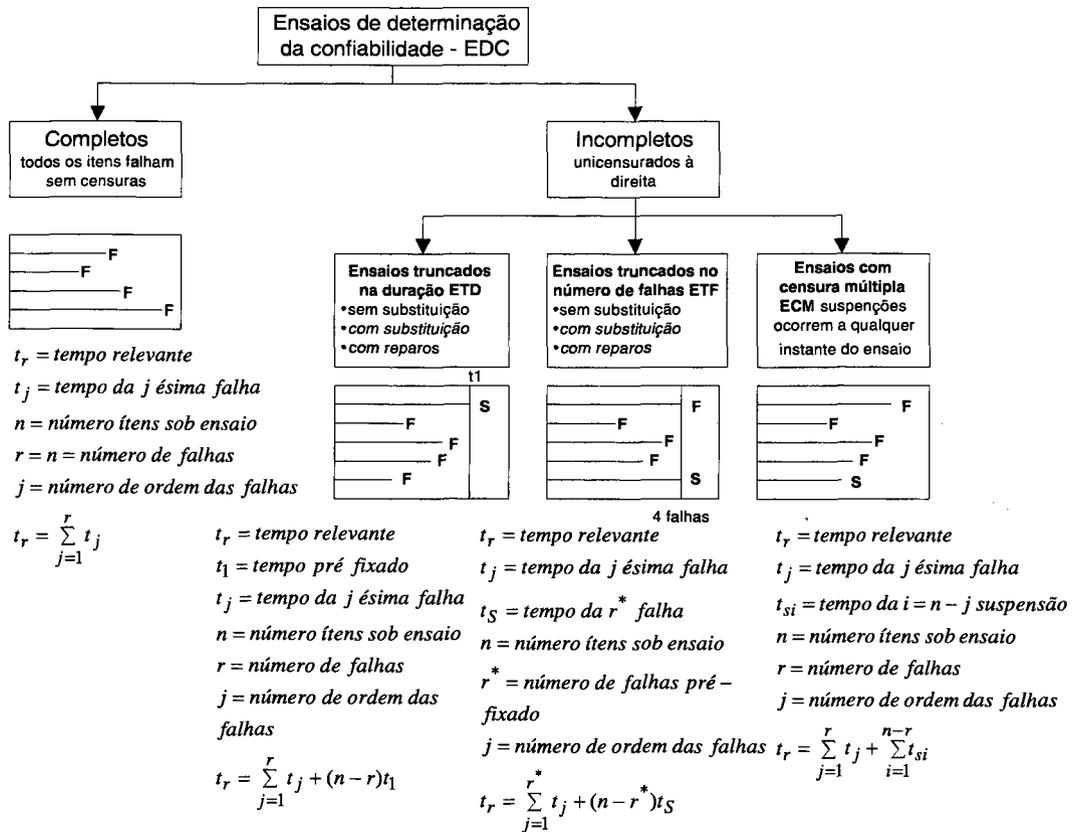


Figura 6-22 – Tipos de ensaios de determinação da confiabilidade com o cálculo dos tempos relevantes acumulados de ensaio.

baseada na norma NBR-9321. Cálculos de taxa de êxito são feitos quando há predominância de falhas. Em termos práticos já existem inúmeros softwares que fazem os cálculos, não havendo necessidade de fazer-se os cálculos manualmente, o mais importante é interpretar os resultados e conhecer o método de cálculo utilizado pelo software. Não é objeto desse trabalho, abordar as diferentes formas de cálculo de aproximação de retas e cálculos dos intervalos de confiança. Maiores informações podem ser encontradas em O'Connor[26], Llord [58], Kececioglu [5], Ireson [11] e Billinton [59].

Quando a hipótese de taxa de falha constante não é válida, a distribuição dos tempos segue uma distribuição de Weibull, Log Normal, Normal ou outras. Testes devem ser feitos para verificar qual a distribuição que é mais adequada. Maiores detalhes dos métodos gráficos podem ser encontrados em Kececioglu [5].

Caract. Param.	Condições de uso	Estimativa p/ pontos duração pré-fixada	Estimativa p. p. quant. de falhas pré-fixada	Intervalo de confiança bilateral para nível de confiança 90%	Intervalo de confiança unilateral para nível de confiança 90%	Método gráfico
Taxa de êxito	<ul style="list-style-type: none"> • Predominância de falhas; • Possibilidade de reparos; • E n s a i o s completos ou inc ompletos unicensurados à direita. 	$\hat{R} = \frac{n-r}{n}$		$\frac{n-r}{n-r+(r+1)F_{0,95}(v_1, v_2)} \leq R \leq \frac{(n-r+1)F_{0,95}(v_1, v_2)}{r+(n-r+1)F_{0,95}(v_1, v_2)}$ <p>$v_1 = 2(r+1) e v_2 = 2(n-r)$ para lim ite inferior $v_1 = 2(n-r+1) e v_2 = 2r$ para lim ite superior</p>	$R \leq \frac{n-r}{n-r+(r+1)F_{0,90}(v_1, v_2)}$ <p>$v_1 = 2(r+1) e v_2 = (n-r)$</p>	
Taxa de falha λ	<ul style="list-style-type: none"> • Taxa de falha constante; • Itens reparáveis ou não; • t_r sufici. grande em relação ao MTBF esperado. 	$\hat{\lambda} = \frac{r}{t_r}$	$\hat{\lambda} = \frac{r^*}{t_r}$	$\frac{\chi^2_{0,05;2r}}{2t_r} \leq \lambda \leq \frac{\chi^2_{0,95;(2r+2)}}{2t_r}$ <p>pode-se usar monogramas NBR 9321</p>	$\frac{\chi^2_{0,9;(2r+2)}}{2t_r}$ <p>pode-se usar monogramas NBR 9321</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Manualmente pode-se utilizar o papel mono-log com o cálculo das categorias medianas conforme NBR 9321. Verifique se os pontos determinam uma reta; • O número de falhas não deve ser inferior à 4; • A forma mais prática é o uso de um software de confiabilidade.
Tempo médio (MTBF ou MTTFF)	$r \geq 2 \therefore r=0 \Rightarrow \hat{\lambda} = \frac{1}{3t_r}$	$\hat{\theta} = \frac{t_r}{r}$	$\hat{\theta} = \frac{t_r}{r^*}$	$\frac{\theta}{2} \leq \frac{2r}{\chi^2_{0,95;(2r+2)}} \leq \frac{\theta}{2}$ <p>pode-se usar monogramas NBR 9321</p>	$\frac{\theta}{2} \leq \frac{2t_r}{\chi^2_{0,9;(2r+2)}}$ <p>pode-se usar monogramas NBR 9321</p>	
Símbolos		t_r = tempo relevante de ensaio	n = número de falhas sob ensaio	r = número de falhas pré - fixado	r = número de falhas	

Figura 6-23 – Estimativa por pontos da taxa de falha, MTBF e taxa de êxito com os respectivos intervalos de confiança para a distribuição exponencial e binomial (taxa de êxito).

6.8.3 ENSAIOS DE CONFORMIDADE DA CONFIABILIDADE (ECC)

Planos de ensaios descrevem critérios para aceitação ou rejeição de equipamentos, face ao valor especificado de confiabilidade, quando em ensaios de conformidade de confiabilidade. Os planos de ensaios para taxas de falhas e tempo médio entre falhas assumem taxa de falha constante. Existem dois tipos básicos de planos de ensaios de determinação da confiabilidade, os quais podem ser realizados com substituições ou sem: 1) Ensaios seqüenciais truncados; 2) Ensaios com duração ou número de falhas pré-fixado. A Figura 6-24 mostra as vantagens e desvantagens da escolha entre planos seqüenciais e pré-fixados.

A Figura 6-25 apresenta a classificação dos ensaios de conformidade da confiabilidade, divididos inicialmente em truncados e seqüenciais. Tanto os ensaios seqüenciais como os truncados, apresentam planos de ensaio normalizados.

A Figura 6-26 apresenta os planos de ensaios seqüenciais, normalizados pelas normas NBR9325 e MIL-STD-781, os planos são iguais, diferindo apenas nos planos 4 e 10 não existentes na MIL-STD e no valor de θ tomado como referência (se θ_0 ou θ_1). Cada um dos planos descritos na Figura 6-26 apresentam: tabela de decisão, gráfico com zonas de decisão e rejeição, curva característica de operação e tempo esperado para chegar-se a uma decisão (vide NBR9325). A Figura 6-27 apresenta os planos de ensaios de tempos fixos normalizados.

COMPARAÇÃO ENTRE PLANOS SEQÜENCIAIS E PRÉ-FIXADOS EM ECC		
	Vantagens	Desvantagens
Ensaios seqüenciais truncados	<ul style="list-style-type: none"> o número médio de falhas para uma decisão é mínimo; a média dos tempos acumulados para se chegar a uma decisão é mínima; têm valores máximos para o tempo acumulado de ensaio e número de falhas que podem ocorrer. 	<ul style="list-style-type: none"> problemas administrativos devido a variação dos custos e tempos dependendo do ensaio; os valores máximos de tempo acumulado de ensaio e o número de falhas, podem superar os ensaios pré-fixados.
Ensaios de duração ou número de falhas pré-fixado	<ul style="list-style-type: none"> o valor máximo de tempo acumulado de ensaio é fixo, assim os requisitos de equipamentos e mão de obra são fixados antes do início; o número máximo de falhas é fixado antes do início do ensaio, portanto o número de ítems é determinado previamente; o valor máximo do tempo acumulado é menor que o correspondente ensaio seqüencial truncado. 	<ul style="list-style-type: none"> em média, o número de falhas e o tempo acumulado ultrapassam os valores correspondentes ao ensaio seqüencial truncado; para equipamentos muito bons ou muito ruins, tem-se que executar o ensaio até o valor máximo, de tempo acumulado ou número de falhas, para chegar a uma conclusão.

Figura 6-24 – Vantagens e desvantagens entre ensaios seqüências e pré-fixados (baseado em [48]).

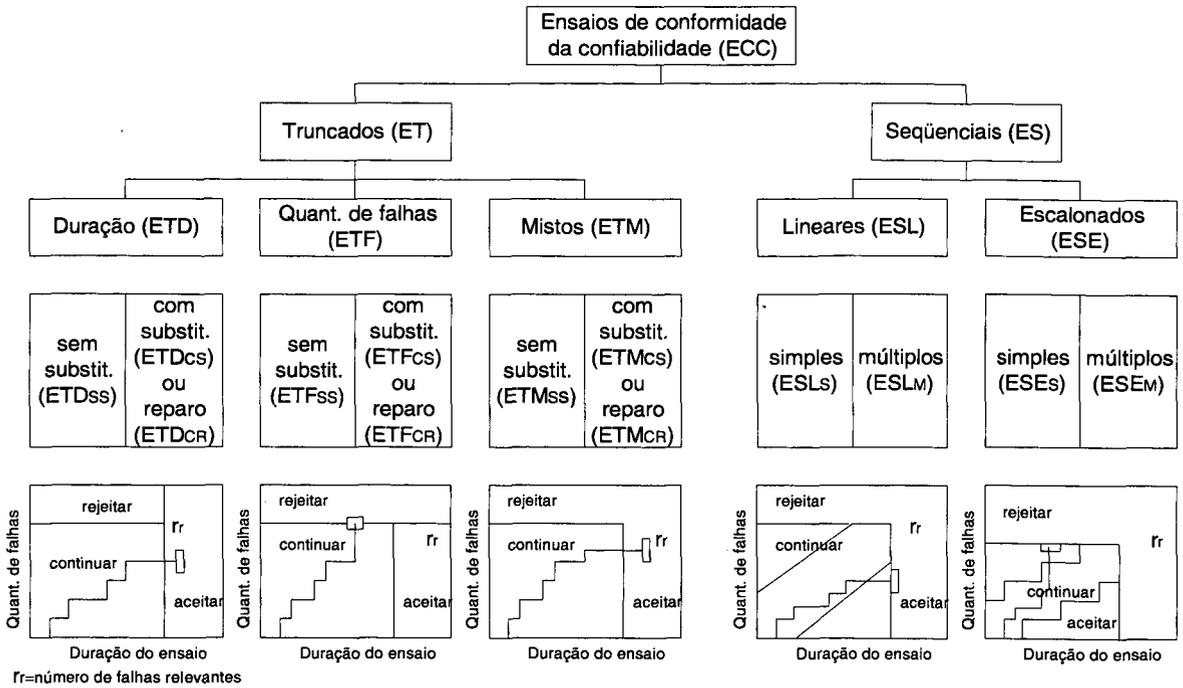


Figura 6-25 – Tipos de ensaios de conformidade da confiabilidade (baseado em [60]).

