

IDÉLCIO ALEXANDRE PALHETA CARDOSO

**ELABORAÇÃO DE POLÍTICAS DE MANUTENÇÃO : UMA ABORDAGEM
VOLTADA À ANÁLISE DE CONFIABILIDADE**

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

São Paulo
2000

IDÉLIO ALEXANDRE PALHETA CARDOSO

**ELABORAÇÃO DE POLÍTICAS DE MANUTENÇÃO : UMA ABORDAGEM
VOLTADA À ANÁLISE DE CONFIABILIDADE**

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

Área de Concentração :
Engenharia Mecânica

Orientador :
Prof. Dr. Gilberto Francisco Martha de Souza

São Paulo
2000

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a todos aqueles que lutam para que o ensino público e gratuito seja o melhor meio de se educar e formar verdadeiros cidadãos, dos quais o Brasil tanto precisa.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a algumas pessoas que contribuíram decisivamente na consecução deste trabalho, seja pelo apoio pessoal, seja pela presteza com que me atenderam, sempre que solicitadas.

Agradeço inicialmente à minha mãe, Inês, pela proximidade e amizade em todas as ocasiões e, naturalmente, pela vida que me concedeu.

Agradeço às minhas tias Iraci e Iracilde Palheta, à Sra. Maria de Lourdes Palheta (minha avó) e à Adriana Palheta Cardoso pelo apoio incondicional.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Gilberto Francisco Martha de Souza, pela amizade, seriedade e atenção com que me ajudou a conduzir este trabalho.

Aos Profs. Dr. Rodolfo Molinari e Oswaldo Horikawa, pelas sugestões construtivas na execução da dissertação.

Ao Prof. Dr. Renato Vairo Belhot pelo apoio e por ter sido, durante a graduação, quem me apresentou ao tema desenvolvido nesta dissertação.

À Sra. Helenita, da biblioteca do LAE (Laboratório de Aeronaves da Escola de Engenharia de São Carlos da USP) pela atenção e presteza com que me atendeu todas as vezes em que precisei de seu auxílio na consulta à bibliografia utilizada neste trabalho.

Ao CNPq pela bolsa concedida.

Aos engenheiros Edgard Cavallheiro e Marin, da EMBRAER, por sua ajuda e esclarecimentos na consulta ao MPG da aeronave estudada neste trabalho.

E a DEUS por tudo.

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| LISTA DE FIGURAS | i |
| LISTA DE TABELAS | iv |
| LISTA DE SÍMBOLOS | v |
| RESUMO | ix |
| ABSTRACT | x |
| CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1) Considerações Iniciais | 1 |
| 1.2) Objetivos do Trabalho | 2 |
| 1.3) Desenvolvimento do Trabalho | 4 |
| CAPÍTULO 2 - CONCEITOS BÁSICOS DE MANUTENÇÃO | 6 |
| 2.1) Considerações Iniciais | 6 |
| 2.2) Manutenção Preditiva | 10 |
| 2.3) Manutenção Preventiva | 11 |
| 2.4) Manutenção Corretiva | 14 |
| 2.5) Abordagens da Manutenção a partir das Práticas Fundamentais | 16 |
| CAPÍTULO 3 - MANUTENÇÃO DE EQUIPAMENTOS | 22 |
| 3.1) Considerações Iniciais | 22 |
| 3.2) Requisitos de Manutenção de Equipamentos | 22 |
| 3.3) Considerações sobre a Falha Humana | 28 |
| CAPÍTULO 4 - ANÁLISE DE CONFIABILIDADE APLICADA À MANUTENÇÃO | 31 |
| 4.1) Considerações Iniciais | 31 |

| | |
|---|-----|
| 6.1) Considerações Iniciais | 107 |
| 6.2) Apresentação da Aeronave | 107 |
| 6.3) Elaboração de Procedimento de Manutenção do Trem de Pouso Principal do EMB-120 | 108 |
| 6.3.1) Caracterização dos Componentes do Trem de Pouso Principal do EMB-120 | 110 |

CAPÍTULO 6 - ELABORAÇÃO DE PROCEDIMENTOS DE MANUTENÇÃO PARA COMPONENTES DA AERONAVE EMB-120 BRASÍLIA 107

| | |
|---|----|
| 5.1) Considerações Iniciais | 81 |
| 5.2) Requisitos de Utilização de um Sistema | 81 |
| 5.3) Procedimentos de Manutenção de Aeronaves | 84 |
| 5.3.1) Introdução | 84 |
| 5.3.2) Limites de uma Aeronave | 84 |
| 5.3.2.1) Limites de Operação | 86 |
| 5.3.2.2) Limites de Crescimento | 88 |
| 5.3.2.3) Limites de Reparo | 93 |
| 5.3.2.4) Limites de Serviço | 94 |
| 5.3.2.5) Limites de Desgaste | 97 |
| 5.3.3) Métodos de Manutenção Aeronáutica | 99 |

CAPÍTULO 5 - ESPECIFICIDADES DA MANUTENÇÃO NA ATIVIDADE AERONÁUTICA 81

| | |
|--|----|
| 4.2) Modos de Falha dos Componentes | 40 |
| 4.3) Análise da Confiabilidade de Sistemas | 43 |
| 4.3.1) Representação dos Sistemas por Meio dos Diagramas de Blocos | 43 |
| 4.3.2) Análise de Modos e Efeitos das Falhas | 54 |
| 4.3.3) Análise da Árvore de Falhas | 61 |
| 4.3.4) Comentários Finais sobre as Técnicas de Análise de Confiabilidade de Sistemas | 67 |
| 4.4) Conceitos de Interesse à Manutenção como Prática Voltada à Confiabilidade | 68 |
| 4.4.1) Conceitos Associados à Definição de Disponibilidade | 69 |
| 4.4.2) Apresentação das Práticas de Manutenção Centradas em Confiabilidade | 78 |

| | |
|--|-----|
| 6.3.2) Caracterização dos Esforços Atuantes na Perna do Trem de Pouso Principal do EMB-120 | 119 |
| 6.3.3) Avaliação dos Modos de Falha dos Componentes do Trem de Pouso Principal | 133 |
| 6.3.4) Detalhamento dos Modos de Falha dos Componentes do Trem de Pouso Principal | 138 |
| 6.3.4.1) Fadiga | 138 |
| 6.3.4.2) Deformação Devido a Ação de Cargas de Compressão | 146 |
| 6.3.4.3) Fratura | 148 |
| 6.3.4.4) Corrosão | 151 |
| 6.3.4.5) Falha nos Elementos de Fixação | 151 |
| 6.3.4.6) Falha nos Elementos de Vedação | 153 |
| 6.3.5) Proposta de Procedimento de Manutenção do Trem de Pouso Principal .. | 156 |
| 6.4) Elaboração de Procedimento de Manutenção da "TRANSFER BOX" do EMB-120 | 166 |
| 6.4.1) Apresentação do Sistema | 166 |
| 6.4.2) Breve Descrição do Funcionamento do Piloto Automático e da "TRANSFER BOX" | 168 |
| 6.4.3) Fatores de Influência na Falha da "TRANSFER BOX" | 171 |
| 6.4.4) Ações de Manutenção Relativas à "TRANSFER BOX" | 177 |
| 6.4.5) Comparações com as Diretrizes do Fabricante | 180 |
| 6.5) Comparação entre os Procedimentos de Manutenção para a Perna do Trem de Pouso Principal e para a "TRANSFER BOX" | 181 |
| CAPÍTULO 7 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS | |
| 183 | |
| CAPÍTULO 8 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | |
| 186 | |

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 3

- Figura 3.1 - Comparação entre os Custos das Ações de Manutenção e das Falhas 24
- Figura 3.2 - Gráfico Custo Total de Manutenção x Tempo para Máquina de Laminação de Papel, adaptado de [9] 28

CAPÍTULO 4

- Figura 4.1 - Gráfico Proporção de Componentes versus Tempo até a Falha 33
- Figura 4.2 - “Curva da Banheira”, [18] 37
- Figura 4.3 - Comportamento da Taxa de Falhas de Equipamentos Mecânicos, [18] 38
- Figura 4.4 - Variação da Confiabilidade e da Taxa de Falhas, ao Longo do Tempo, para um Componente 39
- (a) Confiabilidade 39
- (b) Taxa de Falhas ao longo do Tempo para um mesmo Componente 39
- Figura 4.5 - Componentes Dispostos em Série 43
- Figura 4.6 - Componentes Dispostos em Paralelo 43
- Figura 4.7 - Confiabilidade de Sistemas em Série em Função do Número de Componentes que o Compõem (n) 45
- Figura 4.8 - Gráfico Comparativo da Evolução da Confiabilidade para um Componente e no Modo Paralelo Ativo 47
- Figura 4.9 - Sistema em Paralelo Passivo (“standby”) 49
- Figura 4.10 - Comparação entre Redundância Passiva e Ativa, [18] 52
- (a) Confiabilidade em Função do Tempo 52
- (b) Taxa de Falhas em Função do Tempo 52
- Figura 4.11 - Sistema de Comunicação Preferencial 53
- Figura 4.12 - Representação de um Sistema de Controle Hidráulico de um Missil, [30] ... 59
- Figura 4.13 - Símbolo dos Eventos e Lógica da FTA, [3] 62
- Figura 4.14 - Diagrama de Blocos Simplificado para o Sistema de Partida de um Motor de Combustão Interna 64
- Figura 4.15 - FTA para Ausência de Partida do Motor cujo Diagrama de Blocos é Esquematisado na Figura 4.14, [3] 65
- Figura 4.16 - Fluxo de Informações Necessárias ao “troubleshooting”, [26] 66
- Figura 4.17 - Exemplo de “troubleshooting” para uma Impressora Tipo Jato de Tinta, [34] 75

| | |
|--|----|
| Figura 4.18 - Confiabilidade do Sistema versus t , com e sem Manutenção Preventiva, [18] | 76 |
| Figura 4.19 - Comportamento da Confiabilidade $R(t)$ em Função do Expoente m , [18] | 77 |

CAPÍTULO 5

| | |
|---|-----|
| Figura 5.1 - Aeronave ERJ-145 após ter Excedido Limites de Operação Estabelecidos para o Pousar, [37] | 87 |
| Figura 5.2 - Aspecto da Montagem da Fuselagem de um Grande Jato Comercial | 90 |
| Figura 5.3 - Exemplo de Debelação de Pane para o EMB-121 XINGU, [45] | 102 |

CAPÍTULO 6

| | |
|--|-----|
| Figura 6.1 - Aeronave EMB-120 BRASÍLIA | 108 |
| Figura 6.2 - Localização e aspecto da Perna do Trem de Pousar Principal do EMB-120, [48] | 110 |
| Figura 6.3 - Aspecto e Disposição dos Componentes do Trem Principal do EMB-120, [48] | 111 |
| Figura 6.4 - Componentes de Fixação e Acessórios da Perna do Trem de Pousar Principal, [48] | 112 |
| Figura 6.5 - Amortecedor do Trem Principal EMB-120, [48] | 113 |
| Figura 6.6 - Circuito Principal de Aionamento do Trem de Pousar, [49] | 114 |
| Figura 6.7 - Mecanismo de Atuação por Gravidade, [48] | 116 |
| Figura 6.8 - Tesoura de Torque de Trem Principal, Articulação Central, [48] | 117 |
| Figura 6.9 - Diagrama de Blocos Adaptado para a Estrutura da Perna do Trem Principal do EMB-120 | 119 |
| Figura 6.10 - Pousar Padrão em "Dois Pontos", [33] | 124 |
| Figura 6.11 - Convenção dos Eixos para Determinação dos Esforços Atuantes no Trem de Pousar Principal | 125 |
| Figura 6.12 - Pousar em Três Pontos, [33] | 128 |
| Figura 6.13 - Pousar em um Ponto, [33] | 129 |
| Figura 6.14 - Cargas Transversais no Trem de Pousar na Frenagem, [33] | 131 |
| Figura 6.15 - Esforços Atuantes e Diagrama de Momento Fletor Combinado das Cargas Transversais e Longitudinais | 135 |
| Figura 6.16 - Principais Esforços Atuando na "oleo structure" | 137 |
| Figura 6.17 - Representação Esquemática de Crescimento de uma Trinca, [56] | 139 |
| Figura 6.18 - Curva S-N para Análise de Fadiga | 140 |

| | |
|--|-----|
| Figura 6.19 - Distribuição da Dimensão da Trinca em Função dos Ciclos de Operação ... | 144 |
| Figura 6.20 - Incertezas nos Valores do Carregamento de Compressão e na Resistência Mecânica do Trem de Pouso | 147 |
| Figura 6.21 - Resistência à Fratura em Função da Temperatura, [56] | 149 |
| Figura 6.22 - Esquema de Funcionamento do Piloto Automático do EMB-120, [48] | 167 |
| Figura 6.23 - Localização da "TRANSFER BOX" na Cabine de Comando, [48] | 167 |
| Figura 6.24 - Localização das Superfícies de Controle de uma Aeronave | 169 |
| Figura 6.25 - Esquema de Conexão da "TRANSFER BOX" com os Servo-Motores das Superfícies de Controle, [48] | 170 |
| Figura 6.26 - Aspecto Interno da "TRANSFER BOX", [48] | 172 |

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 2

Tabela 2.1 - Guia de Manutenção Preventiva em Máquina Laminadora de Papel, [9] 12

CAPÍTULO 4

Tabela 4.1 - Matriz para Decisão acerca da Seleção Preliminar das Práticas de Manutenção 42

Tabela 4.2 - Valores de β conforme a Severidade da Solicitação, [30] 56

Tabela 4.3 - Tabela Contendo Informações para Elaboração da Análise de Modos e Efeitos das Falhas, [3] 58

(a) FMEA 58

(b) FME(C)A 58

Tabela 4.4 - FMEA para o Sistema de Controle Hidráulico de um Missil, [30] 60

CAPÍTULO 5

Tabela 5.1 - Evolução dos Limites de Crescimento do BOEING 737, [40] 91

(a) Limites de Crescimento Aproximados para o BOEING 737 91

(b) Valores Reais das Três Primeiras Versões do BOEING 737 91

Tabela 5.2 - Limites de Serviço para os Componentes dos Motores do BOEING 377, [4] 97

CAPÍTULO 6

Tabela 6.1 - Dimensões Iniciais de Trincas em Componentes Estruturais de um Trem de Pouso, [55] 145

Tabela 6.2 - Mecanismos e Causas de Falha de Elementos Rosqueados 153

Tabela 6.3 - Mecanismos de Falha de um Elemento de Vedação, [52] 154

Tabela 6.4 - Taxas Médias de Falha de Elementos de Vedação, [54] 154

Tabela 6.5 - FMEA Simplificado para a Estrutura do Trem de Pouso Principal do EMB-120 156

Tabela 6.6 - Periodicidade das Tarefas Relacionadas no MPG da Aeronave EMB-120, [51] 164

Tabela 6.7 - Valores das Taxas Médias de Falha para Alguns Componentes Eléctro-Eléctricos, [3] 174

Tabela 6.8 - FMEA Simplificado para o Sistema de Piloto Automático do EMB-120 176

| | |
|-----------------|--|
| t | tempo |
| $P^x(t)$ | probabilidade de falhar até o instante t |
| $p(t)$ | probabilidade de falha |
| $P^x(\Delta t)$ | probabilidade de falhar no instante t |
| $f^x(u)$ | função densidade de probabilidade de um evento x |
| $F(t)$ | função distribuição de probabilidade de falhas acumulada |
| $R(t)$ | função confiabilidade |
| $R(t_i)$ | confiabilidade no intervalo t |
| $\lambda(t)$ | taxa de falhas |
| $F_i^j(t)$ | função distribuição de falhas acumulada para cada componente |
| $F^n(t)$ | função distribuição acumulada de falhas do item |
| $F_s(t)$ | função distribuição de falhas acumulada para o sistema |
| $F^x(t)$ | função distribuição acumulada de um evento x |
| $f(t)$ | função densidade de probabilidade |
| t_n | instante contido em um intervalo de tempo |
| n_i | nº de itens que falharam no i -ésimo intervalo de tempo |
| n | nº de componentes idênticos |
| $R^n(t)$ | confiabilidade de cada item |
| $R^n(t)$ | confiabilidade da unidade n no modo passivo |
| $R_s(t)$ | confiabilidade do sistema |
| $R_{ss}(t)$ | confiabilidade do sistema de sensores e computadores |
| λ_{ss} | taxa de falhas do sistema de sensores e computadores |
| λ_p | taxa de falhas do componente reparável |
| $R_m(t)$ | confiabilidade de um sistema sob manutenção |

LISTA DE SIMBOLOS

| | |
|---------------|---|
| m | quantidade de itens que apresentaram falha, parâmetro de forma da distribuição de WEIBULL |
| N | número de ciclos de tensão, quantidade total de itens |
| C | índice de criticidade de cada item do sistema |
| C^m | índice de criticidade de cada modo de falha isolado |
| α^m | frequência da ocorrência do modo de falha |
| β | severidade do modo de falha |
| h | número de modos de falha considerados na análise |
| $A(t)$ | disponibilidade |
| $A^*(t)$ | disponibilidade em um intervalo [0, T] |
| $m(t)$ | função densidade de probabilidade do tempo de reparo |
| $M(t)$ | função distribuição acumulada do tempo de reparo |
| $v(t)$ | taxa de reparos |
| $A^*(\infty)$ | disponibilidade assintótica |
| t_{op} | tempo em operação |
| t_{pr} | tempo paralisado |
| t_0 | início da distribuição de WEIBULL |
| η | valor característico da distribuição de WEIBULL |
| V^{MG} | reação vertical nos trens principais |
| V^{MGd} | reação vertical no trem principal direito |
| V^{MGl} | reação vertical no trem principal esquerdo |
| V^{NG} | reação vertical no trem do nariz |
| B | distância horizontal entre o trem principal e o CG |
| W | peso da aeronave |
| L | sustentação |
| T_{eng} | empuxo dos motores |

| | |
|--------------|---|
| $I_y \theta$ | momento angular referido ao eixo y |
| D | força de arrasto |
| E | distância vertical entre a linha horizontal que passa pelo CG, a partir do solo |
| E_T | distância vertical entre o eixo dos motores e o eixo longitudinal da aeronave |
| n_z | fator de carga na direção vertical |
| n_x | fator de carga na direção longitudinal |
| D_{MG} | reação horizontal nos trens principais |
| D_{MGI} | reação horizontal longitudinal no trem principal esquerdo |
| D_{MGR} | reação horizontal longitudinal no trem principal direito |
| n_y | fator de carga transversal |
| BL_{cg} | excentricidade do CG sobre o eixo y |
| S_{MGR} | carga transversal no trem principal direito |
| S_{MGI} | cargas transversal no trem principal esquerdo |
| S_{NG} | carga transversal no trem do nariz |
| T | distância entre as duas pernas do trem principal |
| n_y | fator de carga transversal |
| K_{PIV} | constante da manobra de pivotamento |
| L_{PIV} | largura de pivotamento |
| F | distância entre as rodas de um mesmo eixo |
| a | dimensão da trinca |
| AK | flutuação do fator de intensificação de tensões |
| AK_{TH} | limite inferior do fator intensificador de tensões, abaixo do qual o a_0 |
| | dimensão inicial da trinca |
| C, m | parâmetros da Lei de PARIS, definidos através de experimentos, sendo característica de um dado material |
| ΔS | flutuação de tensão, induzida pela ação do carregamento externo |

S_{ext}

tensão de tração induzida pelo carregamento externo

K_{ext}

fator de intensificação de tensões induzido pelo carregamento externo

$f(a)$

função dependente da geometria da trinca e da estrutura

$a(N)$

dimensão da trinca após N ciclos de tensão.

Falar em confiabilidade é essencialmente falar em garantia de operação conforme solicitações previstas em projeto por um certo tempo, conceito que orienta seu emprego no meio militar passando pela atividade aeronáutica, bem como pela sua utilização na área de geração de energia, principalmente em plantas de usinas nucleares - aplicação onde a abordagem da confiabilidade se tornou necessária face ao grande risco associado à utilização desta forma de energia - até sua implementação na indústria como um todo.

Dos diversos aspectos com os quais a confiabilidade mantém relação, a segurança sempre virá em posição relevante. Esta segurança está associada à menor possibilidade de ocorrência de falhas, eliminando este risco se possível. Esta característica de segurança pode ser introduzida pelo projeto do produto, por variáveis operacionais ou pela combinação de ambas.

É certo que durante a vida de um produto, sua confiabilidade diminui. Entretanto, é possível controlar e minimizar esta degradação.