Plan o nº	Tipo	Características do plano		Duração para aceitar						Riscos verdadeiros % (NBR / MIL)		
				NBR 9325 Múltiplos θ_0			MIL STD 781 Múltiplos θ_1			$m = m_0$	$m = m_0$	
		Valor nominal	D_m θ_0 θ_1	decisão (td) p/ $\theta = \theta_0$	mínima (r=0)	truncam ento (t*)	decisão (td) p/ $\theta = \theta_0$	mínima (r=0)	truncam ento (t*)	α	β	
1	Riscos normais	10	10	1,5	17,3	4,40	33,0	25,95	6,60	49,5	11,5	12,5
2				5,1	2,20	10,3	10,2	4,40	20,6	12,8	12,8	
3				2,0	1,25	3,45	6,0	3,75	10,35	11,1	10,9	
4				5	0,6	0,55	1,25	-	-	-	12,4	13,0
5		20	20	1,5	7,6	2,79	14,6	11,4	4,19	21,9	22,7	23,2
6				2	2,4	1,40	4,87	4,8	2,80	9,74	22,3	22,5
7				3	1,1	0,89	1,50	3,42	2,67	4,50	18,2	19,2
8	Altos riscos	30	30	1,5	3,4	2,10	4,53	5,1	3,15	6,80	31,9	32,8
9				2	1,3	0,86	2,25	2,6	1,72	4,5	29,3	29,9
10				35	40	1,25	5,0	2,0	8,25	-	-	-

Figura 6-26 – Planos de ensaios seqüenciais, considerando-se distribuição exponencial (fonte NBR 9325 e MIL STD 781).

Os planos de ensaios são caracterizados, basicamente, pelos seguintes parâmetros:

θ_0 = Valor aceitável para a MTBF, corresponde à hipótese nula (H0);

θ_1 = Valor inaceitável para a MTBF, corresponde à hipótese alternativa (H1);

α = Risco do produtor (fabricante), corresponde à probabilidade de rejeição do item quando o valor verdadeiro (θ), é igual a θ_0 , ou seja rejeitar um produto bom;

Plano nº	Tipo	Características do plano			Limite de tempo múltiplos de θ_0	Número máximo de falhas	Riscos verdadeiros %	
		Valor nominal		D_m $\frac{\theta_0}{\theta_1}$			$m = m_0$	$m = m_0$
		α	β				α	β
1	Riscos normais	10	10	1,5	30,0	37	11,5	12,5
2				2	9,4	14	12,8	12,8
3				3	3,1	6	11,1	10,9
4				5	1,10	3	12,4	13,0
5		20	20	1,5	14,1	18	22,7	23,2
6				2	3,9	6	22,3	22,5
7				3	1,46	3	18,2	19,2
8	Altos riscos	30	30	1,5	5,3	7	31,9	32,8
9				2	1,84	3	29,3	29,9
10		35	40	1,25	6,7	8	36,3	39,7

Figura 0-27 – Planos de ensaios com duração e / ou número de falhas pré-fixado, válido para distribuições exponenciais (NBR 9325).

β = Risco do consumidor (usuário, cliente), corresponde à probabilidade de aceitação do item quando o valor verdadeiro (θ), é igual a θ_1 , ou seja aceitar um produto ruim;

d = Taxa de discriminação (ou relação de projeto), definida por $d = \frac{\theta_0}{\theta_1}$, valor adimensional. Adicionalmente, os planos de ensaio são plenamente definidos quando são estabelecidas as seguintes condições:

- Quantos itens (amostras) ensaiar;
- Por quanto tempo e ou quantidade de falhas;
- Em quais condições (com ou sem substituição ou reparo);
- Com quais critérios de caracterização das falhas.

Cada um dos ensaios de tempos ou número de falhas fixo possui curvas características com probabilidade de aceitação em função de θ e curvas com o tempo esperado dos ensaios.

No planejamento de um ensaio de conformidade da confiabilidade, deve-se escolher um plano seqüencial ou fixo, de acordo com os riscos α e β (produtor e consumidor) e a taxa discriminação d entre os valores de θ , aceitável θ_0 e inaceitável θ_1 .

Assim num plano onde $\alpha = 10\%$, $\beta = 10\%$ e $d = 2$, o produtor tem um risco de 10% de ter seus produtos rejeitados, quando na verdade eles estão bons e o consumidor

tem um risco de 10% de aceitar produtos ruins como se estivessem bons. Um lote onde $\theta = \theta_0$, tem a probabilidade de 90% de ser aceito como bom, enquanto um lote onde $\theta = \theta_1$ tem 10% de probabilidade de ser aceito como bom.

Quanto maior o valor de θ menor a probabilidade de rejeição de um lote bom. Quanto menor o valor de d mais criterioso é o ensaio, exigindo no entanto mais horas de ensaio até uma decisão.

6.8.4 PLANEJAMENTO DE ENSAIOS DE CONFIABILIDADE

A elaboração de um procedimento de ensaio segue basicamente os seguintes passos, verifique Figura 6-28:

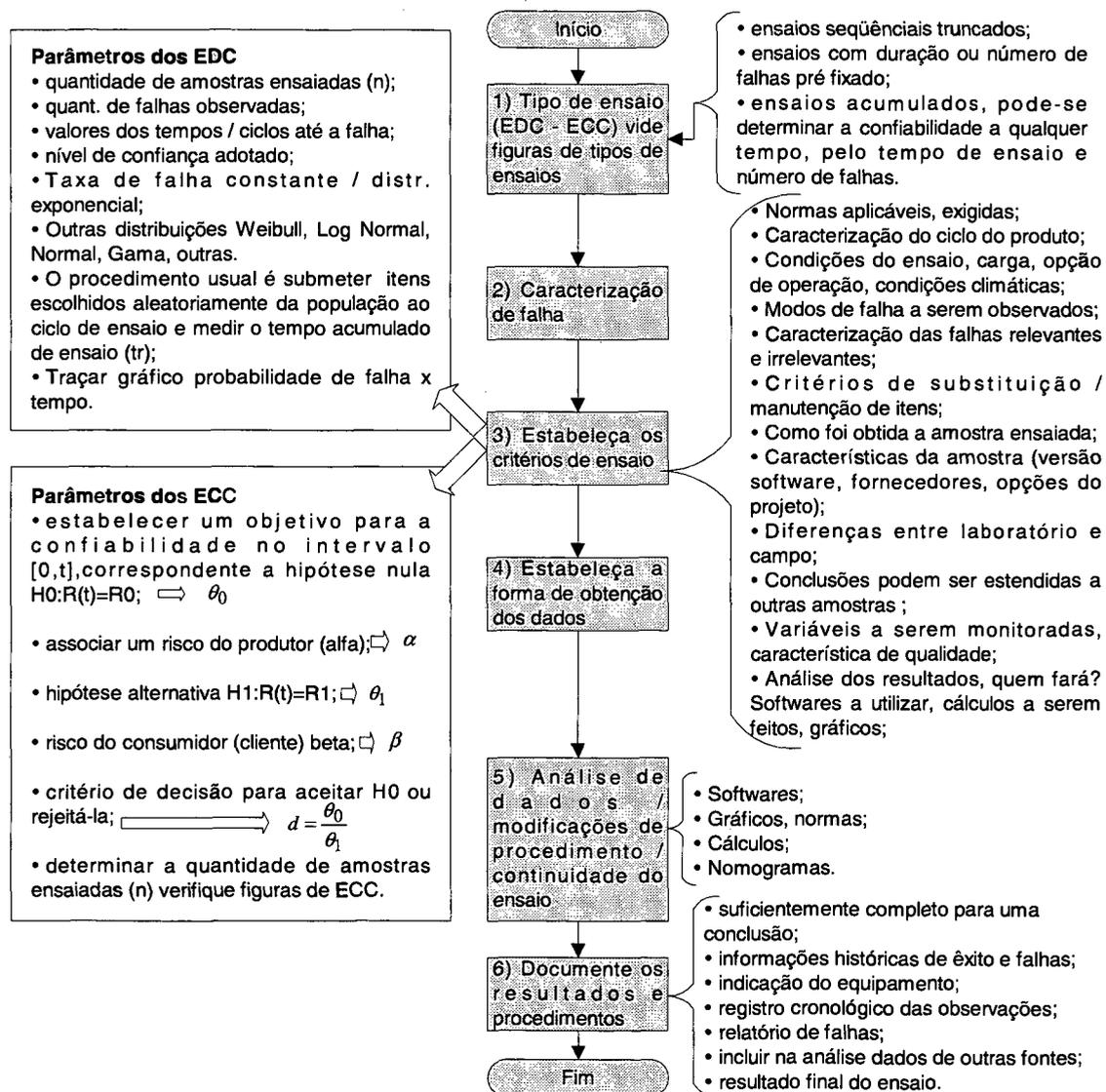


Figura 6-28 – Procedimentos para ensaios de confiabilidade.

1. Escolha do tipo de ensaio (EDC – ECC), para isto pode-se utilizar as Figura 6-22 e Figura 6-25;
2. Caracterização de falha e do parâmetro a ser monitorado como indicativo de falha;
3. Estabelecimento dos critérios de ensaio, entre eles, a permissão ou não para substituições e manutenções.
4. Estabeleça a forma de obtenção dos dados, vai-se utilizar algum recurso para acelerar o ensaio? Qual o tempo esperado de ensaio?
5. Análise dos dados, de preferência com o uso de algum software para cálculos de confiabilidade. Dados muito dispersos dos demais devem ser investigados com respeito a possíveis causas. Procure separar a análise por modo de falha, sempre que possível.
6. Padrões de relatórios de confiabilidade devem ser estabelecidos. Pode-se tomar por base os passos aqui apresentados no planejamento geral de ensaios.

6.8.5 ESTUDO DE CASO DE UM ENSAIO DE CONFIABILIDADE

Este estudo de caso foi realizado no “Centro de inovação em produtos (CIPd)” da “Fundação CERTI” (vide capítulo 3), uma organização de P&D situada no campus da UFSC. Esse exemplo segue os passos do planejamento de ensaios estabelecido pela Figura 6-7 e procedimentos específicos indicados na Figura 6-28, para ensaios de confiabilidade.

PASSO 1 – CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA: Determinado cliente da CERTI, na iminência de adquirir um grande lote de leitoras de código de barras, quer determinar se o lote protótipo apresenta as características de confiabilidade especificadas. O fornecedor especificou um MTBF (*mean time between failure*) de 1 milhão de ciclos.

PASSO 2 – EQUIPE MULTIDISCIPLINAR: Uma equipe composta de um projetista mecânico, um eletrônico, um especialista em software, um técnico de laboratório além do gerente de ensaio foi formada para planejar o ensaio do produto.

PASSO 3 – IDENTIFIQUE PONTOS FRÁGEIS: O diagrama de blocos do produto foi dividido nos seguintes blocos básicos: 1) Acionamento; 2) Leitura; 3) Decodificação; 4) Controle digital; 5) Interface homem / máquina; 6) Interface de comunicação; 7)

Suporte / Fiação e 8) Alimentação. Com o diagrama de blocos e considerando-se os parâmetros críticos, construiu-se uma árvore de falhas. A Figura 6-29 mostra parte dessa árvore de falhas.

Na busca de um parâmetro de ensaio que determinasse o bom funcionamento do equipamento, estabeleceu-se que o “índice de rejeições de leituras – IRL” seria a medida mais adequada, já que este sintetizava o correto funcionamento de todas as partes envolvidas: mecânica, eletrônica e software. O valor máximo de 5% de IRL foi estabelecido, além do qual é caracterizada a falha.

PASSO 4 – ESTRATÉGIA DE ENSAIO – NÍVEL DE MONTAGEM: Optou-se por ensaiar o produto como um todo, já que a separação de determinadas partes iria encarecer os ensaios e estender os seus prazos.

A unidade de tempo nesse caso é a quantidade de ciclos do equipamento. Entendendo-se como um ciclo, a leitura completa do código de barras de um documento.

PASSO 5 – TIPO DE ENSAIO: Já que o parâmetro a ser determinado é de confiabilidade e tratando-se de um produto pronto, optou-se por um ensaio de determinação da

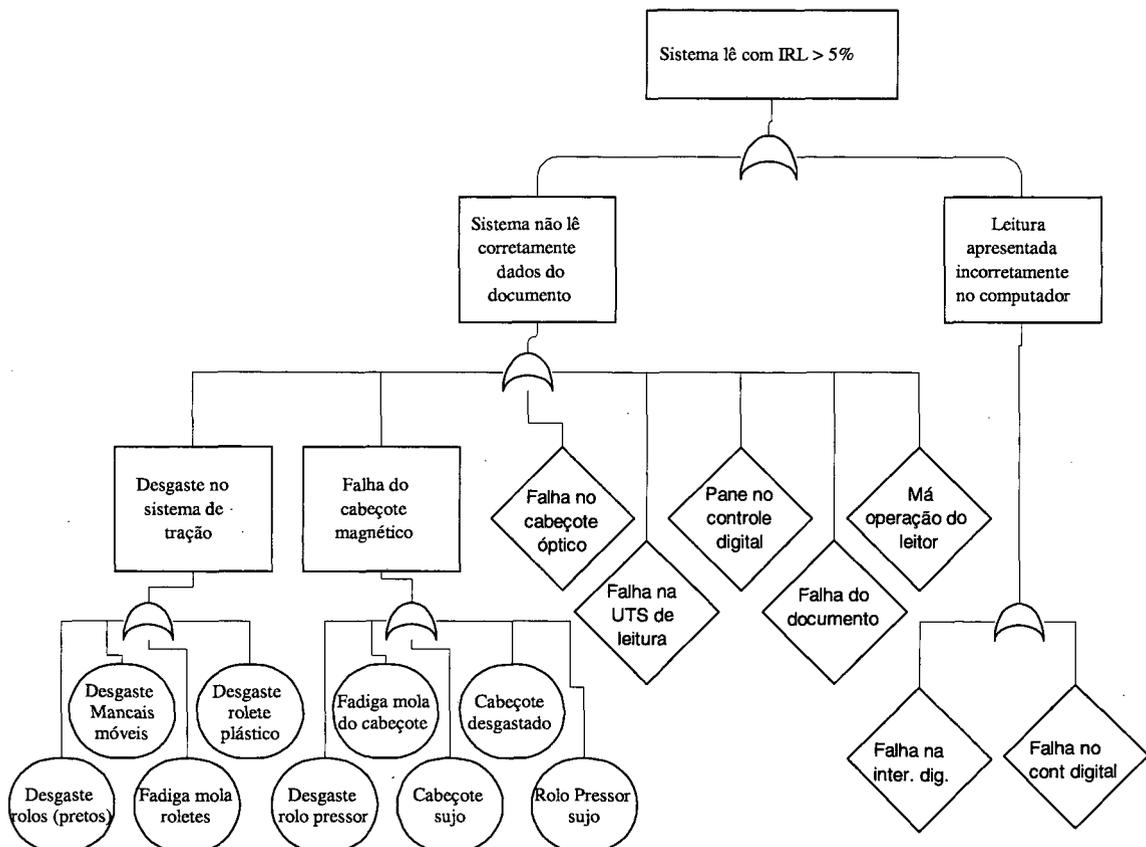


Figura 6-29– Parte da árvore de falhas da leitora de código de barras.

confiabilidade.

PASSO 6 – NORMAS CARACTERÍSTICAS: Nesse caso, nenhuma norma específica de planos de ensaios foi utilizada, já que nos ensaios de determinação da confiabilidade, deve-se fazer a estimativa dos parâmetros de forma pontual. A norma NBR 9320 apesar de pouco aplicada a ensaios de determinação da confiabilidade, foi utilizada como orientação geral.

PASSO 7 – TAMANHO DA AMOSTRA: Nesse caso, não se teve oportunidade de determinar o número de amostras para o ensaio. Tinha-se sete amostras para ensaio, nas quais pôde-se efetuar manutenções corretivas e preventivas ao longo do ensaio.

PASSO 8 – PROCEDIMENTO DE ENSAIO:

- a) O ensaio de confiabilidade escolhido foi um ensaio de determinação da confiabilidade incompleto (EDC) com censura múltipla. A razão para o uso de um EDC foi de conhecer mais a respeito do produto, conhecimento este que é mais intenso com a determinação da distribuição de falhas do produto e que certamente será utilizada para outros fins, tais como estabelecimento de períodos de garantia e manutenção preventiva. Também pode ser usado para melhorar a confiabilidade através da realimentação do projeto.
- b) Procurou-se no início do ensaio monitorar o maior número possível de variáveis, que pudessem de alguma maneira influir no IRL. Assim foram monitorados parâmetros tais como: tensão de alimentação, temperatura do regulador de tensão da fonte, temperatura do microprocessador, velocidade de passagem do documento, temperatura do motor, rotação do motor e continuamente o ensaio era interrompido para verificar o desgaste das principais peças do sistema de tração mecânica do documento.
- c) A quantidade de falhas estabelecida foi de no mínimo 5 falhas, já que a quantidade de amostras era pequena.
- d) A execução manual de mais de 1 milhão (a MTBF especificada) de ciclos, no tempo de um operador normal, levaria muito tempo. Assim foi construído um dispositivo que simulava a passagem de documentos, ininterruptamente, um após o outro. O dispositivo em nada alterava a operação normal do produto, preservando os modos de falha. Portanto conseguiu-se encurtar o

tempo de ensaio apenas aumentando-se a frequência dos ciclos, sem necessidade de recorrer a um ensaio acelerado.

PASSO 9 – BANCADA DE ENSAIO: A bancada de ensaios foi elaborada baseando-se nos sistemas de automatização VXI da National Instruments e software LabView.

PASSO 10 – BALANÇO DE INCERTEZAS: As maiores incertezas estão relacionadas à estimativa da MTBF, a partir de poucas unidades de ensaio. A pequena quantidade de unidades determina intervalos de confiança demasiadamente largos.

PASSO 11 – ENSAIOS PRELIMINARES: Ensaios preliminares mostraram a adequação das soluções adotadas e coerência dos resultados obtidos, bem como comprovaram o funcionamento do software elaborado para aquisição de dados.

PASSO 12 – EXECUÇÃO DOS ENSAIOS: Os ensaios transcorreram normalmente, e as conclusões só puderam ser feitas após o término dos ensaios. No entanto, os resultados preliminares já demonstravam falhas no produto, em nível superior ao esperado. Apesar dos resultados preliminares já indicarem falhas, o ensaio foi feito até o fim, para a elaboração de um laudo completo do produto.

PASSO 13 – ANÁLISE PARCIAL DOS DADOS: Durante a execução do ensaio verificou-se que alguns parâmetros que estavam sendo monitorados, tais como a temperatura do regulador DC da fonte, a tensão de alimentação e outros, não tinham nenhuma influência no IRL.

PASSO 14 – ANÁLISE DOS DADOS E FALHAS: Após análises parciais dos dados obtidos, chegou-se a conclusão que os dados disponíveis já eram suficientes para encerrar os ensaios.

A Figura 6-30 mostra os dados obtidos do ensaio de laboratório das sete amostras. Na figura pode-se observar o estado de suspensão “S” ou falha “F” do produto, o número de ciclos em que ocorreu, a diferença de ciclos para a falha anterior e o tipo de intervenção de manutenção necessária.

As primeiras análises dos dados levaram à verificação de dois modos de falhas, que ocasionavam a elevação do IRL além do limite de 5%:

- O primeiro modo de falha era devido ao desgaste dos mancais dos eixos móveis dianteiros, que determinou a troca dos mesmos. A Figura 6-31 separa os dados relativos à troca do mancal;

Estado	Ciclos	Unidade	Difer. p/ Anterior	Ação corretiva	Estado	Ciclos	Unidade	Difer. p/ Anterior	Ação corretiva
F	205.000	5093		Limpeza	F	669.000	5085	12.000	Troc. buchas
F	246.000		41.000	Limpeza	S	1 milhão		331.000	
F	301.000		55.000	Limpeza	F	278.000	5177		Limpeza
F	345.000		44.000	Limpeza	F	402.000		124.000	Limpeza
F	487.000		142.000	Troc. mancal	F	413.000		11.000	Troc. mancal
S	550.000		63.000		F	424.000		11.000	T man E trás
F	647.000	5152		Limpeza	F	480.000		56.000	Limpeza
F	694.000		47.000	Limpeza	S	640.000		160.000	
F	720.000		26.000	Limpeza	F	304.000		Troc. mancal	
S	1 milhão		280.000	Troc. mancal	F	331.000	5142	27.000	Limpeza
F	257.000	5085		Limpeza	S	480.000		149.000	
F	301.000		44.000	Limpeza	S	811.000	5106		Troc. mancal
F	305.000		4.000	Troc. mancal	F	270.000	5076		Limpeza
F	657.000		352.000	Limpeza	S	480.000			

Figura 6-30 – Dados obtidos dos ensaios de confiabilidade das máquinas leitoras de códigos de barras.

Modo de falha desg. mancal		
Estado	Ciclos	Unidade
F	304.000	5142
F	305.000	5085
F	413.000	5177
F	487.000	5093
* S	811.000	5106
* S	1 milhão	5152

* Pontos excluídos da análise considerados outliers

Figura 6-31 – Dados das falhas que exigiram a troca do mancal.

- O segundo modo de falha era sujeira acumulada nos rolos de tração e na cabeça de leitura. Essa sujeira em parte era dos próprios documentos lidos e também devido ao desgaste do material dos rolos de tração. Observou-se também que, as primeiras manutenções para limpeza, eram mais espaçadas das subseqüentes, o que também caracteriza um modo de falha diferente, que não será aqui analisado.

Assim tem-se um modo de falha que exige modificações de projeto (primeiro, desgaste do mancal) e um modo de falha que a princípio, poderia ser eliminado com manutenções preventivas (segundo).

A) Modo de falha, desgaste do mancal

Analisando o desgaste do mancal resolveu-se, após a análise de vários gráficos, para diferentes distribuições, excluir da análise os dois pontos de suspensão, considerados *outliers*, que poderiam ser explicados através de uma análise mais

cuidadosa dos materiais empregados, processos produtivos, fornecedores etc (dados que não se teve acesso, nem tempo para uma pesquisa mais detalhada). A distribuição que melhor se adaptou aos dados foi a Log-Normal, conforme mostra a Figura 6-32. Utilizou-se na análise o software Weibull 6 da empresa Reliasoft [36], no método da máxima verossimilhança MLE, com limites de confiança de 90%.

Da análise dos dados obtém-se uma vida média (MTBF) de 380 mil ciclos (intervalo de confiança I.C. de 90% - 460mil a 310mil) para o qual tem-se uma confiança de 45% (I.C. 90% - 17% a 76%), ou seja, 55% dos produtos já teriam falhado com 380 mil ciclos. A probabilidade de a leitora suportar 1 milhão de ciclos é praticamente nula. Sendo que, para ter-se 90% de confiança que a leitora não ira falhar, a troca dos mancais deveria ser feita com 270 mil ciclos (I.C. 90% - 200mil a 370mil). Ou melhor, sendo mais rigoroso e adotando o limite inferior do I.C., a troca passa a ser feita com 200 mil ciclos.

B) Modo de falha, sujeira nos rolos de tração

Na análise do outro modo de falha de sujeira nos rolos de tração utilizou-se os dados da Figura 6-30, coluna diferenças para a anterior, obtendo-se 15 falhas (caracterizadas como ação corretiva limpeza) e 5 suspensões (ações corretivas em branco). Observe-se que as manutenções iniciais mais espaçadas foram retiradas da análise. A Figura 6-33 mostra separadamente as falhas relacionadas com sujeira nos rolos de tração.

Novamente foi utilizado o software Weibull 6 da Reliasoft, no qual foi modelada uma distribuição Weibull 2 parâmetros utilizando-se o método MLE . Obteve-se uma vida média de 150mil ciclos (I.C. 90% 86mil a 260mil) para a qual se tem 32% de confiança (I.C. 90% - 18% a 48%), ou seja 68% dos produtos já teriam falhado com 150mil ciclos. Para ter-se 90% de confiança que não haverá falha por falta de limpeza, a manutenção deve ser feita com 7 mil ciclos (I.C. 90% - 2mil a 22mil). Considerando-se o limite inferior as manutenções teriam de ser feitas a cada 2 mil ciclos, ou seja aproximadamente a cada semana de uso normal, o que inviabiliza a operação.

PASSO 15 – DOCUMENTAÇÃO E CONCLUSÕES DO ESTUDO DE CASO:

Concluiu-se que o lote protótipo de leitoras de códigos de barra tem confiabilidade muito abaixo da especificada.

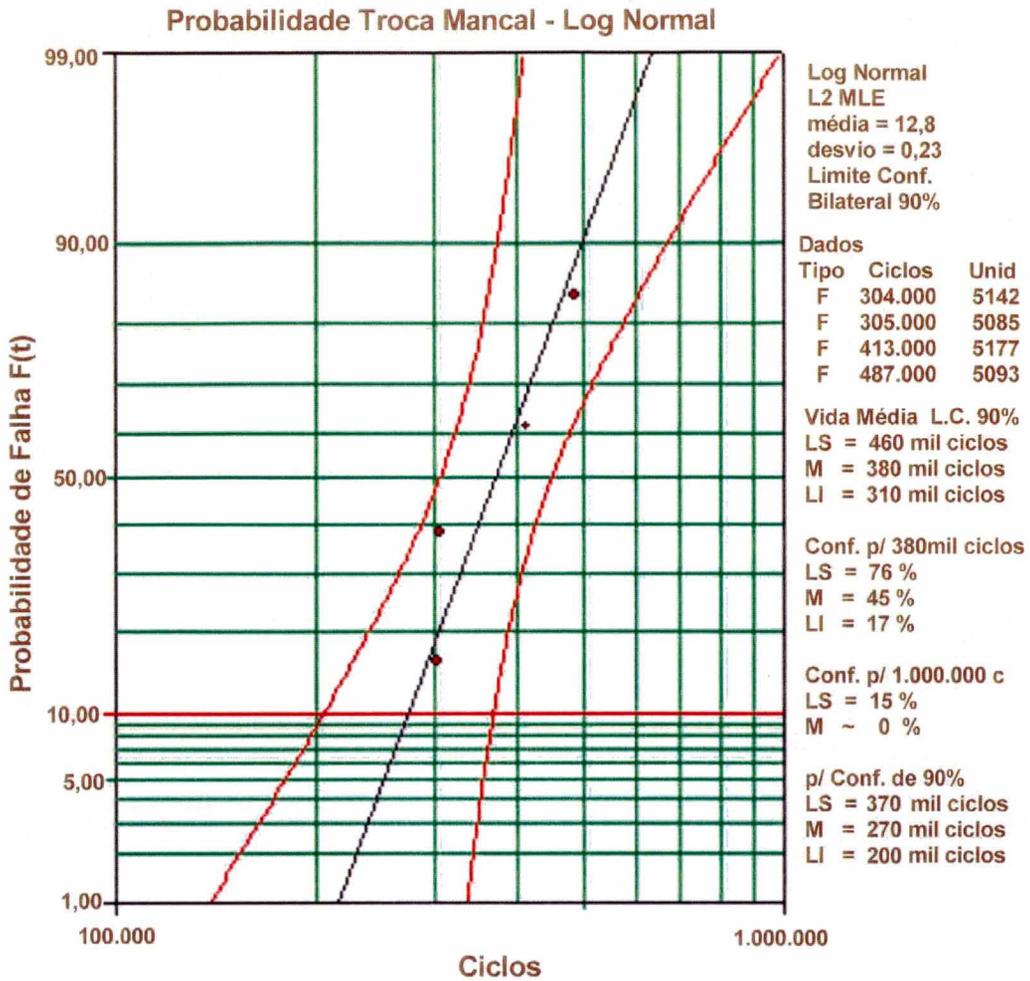


Figura 6-32 – Distribuição Log-normal modelada para os dados da troca do mancal.