Uma das maneiras de assegurar a retardação do processo de redução dos níveis de confiabilidade do equipamento durante sua vida operacional consiste na adoção de políticas adequadas de manutenção. A própria definição de manutenção segundo diversas fontes a serem apresentadas no decorrer deste trabalho, as quais definem manutenção como a atividade responsável por manter ou retornar os equipamentos a condições determinadas de operação, indica que esta atividade tem ligações muito fortes com as ações que visam assegurar a confiabilidade de equipamentos ou sistemas.

Focalizando a meta de manutenção como uma tarefa necessária para manter a confiabilidade de um equipamento ou sistema, este trabalho apresenta um procedimento para seleção de uma política de manutenção baseado no conhecimento dos mecanismos que levam o sistema ou equipamento a falhar. Para tanto, são caracterizados os parâmetros básicos deste procedimento, os quais são: (1) comportamento estatístico da falha, (2) modo de falhar dos componentes do equipamento ou sistema e (3) a progressão da falha ao longo do mesmo. O procedimento ora apresentado é aplicado no desenvolvimento de um plano de manutenção para dois sistemas distintos de uma aeronave, no caso o trem de pouso principal e a "TRANSFER BOX" do piloto automático. A seleção destes dois sistemas baseou-se na necessidade de ser analisado um sistema mecânico e um sistema eletro-eletrônico, a fim de permitir a caracterização de diferenças no plano de manutenção dos mesmos.

RESUMO

ABSTRACT

Reliability is related to the warranty of an operation in accordance with load situations, foreseen by design, during a pre-defined period of time. This concept guides its application on military environment, aeronautical activity, besides its use on electrical power generation, mainly on nuclear power plants - application where reliability approach became needed, in face of a great risk associated to this form of energy utilization - until its industrial implementation.

Among all aspects related to reliability, safety is always situated in an important rank. This safety feature is associated with the lowest possibility of failure occurrence, avoiding this risk if possible. Product design, operational variables or both of these factors may introduce safety features.

During a product life the reliability decreases. Meanwhile, it is possible to control and to minimize this degradation.

One way of assures the delay of equipment reliability degradation during its operational life consists on the use of an adequate maintenance policy. The maintenance definition, according to different sources, presented on this work, wich define maintenance as an activity responsible for keep or return the equipment to certain operational conditions, denotes that maintenance activity has a narrow linking with actions which aim assure equipment or system reliability.

Focusing the goal of maintenance regarded as a task for maintain the equipment or system reliability, this work presents a procedure to select a maintenance policy based on the knowledge of the mechanisms that drive the equipment to failure occurrence. In this way, basic parameters of this process are described, such as : (1) statistical behavior of failure, (2) failure modes of equipment or system components and (3) failure progress through the system. The procedure here presented is applied to develop a maintenance plan for two different systems of an aircraft, named main landing gear and the AutoPilot (AP) "TRANSFER BOX". The selection of these systems is based on the need for studying a mechanical system and an electronic system, in order to stress the differences between their maintenance plans.

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO

1.1) Considerações Iniciais

A manutenção pode ser compreendida como a atividade responsável por manter ou retornar os equipamentos às suas condições normais de operação, como citado por CARDOSO e BELHOT, [6].

A indústria sempre legou à manutenção a condição de atividade necessária, porém responsável apenas por gerar custos, ainda que mais recentemente, com a introdução da Manutenção Produtiva Total (do inglês TPM - "Total Productive Maintenance"), por exemplo, esta visão tenha deixado de ser a regra geral.

De fato, a manutenção requer mão-de-obra específica, a qual pode vir a ficar ociosa em algum instante devido às próprias características da atividade de manutenção. Também pode requerer a presença de estoques de sobressalentes, fato que se torna indesejável, já que até mesmo os estoques de produtos acabados são objeto de restrições por parte das empresas, face às novas técnicas de gerenciamento de estoques para produção como o "KANBAN" e o "just-in-time", que têm como objetivo minimizar o estoque de peças e produtos acabados ao longo de uma linha de produção.

Pode-se creditar parte deste ponto de vista ao fato de que a manutenção, para surtir efeitos que compatibilizem os requisitos técnicos do equipamento como desempenho, características operacionais e durabilidade com a rentabilidade de um empreendimento, deve ter conhecimentos não apenas sobre o equipamento, mas sobre os fatores que podem levar o mesmo a deixar de operar satisfatoriamente, as consequências desta operação inadequada e a frequência com que isto acontece, [1]. Ou seja, é necessário pesquisar a origem, progresso e consequências da falha. Esta atividade deve ser executada por pessoas especializadas, que nem sempre estarão em atividade, face à natureza periódica da manutenção. Este fato tende a colocar a manutenção como atividade onerosa e não geradora de renda.

A partir deste ponto, pode-se estabelecer uma relação estreita entre manutenção e confiabilidade, pois tendo como objetos de pesquisa a falha e os sistemas, entre outros, a

confiabilidade pode fornecer diretrizes na tomada de decisão em manutenção, trazendo esta última atividade a um âmbito científico.

Além disso, as crescentes exigências quanto à segurança e efeitos ambientais, ao lado do surgimento de equipamentos cada vez mais sofisticados, cuja falha pode representar prejuízos de elevada monta ou gerar catástrofes com a perda de muitas vidas, requer um estudo mais aprofundado dos fatores que levam um equipamento a falhar, das consequências destas falhas e das soluções possíveis de serem aplicadas a cada caso, [2].

Selecionar uma política de manutenção exige reflexão a respeito da função do equipamento - o qual pode ser visto como um sistema onde a relação entre seus componentes é conhecida - e também sobre uma série de requisitos que cobrem desde aspectos legais até as necessidades do público que vai utilizar de alguma forma este equipamento.

Estudando as práticas de manutenção, apresentando os conceitos de confiabilidade relacionados ao tema e analisando algumas das ferramentas de análise da confiabilidade de uso consagrado, este trabalho visa elaborar um procedimento de manutenção de dois sistemas distintos - um essencialmente mecânico e outro elétrico - de uma aeronave.

A escolha da atividade aeronáutica para desenvolvimento deste trabalho deve-se ao fato desta possuir documentação detalhada relativa aos procedimentos de manutenção básicos de aeronaves, bem como das características de seu projeto, a qual é de acesso público, ao menos quando considerando os operadores das aeronaves. Estes dados são considerados fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

Tanto manutenção quanto confiabilidade são assuntos bastante amplos e neste trabalho se apresenta uma importante vertente dos dois assuntos : a decisão correta a ser tomada em manutenção, com suporte dos conceitos de confiabilidade, conforme as necessidades do sistema, visando obter segurança e desempenho satisfatório, favorecendo a rentabilidade de um empreendimento, seja ele de que natureza for.

1.2) Objetivos do Trabalho

O objetivo deste trabalho é dar à manutenção um tratamento científico relacionando-a à confiabilidade, recorrendo-se a um exemplo da atividade aeronáutica,

mostrando como a abordagem a partir da confiabilidade pode ser útil na elaboração de procedimentos de manutenção de diversos tipos de sistemas.

A razão não é apenas concernente à segurança, mas também diz respeito a aspectos econômicos na medida em que a manutenção voltada para a confiabilidade concentra ações nos pontos onde estas sejam essenciais, de modo preciso, seguro e econômico não só por evitar intervenções desnecessárias e até prejudiciais, mas por tornar a manutenção mais rápida e eficaz.

A caracterização da confiabilidade e de sua vertente estatística se faz necessária como ferramenta de acesso ao tratamento da falha, a qual toma grande parte deste trabalho. Isto porque uma operação confiável é aquela menos sujeita à falhas ou até isenta quando for possível. É a ação operacional encarregada de debelar ou eliminar falhas é a manutenção. Para a seleção da política adequada de manutenção é imprescindível conhecer em profundidade os mecanismos que levam um sistema à falha. É necessário então caracterizar

- o comportamento estatístico da falha;

- os modos de falhar dos componentes de um sistema e

- a progressão da falha ao longo do mesmo.

A grosso modo, os métodos de análise de confiabilidade em uso orientam-se sobre estas diretrizes básicas [3].

A manutenção é discutida criticamente por este trabalho segundo suas práticas fundamentais e abordagens mais recentes, bem como, os métodos de análise de confiabilidade serão resgatados e analisados segundo sua conveniência na adoção pela manutenção.

Analisando detalhadamente cada um destes fatores relacionados à manutenção e à confiabilidade e resgatando as especificidades da atividade aeronáutica, sobretudo dos requisitos de manutenção de aeronaves, são elaborados procedimentos de manutenção para dois componentes distintos da aeronave fabricada pela Empresa Brasileira de Aeronáutica (EMBRAER), o EMB-120, os quais são o trem de pouso principal e a caixa de transferência de sinais do piloto automático (*TRANSFER BOX*).

É interessante ressaltar que um mesmo sistema - uma aeronave por exemplo - admite políticas diferentes de manutenção para cada um de seus subsistemas, pois cada um destes tem sua confiabilidade reduzida por diferentes processos. Daí, neste trabalho, são apresentados dois sistemas de natureza e função diferentes entre si, pertencentes a uma mesma aeronave, a fim de ressaltar as diferenças nos procedimentos de manutenção dos mesmos.

As diretrizes de manutenção recomendadas neste trabalho são comparadas com as exigências do fabricante, para verificar a validade do procedimento de desenvolvimento de diretrizes de manutenção ora proposto, para definir as atividades de manutenção para equipamentos em geral.

1.3) Desenvolvimento do Trabalho

Após a introdução e apresentação dos objetivos deste trabalho, no capítulo 2, definições e considerações sobre as três práticas essenciais da manutenção (preventiva, preditiva e corretiva) são apresentadas, ressaltando a necessidade da análise detalhada das falhas. Além disso, aprofunda-se uma reflexão sobre a real necessidade de cada uma destas políticas, procurando discutir assertivas comumente associadas a atividade de manutenção.

No capítulo 3 analisa-se sucintamente os aspectos econômicos da manutenção de equipamentos, expondo os fatores que determinam os custos associados a esta atividade, além de uma reflexão sobre a influência do erro humano na manutenção.

Já no capítulo 4, métodos de análise de confiabilidade são comentados e explorados, começando pelo nível mais elementar - o dos componentes - evoluindo para os casos reais - sistemas complexos e multidisciplinares.

A partir de então, a associação entre confiabilidade e manutenção é consolidada, sendo estes métodos imprescindíveis para atingir os pontos-chave da elaboração dos procedimentos de manutenção.

No capítulo 5, apresenta-se as especificidades da atividade aeronáutica, as quais têm influência marcante na definição dos procedimentos de manutenção das aeronaves pela imposição de regulamentos ou pela aplicação de conceitos peculiares a esta atividade.

No capítulo 6, com os conhecimentos adquiridos e apresentados anteriormente, é elaborada uma sequência de análise que permite a definição de um plano de manutenção e tendo em vista os requisitos do sistema, sejam eles de utilização ou funcionamento e natureza da falha, selecionando a política mais adequada a ser aplicada na manutenção do mesmo.

Este método de análise é empregado para elaboração dos procedimentos de manutenção de dois sistemas de uma aeronave, sendo um sistema tipicamente mecânico, no caso o trem de pouso, e um sistema eletrônico, no caso, a caixa de transferência de sinais do piloto automático da aeronave EMB-120 BRASILIA, fabricada pela EMBRAER - EMPRESA BRASILEIRA DE AERONÁUTICA S. A. Os procedimentos elaborados são comparados com os procedimentos de manutenção constantes dos manuais da aeronave, possibilitando a avaliação da validade da metodologia proposta neste estudo para definição das atividades de manutenção a serem utilizadas em um sistema, com a finalidade de garantir a sua confiabilidade.

Finalmente, no capítulo 7, são apresentadas as principais conclusões obtidas com a execução deste estudo, bem como são apresentadas recomendações para trabalhos futuros, visando a continuidade desta linha de pesquisa.

O desenvolvimento de novos processos produtivos, ao lado de novas tecnologias tanto de fabricação, como de projeto de equipamentos, trouxe cada vez mais complexidade a estes últimos. A parada em equipamentos cujo funcionamento deva se dar continuamente pode acarretar danos a todo um sistema de produção e em virtude disto, sua operação

manutenção preventiva. Passou a fazer parte do dia-a-dia das indústrias a ocorrência de falhas nas máquinas. Passou a ter a tarefa de prevenir a como uma atividade ligada ao conserto das máquinas, vista é que a parada em qualquer um deles acarreta mais ônus à linha. Então, a manutenção, vista geral mais caros e sua presença nas linhas de produção se dá em menor número. O resultado outra abordagem por parte da manutenção. Além disso, equipamentos sofisticados são em automação e a entrada dos componentes eletrônicos na linha de produção passou a exigir passassem a ser mais sofisticados. Após esta guerra, novas exigências referentes à a cadência necessária, a automação foi sendo introduzida, fazendo com que os equipamentos os galpões de todas as fábricas localizadas nos países envolvidos no conflito. Para assegurar Durante a II Guerra Mundial, as exigências de produção de material bélico tomaram

similares. A prática de manutenção era predominantemente corretiva. poderia ser facilmente compensada pela transferência de suas atividades para equipamentos superdimensionadas para as tarefas a elas impostas. Assim, a parada em um equipamento sofisticados, o que se traduz em baixo nível de automação e, como segundo século XIX e até mesmo após a revolução industrial eram frequentemente pouco algumas. Trazendo a análise para o âmbito das indústrias e das atividades civis, máquinas, como indústria, geração de energia, aplicações bélicas e transporte para citar de manutenção sempre presente em qualquer atividade onde estejam envolvidas fazer um pequeno apanhado histórico acerca desta atividade. É certo que alguma atividade Antes que qualquer consideração mais profunda seja tecida sobre manutenção, cabe

2.1) Considerações Iniciais

CONCEITOS BÁSICOS DE MANUTENÇÃO

CAPÍTULO 2

passou a ser monitorada, como descrito por CLARK e PAASCH [7]. A manutenção preditiva, em meados da década de 60 veio fazer parte da rotina da indústria, embora ainda hoje, envolva em polémica sobre sua utilização, não pela conveniência em aplicá-la, mas quanto ao modo correto de aplicá-la.

A manutenção, no entanto, ainda era vista como uma atividade geradora de custos sem agregar valor ao produto ou serviço, como citado por CARDOSO e BELHOT [6]. Este argumento encontrava sustentação à medida em que a manutenção preventiva exigia a presença de estoques de sobressalentes e um contingente de mão-de-obra, aspecto inerente à manutenção, o qual poderia ficar várias horas sem ter serviço em andamento, o que se traduz em ociosidade. E a manutenção preditiva, embora bem aceita, exige investimentos altos em aparelhagem e treinamento de mão-de-obra.

Paralelamente, novas questões relacionadas ao ambiente, à qualidade e à segurança passaram a se tornar fatores de influência em vários ramos de atividade industrial, chegando a ter caráter legal ou normativo nos dias atuais.

Assim, novas abordagens foram dadas à atividade de manutenção, como TPM, RCM (Manutenção Centrada em Confiabilidade do inglês "Reliability Centred Maintenance") e manutenção Classe Mundial, conceitos apresentados adiante nesta seção do trabalho. Estas novas abordagens, reconhecendo a importância da atividade de manutenção, procuram integrá-la ao contexto geral das atividades das organizações [6]

A manutenção tem por função manter ou retornar os equipamentos às suas condições específicas de operação, definição esta não muito diferente de outras constantes nas referências [5], [6], [9] [10]. Quando é mencionada a expressão condições específicas de operação, fica implícito que a manutenção tem objetivos a serem alcançados.

Estes objetivos podem ser relativos ao desempenho do equipamento, com uma preocupação econômica, já que o desempenho adequado permite maior produtividade.

É possível que a preocupação seja com a disponibilidade do equipamento quando requerido - aspecto de peculiar importância para as forças armadas e hospitais.

E uma nobre tarefa da manutenção é garantir a segurança, tornando mínimos os riscos de que uma falha venha causar grandes prejuízos econômicos, ambientais ou mortes.

Em geral, estes objetivos listados - os quais fazem parte de um conjunto mais extenso, o qual engloba desde requisitos técnicos até exigências legais e governamentais - devem ser alcançados simultaneamente. Na verdade, os objetivos da manutenção são domínio não apenas do fabricante de um equipamento, ou de seu operador, mas de um público cujos interesses podem ser conflitantes, como cita HEMKE [4]. Considera-se aqui as agências reguladoras, os usuários, o ambiente, enfim, todo o universo que venha a interagir com a operação do equipamento.

Uma mostra de que a manutenção pode abrigar objetivos conflitantes pode ser visto na operação de uma companhia aérea : a divisão comercial requer a máxima utilização da aeronave, já que é um equipamento caro cuja parada gera perda de receita. Mas o setor de operações necessita assegurar a operação dentro das normas prescritas à esta atividade, destacando-se a preocupação com a segurança. Então seria ótimo se este equipamento pudesse voar sempre que se desejasse, mas de forma segura. Como há o desgaste natural - executando-se outros modos de falha - em algum instante deverá haver intervenção da manutenção. Isto toma tempo e se por um lado faz aumentar a segurança, de outro torna o equipamento indisponível durante a intervenção.

O problema retratado já seria suficientemente complexo, mas pode-se acrescentar outras variáveis como as ocorrências aleatórias, as quais podem exigir intervenção da manutenção sem prévio aviso.

Nota-se que a manutenção lida com a interrupção da utilização do equipamento, de forma que suas ações devem assegurar que estas interrupções ocupem o menor tempo possível. Surge então um conceito muito ligado à manutenção - a disponibilidade.

Por disponibilidade entende-se a relação entre o tempo no qual o equipamento é efetivamente utilizado ou está preparado para utilização e o intervalo de tempo total considerado para avaliação desta disponibilidade. Diversas maneiras de definir quantitativamente este conceito já foram desenvolvidas, sendo que a acima citada é uma destas, considerada a mais usual.

Uma implicação da manutenção com o conceito exposto acima é a de que uma intervenção tem um tempo de duração, além da própria paralisação do equipamento devido a falha. Além da inspeção ou substituição de itens, tem-se também a pesquisa da causa do

problema - não apenas de seus sintomas. A esta pesquisa denomina-se de diagnose. De qualquer forma, a intervenção da manutenção implica na redução da disponibilidade do equipamento.

Uma falha pode ser resultado de várias causas diferentes contribuindo juntas ou isoladamente, daí uma diagnose facilitada resulta em menor tempo para a descoberta da causa da falha, reduzindo o tempo de imobilização do equipamento. Além disso, quanto mais facilmente a causa de uma falha puder ser revelada, mais precisa será a determinação de suas origens e portanto, a confiabilidade torna-se favorecida pois a manutenção terá atuado de forma eficaz, pois não apenas terá atuado de modo rápido, mas precisamente sobre o origem da falha, [7].

A dificuldade em diagnosticar problemas não é uma responsabilidade isolada da manutenção. Na verdade, o projeto do sistema deve contemplar este aspecto seja com relação à sua configuração, seja com relação ao acesso aos seus componentes.

Esta é uma das maneiras de encarar a manutenção : depois da ocorrência da falha. Entretanto, muitos, serão a maioria dos equipamentos, não podem ser operados após a ocorrência da falha - uma usina nuclear após uma falha pode nem mesmo existir para ser reparada, sem falar nos danos ao ambiente. Portanto, deve-se antecipar a ação da manutenção, seja de modo monitorado, seja de forma periódica.

O raciocínio parece elementar. Para assegurar altos níveis de confiabilidade durante a operação do equipamento, bastaria estar sempre prevenido, conhecendo aproximadamente os períodos entre os quais as falhas ocorrem, ou monitorando os equipamentos de forma a identificar anormalidades na operação dos mesmos, indicando a possibilidade de ocorrência de uma falha destes. Mas nem todos os tipos de sistemas ou mesmo de componentes admitem esta política de antecipação à falha, sobretudo pela sua natureza - componentes elétricos são típicos deste comportamento.

A seguir, são apresentadas as práticas de manutenção cuja combinação tem dado origem a diversas maneiras de atender aos equipamentos. É possível que estas práticas ou operações [8] sejam confundidas com o termo políticas de manutenção. O termo políticas é mais adequado à estrutura de decisão que cerca um plano de manutenção, estando estas práticas contidas no âmbito maior de uma política de manutenção.

Tem-se então três maneiras básicas de abordar o problema da manutenção com relação ao tratamento da falha, maneiras estas conhecidas do público acostumado à manutenção e até mesmo ao público geral, pois algumas idéias como a prevenção das falhas já fazem parte do senso comum. Mais do que retratar estas operações de manutenção, o objetivo é mostrar que, sob o ponto de vista da contabilidade, nem sempre é possível optar por um determinado tipo de prática, por motivos já comentados nesta seção.

2.2)Manutenção Preditiva

Esta prática tem sido tomada quase como sinônimo de monitoração, mas esta definição não é rigorosa. A manutenção preditiva se ocupa em estimar o estado de funcionamento do sistema [5] pela medição de parâmetros vitais para sua operação, como temperatura, vibrações em eixos e mecanismos, intensidade de correntes elétricas, emissão acústica, análise da presença de partículas e verificação da composição química em óleos lubrificantes e isolantes. Diz-se que a manutenção preditiva é baseada na condigão do parâmetro, como citado por NEPOMUCENO [5] e MOTTER [9].

Pode-se ainda dizer que a manutenção preditiva acompanha o desenvolvimento da falha, apontando o melhor momento para a intervenção. A grosso modo, isto quer dizer dilatar conscientemente a utilização dos componentes, o que se traduz em economia. Por isso, esta prática tem sido bastante adotada, porém às vezes de forma errônea.

Primeiro porque nem todos os parâmetros de funcionamento podem ser medidos, assim como não é possível realizar isto para todo e qualquer equipamento. Além disso, as falhas pesquisadas devem fornecer sintomas e esta característica restringe o uso desta prática para equipamentos eletrônicos por exemplo.

O emprego da manutenção preditiva exige interpretação dos dados coletados, o que por si só já é um fator complicador. A medição e o tratamento dos dados a tornam uma operação sofisticada e cara. Além disso, se o objetivo é apenas dilatar o prazo de utilização de um componente, corre-se o risco de admitir a ocorrência de falhas sem que se possa ter controle sobre seus efeitos, isto porque a possibilidade de medir parâmetros irrelevantes por não conhecer os aspectos vitais do funcionamento de um sistema, tomando decisões com base em dados e interpretações errôneas, é um risco advindo da falta de critérios para a adoção da manutenção preditiva.

Por isso, adotar a manutenção preditiva sem analisar previamente os sistemas ou sem que estes tenham sido projetados com esta possibilidade pode ser uma péssima idéia que alia altos custos com baixa confiabilidade.

Algumas técnicas têm sido associadas a esta prática, tais como :

-tratamento de sinais;

-análise de emissão acústica;

-termografia;

-análise de óleos lubrificantes para medida de desgaste;

-análise da composição de óleos isolantes de transformadores.

Esta prática é benvida no caso de atividades que requeram altos índices de disponibilidade e segurança, como as centrais nucleares, refinarias de petróleo, estações de bombeamento e indústrias de processo contínuo (papel, químicas) entre outras, como cita NEPOMUCENO [5].

A manutenção preditiva tem ainda uma interrelação com as áreas ditas produtivas da empresa, pois uma vez constatado o desenvolvimento da falha, deve-se programar a intervenção e alocar recursos para sua realização. Com a deterioração do equipamento, a exigência por mais recursos - materiais, humanos e até tempo de paralisação - passa a ser maior e as intervenções cada vez mais difíceis de serem realizadas.

2.3) Manutenção Preventiva

O senso comum e o público de manutenção tem muito apreço por esta prática em razão de se anteciper à falha. É uma característica que à primeira vista a torna muito cômoda e segura.

A manutenção preventiva se dá pela intervenção no sistema em períodos pré-determinados quando, além de inspeções em componentes do sistema, etêua-se a substituição de alguns deles. Em geral, há um guia ou manual que deve ser utilizado quando das revisões preventivas, indicando onde deve se dar sua ação, como exemplifica a Tabela

2.1, MOTTER [9], onde apresenta-se um guia de tarefas preventivas para uma máquina laminadora de papel.

Uma das atribuições da manutenção preventiva é manter o sistema em operação com vistas à sua rentabilidade. Entretanto, sempre é necessária a imobilização do equipamento, ou seja, a manutenção preventiva toma tempo. Alguns aspectos devem ser observados de modo a permitir que esta prática, além de assegurar a confiabilidade do sistema, seja também viável do ponto de vista econômico. MOTTER [9] comenta sobre a necessidade do treinamento das equipes envolvidas com esta atividade, de maneira a familiarizá-las com os equipamentos e também permitir operações rápidas e seguras, retornando o equipamento à operação o mais breve possível. O mesmo autor afirma que devido ao prazo necessário à execução da manutenção preventiva, os conflitos entre a área de manutenção e de produção são comuns no ambiente empresarial, fato comprovado pela experiência já obtida junto a empresas.

Tabela 2.1 - Guia de Manutenção Preventiva em Máquina Laminadora de Papel, [9]

RELATÓRIO DE PROGRAMAÇÃO DO USUÁRIO CWB/FI-002-M
ROTEIRO DE MANUTENÇÃO PREVENTIVA

| Grupo: HLP | Data início | Data término | Horim |
|-----------------------------|----------------|--------------|-----------------|
| Cheia: | | | |
| Quant. | Sub-componente | Código | Serviço |
| COMPONENTE SA - 5096 | | | |
| (02) Rolamento Estera | | 6122 | (V) - (R) - (S) |
| (01) Engraxagem | | 18137 AA | (V) - (R) - (S) |
| COMPONENTE SA - 5104 | | | |
| (01) Chaveia | | 32112-634 | (V) - (R) - (S) |
| (01) Chaveia | | 32112-642 | (V) - (R) - (S) |
| (01) Chaveia | | 32112-639 | (V) - (R) - (S) |
| (01) Bucha | | 23488 AA | (V) - (R) - (S) |
| (01) Bucha | | 33516-109 | (V) - (R) - (S) |
| (03) Rolamento Estera | | 23132-208 | (V) - (R) - (S) |
| (01) Braço de Ligeira | | 34481-306 | (V) - (R) - (S) |
| (01) Venti - Record - Subst | | 34481-306 | (V) - (R) - (S) |
| (01) Mão | | 14168 | (V) - (R) - (S) |
| (01) Eixo | | Item 12 | (V) - (R) - (S) |

É importante reconhecer que tempo imobilizado significa realmente produção reduzida ou interrompida, mas a preventiva retorna o equipamento em condições que minimizem a possibilidade de ocorrência de falhas durante a operação do mesmo - o ideal seria a eliminação desta possibilidade. Uma vantagem desta prática é o prévio conhecimento

do início e da duração das intervenções, o que permite incluir esta atividade no planeamento da produção.

Outro fator a ser levado em consideração é a necessidade de materiais como ferramentas e principalmente, sobressalentes. Estes recursos devem estar disponíveis antes da parada do equipamento e o meio para que isto seja conseguido é a presença de estoques ou de almoxarifados exclusivos da manutenção. É um aspecto que gera conflitos pois, sobretudo na indústria, as organizações procuram manter mínimos estoques de produtos e insumos para reduzir o custo de armazenagem. Se a manutenção acena com a necessidade de estoques sem gerar receita - ao menos diretamente - um olhar menos atento pode determinar a inconveniência em mantê-los.

Nem todos os sistemas têm na manutenção preventiva o modo mais favorável para combater as falhas. É possível realizar esta atividade sem no entanto acrescentar nenhum benefício. A ação da manutenção preventiva pode inclusive ser detrimental se mal aplicada - em equipamentos que não justificam seu emprego - causando desde prejuízos até redução na confiabilidade do equipamento. Outro problema é que intervenções exigem desmontagens e uso de ferramentas, as quais podem ser utilizadas de maneira incorreta - sacadores de polias e de rolamentos são exemplos típicos - causando danos não previstos e anulando os benefícios da manutenção preventiva, como ressaltam CARDOSO e BELHOT [6]. Ou seja, o erro humano é um risco associado à manutenção preventiva embora este erro associado às intervenções corretiva e preditiva. No caso da manutenção preventiva, este erro torna-se mais crítico face à frequência exigida para as intervenções.

Cabe ainda observar que embora a manutenção preventiva, quando corretamente aplicada, indiscutivelmente possibilite aumentar a vida do sistema, não possibilita que o mesmo possa operar indefinidamente. Algumas partes do equipamento são substituídas, enquanto outras não sofrem intervenções ao longo da vida do sistema - caso típico de peças estruturais. Espera-se que devido às solicitações habituais sofridas pelo componente durante a operação, o mesmo atinja a deterioração, usualmente devido aos mecanismos de fadiga e desgaste, determinando o fim da vida do sistema do qual faz parte.

Outro detalhe que pode ser observado nos manuais de manutenção de diversas máquinas, é que com o passar do tempo os intervalos entre revisões podem diminuir, o número de componentes substituídos nestas revisões pode ser cada vez maior ou, como é

freqüente, os dois eventos ocorrem simultaneamente, tornando a operação do equipamento economicamente inviável.

Neste momento, o operador pode decidir por uma reforma completa, como a retificação do motor de um veículo, ou pela substituição da máquina.

Sem a ação da manutenção preventiva, deve-se esperar que esta deterioração chegue bem mais cedo.

2.4) Manutenção Corretiva

A manutenção corretiva é executada após a ocorrência da falha, no senso comum, após a quebra. Em geral, há a imobilização do equipamento ou na melhor das hipóteses, um sensível decréscimo em seu desempenho.

Como a falha já terá ocorrido, o equipamento ou sistema estará propenso a causar toda sorte de danos inclusive ao ambiente onde está inserido, como poluição de bacias inteiras no caso de rompimento do casco de um petroleiro, morte de grande número de pessoas em terra e a bordo no caso de acidentes aéreos, desabamento de pontes e edifícios, enfim, um sem número de efeitos maléficos toma lugar se a falha se desenvolveu a ponto de causar catástrofes.

Percorrendo as seções de muitas instalações fabris, é possível notar a aversão que os profissionais de manutenção nutrem pela corretiva, chegando a classificá-la como medida do nível de incompetência do setor em lidar com as falhas. E, realmente, é desejável que as falhas não ocorram.

A manutenção corretiva é atacada em virtude de estar associada a efeitos de falhas que causam sempre os maiores prejuízos possíveis, pois além dos efeitos das falhas, estão presentes os problemas da imobilização do equipamento e perda de produção ou utilidade em virtude da falha [10], espera em fila nas oficinas, custo da substituição do item avariado e o problema da diagnose, o qual pode tomar mais tempo que todos os outros fatores reunidos.

Porém, as formas de prevenir as falhas tiveram origem nas intervenções corretivas. Então, uma das contribuições desta prática é prover dados históricos para o

acompanhamento dos sistemas e futuros subsídios para decisões. Senão vejamos, como seria possível determinar o padrão de comportamento das falhas dos sistemas onde é aplicada a manutenção preventiva sem que estas falhas tenham ocorrido?

Os sistemas também estão sujeitos a variações em suas condições operacionais, como por exemplo, uma aeronave está sujeita a diferentes tripulações cuja habilidade pode variar aleatoriamente. Estes fatores aleatórios contribuem para que algumas falhas fujam ao escopo da manutenção preditiva ou da preventiva, pois seu comportamento é aleatório (podem ocorrer a qualquer tempo sem que sintomas sejam previamente detectados), além de terem causas diversas daquelas normalmente associadas ao equipamento. Um exemplo é o aumento do índice de falhas em turbinas de aviões operando em regiões vulcânicas. Sabe-se que um vulcão ao entrar em erupção lançará partículas a dezenas de quilômetros de altitude, sobretudo até os dez mil metros - altitude de cruzeiro das aeronaves à jato. Sabe-se que estas partículas provocarão entupimento de dutos e filtros, além da erosão nas partes anteriores das turbinas. O que não se pode prever no projeto e no planejamento de manutenção das aeronaves é quando haverá estas erupções. Temos aqui um caso onde a ocorrência de falhas aleatórias exige intervenções corretivas sem que a manutenção tenha sido negligente.

É sob o aspecto da contabilidade, existem sistemas os quais simplesmente não aceitam intervenções preditivas ou preventivas pelas suas características (arranjo, natureza de funcionamento, inexistência ou impossibilidade de coletar medidas e outros). Vejamos o exemplo simples de uma lâmpada, a qual não avisa sobre a ocorrência de uma falha, pois em operação normal, ela simplesmente queima e para de funcionar. Neste caso, a falha deve simplesmente ser tolerada. Entretanto, a ocorrência da falha não deve causar os espantosos efeitos comentados anteriormente. Tanto a manutenção, como os projetistas têm condições de atenuar ou eliminar efeitos das falhas, lançando mão de recursos como a redundância - instalação de sistemas capazes de cumprir a função em caso de falha do sistema principal, a alteração na disposição dos componentes do sistema [7] e, mais recentemente, a concepção de sistemas tolerantes à falha [11].

Há de se ressaltar que algumas falhas podem ser toleradas até um momento conveniente para a imobilização do equipamento, dando origem ao termo corretiva programada. Deve-se tomar a precaução de não confundir esta prática com a preditiva, pois no caso da corretiva programada, a falha terá ocorrido sem que tenha sido monitorada.

E, na vertente lucratividade, obtêm-se a justificativa para a sua implementação. Isto porque, para manter os equipamentos dentro da faixa de tolerância citada, são necessários

qual os resultados podem ser aceitos sem problemas. habilidade do equipamento em operar dentro de uma faixa conhecida de desempenho, na confiáveis - são capazes de produzir mais e melhor. O termo capacidade traduz esta fundamentando esta opinião no fato de que equipamentos bem cuidados - e portanto HERNSTEINS [12], a explicação para o esmero no trato com as máquinas, lucratividade das operações. No aspecto qualidade, encontra-se, segundo A TPM caracterizou-se no início de sua aplicação pela ênfase na qualidade total e na

[12].

japonesas na década de setenta, embora seu surgimento tenha se dado nos Estados Unidos manutenção. Sua origem, na forma como é conhecida no Brasil, remonta às indústrias cercado o equipamento de cuidados desde sua operação até a excelência técnica da equipamento, mantendo seu desempenho em níveis aceitáveis o maior tempo possível, A manutenção da produtividade total preocupa-se em assegurar a produtividade do

Maintenance”, com a derivação RCM-II), além da manutenção de classe mundial. manutenção baseada (centrada) em confiabilidade (RCM, do inglês “*Reliability Centred Maintenance*”), a manutenção da produtividade total (TPM, do inglês “*Total Productive Maintenance*”), a possível, tendo ênfases diferentes. Três abordagens que se destacam - não as únicas! - são a O objetivo comum é utilizar o equipamento com segurança pelo maior tempo

produto ou serviço.

atividade uma parte do processo de produção de um bem, qualquer que seja sua natureza - orienta, trouxe algumas abordagens mais amplas à manutenção por reconhecerem nesta A implementação de programas de qualidade sobretudo a partir da década de

2.5) Abordagens da Manutenção a partir das Práticas Fundamentais

confiabilidade exigida para o sistema em questão. ocorrência da falha é uma decisão a ser tomada após cuidadosa análise dos aspectos da incompetência. Seu emprego é, em algumas ocasiões, a única alternativa. Permitir ou não a operacionais, da manutenção ou até mesmo de projetos deficientes, não é um sinal de Concluído, a manutenção corretiva, embora possa ser exigida em virtude de erros

recursos materiais e humanos, em virtude da ênfase dada à manutenção preventiva pela TPM. Embora este recursos representem certamente custos para a empresa, a redução ou eliminação de descartes e retrabalhos nos itens produzidos é revertida em lucro a médio e longo prazo.

É interessante ressaltar que o lema da TPM é a busca do nível "zero defeitos" ou "quebra zero", [10]. Este lema pressupõe a extinção da manutenção corretiva e, característica marcante desta abordagem, a manutenção preventiva (também a preditiva) é intensamente estimulada e incentivada. Em virtude deste objetivo relacionado à busca pelo "zero defeitos", a tradução do termo TPM foi, segundo BLANCO [13] inicialmente incorreta, pois a sigla era interpretada como manutenção produtiva total.

Operadores, mecânicos, eletricitas, técnicos, engenheiros, todos os níveis estão envolvidos na execução da manutenção da produtividade total. Seus procedimentos começam pela simples limpeza e execução de pequenos reparos pelos operadores, sem a necessidade de contatar a seção de manutenção, a observação do estado do equipamento quando em operação (ruídos, geração ou perda de calor, vazamentos, odores estranhos e outros exemplos de anormalidades) para notificação à manutenção, até a qualificação de toda a equipe envolvida na manutenção, incluindo treinamento, aparelhagem das oficinas, ferramenta adequado e constante reciclagem. Não por acaso, o passo inicial na implantação da TPM, como afirma RIBEIRO [14] é a aplicação da técnica conhecida como "5 S" ("housekeeping").

A técnica dos "5 S" é assim denominada em virtude das iniciais dos nomes dos cinco passos que a compõem em japonês, sendo :

- "seiri" (organização) - separar materiais e objetos úteis, providenciando um destino adequado para os materiais que não tenham utilidade;

- "seiton" (ordenamento) - ordenar os materiais segundo seu volume e peso, além principalmente - de observar sua frequência de utilização, para obter uma disposição lógica para os objetos sejam do setor de manutenção ou de produção;

- "seiso" (limpeza) - não apenas para a higiene do local de trabalho, mas para facilitar a inspeção do ambiente e - particularmente útil em manutenção - tornar a detecção de problemas facilitada;

- "seiketsu" (asseio) - conservação da higiene física do local de trabalho, mas também mental; isto significa agir para que os benefícios alcançados não retrocedam;

- "shitsuke" (disciplina) - é a consolidação do "5 S", onde se espera que uma cultura de melhoria contínua esteja estabelecida.

O "5 S" consiste em uma ferramenta de caráter mais educacional que propriamente técnico. Sua adoção foi, segundo RIBEIRO [14], muito criticada em virtude de representar uma filosofia educacional japonesa (onde a aplicação do "5 S" na indústria se dá desde a década de 50), interpretada como de difícil assimilação no mundo ocidental. De fato, o autor deste trabalho pôde verificar que ao longo de sua aplicação na indústria, houve casos em que a falta de continuidade nos programas de melhoria da manutenção levou ao "housekeeping" a condição de modismo. Apesar destas críticas, é de grande utilidade sua aplicação no início da implementação de programas que visem aperfeiçoar a manutenção.

Embora seja um conceito profícuo à qualidade da manutenção e da própria produção, a aplicação da TPM colecionou alguns fracassos, se considerarmos sua aplicação em empresas brasileiras. Isto se deve à interpretação errônea ou incompleta de alguns de seus tópicos. Um dos problemas, segundo HERNALSTEBENS [12], é que a implantação desta abordagem (TPM), desde seus primeiros passos, é assunto para toda a empresa e a decisão deve partir dos níveis hierárquicos mais altos. Muitas empresas - algumas já fora do mercado - legaram esta tarefa exclusivamente à manutenção, como o autor deste trabalho teve a oportunidade de acompanhar quando estagiário em uma delas. Há também o problema do conflito entre as seções de uma empresa em virtude da própria aplicação do "housekeeping", pois a seção de produção deveria ceder cerca de dez minutos de cada operador para que o mesmo possa executar as observações e pequenos reparos que se fazem necessários nas máquinas por ele operadas.

Outro erro na aplicação da TPM, este de natureza técnica, foi reforçar a ideia de que a manutenção preventiva é a prática ideal para atingir o "zero defeito". Quando aplicado à máquinas operatrizes convencionais, obtêm-se bons resultados com a redução do número de ações corretivas. Mas à medida em que máquinas CNC ou equipadas com CLP tornaram-se parte da indústria, esta ideia passou a mostrar-se equivocada.

E, por fim, a continuidade no programa tem de ser respeitada, sob pena de haver retrocessos e aumento no número de quebras de máquinas [15].

Outra abordagem atualmente muito difundida, contendo sofisticadas e constituído-se num passo para dotar a manutenção de um carácter científico, saindo da experimentação, é a RCM ou, em português, manutenção centrada em confiabilidade [13]. O carácter científico deste tipo de manutenção, segundo BLANCO [13], está no fato de que a RCM busca identificar os fatores que levam um equipamento a falhar, requerendo estudos sobre as solicitações impostas ao mesmo, condições operacionais e um profundo conhecimento sobre o equipamento : seus componentes, a relação entre os mesmos, comportamento à falha e características de projeto.

É conveniente ressaltar que, empregando métodos de análise de confiabilidade - destacadamente o FMEA (do inglês "*Failure Modes and Effects Analysis*"), a ser discutido detalhadamente em seção adiante neste trabalho - para avaliar este parâmetro nos sistemas, a RCM fornece uma base para a tomada de decisões na seara da manutenção. Uma vantagem da RCM é permitir que se opte pela prática mais adequada para executar a manutenção de cada sistema, seja ele mecânico, elétrico, eletrônico ou qualquer outro.

Um desdobramento da RCM, a RCM II, está voltada para a análise de risco e pesquisa dos erros associados à manutenção, quantificando grandezas tidas como qualitativas e de certa forma subjetivas, pois risco envolve percepções e sensações pessoais, sujeitas a contamar uma análise precisa, como afirma BLANCO [13].