Modo de falha sujeira nos rolos de tração								
Estado	Difer. p/ Anterior	Unidade	Estado	Difer. p/ Anterior	Unidade	Estado	Difer. p/ Anterior	Unidade
F	41.000	5093	F	12.000	5085	F	47.000	5152
F	55.000		S	331.000		F	26.000	
F	44.000		F	124.000	5177	S	280.000	
F	142.000		F	11.000		F	44.000	
S	63.000		F	11.000		F	4.000	
F	27.000	5142	F	56.000	5085	F	352.000	
S	149.000		S	160.000				

Figura 6-33 – Dados das falhas relacionadas com sujeira nos rolos de tração.

O problema foi resolvido estudando-se o material do mancal e substituindo-o por outro mais resistente ao desgaste. Com isto, eliminou-se também o problema de acúmulo de sujeira, que exigia manutenções periódicas para limpeza. Como a quantidade de unidades para ensaio era restrita, assim como o tempo disponível, os limites de confiança ficaram muito amplos, o que poderia levar a contestações se os

resultados não fossem tão abaixo dos esperados. Ensaios de confirmação foram efetuados e comprovaram a MTBF esperada e a eficácia das modificações de projeto.

6.9 ENSAIOS DE MANTENABILIDADE

A manutenção é executada em um produto ou componente, em função de uma falha, ou como uma medida preventiva para prevenir uma falha esperada. Manutenibilidade é a característica de projeto que determina fácil acesso, precisão, oportunidade e ações econômicas de manutenção.

Dado que essa característica é multidimensional, ela tem numerosas formas de medição. A manutenibilidade pode ser medida em termos da combinação de tempos decorridos, horas de trabalho e taxas, custos de manutenção, frequência e relevantes fatores logísticos de suporte. Essas medições facilitam quantificar a manutenibilidade de um sistema. O objetivo é influenciar o projeto e produção/manufatura do produto, para que sejam efetivamente e eficientemente suportáveis.

A mesma classificação usada para ensaios de confiabilidade, aplica-se a ensaios de manutenibilidade, tendo-se assim: Ensaios de confirmação da manutenibilidade (ECM) e Ensaios de determinação da manutenibilidade (EDM).

São elaborados e executados pela equipe de projeto, geralmente, nas fases de projeto preliminar ou detalhado.

6.9.1 MEDIÇÕES DAS MANUTENÇÕES CORRETIVAS E PREVENTIVAS

A manutenibilidade é uma característica de projeto, freqüentemente medida em termos do tempo requerido para executar a manutenção. As medições mais comuns dos parâmetros de manutenção são definidas a seguir na Figura 6-34.

Destaca-se o tempo médio de manutenção ativa \bar{M} , que sintetiza, sem os atrasos logísticos (normalmente difíceis de quantificar), o tempo médio que o produto ficará fora de operação, seja por manutenções preventivas ou corretivas.

A manutenção corretiva é executada em função da interrupção do funcionamento de um produto ou serviço, causada por uma falha inesperada. Quanto maior a necessidade de um tempo curto de manutenção, maior ênfase deve ser dada na

Parâmetro	Símbolo	Definição	Fórmula de cálculo	Sub-parâmetros / parâmetros derivados
Tempo Médio das Manutenções Corretivas	$\overline{(Mct)}$ (MTTR)	É a composição das médias aritméticas de várias ações de manutenção (preventiva ou corretiva) ao longo da vida do produto. Inclui somente o tempo fora de operação gasto como resultado da execução da manutenção. Intervalos de tempos administrativos e logísticos não estão incluídos.	$\overline{Mct} = \frac{\sum (\lambda_i)(Mct_i)}{\sum \lambda_i}$ $MTBF = \frac{1}{\lambda} = MTBM_u$	λ_i = taxa de falhas do i-ésimo elem = $\frac{\text{número de falhas}}{\text{tempo total de oper do sist}}$ Mct_i = tempo de correção do i-ésimo elemento do sistema $MTBM_u$ = tempo médio entre manutenções não programadas
Tempo Médio de Manutenção Preventiva	$\overline{(Mpt)}$		$\overline{Mpt} = \frac{\sum (Mpt_i)(fpt_i)}{\sum fpt_i}$ $MTBMs = \frac{1}{fpt}$	fpt_i = taxa de manut. prev do i-ésimo elem = $\frac{\text{número de ações preventivas}}{\text{tempo total de oper do sist}}$ Mpt_i = tempo de manut. preventiva do i-ésimo elemento do sistema $MTBMs$ = tempo médio entre manutenções programadas
Média do Tempo Ativo de Manutenção	$\overline{(M)}$	É função da média dos tempos das manutenções preventivas e corretivas e das suas frequências relativas.	$\overline{M} = \frac{(\lambda)(\overline{Mct}) + (fpt)(\overline{Mpt})}{\lambda + fpt}$	λ = taxa de manutenção corretiva = MTBF fpt = taxa de manutenção preventiva
Tempo inoperante do sistema devido a manutenção	MDT	Engloba o tempo de manutenção ativa (para ambas corretiva e preventiva), mas também os tempos administrativo e logístico.	$MDT = \overline{M} + ADT + LDT$	ADT = atrasos administrativos – ad ministrative delay time LDT = atrasos logísticos – log istics delay time
Tempo Máximo Ativo de Manutenção Corretiva M_{max}	M_{max}	Representa o limite superior em termos de percentagem de tarefas de manutenção, que podem ser executadas em um dado intervalo de tempo.	$M_{max} = \text{anti log}[\log \overline{Mct} + Z\sigma_{\log Mct_i}]$ para o caso de distribuição log-normal	$\log \overline{Mct}$ = média dos log dos Mct_i Z = desvio padrão da correspondente % de M_{max} n = número de manutenções corretivas $\sigma_{\log Mct_i} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\log Mct_i)^2 - (\sum_{i=1}^n \log Mct_i)^2 / n}{n-1}}$
Tempo médio entre manutenções	MTBM	É função das manutenções corretiva e preventiva. As disponibilidades são parâmetros derivados.	$MTBM = \frac{1}{1/MTBM_u + 1/MTBMs}$	$A_0 = MTBM / MTBM + MDT$ = disponibilidade operacional $A_u = MTBM / MTBM + M$ = disponibilidade ativa $A_i = MTBF / MTBF + M_{ct}$ = disponibilidade inerente $MTBR$ = tempo médio entre substituições = específica peças de reposição

Figura 6-34 – Quadro resumo dos principais parâmetros das manutenções corretivas e preventivas.

manutenção corretiva. Um baixo tempo de diagnóstico, aliado com o conceito de remoção e troca, podem determinar um baixo tempo fora de operação para o sistema.

6.9.2 PLANEJAMENTO DE ENSAIOS DE MANTENABILIDADE

O processo de demonstração da manutenibilidade é basicamente a verificação do cumprimento de um elenco de requisitos qualitativos e quantitativos de projeto, a própria especificação destes requisitos é um pré-requisito necessário. Os requisitos iniciais do sistema são desenvolvidos, em função das necessidades do cliente, tais como: 1) O conceito de manutenção, 2) A identificação e priorização das medições de desempenho técnica, 3) O desenvolvimento das especificações do produto. Parâmetros iniciais tais como, parâmetros de confiabilidade (R , $MTBF$, λ), parâmetros de manutenibilidade ($MTBM$, MDT , \overline{M}_{ct} , \overline{M}_{pt} , MMH/OH , M_{\max}), disponibilidade (A_0, A_d, A_i), $MMH/OH =$ homens hora de manutenção por hora de operação, e outros veja na Figura 6-34, devem ser inicialmente especificados.

O objetivo da demonstração de manutenibilidade é selecionar um ou uma série de cenários operacionais, simular uma falha, acompanhada das necessárias ações de reparos e comparar os resultados obtidos com as especificações de \overline{M}_{ct} (ou \overline{M}_{pt} , MDT , ou \overline{M}_{\max} , etc), os requisitos devem ser encontrados.

A demonstração formal inclui a simulação de todas as ações de manutenção (isto é corretivas e preventivas), como a devida verificação, se as especificações iniciais de manutenibilidade foram alcançadas. Dois métodos de demonstração, assim como os ensaios de confiabilidade, são o método seqüencial e o método de amostra fixa.

Passos básicos para planejamento dos ensaios seqüenciais

A Figura 6-35 mostra os passos básicos para o planejamento de um ensaio seqüencial de manutenibilidade.

Critério para aceitação / rejeição

O tempos das tarefas (M_{ct_i}) são medidos e comparados com as especificações iniciais dos valores de \overline{M}_{ct} e M_{\max} . Quando o tempo de demonstração excede o valor especificado, o evento é anotado com uma linha vertical no gráfico, no outro

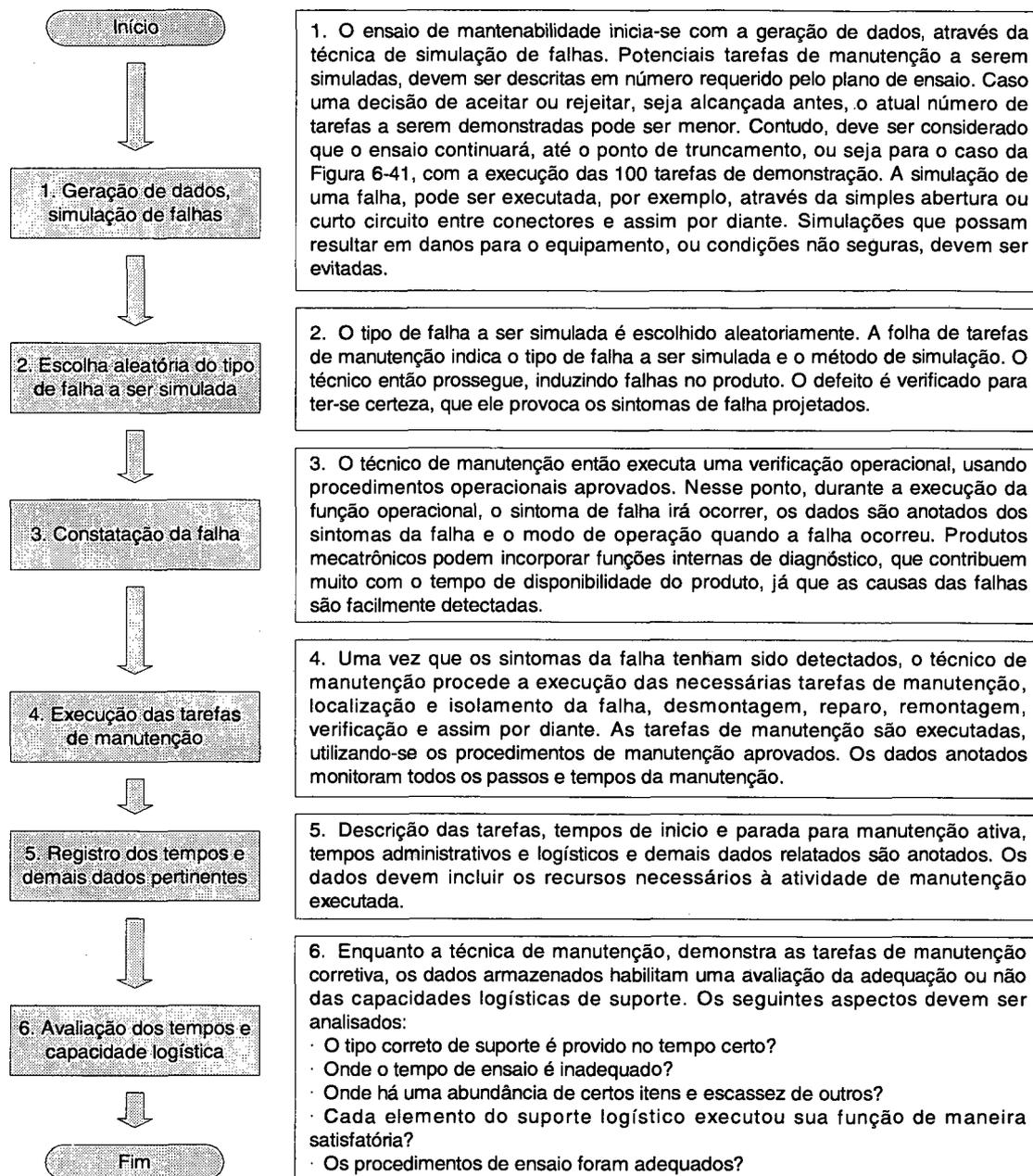


Figura 6-35 – Passos básicos no planejamento de um ensaio seqüencial de manutenibilidade.

caso o evento é anotado com uma linha horizontal no gráfico. O ensaio ira continuar até que as linhas traçadas do evento entrem na região de rejeição ou aceitação.