Tanto a RCM quanto a RCM II, além das conveniências técnicas, possibilitam aumento na rentabilidade do empreendimento, pois o equipamento estará sendo mantido com as técnicas mais adequadas e sofrendo intervenções onde é necessário haver. Certamente, apenas por excelência técnica, nenhuma abordagem encontraria eco no meio empresarial. O próprio MOUBRAY [16] avalia a RCM como uma política de difícil implementação, mais recomendada a empresas de grande porte, sobretudo pelo custo das ferramentas de análise como o FMEA, ao qual a RCM se encontra fortemente relacionada, e muitas vezes o FMEA é tomado erroneamente como sinónimo de RCM.

A manutenção denominada de classe mundial é uma orientação para a execução desta atividade voltada à qualidade e à segurança, podendo conter a aplicação da RCM II.

Durante a fase de implantação das diretrizes das normas ISO-9000 na indústria - sobretudo no início da década de 90 - o quesito qualidade foi o norte da manutenção classe mundial, tornando-a muito semelhante à TQM como citado por BLANCO [13]. O estabelecimento das normas ISO-14000 acrescentou a necessidade de preocupações ambientais quando do planejamento e execução da manutenção, [13]. Estes fatos podem sugerir que se esteja tratando de um tipo de manutenção afeito a modismos e isto é em parte uma afirmação verdadeira : chama-se mundial por haver tendências a serem seguidas por empresas líderes em seu segmento em todo o planeta.

Segundo BLANCO, [13], a manutenção classe mundial exige o emprego de elevado índice de informatização em seu planejamento, preocupações ambientais e de segurança do trabalho, além de estar assentada sobre a estratégia de negócios da organização, ou seja, a manutenção deve estar em sintonia com os objetivos amplos da organização, sendo orientada por eles em termos de custos, qualidade (tanto da manutenção quanto dos produtos ou serviços prestados pela organização) e emprego de tecnologia entre outros.

Em maior ou menor grau, estas abordagens contribuem para a melhoria da performance da manutenção, dependendo da maneira como são implementadas e executadas. Qualquer uma delas exige mudança de postura não apenas dos profissionais de manutenção [6], mas de toda a organização, exigindo uma nova cultura empresarial, pois há a exigência de qualificação de todos os níveis hierárquicos da organização - principalmente do chão de fábrica - e o desenvolvimento de padrões a serem seguidos pela manutenção com base em argumentos científicos.

Finalizando, é interessante mencionar que até o momento, não foi utilizado o termo "política de manutenção" para definir manutenção corretiva, preventiva, preditiva ou as abordagens citadas. Segundo BEA [8], pode-se utilizar os termos "prática" e "técnicas" de manutenção quando se deseja fazer referência à periodicidade das intervenções (como no caso da preventiva, preditiva e corretiva).

Política de manutenção vem a ser a estrutura utilizada para tomar decisões em manutenção, compreendendo metodologia de análise de falhas, aspectos econômicos, técnicos e legais da operação do equipamento, seleção das práticas convenientes e gestão de todos os recursos - inclusive humanos - envolvidos na manutenção.

Do que foi visto neste capítulo, uma política de manutenção pode ser encontrada na RCM, onde a confiabilidade é um critério para a tomada de decisões a respeito da manutenção.

Nos capítulos seguintes, a intenção é propor uma metodologia para a elaboração de uma política de manutenção voltada à confiabilidade do sistema, analisando inclusive o porque da confiabilidade ser um critério de tomada de decisões.

O usuário de um equipamento exigirá da manutenção a intervenção adequada, eficaz, que garanta o cumprimento dos objetivos previstos na utilização do equipamento, em conformidade com suas especificações, com o menor dispêndio associado à própria

assegurar a confiabilidade prevista ao longo da vida de um equipamento. Estendendo o raciocínio à confiabilidade, à manutenção cabe a tarefa de surgir como um requisito para que os sistemas tenham assegurado seu desempenho previsto ainda que seja executada em nome da rentabilidade de um empreendimento. A manutenção, pois esta atividade agrega custos, podendo exigir a parada do equipamento, alta confiabilidade ao longo do período de sua utilização e não de exigir a execução da manutenção, evidentemente, são concebidos com a finalidade de apresentarem

3.2) Requisitos de Manutenção de Equipamentos

Esta seção pretende discutir os aspectos relacionados ao custo das ações de manutenção, explorando sua interface com a confiabilidade, trazendo exemplos de abordagens de decisões orientadas para o aspecto dos custos da manutenção.

A tomada de decisão em manutenção no cotidiano das organizações torna-se um problema bem mais amplo que apenas selecionar uma prática de manutenção se tornou um importante fator na estratégia das organizações, pois, assegurando o desempenho dos equipamentos, contribui para fortalecer a competitividade da empresa, ao mesmo tempo em que tem se tornado uma atividade que exige uma abordagem cada vez mais sofisticada, fato que contribui para uma visão sobre a manutenção como uma atividade geradora de custos crescentes. Além disso, os equipamentos utilizados na indústria, nos serviços e nos transportes têm apresentado sofisticação crescente, empregando diversos tipos de componentes e exigindo, num único exemplar, o emprego de várias práticas de manutenção simultâneas. Esta realidade impõe um questionamento sobre a necessidade da manutenção equalizar sua porção técnica com a parcela operacional do equipamento.

3.1) Considerações Iniciais

MANUTENÇÃO DE EQUIPAMENTOS

CAPÍTULO 3

Cada situação pode exigir um nível de manutenção, o qual, em função de diversos fatores, pode não ser o melhor tecnicamente falando. Por outro lado, deixar que as falhas paradas do equipamento.

ordens diversas, pois exige-se mão-de-obra, peças sobressalentes, instrumentação e até a assim o custo de sua ocorrência. Porém, as intervenções da manutenção acarretam custos de operacionais da manutenção, pois esta atividade é profícua em atacar as falhas, reduzindo afirma WASSSEL, [17]. Neste ponto, pode-se perceber o conflito entre fatores técnicos e o custo de sua prevenção, correção ou predição, conforme o tipo de equipamento, como Tomar decisões em manutenção exige comparar o custo da ocorrência da falha com

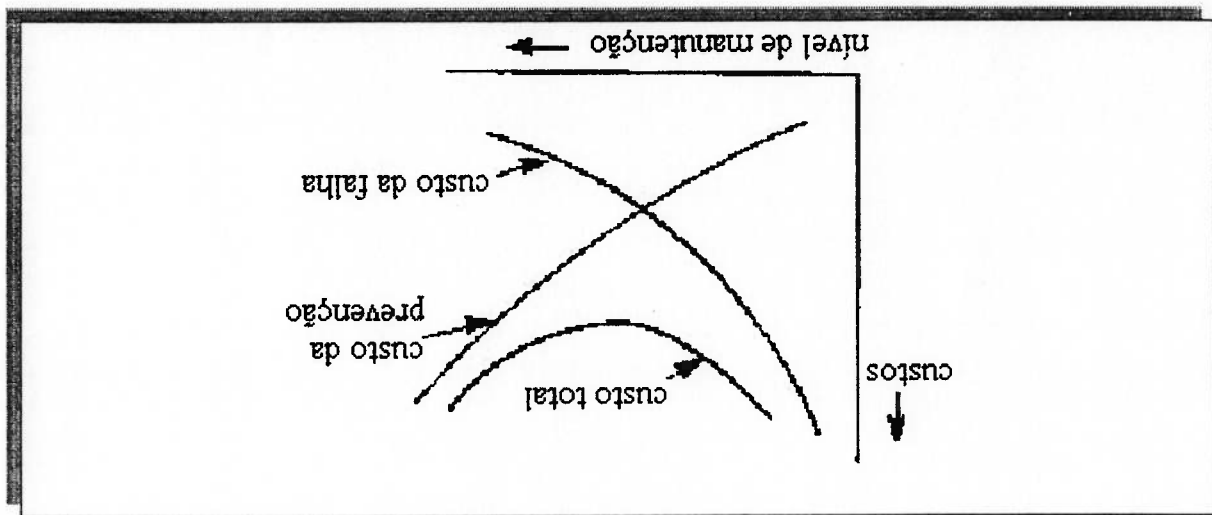
momento adequado para analisar as ações de manutenção. Nos exemplos citados, fica evidente o conflito entre a parte técnica e a operacional da manutenção, mas deve-se ressaltar que o fim da vida de um equipamento não é o

casos comuns no cotidiano das empresas. máquinas-ferramenta que não mais produzem itens com a qualidade requerida, pois são exemplo, pode-se citar veículos muito antigos sofrendo quebras em uma viagem, ou vez mais na manutenção de equipamentos cujo desempenho não mais se restaura. Como decisão em manutenção - trazendo também prejuízos em sua operação, pois gasta-se cada vez maior de recursos sem garantir a conservação do produto - este fato mostra que o critério financeiro não é único e que a confiabilidade reforça a tomada de decisão em manutenção exigidas passam a consumir um montante cada vez maior de recursos sem garantir a conservação do produto - este fato econômico, quando as ações de manutenção exigidas passam a consumir um montante cada fim de sua vida. Em geral, o fim da vida de um produto é estabelecido por critérios se aplicar), quais os pontos a serem atacados e o momento em que o equipamento atinge o tomada de decisão em manutenção, ou seja, que práticas adotar, sua periodicidade (quando ao equipamento (sobretudo a evolução das falhas), de modo a fornecer subsídios para a visto adiante neste trabalho, é necessária a análise do histórico das ocorrências relacionadas tangente ao aspecto dos custos, são sentidos a médio e longo prazo, até porque, como será Os benefícios da aplicação dos conceitos de confiabilidade à manutenção, no que

rentabilidade do referido equipamento, como afirmam CARDOSO e BELHOT [6]. conflitante com o objetivo de produtividade dos recursos, compreendida como a assegurar a confiabilidade e o desempenho de um equipamento, num primeiro momento, seja possível observar na indústria em geral. Este comportamento é motivado pelo fato de que manutenção. Este fato não significa que se deva suprimir as ações de manutenção, como é

A abordagem da manutenção voltada para a confiabilidade é fortalecida pelo balançamento entre estes custos, pois o aspecto das falhas é objetivamente etucidado. Em uma análise descuidada, pode parecer que orientar a manutenção sobre os conceitos da confiabilidade torna a operação de um equipamento mais onerosa e isto pode ser verdade se apenas se levar em consideração a parcela do nível de manutenção requerido. Ora, sabe-se que nenhum operador realizará qualquer política de melhoria se estas melhorias não contemplarem a redução ou ao menos o controle de seus custos.

Figura 3.1 - Comparação entre os Custos das Ações de Manutenção e das Falhas



Muitas vezes, a legislação exige que determinados tipos de falha sejam mantidos sob estreito controle, como no caso da atividade aeronáutica e da geração de energia, como citado por LEWIS, [18]. O ponto ideal de balançamento entre os custos da falha e de sua prevenção pode ser visualizado na Figura 3.1. A localização deste ponto de mínimo custo total depende de fatores técnicos, legais e até mesmo de fatores subjetivos como a aversão ao risco que o operador pode ter em função da relevância de suas atividades, mas para efeitos de simplificação, levar-se-ão em conta apenas as parcelas tangíveis dos custos de manutenção.

ocorram até que assumam uma proporção que torne a operação do equipamento inviável do ponto de vista econômico também não é aceitável e pode trazer consequências danosas ao operador de um equipamento mantido nestas condições.

- contratos com fornecedores e
 - treinamento de pessoal técnico e administrativo;
 - parada do equipamento;
 - sobressalentes e ferramentas;
 - encargos administrativos;
 - mão-de-obra;
 - geram custos :
- Especificamente sobre manutenção, pode-se enumerar os seguintes fatores que

eventualmente cobrir a falha em um outro componente (redundância) e assim por diante.

Alguns aspectos do custo de prevenção contra as falhas relacionam-se com o projeto do equipamento, não estando diretamente relacionados com a atividade de manutenção. Isto inclui providências como a adoção de dispositivos de segurança, superdimensionamento de componentes, componentes presentes em número maior que o necessário para

3.1.

atacada do modo devido, elevando a parcela relativa ao custo das falhas, como na Figura

Segundo LEWIS [18], a adoção da prática inadequada sempre trará os maiores custos associados à manutenção, sobretudo pelo fato de que a falha não estará sendo

tratamento científico das falhas.

conflitante com a abordagem da confiabilidade, pelo contrário, reforça a necessidade do

ferramenta a mais no momento da tomada de decisão em manutenção o qual não é

O critério econômico é um dos requisitos da manutenção de equipamentos e uma

segurança atingidos pela aviação seja ela civil ou militar.

altos custos associados à esta atividade, por outro também explica os altos níveis de

periódica de peças independentemente do seu estado. Se por um lado este rigor explica os

no caso da aviação, onde, para alguns itens, é exigida uma rigorosa política de substituição

energética da manutenção. Mas neste caso, entram na avaliação os fatores intangíveis, como

decisão para algum ponto diferente do mínimo custo, sobretudo por exigir uma ação mais

Muitas vezes, os requisitos de manutenção de um equipamento podem deslocar a

- ações imperfeitas, gerando novas intervenções e indução de novas falhas inerentes às intervenções, como no caso de componentes mecânicos incorretamente reparados, para citar os mais comumente referidos na literatura acerca do tema.

Por sua vez, a falha pode onerar a operação de um equipamento segundo os fatores :

- custo do lucro cessante;

- custo do reparo/reposição do item;

- despesas jurídicas e indenizações no caso de acidentes;

- custo da perda da imagem, que é um fator intangível, mas de grande importância;

- horas-extras eventualmente necessárias para o retorno do equipamento à operação e

- risco da perda de vidas ou ferimentos, danos ambientais, danos a terceiros e assim por diante, para citar os principais.

Muitas vezes, a decisão sobre a prática de manutenção a ser adotada se defronta com aspectos subjetivos, sobretudo no caso do custo das falhas. Em outras ocasiões, como já foi citado, a legislação impõe requisitos à manutenção sobretudo relativos à segurança, como no caso da aviação.

Assim, quando se pensa em suprir a manutenção preventiva para evitar os gastos que esta prática acarreta, deve-se ter em mente sua adequação ao equipamento, os tipos de falhas a serem evitados, as consequências de uma eventual falha, a importância do equipamento no contexto produtivo da organização, a facilidade de obtenção de peças sobressalentes e uma série de fatores os quais, como se pôde observar, podem ser de difícil mensuração.

O mesmo pode ser dito com relação à manutenção preditiva, pois sobre este tipo de manutenção pesam ainda os custos da mão-de-obra específica, pois muitas vezes a decisão sobre a intervenção é tomada com base em análise de dados coletados e processados por computador, encarecendo ainda mais o processo.

A prática de manutenção que tende a gerar mais custos, segundo MIRSRAWKA, [10], é a corretiva, pois além dos custos da intervenção em si, tem-se ainda os custos de uma falha imprevisível, que pode variar desde uma pequena interrupção na operação até a

ocorrência de falhas catastróficas que podem gerar além da perda do equipamento, perda de vidas humanas e uma série de conseqüências agravadas pela sua imprevisibilidade.

A TPM (Manutenção Produtiva Total), referida na seção anterior deste trabalho é bastante produtiva em atacar o custo das falhas e seus resultados técnicos em equipamentos mecânicos tendem a ser satisfatórios, pois concentra ênfase na manutenção preditiva e na preventiva. Mas seu custo é alto em virtude da frequência das intervenções e do intenso emprego de mão-de-obra, algumas vezes reduzindo o tempo de operação do equipamento para a execução de tarefas de manutenção, como é de conhecimento do autor deste trabalho. Este fato pode explicar a descontinuidade em sua aplicação como visto em algumas empresas brasileiras, as quais se limitaram a adotar a política dos "5'S" e procedimentos elementares de manutenção como limpeza e lubrificação.

A RCM (Manutenção Centrada em Confiabilidade) também ataca os custos das falhas e é considerada mais econômica na questão dos custos associados à manutenção, pois, como afirma BLANCO [13], a RCM procura aplicar através de decisões baseadas em ferramentas de análise da confiabilidade a prática adequada a cada tipo de equipamento/componente. Porém, seus custos se elevam em virtude da utilização de ferramentas de análise específicas como o FMEA (a ser explorado adiante neste trabalho), as quais são comumente dispendiosas, exigindo inclusive consultoria especializada na sua aplicação.

MOTTER, [9], traz o exemplo da evolução da manutenção em uma máquina de laminação de papel, onde foi elaborado um gráfico similar ao da Figura 3.1, traçando ao longo do tempo o custo total de manutenção, obtendo o gráfico apresentado na Figura 3.2. Ao ser atingido o nível crítico, onde o custo de manutenção para evitar as falhas assumiu um valor alto demais, segundo MOTTER de cerca de 10% do valor depreciado do equipamento ao mês, optou-se por sua reforma completa, uma decisão bastante típica em manutenção.

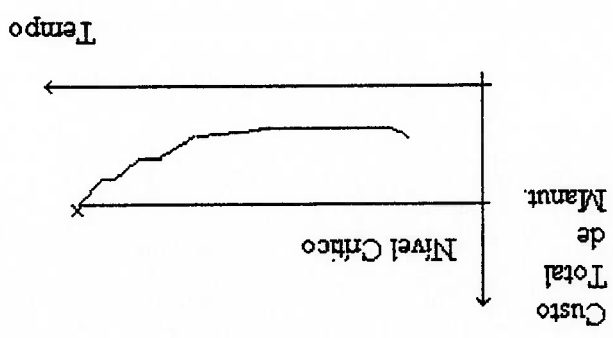
O projetista de um equipamento nunca deve imaginar seu produto operando com pessoas hábeis e cuidadosas, mas sim, procurar colher todo um arsenal de informações sobre as possibilidades de erros humanos em equipamentos similares. Isto é um fator complicador para produtos inovadores, mas WASSSEL, [17], ressalta que sempre é possível colher informações com vistas à melhoria de um projeto. Assim, pode-se evitar que botões sejam acionados em sequência incorreta, automatizando estas funções (como na partida de motores elétricos trifásicos de grande potência) ou que sobrecargas sejam aplicadas causando danos a todo um conjunto mecânico dotando o equipamento de embreagem e limitadores. Para WASSSEL, [17], um dos meios para se alcançar estas melhorias de projeto

Por mais automatizada que seja uma tarefa, a operação de um equipamento, em maior ou menor grau exigirá a intervenção humana e isto é uma assertiva muito importante para a atividade de manutenção. WASSSEL, [17], afirma que o funcionamento de qualquer produto fica prejudicado se for exigida grande intensidade de intervenções humanas, pois é exatamente neste aspecto que se encontra a maior variabilidade operacional, no que tange aos aspectos de habilidade, atenção e até mesmo de intenções.

3.3) Considerações sobre a Falha Humana

Um dos fatores mais importantes no custo e na eficácia de qualquer ação de manutenção é o fator humano, pois é a quem cabem as decisões e a qualidade da manutenção, mas também, é a parcela que, segundo WASSSEL [17], constitui a maior limitação a esta atividade. Por isso, será discutida brevemente a influência do fator humano na manutenção.

Figura 3.2 - Gráfico Custo Total de Manutenção x Tempo para Máquina de Laminção de Papel, adaptado de [9].



é verificar as reações dos operadores durante a realização de ensaios ou simulações antes do lançamento do produto.

O erro humano é de especial interesse para a manutenção pois além da variabilidade normal nas ações humanas, o homem de manutenção (como mecânicos e eletricitistas) pode trazer vícios na realização de suas tarefas e seu próprio estado de espírito tende a comprometer a qualidade e por conseguinte a confiabilidade da manutenção, colocando em risco não apenas sua própria integridade, mas a de terceiros, como no caso do transporte aéreo.

Para visualizar o que foi dito, tome-se o exemplo da manutenção preventiva, como em CARDOSO e BELHOT, [6]. Já foi dito que um dos inconvenientes trazidos por esta prática é a introdução de novos defeitos por ocasião das intervenções. Como exemplo, pode-se citar a troca periódica dos rolamentos de um mancal. Para a realização desta operação, é necessário extrair os rolamentos por vezes utilizando pancadas para liberá-lo do eixo ou de seu assento nas caixas de rolamento, apesar da existência de sacadores de rolamentos. O emprego das pancadas já configura por si só um erro humano, que pode introduzir ou acelerar trincas e deformações nos demais elementos do mancal. Mas, ainda que se reconheça a inconveniência do método, é de conhecimento do autor que a prática é comum em muitas oficinas deste país.