O ensaio seqüencial requer que ambos os critérios, \overline{Mct} e M_{\max} sejam alcançados antes do sistema ser completamente aceito. M_{\max} pode ser baseado em certezas de 90 ou 95 %, dependendo das especificações do sistema e do plano de ensaio selecionado.

Passos básicos para planejamento dos ensaios com número fixo de amostras

A Figura 6-36 exemplifica os passos para elaboração de um procedimento de ensaio, com as fórmulas para cálculo dos parâmetros.

Se todos os valores demonstrados são melhores que os valores especificados, seguindo os critérios definidos acima, então o sistema é aceito. Caso contrário, talvez um novo ensaio / ou novo projeto possa ser requerido, dependendo da seriedade do problema.

No caso do re-projeto ser requerido, possíveis áreas problemáticas são facilmente identificadas, por uma revisão cuidadosa e análise das informações obtidas. Tempos excessivos de manutenção irão indicar quais as áreas problemáticas.

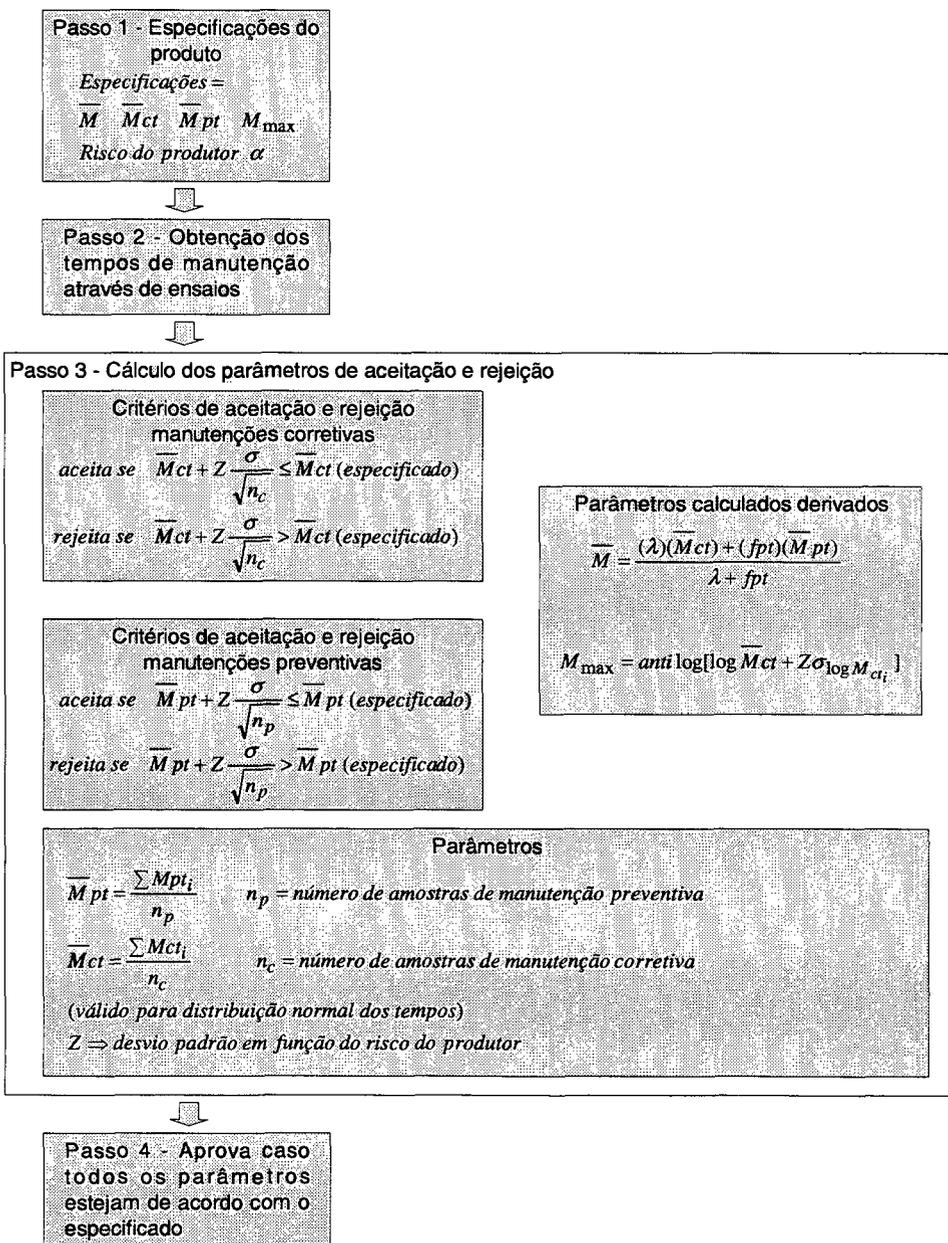


Figura 6-36 – Passos do método de demonstração da mantabilidade com número fixo de amostras.

Os resultados serão revisados e avaliados pelo engenheiro de projeto e engenheiro de manutenção, que determinarão ações corretivas.

6.10 ENSAIOS DE MANUTENÇÃO DA CONFIABILIDADE DA PRODUÇÃO

Trabalhadores não habilitados, desgaste de maquinário, ajustes errados, lotes ruins de peças e outros fatores de produção, podem degradar a confiabilidade do produto. Ensaios de manutenção da confiabilidade da produção são feitos para acompanhar qualquer degradação do produto, durante o período em que este for produzido.

Os ensaios de manutenção da confiabilidade da produção servem para minimizar problemas de confiabilidade da produção, fornecendo advertências ao longo do tempo e dados para ações corretivas. Os ensaios de manutenção da confiabilidade da produção podem ser periódicos ou contínuos durante a produção, em amostras ou em 100% dos produtos.

6.10.1 PLANEJAMENTO DE ENSAIOS DE MANUTENÇÃO DA CONFIABILIDADE DA PRODUÇÃO

Existem várias formas de fazer-se um ensaio de aceitação da confiabilidade da produção, as mais comuns são:

- a) **Repetição periódica dos ensaios de confiabilidade.** Deve-se atentar para o fato que, repetições dos ensaios, diminuem a probabilidade do produto passar nos ensaios. Por exemplo, um produto que tenha uma confiabilidade de 90%, caso tenha o seu ensaio de confiabilidade repetido seis vezes, terá apenas $(0,90)^6 = 53\%$ de probabilidade de passar nos seis ensaios. Os ensaios mais indicados são os ensaios de confirmação da confiabilidade, devendo-se escolher o plano de ensaio de acordo com os riscos admitidos.
- b) **Ensaio de todos os produtos,** como indica o nome, todos os produtos são submetidos a um número específico de horas de ensaio. A avaliação da produção é feita agregando-se os tempos de ensaio em função do número de defeitos, em gráficos similares aos usados nos ensaios seqüenciais.

A Figura 6-37 ilustra um gráfico de aceitação da qualidade da produção. No gráfico

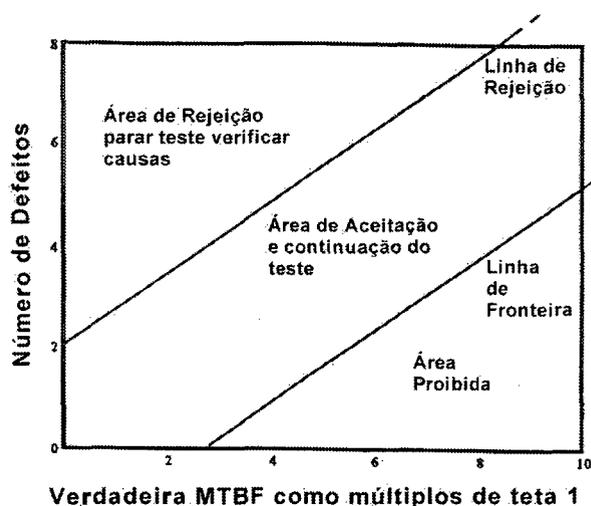


Figura 6-37 – Gráfico de um ensaio tipo seqüencial utilizado para aceitação da produção [61].

de aceitação da confiabilidade da produção o ensaio prossegue, caso os pontos estejam entre as duas linhas, linha de fronteira inferior e linha de rejeição. Caso os pontos caiam além da linha de rejeição, a produção deve ser interrompida e as causas descobertas. A linha de fronteira inferior não deve ser ultrapassada, os pontos devem permanecer sobre a linha até que novos defeitos façam com que os pontos subam.

O problema com esse tipo de ensaio é que caso o tempo total de ensaio das amostras seja pequeno, em relação à verdadeira MTBF, os produtos irão passar sempre. Por outro lado, caso os tempos sejam grandes, mesmo valores aceitáveis de MTBF serão rejeitados.

- c) O Controle Estatístico do Processo (CEP) (Statistical process control SPC)** tem sido usado para o controle de parâmetros críticos da produção. A teoria é que amostras da população, irão seguir uma distribuição normal, cuja média é a média da população. Assim 67% de todas as medições irão variar de um desvio padrão, para cima ou para baixo. Ou ainda, somente três medições em mil, são esperadas de exceder a três desvios padrões.

Existem várias formas de interpretação dos resultados, de acordo com o número de pontos fora dos limites estabelecidos. Maiores detalhes de planos de CEP podem ser encontrados em Montgomery [10].

Uma das medições mais comuns para efetuar-se um CEP é número de defeitos por unidade, mas taxa de falhas por hora também pode ser medida.

O uso da taxa de falhas em CEP pode apresentar desvantagens, tais como, a de necessitar-se tamanhos de amostras grandes o suficiente para detectar defeitos. Para produtos com taxas de falhas baixas, é impraticável uma amostra grande o suficiente. A medida defeitos por unidades pode ser adotada como unidade de medida para produtos de produção em larga escala, tais como: automóveis, aviões, produtos mecatrônicos etc.

6.11 ENSAIOS DE PRÉ-ENVELHECIMENTO

É conhecido que a maioria dos produtos sejam eletrônicos, eletromecânicos ou mecânicos apresentam uma quantidade desproporcional de falhas no período inicial de seu uso. A taxa de falhas inicial é alta e cai à medida que o produto entra em vida útil, quando a taxa de falhas é geralmente constante. Os ensaios de pré-envelhecimento visam, principalmente, detectar lotes onde os produtos apresentam tendência a manifestarem falhas latentes.

Consegue-se evitar que uma grande quantidade de produtos apresentem falhas quando já colocados no mercado. Evita-se assim, os altos custo de reposição e principalmente o comprometimento da marca.

Devem ser aplicados em amostras ou em 100% dos produtos, após a produção.

Em produtos mecatrônicos são mais aplicados às placas eletrônicas, utilizando-se normalmente um fator de aceleração, tal como a temperatura. No produto como um todo, são mais utilizados os ensaios funcionais (*run-in*), para verificação das funções do produto, ou eventualmente, o produto já possui um modo de teste interno que é ativado.

6.11.1 PLANEJAMENTO DE ENSAIOS DE PRÉ-ENVELHECIMENTO

Um dos maiores problemas associados com os ensaios de pré-envelhecimento é determinar exatamente por quanto tempo o ensaio deve se estender, levando-se em conta as necessidades de confiabilidade e os custos.

A determinação correta do tempo de ensaio pode ser feita através de ensaios de confiabilidade. Através desses, pode-se determinar graficamente qual o comportamento da distribuição da população anômala, em relação ao da distribuição

da população principal. A Figura 6-38 mostra graficamente o comportamento das duas distribuições, para um exemplo de transistores ensaiados até 300 °C.

Os tempos de ensaio estendem-se por longo tempo, exigindo o uso de algum fator de aceleração, normalmente, a temperatura. Assim consegue-se reduzir significativamente os tempos de ensaio de pré-envelhecimento. A Figura 6-39 ilustra os deslocamentos da população anômala e principal, com o aumento da temperatura de junção em circuitos integrados CMOS, conseguindo-se assim com pouco tempo de ensaio, eliminar os produtos pertencentes à população anômala, ou reduzi-los a percentagens aceitáveis.

Outras considerações em ensaios de pré-envelhecimento são as falhas prematuras ligadas a diversas causas, tais como: manufatura, transporte, condições ambientais etc. Estas falhas se manifestam como uma terceira distribuição, com tempos inferiores aos da distribuição anômala. Assim, logo nos primeiros instantes de ensaio, vários defeitos se manifestarão, devido às falhas prematuras mencionadas. Ao contrário da distribuição anômala, que possui sempre o mesmo mecanismo de falha, essa distribuição de falhas prematuras, apresenta uma coleção de defeitos aleatórios, geralmente, ligados à manufatura.