Para minimizar o erro humano e suas conseqüências, o planejador da manutenção deve recorrer à elaboração de padrões, de forma a afastar a possibilidade de que o comportamento do homem de manutenção torne as ações de manutenção imperfeitas, prejudicando a confiabilidade do equipamento e da própria manutenção. A Manutenção da Produtividade Total (TPM), segundo HERNALSTENS [12], valeu-se da padronização na execução das tarefas de manutenção para alcançar os expressivos resultados observados em sua aplicação, em que pese alguns insucessos observados no Brasil.

Esta discussão sobre os padrões, suscita a reflexão em torno de outro aspecto : a ergonomia. O profissional de manutenção será impedido, segundo WASSSEL [17] a fugir dos padrões se o acesso a algum componente de um equipamento for dificultado ou se a execução de alguma tarefa for por algum motivo dificultada. Portanto, não apenas os projetistas, mas a manutenção deve atentar para as condições em que suas tarefas são realizadas, até porque, a manutenção tem se ocupado das modificações em equipamentos,

muitas delas com o intuito de facilitar sua execução ou torná-la mais segura, como no caso da instalação de janelas de inspeção ou de dispositivos de segurança.

A questão ergonômica também diz respeito à sensibilidade do operador, ou seja, em tarefas com algum grau de assistência da máquina, é conveniente que alguma sensação tátil ou indicação visual seja transmitida ao operador para que este não ultrapasse os limites estabelecidos em projeto. Este é o caso típico dos torquímetros e das ferramentas hidráulicas, muito úteis à manutenção, mas que pela sua potência pode vir a danificar os componentes onde estiverem atuando. Segundo WASSSEL [17], a ausência de sensação ou de indicações é uma fonte considerável de imperfeições na manutenção.

Em acordo com os padrões sugeridos para a manutenção, CARDOSO e BELHOT [6] ressaltam a importância das ações educativas na manutenção, como treinamento e reciclagem dos profissionais, necessidade reclamada tanto pela TPM como pela RCM, pois a ignorância também é uma poderosa fonte de erros e imperfeições, talvez a maior delas.

ANÁLISE DE CONFIABILIDADE APLICADA À MANUTENÇÃO

4.1) Considerações Iniciais

Até o momento, muito se falou em confiabilidade e manobras de atacar as falhas. É momento, então, de formalizar estes conceitos, explorar seu significado para compreender a razão do uso da confiabilidade como critério de manutenção.

Sob diferentes pontos de vista, a confiabilidade tem diferentes enfoques, entretanto, há coincidências em tópicos relativos à definição deste termo. Para os civis - indústria, transporte, construção civil, geração de energia - o aspecto segurança é um fator relevante no momento de estabelecer os requisitos de confiabilidade, [1], [2], [3], [18] e [19]. No meio militar, evidentemente há a interferência com a vida civil, mas seu primado é o da missão, ou seja, tarefas têm de ser cumpridas custe o que custar [20].

Estas nuances aparecem nas definições encontradas na literatura acerca deste conceito, tais como as apresentadas abaixo :

- BRITISH STANDARDS e U.K. ARMY - "é a habilidade de um item executar sua função sob determinadas condições específicas por um período pré-determinado", definição citada em [30];

- EUROPEAN ORGANIZATION FOR QUALITY CONTROL - "é a medida da habilidade de um produto operar com sucesso, quando solicitado, por um período de tempo pré determinado e sob condições específicas. É medida como probabilidade", também citada em [30];

- U.S. Military Handbook - "é a probabilidade de um item executar suas funções sob condições pré-definidas de uso e manutenção, por um período de tempo específico", [3].

Analisando as definições citadas, pode-se notar a ocorrência de pontos em comum :

- desempenho específico é esperado;

- condições de uso devem ser especificadas;

- há um período de tempo para a utilização e

- a confiabilidade é uma grandeza estatística.

A confiabilidade é uma grandeza mensurável a partir da análise estatística da ocorrência do evento falha, cuja definição também merece destaque, por estar envolta em polémicas e imprecisões.

Falha é o fenômeno que compromete o desempenho ou impossibilita a operação de um item, [10]. Sua observação e tratamento estatístico são relevantes para a ciência da confiabilidade pois a partir desta análise pode-se obter a probabilidade citada em algumas das definições dadas acima. A partir deste capítulo, será possível notar que considerações envolvendo confiabilidade envolvem necessariamente uma probabilidade de sobrevivência do item em um intervalo de mensuração.

Alguns pontos são merecedores de atenção na determinação da confiabilidade, tais como :

- a função do equipamento, a qual deve ser claramente definida, pois isto permite reconhecer as formas de utilização e eventuais modos de falhar;

- ambiente, sendo um aspecto complexo pois não inclui apenas o meio físico, mas as ações de operação, manutenção, instalações e usuários entre outros e

- o tempo de utilização, o qual pode expressar a severidade de uso imposta ao equipamento.

Ainda sobre as definições de confiabilidade, pode-se notar que todas fazem menção ao tempo de utilização do item. Ou seja, ainda que sob cuidados de operação e manutenção, há um período além do qual o item não pode mais ser utilizado, sua "habilidade em executar tarefas com sucesso" terá findado. O período compreendido entre entrada em operação e retirada definitiva de serviço é conhecido como vida útil, o qual constitui-se em um limite até hoje intrasponível para qualquer tipo de sistema que conheçamos.

Definidos os conceitos de vida útil, confiabilidade e falha, a partir daqui estes serão empregados à exaustão.

Para que seja possível prosseguir neste trabalho, é necessário explorar a relação entre a ocorrência de falhas e a confiabilidade do sistema. Consideremos então uma quantidade finita de um item qualquer, observada em operação por um período de tempo sob condições previamente definidas. A medida em que os itens falham, é anotado o instante em que isto ocorre, sem que haja reposição. Quando o último item falhar, a observação terá fim. Agrupando-se os resultados em intervalos de tempo de amplitude constante e previamente definida e definindo-se a relação entre o número de itens que falharam em um dado intervalo e o número total de itens ensaiados, pode-se lançar os dados colhidos em um gráfico, obtendo-se uma curva cuja forma será similar à curva apresentada na Figura 4.1.

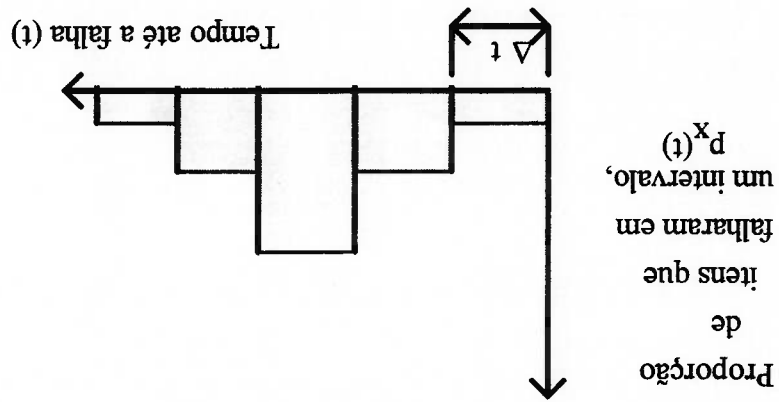


Figura 4.1 - Gráfico Proporcão de Componentes versus Tempo até a Falha

O histograma apresentado na figura em referência pode ser transformado em uma função contínua no tempo, denominada $f_x(t)$...função densidade de probabilidade da ocorrência de falhas ao longo do tempo. Diversos tipos de distribuição, com função densidade de probabilidade conhecidas, são empregados na análise da confiabilidade, alguns associados a certos tipos de componentes, como é o caso da distribuição exponencial, usualmente associada a componentes eletrônicos, além das distribuições de WEIBULL, normal, log-normal e outras. A variável da função densidade de probabilidade é o tempo.

As considerações feitas nesta seção, referem-se a ocorrência de tipos de falha conhecidos e previsíveis para um dado tipo de equipamento, levando-se em conta sua operação prevista em projeto. Falhas acidentais não são modeladas desta maneira, pois representam "saltos" na confiabilidade, além de não poderem ser avaliadas como funções do tempo, conforme afirma LEWIS [18]. O conjunto de normas BRITISH STANDARDS [17]

utiliza para estas ocorrências acidentais o termo "unreliability", ressaltando que estas ocorrências não podem ser modeladas como função do tempo.

Se deseja-se obter uma estimativa da proporção total de itens que falham ao longo do tempo até o último item falhar, ou seja, ao final de cada intervalo a proporção de itens que terão falhado, recorre-se a distribuição acumulada de $f^x(t)$, notação $F^x(t)$, a qual pode ser expressa de duas formas, dependendo de estar-se analisando eventos discretos ou contínuos.

Para observações de eventos discretos :

$$P^x(t) = \sum_{i=1}^n p^x(\Delta t_i)$$

4.1

onde

$P^x(t)$...é a probabilidade de um item falhar até o instante de tempo t , sendo $i=1...n$ os intervalos considerados para formar o tempo t , ou seja, $t = \sum_{i=1}^n \Delta t_i$

$P^x(\Delta t_i)$...é a probabilidade de falhar no intervalo Δt_i .

Para eventos contínuos :

$$F^x(t) = \int_0^t f^x(n)dn$$

4.2

onde

$F^x(t)$...função distribuição acumulada, expressando a probabilidade do item falhar até o instante t .

Nunca é demais lembrar que as expressões 4.1 e 4.2 assumem valores no intervalo $[0,1]$ e que a função distribuição acumulada é monotônica crescente.

Se as expressões 4.1 e 4.2 denotam a probabilidade de um item falhar até o instante t , então a confiabilidade até este instante é dada pela probabilidade do item sobreviver até este intervalo. Logo a confiabilidade $R(t)$ é dada por :

$$R(t) = 1 - F_x(t) \quad 4.3$$

A função confiabilidade é monotônica decrescente, ou seja, seu valor é máximo em $t=0$, quando $R(0)=1$ e sempre diminui. Tem-se um ponto interessante, pois a confiabilidade de um item não pode ser aumentada num instante t . Apenas pode-se reduzir o seu gradiente de perda de confiabilidade. Esta grandeza, embora seja uma função do tempo, é melhor compreendida se referida a um intervalo, isto porque a operação de um componente ou equipamento dar-se-á também em um intervalo de tempo.

A ciência da confiabilidade tem entre seus atributos a pesquisa da falha e seu comportamento no domínio do tempo. Esta atribuição deu origem ao conceito de taxa de falhas (λ), o qual traduz, segundo LEWIS, [18], a probabilidade de que um componente venha a falhar, dado que sobreviveu até o intervalo de tempo anterior ao considerado. Ainda segundo LEWIS, [18], a análise da confiabilidade de um equipamento a partir de sua taxa de falhas traz benefícios no sentido de facilitar a interpretação do comportamento das falhas. Para caracterizar a taxa de falhas, suponha N unidades operando sob as mesmas condições, anotando-se o tempo decorrido em operação até a falha. Tomemos a proporção de itens $P_x(\Delta t)$, os quais tenham falhado no i -ésimo intervalo de tempo, compreendido entre t_{i-1} e t_i . Então:

$$d = \frac{N}{n} (\Delta t) \quad 4.4$$

onde :

$n_i \dots$ número de itens que falharam no i -ésimo intervalo de tempo (t_{i-1}, t_i) e;

$N \dots$ número total de itens testados.

Assim sendo, a distribuição acumulada de falhas até o tempo t_j fica :

4.5

$$P^x(t) = \sum_{j=1}^f P^x(\Delta t_j)$$

onde

$$t_j = \sum_{i=1}^{j-1} \Delta t_i$$

A confiabilidade até o instante t_j , definindo a probabilidade do item sobreviver até este instante de tempo, é expressa por :

4.6

$$R(t_j) = 1 - P^x(t_j)$$

A taxa de falhas associada a este ensaio tem a forma :

4.7

$$\lambda(\Delta t_j) = \frac{P^x(\Delta t_j)}{P^x(t_{j-1})}$$

ou seja, a taxa de falhas depende do intervalo de observação considerado, assim como a confiabilidade.

Esta expressão, também conhecida como taxa de falhas instantânea, pode ser interpretada como a probabilidade de um item que sobreviveu até o intervalo anterior falhe no presente intervalo.

Para variáveis contínuas, tem-se :

Pode-se perceber, de acordo com o gráfico da Figura supra citada, três fases distintas ao longo da vida do equipamento ou item, sendo :

I - Mortalidade Infantil, caracterizada pelo alto número de falhas nos primeiros momentos em que o item entra em operação;

II - Vida Útil, caracterizada pela baixa taxa de falhas durante o período, apresentando um patamar (λ constante), típico de falhas aleatórias e

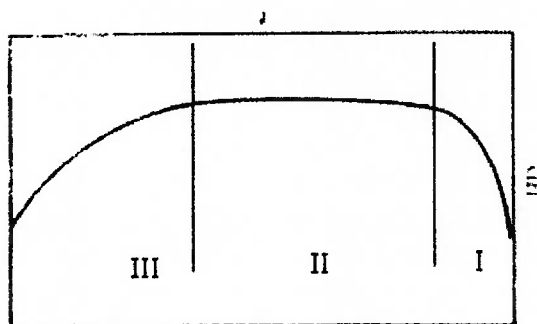


Figura 4.2 - "Curva da Banheira", [18]

Diversos modelos têm sido propostos para caracterizar a evolução temporal da taxa de falhas na tentativa de estabelecer um padrão de comportamento para diversos tipos de equipamentos. O mais conhecido destes modelos é a curva da banheira, ilustrada na Figura 4.2, adaptada de LEWIS, [18].

4.9

$$\lambda(t) = \frac{\{dF(t) / dt\}}{R(t)}$$

e

4.8

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

III - Velhice ou Deterioração, onde a taxa de falhas volta a aumentar, ainda que ações como manutenção intensa seja empregada; é a última fase na vida útil do item.

Durante grande parte de seu período de utilização, os equipamentos elétricos, segundo O'CONNOR [3], após um período de mortalidade infantil, não apresentam variação na taxa de falhas. Equipamentos mecânicos se comportam de maneira mais fiel à curva da banheira, embora o intervalo de tempo correspondente ao patamar de taxa de falhas constantes, devido às falhas aleatórias, seja muito reduzido quando comparado à vida útil do equipamento, ou mesmo este não é observado. Isto porque estando estes equipamentos sujeitos à ação do desgaste, a taxa de falhas vai crescendo progressivamente durante a vida útil, como pode ser observado na Figura (4.3), também adaptada de [18].

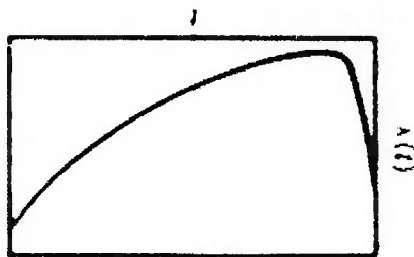


Figura 4.3 - Comportamento da Taxa de Falhas de Equipamentos Mecânicos, [18]

A análise da taxa de falhas merece ainda outras precauções. Acompanhando a curva da banheira, é nítido haver períodos onde a taxa de falhas assume valores maiores que em outros. Um olhar menos atento pode suscitar que a confiabilidade também pode assumir valores ora maiores, ora menores. Isto em tempo algum é verdade! Se em intervalos anteriores houve falhas, então a confiabilidade no intervalo atual será cada vez menor, sempre decrescente. Acompanhem as curvas da taxa de falhas e da confiabilidade para o mesmo item em um intervalo de tempo, tal como indicado na Figura 4.4.

Note-se que, embora a taxa de falhas possa ser crescente em um determinado intervalo, a função confiabilidade será, em qualquer intervalo, sempre decrescente.

Estas linhas introdutórias fornecem a visão de apenas um dos aspectos da determinação da confiabilidade de um item ou sistema - sua caracterização estatística. Entretanto, se há uma falha é provável que haja causas. Sendo um ramo da engenharia, a confiabilidade também se ocupa das causas e conseqüências das falhas, sugerindo

desde que seja respeitada a relação : $\lim_{t \rightarrow \infty} R(t) = 0$

4.11

$$\int_0^{\infty} R(t) dt$$

O tempo médio até a falha também pode ser calculado pela expressão 4.11, [18].

4.10

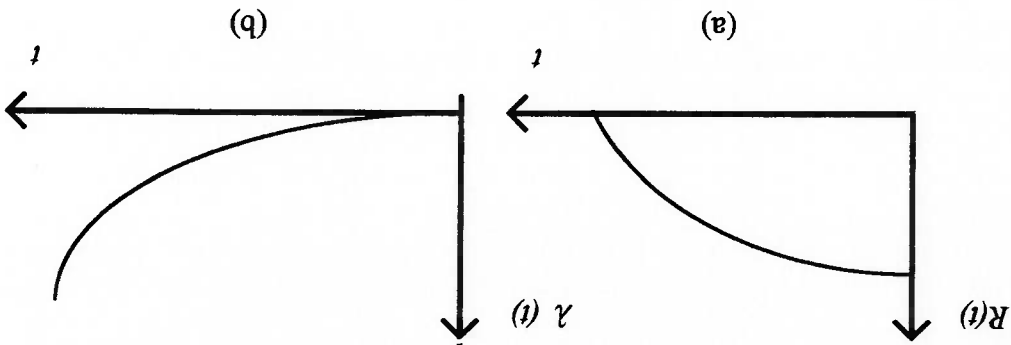
$$MTTF = \int_0^{\infty} f(t) dt$$

Um outro conceito importante na caracterização da confiabilidade e também nas características de projeto dos equipamentos é o tempo médio até a falha, MTTF, do inglês "Mean Time to Failure". O MTTF é a média dos tempos até a falha e, para componentes não reparáveis, coincide com a vida média. Assim sendo, o tempo médio até a falha pode ser expresso pela expressão 4.10.

(a) Confiabilidade, (b) Taxa de Falhas

Tempo para um Mesmo Componente

Figura 4.4 - Variação da Confiabilidade e da Taxa de Falhas, ao Longo do



modificações de projeto, ações de manutenção, diretrizes operacionais e uma série de especificações para equipamentos e sistemas de qualquer natureza. Na seção seguinte, será explorado um tópico essencial na análise de confiabilidade e sua aplicação à manutenção : os modos de falhar dos componentes.

4.2) Modos de Falhas dos Componentes

Observando os aparelhos que nos rodeiam, notamos que seu funcionamento se dá até que algum evento impeça temporária ou definitivamente sua utilização, em outras palavras, uma falha ocorre.

Assim, lâmpadas e outros artefatos elétricos se queimam, pneumáticos dos automóveis furam, eixos se rompem, estruturas podem sofrer vários graus de danos. Para alguns tipos de componentes, as falhas são causadas por poucos fatores, por vezes, apenas um. Outros componentes podem falhar por mais de um motivo. É comum em caso de acidentes aeronáuticos, haver investigações que procuram os motivos primários da queda de uma aeronave e, após estas investigações, haver recomendações de alterações em projetos e operação das aeronaves no mundo todo [20]. Novos projetos se beneficiam do recolhimento destas informações - os modos de falhar dos componentes.

A literatura acerca da confiabilidade apresenta diversas definições para modo de falha como a da ARINC [1] - "modo de falha é o conjunto de fatores e solicitações às quais um equipamento está sujeito durante sua operação, que o levam a atingir o fim de sua vida útil". Uma definição mais simples, proposta por SUNDARAJAN [21], estabelece que modo de falha é "o mecanismo pelo qual um item falha".

O conceito de modo de falha visa justamente esclarecer que componentes de naturezas diferentes falham por motivos diferentes.

A experiência no trato com os equipamentos possibilitou à engenharia conhecer empiricamente alguns dos modos de falhar como por exemplo a fadiga, sempre presente em componentes mecânicos sujeitos a solicitações de magnitude variável no tempo. Atualmente, a determinação dos modos de falha é feita antes mesmo do produto existir : em sua fase de projeto. Pode-se recorrer à simulação, aos testes de laboratório e de campo com protótipos e até mesmo, projetar componentes impondo seus modos de falhar.

Ainda que se trate de produtos já em operação, a análise do projeto pode revelar prováveis modos de falha como afirmam CLARK e PAASCH [7]. Há ferramentas desenvolvidas especialmente com esta finalidade, a serem estudadas ainda neste capítulo.

O modo de falhar dos componentes é função das solicitações que o mesmo receberá durante sua operação. Entretanto, é possível que haja alterações neste modo de falhar se valores admissíveis forem ultrapassados. Um eixo concebido para resistir à falha por fadiga, o que leva bastante tempo em geral, se mantidas as tensões de projeto, pode falhar por escoamento se for solicitado com tensões acima da tensão limite de escoamento.

Portanto, coerente com as definições da confiabilidade de um componente ou equipamento apresentadas no início deste capítulo, também os modos de falha podem ser determinados com segurança dentro de condições pré-estabelecidas.