É praticamente impossível se eliminar todos os componentes anômalos, pelo ensaio de pré-envelhecimento e garantir que o sistema já está no período de vida útil. Por outro lado, é possível dizer que, por exemplo, somente 1% da população anômala permanece após o ensaio. Conhecendo-se o número de defeitos de campo aceitáveis para uma população, pode-se otimizar o ensaio e determinar o tempo

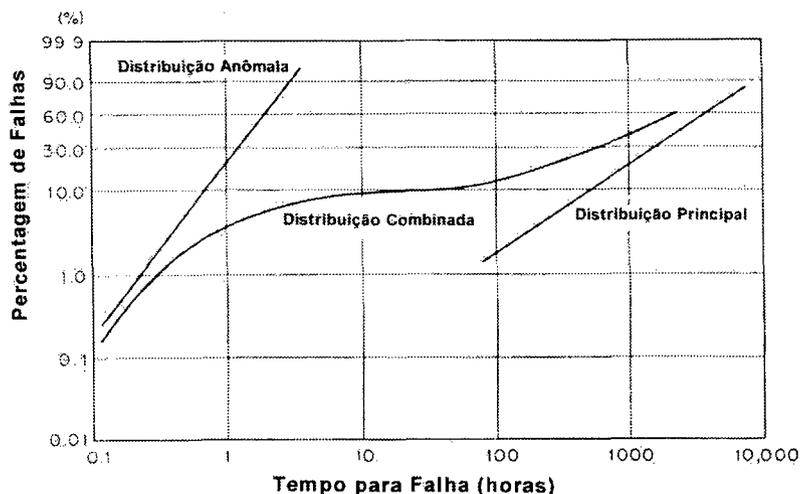


Figura 6-38 – Distribuições anômala e principal típicas para transistores testados a 300°C [62].

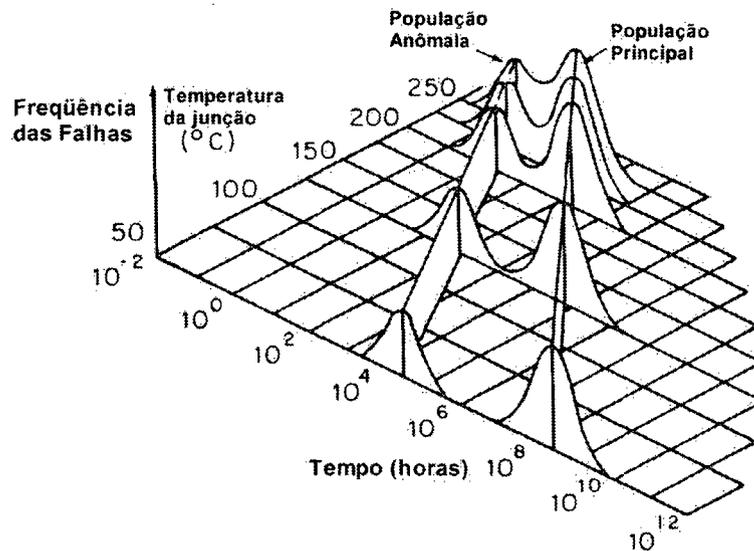


Figura 6-39 – Relação entre tempo para falha e temperatura encontrada em ensaios de circuitos integrados CMOS [62].

ótimo de ensaio de pré-envelhecimento.

É improvável que um ensaio otimizado de pré-envelhecimento conduza a tempos longos como, por exemplo, 24 dias. O mais provável é que os ensaios levem pouco tempo, ou desejavelmente, poucas horas.

A Figura 6-40 apresenta os passos para elaboração de um procedimento de ensaio de pré-envelhecimento. Entre os passos para o planejamento de um ensaio de pré-envelhecimento, os passos 5 e 6 requerem um pouco de trabalho matemático. Análises de falhas através de softwares (Weibull 6 [36]), também permitem o traçado de distribuições binodais, o que facilita muito o trabalho, no entanto deve-se ter cuidados especiais ao simplesmente aceitar os critérios assumidos pelo software. Com as curvas de falhas para a população anômala e principal traçadas pode-se determinar o número de horas necessárias de ensaio para eliminar-se a percentagem de falhas desejada, verifique Figura 6-38.

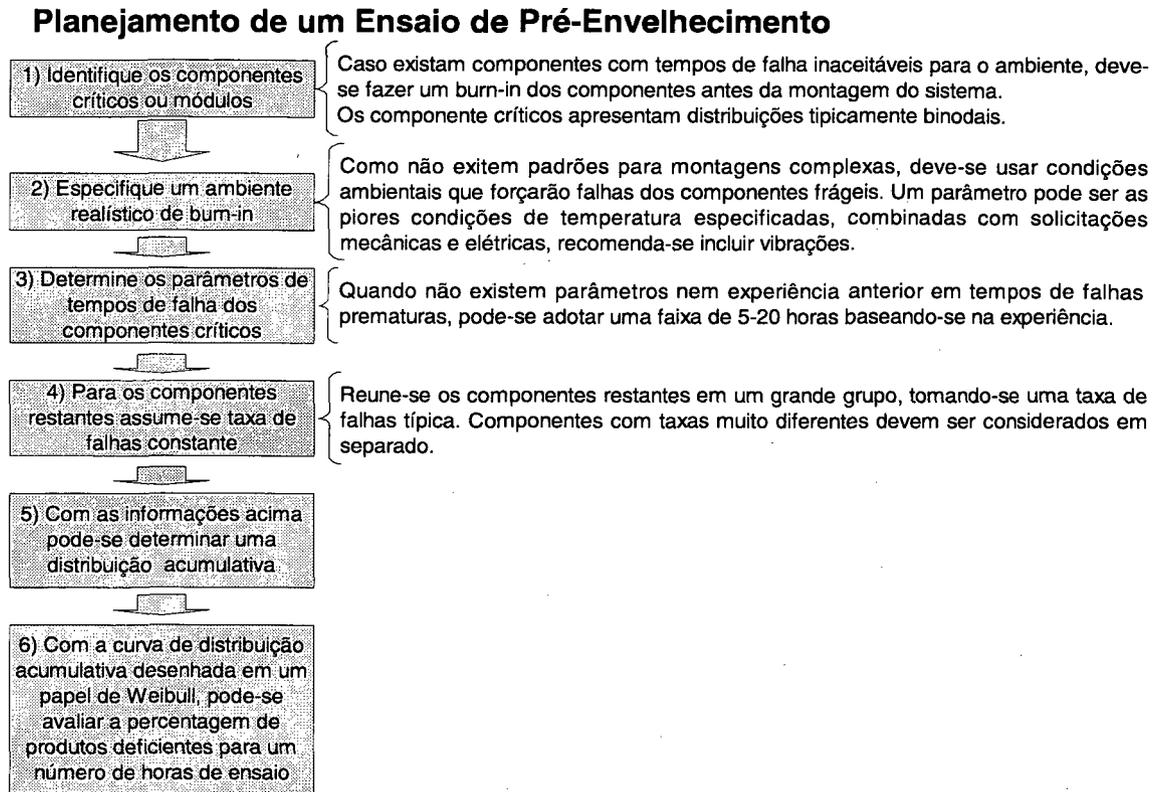


Figura 6-40 – Procedimentos para planejamento de um ensaio de pré-envelhecimento.

CAPÍTULO 7

CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir da premissa que “pode-se garantir a confiabilidade de um produto mecatrônico, caso o mesmo seja desenvolvido de forma sistematizada, enfatizando os ensaios, e dentro de uma empresa que dê condições para tal”; foram feitas pesquisas bibliográficas, estudos práticos em empresas e o acompanhamento do desenvolvimento de um produto mecatrônico com o intuito de sistematização e levantamento de todos os aspectos envolvidos, bem como a comprovação do acima exposto.

Apresenta-se neste capítulo de forma sistematizada, as principais conclusões, recomendações e observações colhidas ao longo do trabalho. Os aspectos visados nesse capítulo são os cinco objetivos específicos do trabalho: a) Confiabilidade pensada desde as fases iniciais do desenvolvimento; b) Especificidades dos projetos mecânico, eletrônico e de software; c) Ênfase nos ensaios; d) Aspectos metrológicos dos ensaios; e f) Identificar dentro da empresa os aspectos da confiabilidade.

Como forma de dar continuidade à linha de estudos que aqui se inicia, trabalhos de continuidade são apontados, visando um maior aprofundamento em alguns tópicos que são somente citados nesse estudo. Ressalta-se que esse trabalho é além de tudo, um trabalho de levantamento da problemática da confiabilidade no desenvolvimento de produtos mecatrônicos.

7.1 CONFIABILIDADE PENSADA DESDE AS FASES INICIAIS DO DESENVOLVIMENTO

A metodologia MEGACOM encadeia uma série de tarefas que sistematizam a busca da confiabilidade num projeto mecatrônico. Pôde-se verificar na prática que as ações indicadas na metodologia foram consideradas importantes, em 93% das tarefas propostas e em 68% dos ensaios.

Aspectos inovadores da metodologia MEGACOM:

1. Sistematizar ao longo das fases do desenvolvimento de um produto mecatrônico, quais as tarefas importantes para a confiabilidade;
2. Relacionar ensaios, documentos e ferramentas a serem aplicadas na execução das tarefas;
3. Propor tarefas específicas para as tecnologias mecânica, eletrônica e de software de acordo com as características de cada uma;
4. Enfatizar os ensaios a serem executados durante o desenvolvimento;
5. Propor mecanismos, principalmente na área de software, diferentes dos tradicionais, para melhoria da confiabilidade. Destacam-se os mecanismos de auto documentação de falhas, horas de uso e correção de falha.
6. Transpor as fases clássicas do projeto e tratar de tarefas relacionadas com a manutenção da confiabilidade durante a produção, assistência técnica e retirada do produto do mercado;

Pôde-se observar na prática, que as empresas visitadas não adotam efetivamente uma metodologia de desenvolvimento. A adoção de uma metodologia pode contribuir sobre maneira, para a melhoria da confiabilidade dos produtos desenvolvidos. Isso se comprova por dois exemplos:

- Uma das empresas visitadas apresentou falha do seu produto em campo, por não ter sido previsto, operação em ambientes úmidos. Uma pesquisa mais apurada na fase de projeto informacional, sobre as condições ambientais, poderia detectar o problema e determinar uma impermeabilização da parte eletrônica ou outra qualquer susceptível à umidade;

- O produto de uma outra empresa apresentou problemas de confiabilidade em um dos componentes eletrônicos usados. Ensaios acelerados ou não poderiam detectar a baixa confiabilidade do fornecedor ainda na fase de projeto preliminar. Por vezes, só perguntar os parâmetros de confiabilidade do fornecedor, basta para verificar qual a preocupação do mesmo a respeito.

Pode-se assim concluir que a confiabilidade dá-se ao longo do ciclo de vida de um produto, principalmente nas fases iniciais (projeto informacional), por pequenas tarefas que são implementadas, envolvendo ou não ensaios e não através de grandiosas tarefas e ensaios, envolvendo uma grande quantidade de parâmetros.

A confiabilidade não está, no caso de produtos mecatrônicos, somente relacionada com a confiabilidade dos componentes, mas principalmente com um projeto sistematizado levando-se em conta uma série de tarefas nos devidos tempos.

ALGUMAS CONSTATAÇÕES

- A metodologia contribui para a confiabilidade no sentido que força a documentação do projeto, contribuindo para o aspecto de tradição de soluções que anteriormente deram certo. Pode-se adotar com segurança soluções de projetos anteriores nos projetos atuais. Constatou-se que a documentação de projetos era um aspecto crítico nas empresas visitadas, que deve ser devidamente equacionado.
- A metodologia proposta é evolutiva, na medida que constitui uma base geral, que a empresa pode utilizar como referência. No entanto, a metodologia deve evoluir com o tempo e com a aplicação em diversos projetos. Cada projeto acrescenta novos aspectos, que podem ser explorados no sentido de aprimorar a metodologia. Também a evolução tecnológica acelera mudanças na metodologia e nas ferramentas disponíveis.
- A metodologia de projeto acaba agindo como um elemento de aglutinação dos esforços para a confiabilidade, que somente pela discussão dos seus aspectos, já produz resultados.
- Atualmente, as empresas visitadas não possuem uma tradição de especificação de dados de confiabilidade dos seus produtos. Esse

comportamento reflete-se nos próprios fornecedores, que não divulgam os dados de confiabilidade das peças, nem tão pouco são solicitados a fazer.

7.2 ESPECIFICIDADES DOS PROJETOS MECÂNICO, ELETRÔNICO E DE SOFTWARE

A Figura 7-1 apresenta uma síntese das principais tarefas recomendadas pela

ÁREA	PRINCIPAIS TAREFAS DA METODOLOGIA MEGACOM
GERAL	<ul style="list-style-type: none"> • Estabeleça critérios de confiabilidade do produto; • Estabeleça critérios de confiabilidade para os fornecedores; • Utilize uma metodologia de projeto; • Estabeleça uma política de confiabilidade da empresa; • Treine o pessoal nos aspectos da confiabilidade; • Disponibilize laboratórios com instrumentos adequados; • Treine o pessoal nos aspectos da metrologia; • Tenha critérios definidos e documentados para acompanhamento de projetos; • Preveja mecanismos de realimentação dos dados das assistências técnicas; • Preveja falhas dos operadores do produto; • Faça ensaios operacionais.
ELETRÔNICA	<ul style="list-style-type: none"> • Escolha componentes modernos de fornecedores confiáveis; • Faça um projeto eletrônico e de placa de CI considerando a EMI / EMC; • Projete redundâncias para itens críticos; • Utilize sensores confiáveis; • Estabeleça uma linha de componentes a serem utilizados nos produtos; • Faça um bom projeto de fonte de alimentação; • Preocupe-se com as dissipações de calor internas; • Projete mecanismos de recuperação de falhas, watch dogs; • Proteja os circuitos da umidade; • Faça testes climáticos para verificar adequação do projeto ao ambiente; • Cuide com as cargas estáticas nas montagens; • Faça ensaios de burn-in em placas montadas; • Acompanhe os processos de soldagem; • Faça ensaios de ciclos e choques térmicos; • Preveja mecanismos de proteção contra descargas atmosféricas (raios); • Faça ensaios óticos nos novos processos de montagem de placas; • Projete elementos de conexão elétrica confiáveis; • Cuidados com componentes grandes, tipo dissipadores sob efeito da vibração (ensaios de vibração); • Faça revisões de projeto periódicas.
MECÂNICA	<ul style="list-style-type: none"> • Escolha as melhores alternativas de projeto com base na confiabilidade; • Estabeleça e verifique critérios de tolerâncias para peças críticas; • Projete componentes redundantes para itens críticos; • Use critérios e orientações para facilitar a manufatura e montagem; • Projete uma boa embalagem para o transporte do produto; • Projete um gabinete a prova de choque mecânicos; • Faça ensaios de vibração; • Faça ensaios de fatores climáticos; • Proteja peças contra a corrosão; • Escolha processos de manufatura confiáveis; • Escolha fornecedores usando critérios de qualidade; • Faça revisões de projeto periódicas.
SOFTWARE	<ul style="list-style-type: none"> • Faça o projeto do software de forma modular; • Documente bem os softwares; • Preveja mecanismos de proteção contra falhas, watch dogs; • Preveja mecanismos redundantes; • Uniformize linguagens de programação e bibliotecas de software, use sempre que viável linguagens de alto nível; • Implemente mecanismos de contagens de tempo de uso e controle de falhas; • Projete mecanismos de recuperação de falhas; • Faça revisões de projeto periódicas.

Figura 7-1 – Síntese das principais considerações da metodologia MEGACOM.

metodologia MEGACOM. As tarefas foram escolhidas com base na opinião de especialistas das empresas visitadas, dados bibliográficos e observações das principais falhas cometidas pelas empresas no desenvolvimento dos produtos mecatrônicos.

Observa-se na prática a tendência de disponibilizar cada vez mais funções de software, para melhorar a confiabilidade dos produtos mecatrônicos. Por exemplo, é comum as empresas fazerem os devidos ajustes nos protótipos, a partir de modificações de software. Constatou-se na prática a implementação de leituras redundantes de sensores, ajustes de *time out*, prevenção de falhas, entre outros mecanismos para melhorar a confiabilidade por ajustes do software. Deve-se lembrar ainda que ferramentas mais elaboradas, tais como a inteligência artificial, podem expandir muito as possibilidades de melhorias.

7.3 ÊNFASE NOS ENSAIOS

Constatou-se que as empresas de uma maneira geral não conhecem os limites dos seus produtos, devido à pequena quantidade de ensaios realizados. Para fazer frente à demanda por confiabilidade, possuem um produto bastante robusto frente às solicitações. Uma forma de reduzir custos é conhecer os limites do produto através de ensaios, normalmente acelerados, que buscam determinar quais as partes viáveis para redução do custo. A Figura 7-2 ilustra o quadro atual das empresas visitadas com respeito aos nove tipos de ensaios descritos no capítulo 6.

Destaca-se também o pouco uso e conhecimento de normas de ensaio específicas. Normas internacionais de segurança, compatibilidade eletromagnética e confiabilidade começam a ter uma maior importância para expansão do comércio.

Os fatores ambientais devem ser bem avaliados quando de um novo projeto, pois estes acabam quase sempre, determinando condições de solicitação além dos limites de projeto, ocasionando falhas. Entre as principais causas dos problemas de confiabilidade, está a não adequação ao ambiente operacional.

Do estudo de caso sobre ensaios de confiabilidade pôde-se concluir:

1. Um bom planejamento dos ensaios com a caracterização dos objetivos, falhas, manutenções permitidas e paradas estratégicas para análise dos

TIPO DE ENSAIO	APLICAÇÃO NAS EMPRESAS VISITADAS	COMENTÁRIOS
Funcional	Muito aplicado	Utilizado como forma de testar todas as possibilidades de operação do produto. Iteração com o usuário, possibilidades de software, diferentes insumos.
Materiais	Em certos projetos especiais	Caso haja algum material crítico no produto alguns ensaios podem ser demandados. Normalmente, é utilizado em placas impressas para determinar a qualidade do processo de soldagem.
Projeto de parâmetros	Não aplicado	Normalmente as técnicas de planejamento de experimentos não são conhecidas da equipe de projeto. Quando conhecidas são utilizadas em casos onde há condições favoráveis para medida da característica de qualidade e mudanças de parâmetros.
Acelerados	Mais aplicado na forma de aumento da frequência	É o tipo de ensaio desejado de todo projetista, por acelerar conclusões. A forma mais utilizada ainda é na forma do aumento do número de ciclos, sem mudanças das características normais de solicitação.
Ambientais	Somente quando há problemas	Podem ser aplicados quando há uma orientação para tal. Operação do produto em temperaturas muito altas ou muito baixas. Ensaio de emissão e compatibilidade eletromagnética são os mais realizados, principalmente para exportação para EUA e CE.
Confiabilidade	Aplicado em poucas peças, sem maiores análises	Ensaio são realizados em poucas peças, as vezes com o produto já em campo. De uma maneira geral, poucas análises são feitas com os dados. Os softwares mais potentes hoje em dia, estão mudando esse perfil.
Mantenabilidade	Não aplicado como medida formal	A tendência atual são de produtos facilmente montáveis e conseqüentemente fáceis de manutenção. No entanto, medidas de mantenabilidade não foram observadas em nenhuma das empresas visitadas.
Manutenção da confiabilidade da produção	Mais aplicado o CEP, ou métodos próprios já normalizados para controle	O acompanhamento estatístico dos processos é mais comum. Também é usado o controle de itens críticos. Alguns produtos mais tradicionais, existentes a muitos anos no mercado, possuem testes já normalizados para avaliação da confiabilidade da produção.
Pré-envelhecimento	Aplicado em alguns casos nos circuitos eletrônicos	Ensaio de pré-envelhecimento são realizados geralmente por fornecedores de componentes eletrônicos. É comum ensaio de p.e. em placas de circuitos já montadas, para eliminar populações anômalas.

Figura 7-2 – Conclusões a respeito dos ensaios realizados nas empresas de produtos mecatrônicos.

resultados e correção dos rumos garante o bom aproveitamento dos ensaios (vide Figura 6-7);

2. Deve-se buscar sempre artifícios para acelerar os ensaios e automatizar as medidas;
3. As pressões para conclusões rápidas dos ensaios são grandes, as amostras disponíveis são escassas. Frente a isso, deve-se envolver toda a equipe de projeto nos ensaios.

7.4 ASPECTOS METROLÓGICOS DOS ENSAIOS

Os aspectos metrológicos nos ensaios de desenvolvimento de produtos podem se tornar um fator crítico, na medida que, cronogramas extremamente apertados e economia de recursos, determinam que poucas amostras sejam ensaiadas (intervalos de confiança muito amplos). Isso pode ocasionar sérios problemas, nas fases de montagem do produto, quando problemas de tolerância forem detectados, demandando um bom tempo de aprendizado e modificações de projeto até atingir-se a qualidade buscada. Um agravante é que os processos de fabricação dos protótipos, quase sempre diferem dos processos de produção em larga escala.

Constatou-se que em relatórios de ensaios não há uma preocupação com as incertezas da medição e possíveis variações de materiais, processos, fornecedores, etc.

A sistematização dos procedimentos de ensaios também contribui para a diminuição das incertezas, tornando o ensaio facilmente reproduzível. Constatou-se, nas empresas visitadas que não existia um procedimento padrão para ensaios.

7.5 ASPECTOS DA CONFIABILIDADE DENTRO DA EMPRESA

A confiabilidade assim como a qualidade é um processo no qual a empresa se engaja, onde os resultados são frutos da persistência e da experiência da equipe.

As empresas estão muito mais se tornando empresas aglutinadoras de várias tecnologias de diferentes fabricantes. A empresa que possui uma marca forte consegue desempenhar esse papel de aglutinar diversas tecnologias, buscando várias partes de diferentes fabricantes e montando um novo produto. Inclusive o próprio projeto do produto pode ser terceirizado, como foi o caso do projeto Escrow apresentado. No entanto, a empresa deve manter massa crítica em áreas estratégicas, para poder especificar e controlar o cumprimento das tarefas. Uma forte sistematização dos procedimentos e controle dos fornecedores é vital, para a eficiente coordenação das tarefas.

Nesse contexto, a empresa deve promover a sua marca como o produto mais valioso, sendo uma boa estratégia priorizar a confiabilidade. A priorização da confiabilidade exige muito cuidado com os fornecedores, principalmente se a empresa for apenas comercializar produtos de terceiros, com a sua marca.

Atualmente, no entanto, as empresas estão buscando novos mercados, seja pela necessidade de terem escala de produção, ou mesmo para se manterem competitivas. Nesse contexto, a confiabilidade e os ensaios desempenham papel fundamental, para que os produtos sejam aceitos em mercados mais exigentes.

Em uma organização para projeto tipo matricial, a equipe se mantém durante todo o tempo do projeto do produto, o problema ocorre quando deficiências do projeto são descobertas, com o produto já colocado em campo. Nesse caso com as equipes dissociadas, outras pessoas acabam por assumir modificações do projeto, é preciso que haja uma sistematização no sentido de que re projetos sejam encaminhados para a mesma equipe, fazendo parte do desenvolvimento do produto. Outro aspecto é as informações provenientes do suporte aos produtos, que igualmente precisam encontrar dentro da empresa, mecanismos para que as informações colhidas no campo possam ser revertidas, em melhorias do produto.

Sem uma metodologia definida, além de ter-se dificuldade no desenvolvimento do projeto, fica difícil implementar uma política da empresa, bem como enfatizar aspectos relevantes no desenvolvimento de um produto, como a confiabilidade.

No caso de laboratórios, os investimentos são baixos em parte devido à baixa exigência dos consumidores do mercado interno. O quadro tende a mudar com a abertura de novos mercados mais exigentes.

Os serviços de assistência técnica são terceirizados, exigindo muito treinamento das assistências, para que os serviços sejam realizados a contento.

7.6 TRABALHOS DE CONTINUIDADE

O presente trabalho serve como forma de mapear os diferentes aspectos que influem na confiabilidade, centrando o seu foco em metodologia e ensaios. Alguns dos possíveis trabalhos de continuação e aprofundamento dessa mesma linha de pesquisa podem ser:

1. Cada um dos nove ensaios relacionados poderia conter casos práticos, a exemplo dos apresentados para ensaios de confiabilidade e acelerados. Trabalhos individuais para cada um dos ensaios, incluindo um maior nível de detalhes também podem ser propostos;

2. Detalhamento dos aspectos gerenciais para a confiabilidade, se possível comparando estratégias de empresas com forte ênfase na confiabilidade. Esse trabalho também pode incluir, estruturas organizacionais para a confiabilidade;
3. Trabalho sobre programas de melhorias da confiabilidade desenvolvidos por empresas. Tipos de programas para melhoria da confiabilidade, casos práticos de programas, sistematizações de implementação;
4. Trabalho sobre infra-estrutura das empresas para a confiabilidade. O principal aspecto a ser abordado poderia ser a parte laboratorial, muito carente nas empresas brasileiras. Embora que outros aspectos mencionados também possam compor trabalhos interessantes, tais como: assistência técnica, processos de manufatura e outros;
5. Trabalho de detalhamento de todas as tarefas descritas na metodologia. O trabalho de detalhamento será bastante árduo já que são 219 tarefas propostas. Com o detalhamento dessas tarefas pode-se chegar às bases da confiabilidade. A Figura 7-1 pode servir para caracterização das tarefas que merecem maior atenção;
6. Trabalho de elaboração dos documentos e sistematização de ferramentas para a confiabilidade, citados na metodologia. Esse trabalho é importante para uma maior sistematização do desenvolvimento do produto, tornando o processo bem definido e documentado;

Outros estudos também podem ter como fonte de inspiração o presente trabalho, que introduziu importantes aspectos da confiabilidade de forma sistematizada, dando ao leitor um entendimento da confiabilidade e seus desdobramentos no desenvolvimento de um produto mecatrônico. Cabe a aqueles que desejam aprofundar-se escolher um dos trabalhos sugeridos ou outros, estabelecer claramente as estratégias científicas a serem utilizadas e analisar os resultados. A escolha da estratégia científica é uma das principais determinantes de um bom trabalho, principalmente em um trabalho que trata de um assunto tão vasto e de difícil comprovação prática.

7.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho apresentou uma série de conceitos novos (metodologia de pesquisa, tarefas propostas na metodologia MEGACOM, exploração dos aspectos da confiabilidade na empresa, sistematização dos diversos ensaios característicos no desenvolvimento de um produto, etc.) com relação à confiabilidade. Alguns já eram conhecidos intuitivamente pelos projetistas, que poderão confirmar as suas desconfianças com a leitura desse trabalho.

Na parte de ensaios delimitaram-se e sistematizaram-se os tipos de ensaios possíveis, contribuindo para facilitar a aplicação prática pelos projetistas.

Cuidados metrológicos, assim como a necessidade do planejamento dos ensaios são as mensagens que se encontram nas entrelinhas, do capítulo de ensaios.