Modo da falha é uma informação essencial no estabelecimento das políticas de manutenção a serem aplicadas a um componente ou equipamento, pois juntamente com a caracterização estatística das falhas, fornece diretrizes para a tomada de decisões como a necessidade de substituições periódicas, revisões, monitoração ou mesmo revelar a impossibilidade de adotar medidas anteriores às falhas.

BLANCO [13] propõe a existência de quatro tipos básicos de falhas, com relação ao seu comportamento estatístico e ocorrência de sintomas que possibilitem seu diagnóstico antecipado, ou seja, a falha apresenta um tempo para seu desenvolvimento (TDF) ou eclode repentinamente. Assim, podemos ter :

-falhas aleatórias com TDF;

-falhas aleatórias sem TDF;

-falhas não aleatórias com TDF e

-falhas não aleatórias sem TDF.

Assim, pode-se montar a pequena matriz de decisão como indicado na Tabela 4.1 acerca da seleção preliminar de uma prática de manutenção com base nas características destas falhas e nos conceitos associados às práticas de manutenção discutidos no capítulo 2.

Isto acrescenta notável complexidade à análise de confiabilidade de um sistema, pois tem-se componentes interligados de diversas maneiras, conduzindo a níveis distintos de confiabilidade. Na seção 4.3 deste trabalho é feita a apresentação das técnicas empregadas para avaliação da confiabilidade de sistemas.

Para alcançar os objetivos pretendidos, as partes do equipamento devem interagir, ou seja, o funcionamento de uma parte influenciará o desempenho das demais. Quando isto se observa, tem-se um sistema em operação. Sistema é definido por diversos autores de maneira a convergir para a definição de CHURCHMAN, [22] : "...sistema é um conjunto de partes operando interligadas de modo a formar um conjunto, sendo que cada uma das partes operando isoladamente pode conduzir a resultados diferentes do todo. Esta propriedade da soma das partes isoladas ser menor que o todo é conhecida como *sinergia*...".

Os equipamentos em geral são compostos de muitas partes atuando de forma a possibilitar seu funcionamento. São raros os exemplos, sobretudo em equipamentos mais modernos, de apenas uma ou duas peças operando.

É uma análise superficial mas, segundo BLANCO [13], as contribuições à manutenção e à confiabilidade do componente ou equipamento alvo desta política são incontestáveis, pois, com rapidez e precisão, é possível selecionar a prática de manutenção mais indicada a cada tipo de falha. De fato, o modo de falhar dos itens analisados pode não estar completamente determinado, mas já se conhece aspectos iniciais para proceder análises mais apuradas.

| | | |
|-----------------|--------------|----------------------|
| TDF/Estatística | Aléatorias | Não Aleatórias |
| Com TDF | Preditiva | Preditiva/Preventiva |
| Sem TDF | Só Corretiva | Preventiva |

Tabela 4.1 - Matriz para Decisão acerca da Seleção Preliminar das Práticas de Manutenção

4.3) Análise da Confiabilidade de Sistemas

Cada uma das partes de um sistema passará a ser formalmente denotada pelo termo componente. Na análise da confiabilidade dos sistemas, é útil a abordagem de diagrama de blocos para representá-lo.

4.3.1) Representação dos Sistemas por Meio dos Diagramas de Blocos

Basicamente, há duas disposições para os componentes de um sistema, as quais são apresentadas abaixo :

I) Componentes dispostos em série

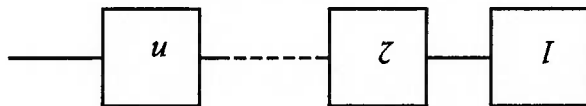


Figura 4.5 - Componentes Dispostos em Série

II) Componentes dispostos em paralelo

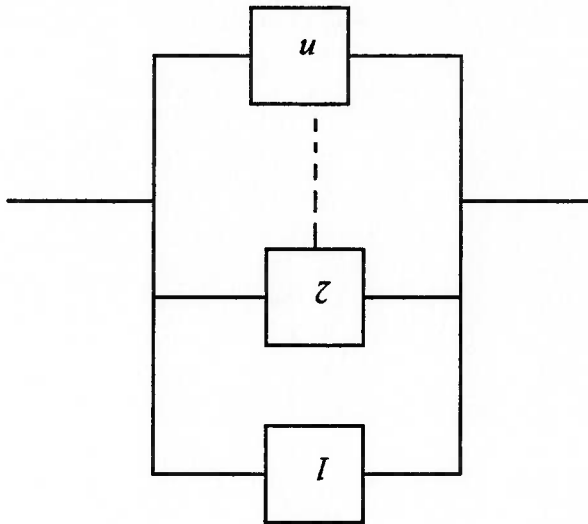


Figura 4.6 - Componentes Dispostos em Paralelo

No diagrama de blocos, como indicado nas Figuras 4.5 e 4.6, cada quadrado representa um item ou componente e este diagrama ilustra as interligações entre estes itens, ou seja, o fluxo de informações do sistema. Os sistemas reais costumam se apresentar como combinações de componentes em série e em paralelo.

O tipo de sistema (seu arranjo) inclui decisivamente em sua confiabilidade. A escolha entre as formas em série ou em paralelo depende de fatores como a função de cada item, a confiabilidade requerida, espaço físico, recursos disponíveis e segurança entre outros.

Para os sistemas em série, com n componentes tal como o constante da Figura 4.5, supondo que as causas das falhas sejam independentes, a confiabilidade $R_s(t)$ do sistema é, segundo O'Connor [3]:

$$R_s(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t).$$

4.12

$R_1(t) = R_1(t), R_2(t), \dots, R_n(t)$... valor da confiabilidade de cada componente.

No caso específico em que a função distribuição de probabilidade dos componentes seja exponencial, a confiabilidade de cada um é expressa por :

$$R_i(t) = \exp(-\lambda_i t).$$

4.13

e para o sistema :

$$R_s(t) = \exp\left(-\sum_{i=1}^n \lambda_i t\right).$$

4.14

onde λ_i é a taxa de falhas de cada componente, a qual, no caso de distribuição exponencial é constante.

Quando são empregados componentes em série, deve-se atentar para dois problemas: (1) a falha em qualquer componente, um que seja, é suficiente para interromper a operação do sistema; (2) o número de componentes tem efeito negativo na confiabilidade do sistema. Analisando a expressão 4.11, nota-se que $R^s(t)$ é um número menor ou igual a 1. Logo, o produto decresce com o número de componentes, independentemente da distribuição de probabilidades associada aos componentes, como ilustra esquematicamente o gráfico constante na Figura 4.7, onde é indicada a variação temporal da confiabilidade de um sistema em série, como função do número de seus componentes.

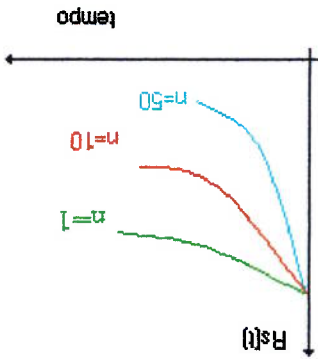


Figura 4.7- Confiabilidade de Sistemas em Série em Função do Número de Componentes que o Compõem (n).

No caso de sistemas onde os n componentes estejam dispostos em paralelo, como na Figura 4.6, considerando-se falhas cujas causas sejam independentes, a função distribuição acumulada de falhas para o sistema $F^s(t)$, expressa a partir da função distribuição acumulada de cada componente é dada por:

$$F^s(t) = \prod_{i=1}^n F^i(t) .$$

4.15

onde :

$F^i(t) = F^1(t), F^2(t), \dots, F^n(t)$... Função distribuição de falhas acumulada de cada componente

A confiabilidade para o sistema $R_s(t)$ tem a forma :

$$4.16 \quad R_s(t) = 1 - F_s(t).$$

Escrevendo $R_s(t)$ em função da confiabilidade de cada item, obtém-se :

$$4.17 \quad R_s(t) = 1 - (1 - R_1(t)) \cdot (1 - R_2(t)) \cdot \dots \cdot (1 - R_n(t))$$

No caso particular de 2 componentes ($n=2$),

$$4.18 \quad R_s(t) = R_1(t) + R_2(t) - R_1(t) \cdot R_2(t)$$

e para n componentes **idênticos**, para os quais a confiabilidade tenha o valor $R(t)$, tem-se :

$$4.19 \quad R_s(t) = 1 - (1 - R(t))^n.$$

Como exemplo, suponhamos 2 componentes iguais, para os quais a confiabilidade é

expressa por :

$$4.20 \quad R(t) = e^{-\lambda t}.$$

Levando este valor à equação 4.18, obtém-se :

$$4.21 \quad R_s(t) = 2e^{-\lambda t} - e^{-2\lambda t}.$$

Ao analisar os sistemas em paralelo, nota-se que se há a possibilidade de que se uma única unidade, um único componente funcionar, estará garantido o funcionamento de todo o sistema, o que constitui uma Redundância Ativa, [18].

A grande contribuição dos sistemas paralelos é justamente esta - prover uma forma de assegurar a operação do sistema pela presença de várias unidades capazes de realizar a mesma tarefa. Estações de bombeamento de fluidos, [23], geração de energia e sistemas de aeronaves, para citar alguns, são exemplos do emprego desta forma de redundância.

Na Figura 4.7, o gráfico representativo dos sistemas em série mostra um forte decréscimo da confiabilidade do sistema ao longo do tempo, quando comparada ao

componente isolado. Na Figura 4.8, indica-se também uma redução no valor da confiabilidade do sistema em paralelo ao longo do tempo. Porém, nestes sistemas com redundância ativa, o decréscimo é menos acentuado em comparação com o observado nos sistemas em série e há ganhos em termos da confiabilidade do sistema, em comparação ao componente isoladamente, [18].

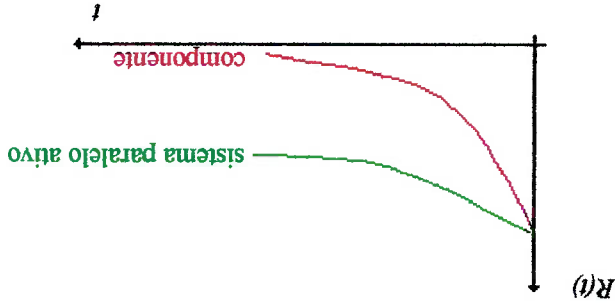


Figura 4.8 - Gráfico Comparativo da Evolução da Confiabilidade para um Componente e no Modo Paralelo Ativo

Um primeiro raciocínio acerca da confiabilidade dos sistemas em paralelo, leva a considerar o caso onde todas as unidades operam até que uma delas falhe (redundância ativa). Quando ocorre a falha, as unidades restantes cumprem a função da unidade avariada. Porém, é possível que haja sobrecargas pois teremos menos unidades para cumprir o mesmo número de tarefas. Inúmeras propostas para o emprego da redundância - propostas estas muito utilizadas para projetar sistemas que demandem altos níveis de confiabilidade - são encontradas na literatura, [3], [18]. São formulações envolvendo requisitos mínimos para a operação do sistema (como número mínimo de unidades em operação) ou o emprego de unidades inoperantes até a falha da unidade principal ("standby").

Seja considerado, inicialmente, o caso de um sistema em paralelo onde os n componentes sejam idênticos, tendo o valor $R(t)$ para a confiabilidade de cada componente e aos quais seja associada a probabilidade de falha p , definida da forma :

$$p(t) = 1 - R(t)$$

Para este sistema, deseja-se que no mínimo m das N unidades operem para assegurar a continuidade do funcionamento do sistema.

Assumindo que a probabilidade de que x componentes falhem até o instante t ,

($P(n=x)$) seja binomial, como definido por CHATFIELD em [24], tem-se :

$$P(n \leq (N - m)) = \sum_{n=0}^{N-m} C_N^m p^n (1 - p)^{(N-m)}$$

4.23

onde $P(n \leq (N - m))$ representa a probabilidade de que um número de componentes menor ou igual a $(N-m)$ venham a falhar, portanto, a probabilidade de que o sistema esteja em operação.

Mas $p(t) = 1 - R(t)$ (vide equação 4.22) e o lado esquerdo da sentença 4.23 é a

confiabilidade do sistema $R_S(t)$ até o instante t . Logo, a formulação para a definição desta

confiabilidade é :

$$R_S(t) = \sum_{n=0}^{N-m} C_N^m (1 - R(t))^n (R(t))^{N-m}$$

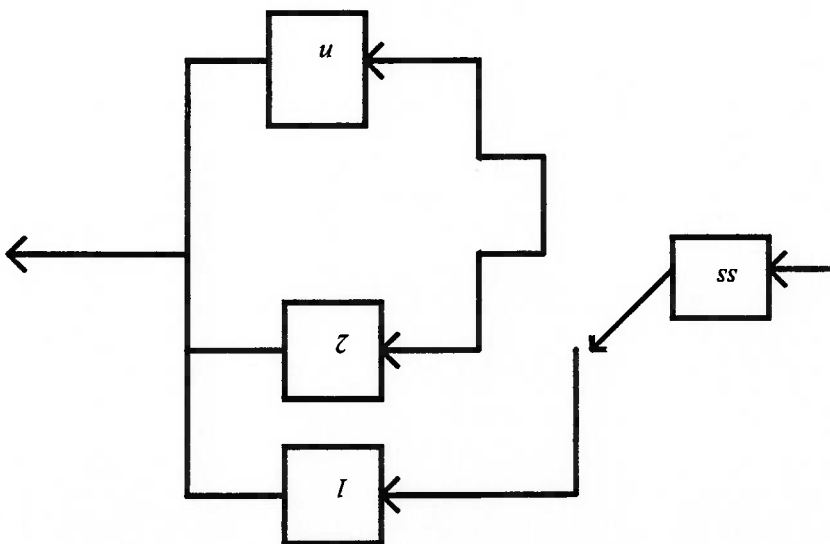
4.24

Quanto mais complexa for a distribuição da confiabilidade dos componentes no domínio do tempo e quanto maior o número de componentes envolvidos - especialmente se m for pequeno, ou seja, poucos componentes devem operar - mais complexa fica a resolução deste problema, às vezes possível apenas computacionalmente.

Outra modalidade de redundância possível de ser empregada é o que se denomina de redundância passiva ou reserva ("standby"). Os componentes são dispostos em paralelo, mas não operam todos ao mesmo tempo, havendo unidades de reserva que entram em operação quando da ocorrência da falha das unidades em operação.

É interessante e muitas vezes necessário, como no caso de estações de bombeamento ou em equipamentos críticos quanto a segurança, que a resposta das unidades de reserva seja feita imediatamente após a ocorrência da falha. Muitas vezes isto é possível - quer pela complexidade dos sistemas envolvidos, quer pela dificuldade em ter acesso aos dispositivos - quando se recorre aos acionamentos e comutações automáticos. Para

representar um sistema desta modalidade, tem-se a Figura 4.9, de onde se pode tecer considerações a respeito do funcionamento de tal recurso.



- ss...comutadores

- 1, 2, ..., n...componentes do sistema

Figura 4.9 - Sistema em Paralelo Passivo ("standby")

Se a presença de tais dispositivos aumenta a segurança de um sistema, também traz problemas que devem ser cuidadosamente analisados antes de conceber um projeto de sistema com estas características, problemas que estatisticamente traduzem-se no emprego de probabilidade condicionada, [25].

É necessário antes de mais nada considerar que uma unidade intocada, em "standby" pode não operar no instante t de ocorrência da falha da unidade principal por diversas razões como defeitos de fabricação, erros na instalação e problemas com acessórios além da ação do tempo, pois qualquer componente pode vir a falhar quando inoperante por muito tempo.

Senão vejamos, os aviões de pequeno porte - como na norma ATA 100 (norma referente à publicações técnicas para aeronaves elaborada pela Air Transport Association of

America), citada por [26], onde pequeno porte é a classificação das aeronaves com até 70000 N de MTOW (do inglês *Maximum Take-Off Weight* ou peso máximo de decolagem) (principal) são equipados com dois sistemas de bombeamento de combustível : o mecânico (principal) e o elétrico, cujo nome na literatura aeronáutica é coincidentemente "*standby fuel system*", conforme ilustra o manual de operações da aeronave EMB-810 SENECA II [26], bimotores a pistão fabricado pela EMBRAER. Para esta aeronave, a comutação em caso de falha da bomba mecânica é feita por interruptores manuais na cabine de pilotagem e mesmo durante a operação de decolagem o acionamento pode se dar rapidamente (o piloto desta aeronave deve ser treinado para tal, assim como em qualquer atividade aeronáutica). Ocorre que um dos procedimentos de manutenção deste componente consiste em testar periodicamente a bomba elétrica, pois sua imobilização por longos períodos causa o travamento do eixo do rotor pelo acúmulo de impurezas e oxidação do lubrificante, o que leva à queima do motor elétrico da bomba, causando a parada do motor da aeronave por falta de alimentação de combustível, já que a bomba está inoperante.

É perigosa a crença de que componentes novos ou pouco usados não falharão. Este engano pode ser facilmente refutado se for considerada a possibilidade de que o componente passivo ("standby") possua taxa de falha decrescente ao menos no início de sua vida útil, como a bomba elétrica citada, caracterizando o período de mortalidade infantil, ou seja, a chance de haver falhas é maior no início da vida operacional. Por isso há a necessidade de testes.

Outro problema relaciona-se ao acionamento automático dos dispositivos de redundância. A forma usual de acioná-los consiste no emprego de sensores cuja função é captar sinais de falha (valores de corrente elétrica, torque, vibração, oscilações de pressão entre outros) e gerar sinais que atuam sobre comutadores, cuja função é "ligar" os componentes de reserva. Sempre estará presente a probabilidade de falha associada aos componentes eletro-eletrônicos - situação da grande maioria dos sensores e comutadores empregados atualmente - os quais, por sinal, ainda são um desafio para a manutenção sob o ponto de vista da confiabilidade. Ressalta-se que o crescente emprego destes componentes, cujo perfil das falhas se revela aleatório, é motivador do emprego da redundância em sistemas onde se pretende altos níveis de confiabilidade, até porque são utilizados em aplicações essenciais à segurança, como os sistemas de gerenciamento de voo (sistemas e navegação) de todos os aviões comerciais atualmente produzidos, [27].

MODARRES, [28], propõe para o caso particular de dois componentes em um

sistema paralelo passivo a formulação :

$$R_s(t) = R_1(t) + \int_0^t f_1(t) R_{ss}(t_1) [R_2(t_1) R_2(t-t_1)] dt_1 \tag{4.25}$$

onde o termo entre os colchetes expressa a probabilidade de falha do componente 2 considerando a situação passiva e em operação, após a falha do componente 1, e

$R_s(t)$ = Confiabilidade do sistema;

$f_1(t)$ = Função densidade de probabilidade da unidade 1 no modo ativo;

$R_{ss}(t)$ = Confiabilidade do sistema de sensores e comutação;

$R_2(t)$ = Confiabilidade da unidade 2 no modo passivo e

$R_1(t)$ e $R_2(t)$ = Confiabilidade das unidades 1 e 2 no modo ativo.

A presença da integral em 4.25 torna a determinação da confiabilidade deste tipo de

sistema um problema quase sempre solucionável apenas com auxílio de métodos numéricos, o que traz praticidade, mas a possibilidade de erros de aproximação e resíduos inerentes aos métodos empregados. Um exemplo de um sistema com dois componentes, não necessariamente idênticos, cujas funções densidade de probabilidade sejam exponenciais (inclusive para sensores e comutadores) é descrito por MODARRES, [28] e abaixo reproduzido. Sejam os índices (1, 2, 2' e ss) definidos como em 4.25. Lembrando a validade de 4.20 para a confiabilidade de componentes cuja função densidade de probabilidade seja exponencial, vem :

$$R_1(t) = \exp(-\lambda_1 t) + \int [\lambda_1 \exp(-\lambda_1 t)] \exp(-\lambda_{ss} t_1) [\exp(-\lambda_2 t_1) \exp(-\lambda_2 (t-t_1))] dt_1$$

4.26

sendo λ_2 a taxa de falha da unidade 2 no modo passivo.

A expressão da confiabilidade é :

$$R_s(t) = \exp(-\lambda_1 t) + \frac{\lambda_1 \exp(-\lambda_2 t)}{\lambda_1 + \lambda_{ss} + \lambda_2 - \lambda_2} \left[1 - \exp(-(\lambda_1 + \lambda_{ss} + \lambda_2 - \lambda_2)t) \right]$$

4.27

o que demonstra a complexidade deste tipo de estimação da confiabilidade. Porém, se empregado com critérios cuidadosos na seleção do método numérico apropriado para a integração da equação (4.25), na determinação esmerada dos valores da confiabilidade dos componentes e na formulação das hipóteses, resulta num instrumento sofisticado e muito útil na avaliação da confiabilidade dos sistemas em paralelo passivos. Outras suposições a partir do exemplo apresentado podem ser feitas, como modo de falha comum entre os componentes e emprego de componentes idênticos, o que levaria à obtenção de equações similares às apresentadas em 4.26 e 4.27. A comparação entre a confiabilidade e taxa de falha de um sistema cujos componentes sejam idênticos, porém considerando sua versão paralelo ativo e passivo pode ser vista nos gráficos constantes nas Figuras 4.10 (a) e (b), desconsiderando a confiabilidade do sistema de sensoramento, ou seja, $R_{SS}(t) = 1$.

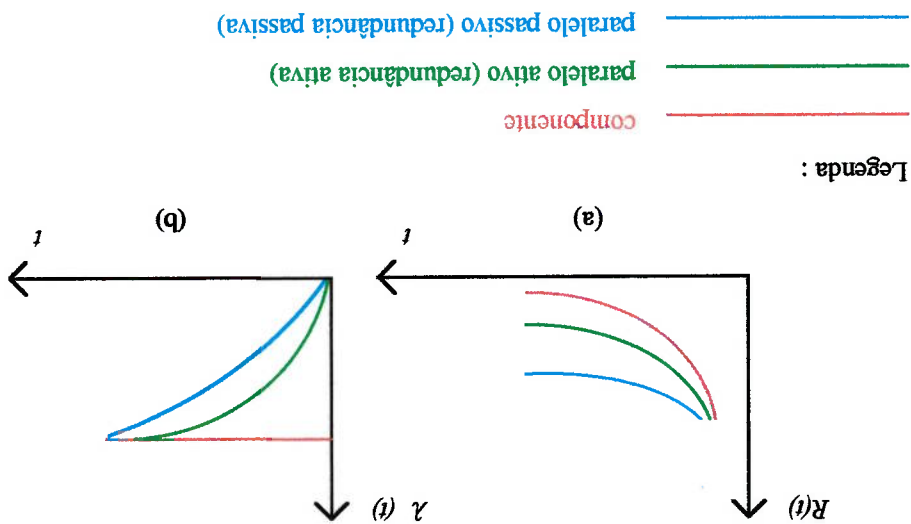


Figura 4.10 - Comparação entre Redundância Ativa e Passiva, [18]

(a) Confiabilidade em Função do Tempo, (b) Taxa de Falhas em Função do Tempo

Verifica-se que, mesmo havendo a possibilidade do componente passivo falhar quando este não está operando, a confiabilidade do sistema com redundância passiva melhora, bem como a taxa de falhas do mesmo decresce.

Os denominados sistemas de informações preferenciais podem ser compreendidos como uma variante dos sistemas em paralelo passivo.

Nos sistemas com fluxo preferencial de informações, um "caminho" é percorrido pelas informações, quando o sistema encontra-se em operação normal - o caminho preferencial. Quando a unidade que centraliza as informações preferenciais (unidade preferencial) falha, o sistema muda o caminho preferencial, como se fizesse um desvio para uma unidade redundante. Na Figura 4.11 é apresentado o diagrama de blocos de um sistema com informações preferenciais, sendo a unidade preferencial a 2a e a redundante a 2b. Embora a ilustração da Figura 4.11 pareça representar um sistema de difícil análise quanto à sua confiabilidade, LEWIS, [18], propõe sua decomposição em situações onde primeiramente o sistema opere com a unidade preferencial e depois, operando após a falha desta unidade. A confiabilidade do sistema é definida pela composição das confiabilidades definidas para as duas situações acima descritas, com o emprego do Teorema da Probabilidade Total.

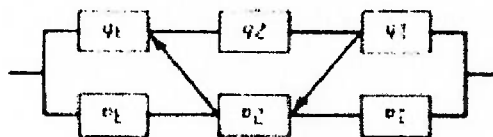


Figura 4.11 - Sistema de Comunicação Preferencial

Não foram apresentadas aqui todas as possíveis concepções de sistemas com algum nível de redundância, pois não seria possível enumerá-los. Aqui são discutidos tipos essenciais de sistemas os quais, combinando elementos em série, paralelo, com caminhos preferenciais de operação, itens de reserva e outras soluções, se fazem presente na literatura sobre confiabilidade tais como [1], [3], [18], [21] e [29], para citar alguns dos mais importantes.

4.3.2) Análise de Modos e Efeitos das Falhas

A representação segundo o modelo de blocos exposto na seção anterior é muito útil para a compreensão do funcionamento do sistema e da relação entre seus componentes, bem como da confiabilidade do sistema, mas não permite definir o efeito da ocorrência de uma falha sobre a operação do sistema, o qual pode continuar a operar mesmo com a degradação de sua situação ideal. Uma análise da confiabilidade de qualquer sistema apenas pela inspeção de seu diagrama de blocos resulta, por isso, incompleta.

A sofisticação dos equipamentos, os requisitos cada vez mais exigentes quanto à segurança e a necessidade de dominar os fenômenos relativos aos equipamentos e seus desdobramentos deu origem ao método bastante conhecido em análise da confiabilidade denominado FMEA (do inglês "*Failure Modes and Effects Analysis*", ou Análise de Modos e Efeitos das Falhas), [21]. Segundo O'CONNOR [3], o FMEA "é o método de análise de confiabilidade mais amplamente utilizado e de maior eficácia em uso atualmente", sendo uma das razões a análise conjunta dos modos das falhas com seus efeitos.

O FMEA é um método empregado na melhoria de projetos de sistemas, na determinação dos pontos vulneráveis no projeto, na concepção de testes do tipo "*built-in*", no projeto de linhas de produção (chão de fábrica) e no planejamento da manutenção, onde a elaboração de rotinas de diagnóstico e requisitos de manutenção preventiva são benefícios relevantes [3].

Sua origem remonta ao meio militar, sendo freqüente a referência às normas MIL-STD-1629 (Procedimentos para Execução da Análise dos Modos, Efeitos e Confiabilidade das Falhas), como citado por O'CONNOR em [3].

A atividade civil que primeiro se beneficiou do FMEA - terminologia utilizada com ou sem um índice de criticidade para designar o emprego comercial do método - foi a aeronáutica, pois seus requisitos de legislação, segurança, complexidade e sofisticação de seus produtos e - fator atualmente presente em quase todos os ramos da indústria - os altos valores envolvidos (sempre múltiplos de \$10 milhões!) justificam esta acolhida. A partir da década de oitenta, a indústria passou a adotar maciçamente este método, muitas vezes como sinônimo de RCM.

Embora o FMEA manipule conceitos nem sempre usuais como taxas de falhas associadas a um modo de falha específico, sua execução pode ser simples, dependendo do sistema que se pretende analisar. Entretanto, sua execução é sempre laboriosa, embora seja possível a utilização de recursos computacionais.

Como método, o FMEA tem diretrizes gerais as quais norteiam sua elaboração. SUNDARAJAN, [21], propõe a reflexão sobre cinco questões a respeito do sistema como base para a elaboração do FMEA:

1 - Como cada componente do sistema pode falhar (quais seus modos de falha)?

2 - Quais os efeitos desta(s) falha (s) sobre o sistema?

3 - Quais críticos são estes efeitos?

4 - Como detectar a falha?

5 - Quais as medidas contra estas falhas (evitar, prevenir a ocorrência das mesmas ou minimizar seus efeitos)?

Na verdade, como pode ser visto em [3], esta norma MIL STD 1629 faz alusão ao método conhecido como FME(C)A, onde a letra C representa o índice de criticidade da falha de um componente do sistema, assim definido pela norma citada :

$$C = \sum_{i=1}^h C_m$$

4.28

e

$$C_m = \beta \cdot \alpha \cdot \lambda_p \cdot i$$

4.29

onde :

C = índice de criticidade de cada item do sistema;

C_m = índice de criticidade de cada modo de falha do item analisado;

β = probabilidade condicional de perda da função ou, simplificada, severidade, à qual são atribuídos graus, conforme a Tabela 4.2, adaptada de LEITCH [30] :

Tabela 4.2 - Valores de β conforme a Severidade da Solicitação, [30]

| Gravidade | β |
|-----------|---------|
| I | 1 |
| II | 0,7 |
| III | 0,4 |
| IV | 0,1 |

$$\alpha^m = \text{frequência da ocorrência do modo de falha (para o item, } \sum_{i=1}^m \alpha_i = 1 \text{)};$$

h = número de modos de falha considerados na análise;

λ^p = taxa de falha do componente (para itens reparáveis, podendo ser substituído pela probabilidade de falha $f(t)$ do componente, ou pelo inverso do tempo médio até a falha - 1/MTTF - para itens não reparáveis);

t - tempo de operação do componente.

O FMEA, sem o cálculo deste índice, torna-se - segundo SUNDARAJAN [21] - “um método qualitativo de análise da confiabilidade”. Se considerada a criticidade da falha - o que já é um indicio de análise de risco potencial - tem-se o FME(C)A.

O’CONNOR [3] ressalta a necessidade do diagrama de blocos do sistema para iniciar a prospecção das falhas e seus efeitos. O conjunto de informações necessário para a elaboração do FMEA de um componente ou sistema pode ser visualizado nas Tabelas 4.3 (a) e (b), correspondentes respectivamente aos procedimentos MIL-1629-101 e MIL-1629-102 ou, respectivamente FMEA e FME(C)A.

Executar o FMEA exige pessoal especialmente preparado para esta função, pois além de dominar o conhecimento acerca do sistema (suas características, princípios de funcionamento e especificações), exige conhecimento dos conceitos relativos à confiabilidade, uma vez que taxas de falha e probabilidades devem ser calculadas.

Como o nível de detalhamento é alto, o tempo consumido na elaboração do FMEA de um sistema é elevado [21]. Estes fatos tornam o FMEA um método sofisticado, mas

dispendioso. Por isso, sua aplicação se consagrou sobre equipamentos complexos ou críticos para a operação da empresa ou organização. É interessante ressaltar que para determinar quais equipamentos em uma planta são convenientes para serem analisados pelo FMEA, pode-se aplicar este método à própria planta, considerando-a como um sistema e os equipamentos como componentes. Esta abordagem é atualmente empregada, consistindo na aplicação sucessiva do FMEA primeiro ao ambiente da organização, às divisões, seções ou departamentos, aos equipamentos selecionados, seus subsistemas, componentes até o menor nível de detalhamento possível de alcançar (por exemplo, componentes indivisíveis). Um exemplo, extraído de [30], pode ser visto na Tabela 4.4, onde é realizado o FMEA para um sistema de controle hidráulico de um míssil, cujo diagrama funcional é apresentado na Figura 4.12.

Observando a figura citada, nota-se que são de primordial importância para a operação do míssil seus sistemas de geração de gases e de controle, este último composto por superfícies movidas por atuadores. Controlando a operação destes dispositivos, estão componentes eletrônicos e válvulas, os quais determinam os sinais a serem enviados aos demais sistemas do míssil para determinar sua trajetória. Assim sendo, é fundamental o conhecimento dos modos de falha destes componentes para a correta operação do míssil, além da necessidade de se conhecer as consequências de uma eventual falha em sua operação.

O FMEA tem como uma de suas deficiências, considerar a progressão dos modos de falha isoladamente, não sendo possível avaliar os efeitos para a combinação de diversos modos de falha ocorrendo simultaneamente [3]. Ainda segundo SUNDARAJAN [21], a ocorrência de um modo de falha pode não afetar negativamente o desempenho do sistema, porém, ocorrendo juntamente com outros modos, os efeitos podem ser amplificadas, especialmente se os modos de falha são interdependentes. A literatura sobre confiabilidade reconhece que o FMEA não responde isoladamente a todos os problemas relacionados ao tema, porém a aplicação do método fornece informações valiosas para novos projetos, para a manutenção - sendo inclusive um critério de decisão - e contribuições inegáveis à segurança do sistema, de seus operadores e do ambiente, devendo ser utilizado desde a fase inicial do projeto do sistema - seja ele qual for [3].

Tabela 4.3 - Tabela Contendo Informações para Elaboração da Análise de Modos e Efeitos das Falhas, [3]

| Nº de identificação | Nomenclatura | Função | Causas / Modos de falhas | Fase / modo da operação | Efeitos | | | Método de detecção da falha | Medidas preventivas / corretivas | Severidade e Observações |
|---------------------|--------------|--------|--------------------------|-------------------------|---------------|---------------|---------|-----------------------------|----------------------------------|--------------------------|
| | | | | | Proxímo nível | Níveis finais | Localis | | | |
| | | | | | | | | | | (β) |

(a) FMEA

| Nº de identificação | Nomenclatura | Função | Causas/Modos de falha | Fase/Modo da operação | ACRESCENTAR COLUNAS DO FMEA | Classe de Severidade | Probabilidade de Falha | Probabilidade de ocorrência | Taxa de falha | Taxa de falha modo de falha | (α) | (α,β) | α,λ,β |
|---------------------|--------------|--------|-----------------------|-----------------------|-----------------------------|----------------------|------------------------|-----------------------------|---------------|-----------------------------|-----|-------|-------|
| | | | | | | | | | | | | | |

(b) FME(C)A

Figura 4.12 - Representação de um Sistema de Controle Hidráulico de um míssil, [30]

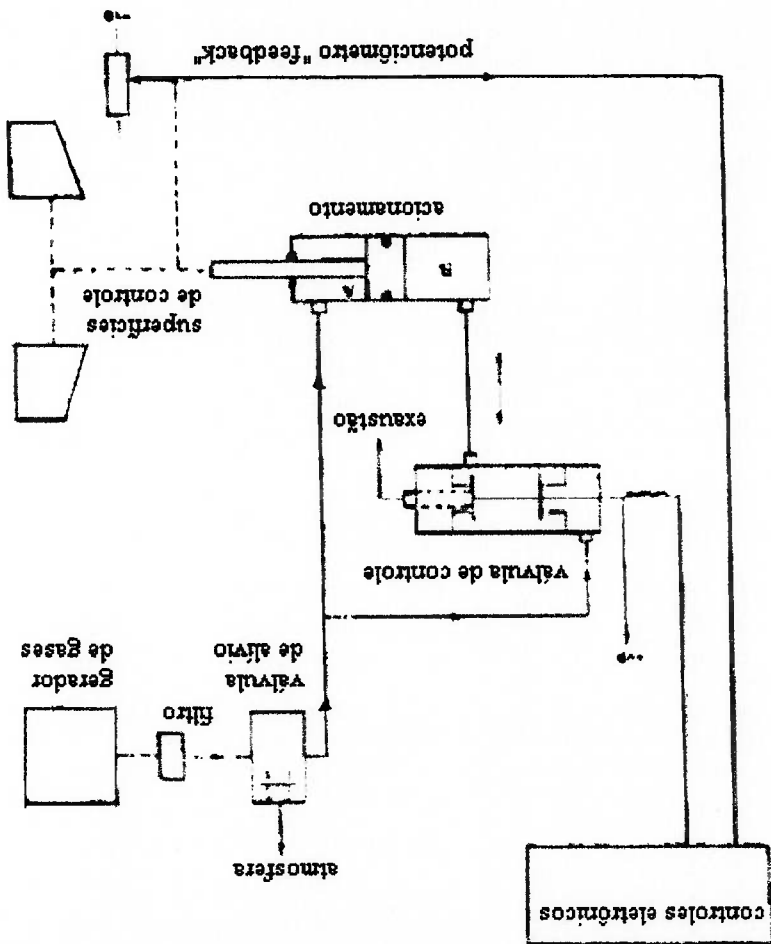


Tabela 4.4 - FMEA para o Sistema de Controle Hidráulico de um míssil, [30]

| Item | Função | Modo de falha | Causa | Efeitos | Locais | Proximo nível | Observações |
|---------------------|-------------------------|------------------------------|--|--|---|-----------------------------------|-------------------|
| Solenóide | operar válvulas | abertura não comandada | desuso, idade | válvula de admissão permanente aberta sob pressão de gás | atuador não opera devidamente, travando à direita | atuador não opera | perda de controle |
| Solenóide | abrir exaustão | isolamento | idade | força reduzida para operar as válvulas | atuador lento | atuador lento | perda de controle |
| Mola de compressão | abrir exaustão | tratura | desuso | atuador lento | atuador lento | atuador lento | perda de controle |
| Admissão e exaustão | medição do fluxo de gás | travamento | falta de lubrificação | medição incorreta | atuador lento | atuador lento | perda de controle |
| Válvulas | controle de fluxo | defeitos nos encostos | idade | medição incorreta | atuador lento | atuador lento | perda de controle |
| Corpo da válvula | medição do fluxo de gás | restrição da passagem de gás | presença de impurezas durante a fabricação | medição incorreta | atuador trava à esquerda | atuador trava à esquerda | perda de controle |
| Corpo da válvula | controle de fluxo | tratura | desuso | perda de gás | atuador lento ou ausência de ação | atuador lento ou ausência de ação | perda de controle |

4.3.3) Análise da Árvore de Falhas

Um outro método bastante utilizado para avaliar a confiabilidade dos sistemas é a FTA (*Fault Tree Analysis*) ou Análise da Árvore de Falhas. Sua utilidade consiste em determinar as causas de uma falha - ou de um evento indesejável como a ocorrência de uma acidente - a partir de seus sintomas, relacionando-os com os componentes, subsistemas ou eventos que poderiam tê-los causado. SUNDARARAJAN, [21], considera este método como uma ferramenta de dedução a partir da representação gráfica do "caminho" percorrido pela falha, resultando em uma análise que pode ser qualitativa ou quantitativa, segundo PAPAIOGLOU, [31].

Na montagem da árvore de falhas, há uma lógica a ser observada pois um sintoma necessariamente tem um número finito e conhecido de causas as quais, para máquinas, podem ser pesquisadas e determinadas com precisão, [31], desde que se conheça, ao menos, seu diagrama de blocos. Ainda, segundo os autores O'CONNOR [3], SUNDARARAJAN [21] e PAPAIOGLOU [31], o objetivo da construção de qualquer diagrama do tipo árvore é elaborar uma estrutura lógica para definir sua "raiz", a origem do problema.

Na seção anterior sobre o FMEA, comentou-se sobre a deficiência daquele método em não determinar os efeitos quando vários modos de falha ocorrem simultaneamente. A FTA, sendo iniciada pelo sintoma da falha, realiza a prospecção de suas prováveis origens levando em conta a necessidade da combinação de eventos anteriores para ocorrer o evento indesejável. Por este motivo, o método tem sua notação, constituída de símbolos que representam diferentes tipos de eventos e diferentes combinações possíveis dos mesmos - os denominados portões lógicos, como mostra a Figura 4.13, extraída de [3].

A construção da FTA segue três etapas, segundo SUNDARARAJAN :



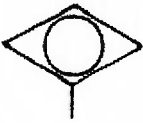
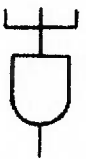


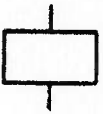
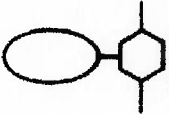


1 - elaboração do diagrama;

2 - análise qualitativa e

3 - análise quantitativa.

Mas isto não é um procedimento rígido e conforme a necessidade os passos 2 e 3 podem não coexistir.

Figura 4.13 - Símbolos dos Eventos e Lógica da FTA, [3]

| evento | lógica |
|---|--|
| <p>evento básico</p>  | <p>"switch" para incluir ou excluir partes da árvore</p>  |
| <p>evento básico dependente de outros eventos</p>  | <p>portão "e"</p>  |
| <p>evento básico para o qual não há desdobramentos</p>  | <p>portão "ou"</p>  |
| <p>evento combinado</p>  | <p>portão inibidor</p>  |
| <p>transfêrência de eventos para fora</p>  | <p>para dentro</p>  |

Determinar a origem do problema corresponde à parte qualitativa da análise. A FTA permite ainda calcular a probabilidade da ocorrência do evento falha (que SUNDARARAJAN [21] denomina de terminal) a partir dos vários eventos iniciais, desde que seja conhecida a probabilidade de falha de cada um dos componentes candidatos a causar o evento terminal.

Conhecer esta probabilidade é importante para determinar uma ação mais enérgica sobre componentes cuja probabilidade de causar uma falha seja elevada em comparação com os demais (componente crítico). Mas as informações obtidas com a FTA, permitem alterar projetos de sistemas atacando suas vulnerabilidades (o FMEA também, como exposto na seção anterior), bem como avaliar a segurança oferecida por um sistema cujo(s) componente(s) possa(m) estar apresentando falha. Esta prática é comum na atividade aeronáutica, já que uma aeronave não necessita de todos os seus componentes operantes para realizar vôos nas margens mínimas de segurança. Entretanto, a combinação de diferentes subsistemas falhando simultaneamente pode acarretar a perda total do controle da aeronave, causando, mais que a falha de um sistema, uma catástrofe.