Recomenda-se a uma empresa que busca aplicar a metodologia, uma estratégia de envolvimento de todos no processo da confiabilidade, a começar pela alta gerência. A metodologia deve ser aplicada gradualmente, a medida que documentos, ferramentas e ensaios são sistematizados de acordo com a realidade de cada empresa. Deve-se incluir também o aspecto dinâmico na metodologia com análises e evoluções constantes das técnicas aplicadas.

Ao final desse trabalho espera-se ter contribuído e inspirado para que mais trabalhos dentro dessa mesma linha sejam escritos.

BIBLIOGRAFIA

- [1] HARRINGTON, H.J. **Reliability Simplified : going beyond quality to keep customers for life.** ISBN 0-07-027051-1 United States of America. McGraw-Hill, 1999.
ANDERSON, L.C.
- [2] AHMED, J. U. **Modern Approaches to Product Reliability Improvement.** Birmingham, UK : International Journal of Quality & Reliability Management, 1996.
- [3] ABNT. NBR 5462 **Confiabilidade e Manutenibilidade – Terminologia.** Ed. Nov 1994. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1994.
- [4] ISO/IEC/OIML/BIPM **Vocabulary of basic and general terms in metrology.** International Organization for Standardization, 1993
INMETRO, 1995 – Portaria 29 de 10/03/95
- [5] KECECIOGLU, D. **Reliability Engineering Handbook - Volume 1.** ISBN 0-13-772294-X 1ª Ed. Department of Aerospace and Mechanical Engineering The University of Arizona: Prentice - Hall, Inc, 1991.
- [6] CONDRA, L. W. **Reliability Improvement with Design of Experiments.** ISBN 0-8247-8888-5 1ª Ed. United States of America: Marcel Dekker, Inc, 1993.
- [7] PRESSMAN, R. S. **Software Engineering A Practitioner's Approach.** ISBN 0-07-114603-2 4ª Ed. United States of America: McGraw-Hill, 1997.
- [8] DENSON, W. **The History of Reliability Prediction.** IIT Research Institute, Rome: IEEE Transactions on Reliability, 1998.
- [9] OLIVEIRA, L.F.S. **O estágio atual da aplicação de confiabilidade na indústria brasileira de processos químicos.** Mestrado Engenharia de Produção da UFF. 2000.

- [10] MONTGOMERY, D.C. **Introduction to statistical quality control.** ISBN 0-471-30353-4 3^a Ed. Arizona State University :John Wiley & Sons, Inc , 1997.
- [11] IRESON, W. G; **Handbook of Reliability Engineering and**
COOMBS, C. F. JR.; **Management.** ISBN 0-07-012750-6 2^aEd. Stanford
MOSS, R. Y. University: McGraw-Hill, Inc. 1996
- [12] SINTEF **Mechatronic Design Methods**
Site internet sintef disponível em
<http://www.sintef.no/units/matek/projects/mekatr/>
Acessado em 15/07/00.
- [13] SALMINEN, V.; **Multi-disciplinary design problem in**
VERHO, A. J. **mechatronics and some suggestions to its**
methodical solution in conceptual design phase.
Proceedings of the Institution of Mechanical
Engineers – International Conference – Engineering
Design Volume I – ICED 1989.
- [14] BUUR, J. **A framework for mechatronics design**
methodology. Proceedings of the Institution of
Mechanical Engineers – International Conference –
Engineering Design Volume I – ICED 1989.
- [15] BUUR, J. **A Theoretical Approach to MECHATRONICS**
DESIGN. 1^a Ed. Institute for Engineering Design.
Technical University of Denmark, 1990.
- [16] MARIBONDO, J. F. **Desenvolvimento de uma metodologia de projeto**
de sistemas modulares, aplicada a unidades de
processamento de resíduos sólidos domiciliares.
Tese de doutorado, UFSC, 2000.
- [17] BLANCHARD, B.S. **Systems Engineering and Analysis.** ISBN 0-13-
FABRICKY, W.J. 135047-1 3^aEd., Virginia Polytechnic Institute and
State University: Prentice – Hall, 1998.

- [18] PATTERSON, M. **Accelerating Innovation – Improving the Process of Product Development.** ISBN 0-442-01378-7 United States of America: Van Nostrand Reinhold, 1993.
- [19] GUIMARÃES, M. F. **Processo de desenvolvimento rápido de produtos tecnológicos.** Curso interno Fundação CERTI, UFSC, 2000.
- [20] DONOVAN, J.;
MURPHY, E.;
STEPHENSON M.I. **SURGE process - a time to market approach to reliability improvement.** Regional Technical College, Sligo, Ireland; University of Limerick, Ireland: 1996.
- [21] DEPARTMENT OF
DEFENSE - UNITED
STATES OF AMERICA **MIL-HDBK-781A Handbook for Reliability Test Methods, Plans, and Environments for Engineering, Development Qualification, and Production.** Estados Unidos da América: Department of Defense – U.S.A. 8/10/96.
- [22] PHADKE, M. S. **Quality Engineering Using Robust Design.** ISBN 0-13-745167-9 1ª Ed. New Jersey: Prentice - Hall, Inc. 1989.
- [23] JURAN, J.M.;
GRYNA, F.M. **Controle da qualidade – Handbook – Ciclo dos produtos: do projeto à produção VIII.** 4ª Ed, São Paulo: Makron Books do Brasil Editora Ltda, 1992.
- [24] FOWLKES, W. Y.;
CREVELING, C. M. **Engineering Methods for Robust Product Design.** ISBN 0-201-63367-1 Massachusetts Institute of Technology: Addison-Wesley Publishing Company, Inc, 1995.
- [25] BACK, N.;
FORCELLINI, F. A. **Projeto de Produtos.** Universidade Federal de Santa Catarina – Florianópolis. 1999.
- [26] O'CONNOR P. D.T. **Practical Reliability Engineering.** ISBN 0-471-92696-5 3ª Ed. British Aerospace Dynamics Group, Stevenage: John Wiley & Sons, Inc, 1991.

- [27] CLAUSING, D. **Total Quality Development.** ISBN 0-7918-0035-0 3ª Ed. United States of America: ASME Press, 1995.
- [28] VEIGA, C.; FIDÉLIS, G.C. **Metrologia dimensional – Técnicas e certificação de instrumentos segundo normas ISO.** Fundação CERTI / Labmetro – UFSC, Florianópolis – SC, 1996.
- [29] SCHOELER, N; FIDÉLIS, G.C. **Curso “Requisitos de garantia da qualidade para instrumentos de medição”,** Fundação CERTI Labmetro UFSC, Florianópolis – SC, 1998.
- [30] NATIONAL INSTRUMENTS **The measurement and automation, catalog 2001.** Catálogo de produtos 2001 N.I., USA, 2001.
- [31] LESKO, J **Industrial Design Materials and Manufacturing.** ISBN 0-471-29769-0 1ª Ed. United States of America, John Wiley & Sons, Inc, 1999.
- [32] PFEIFFER, G. **Uma metodologia para determinação da necessidade de inspeção.** Dissertação de mestrado da UFSC – Florianópolis, Julho de 1999.
- [33] HUANG, G.Q. **Design for X.** ISBN 0-412-78750-4 1º Ed. University of Abertay Dundee, UK: Chapman & Hall, 1996.
- [34] DAY, R. G. **Quality Function Deployment: Linking a Company with Its Customers.** ISBN 0-87389-202-X 1ªEd. Milwaukee, Wisconsin: ASQC Quality Press, 1993.
- [35] CREVELING C. M. **Tolerance Design - A Handbook for Developing Optimal Specifications.** ISBN 0-201-63473-2 1ª Ed. Canada: Addison-Wesley Publishing Company, Inc, 1996.
- [36] RELIASOFT **Software Weibull ++ 6 .** Análise de confiabilidade. Guia de treinamento. Reliasoft Brasil. 2001.

- [37] MACHADO, V.N;
SCHNEIDER, C.A.;
OGLIARI, A.;
ASSUITI, C.H. **Ensaio para assegurar a confiabilidade no desenvolvimento de produtos mecatrônicos.** Artigo publicado no 3º CBGDP, UFSC Florianópolis – SC, Setembro/2001
- [38] ICHIDA, T. **Product Design Review.** ISBN 1-56327-041-2 1ª Ed. Portland, Oregon: Productivity Press, 1996.
- [39] RELIASOFT **Software Alta 1.0.** Produzido pela empresa Reliasoft Corporation.
- [40] MACHADO, V.N.
SCHNEIDER, C.A. **Manual para garantia da confiabilidade no desenvolvimento de produtos mecatrônicos com ênfase no projeto.** Trabalho realizado na UFSC, departamento de mecânica com apoio à Tese de Vicente Machado Neto. Janeiro, 2001.
- [41] AMERICAN
SUPPLIER
INSTITUTE **Robust Design Using Methods - Workshop Manual.** USA. American Supplier Institute, 1999.
- [42] AMERICAN
SUPPLIER
INSTITUTE **Robust Design Using Methods - Case Studies.** USA. American Supplier Institute, 1999.
- [43] AMERICAN
SUPPLIER
INSTITUTE **Engenharia Robusta - Estudos de Casos.** Brasil – Qualiplus. American Supplier Institute, 1999.
- [44] MONTGOMERY, D.C. **Design and analysis of experiments.** ISBN 0-471-15746-5 4ª Ed. Arizona State University: John Wiley & Sons, Inc , 1997.
- [45] DEPARTMENT OF
DEFENSE - UNITED
STATES OF AMERICA **MIL-STD-810E Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests.** Estados Unidos da América: Department of Defense - United States of America. 31/07/95.

- [46] ABNT. NBR 6534 **Planos de Amostragem para Qualificação de componentes baseada na Taxa de Falhas.** Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, Mar/1981.
- [47] ABNT. NBR 6742 **Utilização da distribuição de Weibull para interpretação dos ensaios de durabilidade por fadiga.** Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, Jan/1987.
- [48] ABNT. NBR 9320 **Confiabilidade de Equipamentos Recomendações Gerais.** Brasil: Associação Brasileira de Normas Técnicas. Abr/1986.
- [49] ABNT. NBR 9321 **Cálculo de Estimativas por Ponto e Limites de Confiança Resultante de Ensaios de Determinação da Confiabilidade de Equipamentos.** Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, Abr/1986.
- [50] ABNT. NBR 9325 **Confiabilidade de Equipamentos – Planos de Ensaios de Conformidade para Taxa de Falhas e Tempo Médio entre Falhas Admitindo-se Taxa de Falhas Constante.** Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, Abr/1986.
- [51] BLANCHARD, B. S.;
VERNA, D.;
PETERSON, E. L. **Maintainability a Key to effective Serviceability and Maintenance Management.** ISBN 0-471-59132-7 1ªEd. Virginia Polytechnic Institute and State University: John Wiley & Sons, Inc. 1995.
- [52] RAC RELIABILITY
ANALYSIS CENTER **Blueprints for Product Reliability.** Rome, NY. Reliability Analysis Center, Maio / 1996.

- [53] WERKEMA, M.C.C. **Como Estabelecer Conclusões com Confiança: Entendendo Inferência Estatística – Série Ferramentas da Qualidade Volume 4.** ISBN 85-85447-28-1 Belo Horizonte, MG: Fundação Christiano Ottoni, Escola de Engenharia da UFMG, 1996.
- [54] DRAIN, D. **Statistical Methods for Industrial Process Control.** ISBN 0-412-08511-9 1ª Ed. United States of America. Chapman & Hall, 1997.
- [55] LINK, W **Tópicos avançados da metrologia mecânica.** 1ª Ed. São Paulo, Nov / 2000.
- [56] COLPAERT, H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns.** 3ª Ed. São Paulo, Edgard Blücher, 1974.
- [57] FIOD, M. N. **Notas de Aula Planejamento de Experimentos.** Universidade Federal de Santa Catarina: Dez/1999.
- [58] LLOYD, DAVID K. ;
LIPOW, MYRON **Reliability Management, Methods, and Mathematics.** ISBN 0-9601504-1-2 2ªEd. United States of America: Prentice - Hall, Inc, 1979.
- [59] BILLINTON, R.
ALLAN, R.N. **Reliability evaluation of engineering systems.** ISBN 0-306-41296-9 Great Britain. Plenum Press, 1983.
- [60] PALLEROSI, C.A. **Metodologias de ensaios e normas.** Apostila Volume 6 Reliasoft Brasil – Confiabilidade. Maio / 2000.
- [61] RAC Reliability Analysis Center. Disponível em <http://rac.iitri.org> Site acessado em Nov/00.
- [62] JENSEN F.
PETERSEN N. E. **Burn-In An Engineering Approach to the Design and Analysis of Burn-in Procedures.** ISBN 0-471-10215-6 1ª Ed. Great Britain: John Wiley & Sons, 1982.

- [63] RAC Reliability Analysis Center. Disponível em <http://rome.iitri.org/RAC> Site acessado em Nov/00
- [64] RELIASOFT **Software Block Sim.** Análise de sistemas. Guia de treinamento. Reliasoft Brasil 2001.
- [65] ROSS, P. J. **Aplicações das Técnicas de Taguchi na Engenharia da Qualidade.** ISBN 620.0045 1ª Ed. São Paulo: McGraw-Hill, Inc, 1991.
- [66] VALERIANO, D. L. **Gerência em Projetos Pesquisa, desenvolvimento e engenharia.** São Paulo. Makron Books, 1998.