A Figura 4.15, a partir do diagrama de blocos simplificado de um motor de combustão interna esquematizado na Figura 4.14, apresenta uma FTA elaborada para analisar a impossibilidade de dar partida no mesmo.

Elementos

1 - Bomba de Combustível

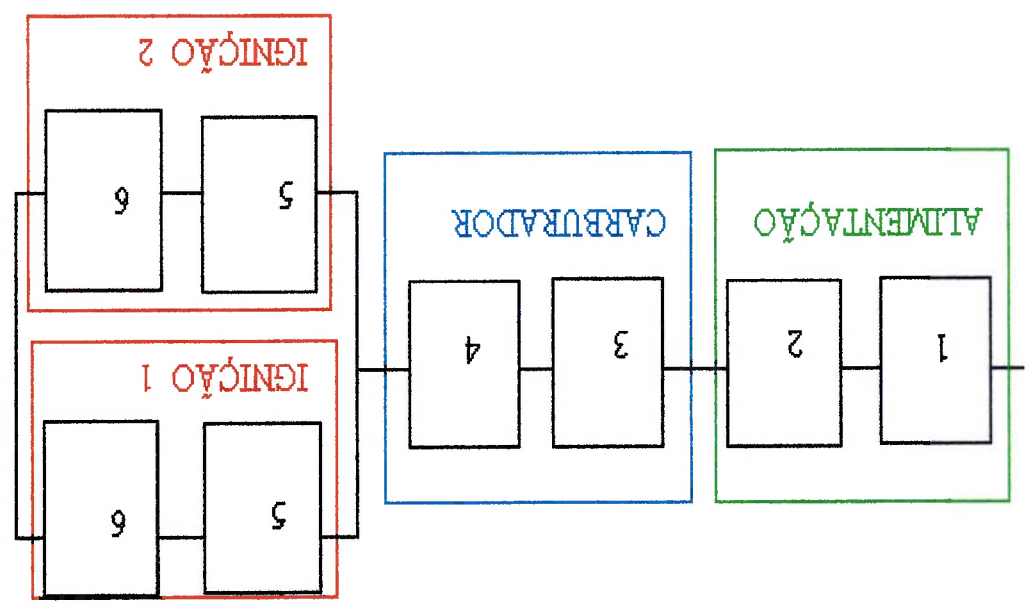
2 - Filtro de Combustível

3 - Giclês

4 - Componentes do Carburador

5 - Componentes de Baixa Voltagem

6 - Componentes de Alta Voltagem



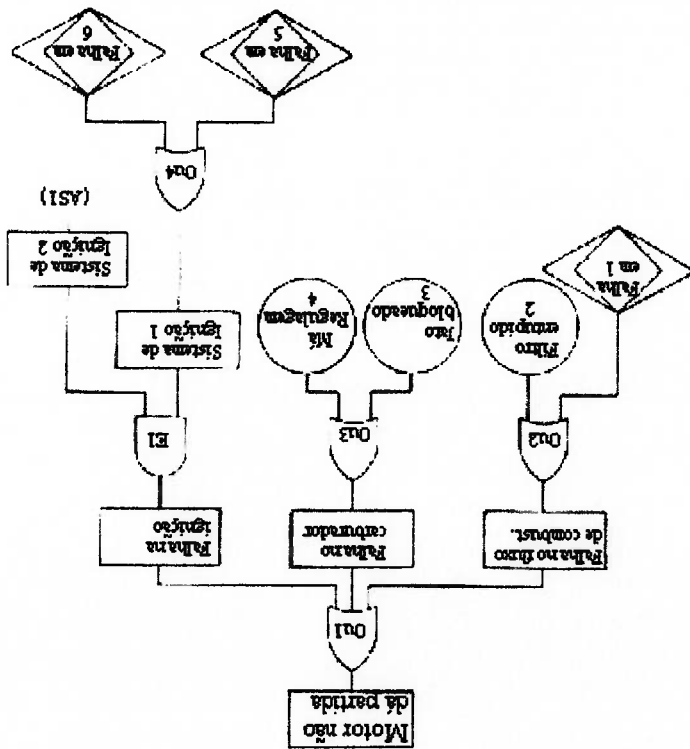
Combustão Interna

Figura 4.14 - Diagrama de Blocos Simplificado para o Sistema de Partida de um Motor de

A FTA também possibilita elaborar procedimentos de diagnóstico de falhas como o “troubleshooting”, o qual é um procedimento para a rápida diagnose do sistema - e correção de componentes onde a falha se originou e as causas desta falha - e correção de problemas. A Figura 4.16, adaptada de [26], apresenta o fluxo de informações necessário para a elaboração do procedimento denominado “troubleshooting”. Visando a rapidez da diagnose e correção de problemas, sistemas aptos à aplicação deste procedimento em geral exigem a inspeção de poucos componentes e sua concepção é feita de forma a permitir esta agilidade. Entretanto, a complexidade pode não ser uma restrição à elaboração do “troubleshooting”. Como este procedimento é elaborado a partir da FTA, portanto após a

A análise da Figura 4.15 possibilita verificar quão rápida e precisa pode ser a determinação da causa da falha de um sistema. Assim, um motor de combustão interna que pode ser complexo pode ter a ausência de partida analisada rapidamente a partir da inspeção dos componentes de influência determinante no desenvolvimento da falha.

Figura 4.15 - FTA para Ausência de Partida do Motor cujo Diagrama de Blocos é Esquemmatizado na Figura 4.14, [3]



ocorrência de uma falha, o "troubleshooting" caracteriza-se por ser um procedimento de manutenção corretiva.

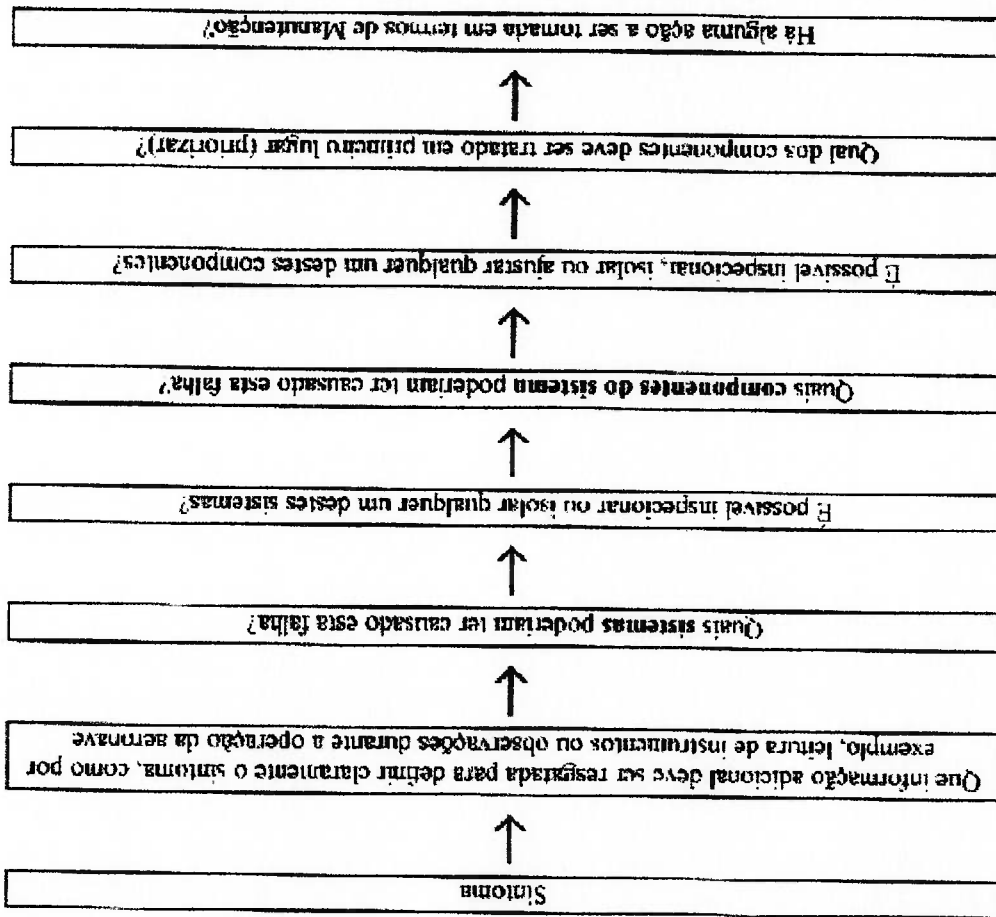


Figura 4.16 - Fluxo de Informações Necessárias ao "troubleshooting", [26]

SUNDARARAJAN, [21], aponta para o fato de que a FTA pode ser empregada em qualquer fase do projeto de um sistema, haja visto a possibilidade de simulação computacional disponível nos programas de projeto.

Mas O'CONNOR, [3], alerta para o fato de que nem todas as falhas são materiais ou provocadas pelo mau funcionamento de componentes. Falhas podem ser resultado de erros humanos como sobrecargas, erros de programação em equipamentos computadorizados, fatores ambientais sobre os quais não se tem nenhuma possibilidade de predição.

4.3.4) Comentários Finais sobre as Técnicas de Análise de Confiabilidade de Sistemas

Todos os autores consultados sobre o tema ferramentas de análise de confiabilidade, como O'CONNOR, [3], SUNDARARAJAN, [21] e LEITCH, [30], ressaltam a incerteza envolvida na avaliação da confiabilidade de sistemas operando em condições reais, por exemplo, em função de não levarem em consideração os aspectos de erros humanos. Porém, estes autores recomendam o uso - em projetos - das técnicas de análise de confiabilidade para a análise da probabilidade de ocorrência de um evento indesejável, isto é, considerar as falhas mais prováveis como as mais graves, as quais poderiam causar severas limitações à operação dos sistemas, os componentes críticos associados às falhas mais severas bem como, os modos de falha mais frequentes associados aos componentes que poderiam causar as falhas mais graves. Normas como MIL - 1629, ou MIL - HDBK - 217, [3], para componentes eletrônicos e FAR - *parts 23/25 (Federal Aviation Rules)* para projeto e homologação em aviação civil, como citado por THURSTON em [32], estipulam valores de taxas de falhas a serem mantidos e métodos de predição de confiabilidade a serem seguidos pelos projetistas dos sistemas, métodos estes que visam identificar os componentes sujeitos às maiores taxas de falhas, bem como, os componentes cuja falha seja mais grave.

Se o FMEA, por partir da análise de um componente ou subsistema, peca por não considerar a ocorrência simultânea de modos de falha distintos, a FTA se ressurte pelo fato de não considerar a evolução temporal (dinâmica) dos parâmetros do sistema como as taxas de falhas dos componentes. Assim, a FTA é um diagrama estático, válido para o momento específico de sua elaboração, segundo DRAGFFY, [23]. E também uma deficiência o fato de a FTA não indicar a participação dos componentes em mais de um evento terminal, a menos que várias árvores sejam elaboradas. Evidentemente, é um trabalho laborioso, mas, segundo O'CONNOR [3], muito empregado devido à sua precisão na determinação das causas de eventos iniciais, sendo o método mais revelador utilizado na investigação das causas de acidentes aeronáuticos, havendo FTA's tão complexas a ponto de ocuparem ao redor de cem páginas.

O FMEA pode orientar a construção de FTA's mais confiáveis e vice-versa.

Como a elaboração da FTA exige o emprego de Figuras lógicas (apresentadas na Figura 4.13), sua programação em computadores é possível, desde que sejam tomadas as precauções contra incoerências.

Por fim, SUNDARARAJAN, [21], afirma que, dependendo de quão complexo seja o sistema analisado, diferentes observadores podem elaborar FTAs não necessariamente idênticas, principalmente porque eventos externos ao sistema podem ser relevantes para alguns analistas, mas desprezíveis para outra parcela. Entretanto, as probabilidades associadas ao evento terminal e os eventos iniciais devem ser os mesmos para todos, bem como a estrutura lógica - não se pode, por exemplo, considerar uma relação que exige portão ou como portão e.

A diferença entre FMEA e FTA é nítida, pois o FMEA parte da análise do componente para determinar o comportamento do sistema. Já a FTA, parte da ocorrência de um evento final específico - uma falha determinada - para verificar sua origem e possíveis causas.

Mesmo contando com estas duas ferramentas citadas anteriormente, não se pode descartar a adoção dos diagramas de blocos para a análise da confiabilidade de um sistema, pois sua elaboração é relativamente simples e fornece importantes informações a respeito da operação dos sistemas em questão, como a possibilidade de analisar a progressão de uma falha ao longo dos componentes sistema. Além disso, permite calcular diretamente sua confiabilidade, o que é mais difícilmente alcançado com o FMEA e a FTA. Além disso, reitera-se que as duas ferramentas citadas acima dependem da confecção do diagrama de blocos.

Tanto FMEA quanto FTA são recursos cientificamente válidos para a análise de confiabilidade de um sistema, partindo de premissas diferentes. Estes dois recursos exigem reflexão e conhecimento da operação do sistema na elaboração das hipóteses, e retribui com rigor no fornecimento de resultados que apoiem a tomada de decisão, como afirma PAPAZOULOU, [31].

4.4) Conceitos de Interesse à Manutenção como Prática Voltada à Confiabilidade

Na exposição dos métodos da seção anterior, procurou-se enfatizar sua importância na tomada de decisões para abordar falhas em sistemas já operantes ou em projeto visando a definição de sua confiabilidade. Esta seção pretende explorar a contribuição destas ferramentas na elaboração de rotinas de manutenção voltadas à confiabilidade, bem como, discutir sobre as práticas de manutenção em voga como a RCM.

Antes, porém, é necessário tratar da interferência da manutenção com a confiabilidade, trazendo à tona dois conceitos de vital importância: a manutenção e a disponibilidade.

O operador de um sistema deseja que o mesmo realize suas funções pelo maior intervalo de tempo possível. Entretanto, como se pode perceber a partir das definições de confiabilidade, algumas condições se impõem para que seja alcançado este objetivo. Uma delas é a ação da manutenção, principalmente se forem consideradas as modalidades preventiva e corretiva, ocupa tempo para ser executada. Portanto, quanto mais demorada a intervenção, ou quanto mais frequente são feitas estas intervenções, menos tempo disponível terá o equipamento. O tempo de imobilização do equipamento é maior quanto maior for o tempo consumido em seu reparo. Ou seja, quanto maior o tempo de reparo, menor a manutenção do equipamento.

A manutenção relaciona-se ao conceito de disponibilidade o qual, ao lado da confiabilidade, ilustra a eficácia da manutenção. Evidentemente, disponibilidade não depende apenas de manutenção, mas de fatores como operação correta e qualidade dos componentes do sistema, pois operação incorreta significa alteração características de utilização previstas em projeto, podendo causar inclusive acidentes, com avarias no equipamento e sua consequente imobilização. A qualidade dos componentes também interfere com características de projeto do sistema, como por exemplo, o MTTF em componentes não reparáveis. Componentes cujo MTTF seja baixo, acarretam maior número de paradas em virtude da ocorrência de falhas e por isso, seu efeito sobre a disponibilidade é adverso.

4.4.1) Conceitos Associados à Definição de Disponibilidade

Antes de expor a definição de disponibilidade, cabe esclarecer que este conceito é controverso, pois se trata de um termo a ser exibido pela manutenção, mas um motivo de cobrança por parte dos setores de produção. A disponibilidade é uma relação entre o tempo em operação e o tempo total considerado para medir o tempo em operação, o qual consiste nas parcelas do tempo de operação e tempo para reconduzir o sistema às suas condições operacionais. O ambiente fabril apresenta exemplos onde tempos ociosos devidos aos intervalos de programação, falta de insumos e problemas com mão de obra - para citar alguns - são somados ao denominador desta relação.

Como pessoas diferentes podem executar o reparo a cada nova falha, ou então, como estão sendo levados em consideração todos os modos de falha, o tempo de reparo será naturalmente diferente. A duração do reparo terá uma distribuição no tempo que é caracterizada por uma função densidade de probabilidade do tempo de reparo $m(t)$. Então,

Analisando-se o aspecto da duração do reparo, pode ser feita a seguinte consideração : há sistemas que permitem correção de falhas rapidamente ou mais facilmente quando comparado a outros. Portanto, o tempo de duração do reparo é um índice associado a maior ou menor facilidade de execução da manutenção, recebendo o nome de manutenibilidade ou manutenibilidade, sendo que neste trabalho é feita opção pelo primeiro termo.

número cada vez maior de componentes do equipamento ou sistema.

- eventos desconhecidos podem induzir à manutenção imperfeita, gerando paradas crônicas ou a ocorrência de falhas cada vez mais extensas, sob o aspecto de haver danos em um

- demorado e

- uma falha aleatória como as que causam a necessidade de intervenção corretiva podem ser totalmente estranhas aos responsáveis pela manutenção, tornando o reparo cada vez mais

- os recursos necessários ao reparo podem não estar disponíveis;

- ocorrendo uma falha, deve-se proceder à sua diagnose;

seguintes fatores :

Os fatores citados, do ponto de vista da manutenção e da confiabilidade, não são objeto de sua influência, mas a discussão não para por aí. Tanto a manutenção corretiva, quanto a manutenção preventiva tomam tempo do equipamento. Entretanto, a manutenção preventiva é programada, o momento da intervenção e sua duração são conhecidos, isto supondo mão-de-obra qualificada, procedimentos padronizados, recursos materiais e humanos disponíveis e não ocorrência de acidentes. Portanto, a parcela relativa ao tempo de operação já estará subtraída da duração da manutenção preventiva. No mais, a manutenção preventiva, por reduzir falhas através da revisão periódica de determinados componentes, tende a aumentar o seu tempo em operação, agindo de forma benéfica na disponibilidade. A grande influência negativa sobre a disponibilidade recai sobre a manutenção corretiva pelos

$M(t)$ será a probabilidade de que o reparo venha a ser executado num intervalo de tempo $t > T^*$, onde T^* corresponde a uma duração desejada para o reparo. Assim :

$$M(t) = \int_0^T m(t) dt$$

4.30

Para caracterizar a manutenção, a média dos tempos de reparo é de capital importância, pois representa o conceito de tempo médio de reparo ou MTTR (do inglês "Mean Time to Repair"). Desta feita :

$$MTTR = \int_0^{\infty} t \cdot m(t) dt$$

4.31

A taxa de reparo $v(t)$ será, [18]:

$$v(t) = \frac{1 - M(t)}{m(t)}$$

4.32

O significado prático desta taxa é que se seu valor é muito alto, ou aumenta com o tempo, pode estar sendo utilizada uma prática inadequada de manutenção.

Isto posto, caracteriza-se a disponibilidade matematicamente. Em primeiro lugar, cabe esclarecer que disponibilidade $A(t)$ é um valor local, significando a probabilidade de um sistema operar satisfatoriamente no instante t .

Embora a disponibilidade seja um valor pontual, usualmente utiliza-se como de avaliação a denominada disponibilidade em um intervalo, expressa por:

$$A^*(t) = \frac{1}{T} \int_0^T A(t) dt$$

4.33

onde :

- T : duração do intervalo de tempo;

- $A^*(t)$: disponibilidade em um intervalo $[0, T]$.

A disponibilidade em um intervalo, segundo LEWIS[18], é objeto de interesse no caso de componentes reparáveis. O intervalo a que se refere este conceito pode ser a vida projetada, ou o tempo durante o qual o componente desempenha satisfatoriamente suas funções. Acontece que, ainda segundo LEWIS[18], após um período inicial onde há efeitos transitientes sobre a disponibilidade instantânea ($A(t)$), nota-se que a disponibilidade dos sistemas reparáveis passa a assumir um comportamento independente do tempo. Nestes casos, a disponibilidade assintótica $A^*(\infty)$ é definida como :

$$A^*(\infty) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_T^{\infty} A(t) dt$$

4.34

No caso de sistemas ou componentes não reparáveis, em vista da definição dada à disponibilidade no início desta seção, a disponibilidade instantânea em um instante t é numericamente igual à confiabilidade :

$$A(t) = R(t) .$$

4.35

De modo simples, como todo sistema ou componente deverá, hipoteticamente, falhar em algum instante e como estão sendo considerados os sistemas ou componentes não reparáveis, se o intervalo de tempo tende ao infinito, deve-se esperar que neste intervalo ocorra a falha e, portanto, a disponibilidade seja nula. Para os sistemas ou componentes não reparáveis, a disponibilidade assintótica é expressa por :

$$A^*(\infty) = 0 .$$

4.36

Dependendo da distribuição associada às taxas de falha e de reparo, o cálculo da disponibilidade pode ser muito laborioso, exigindo o emprego de métodos numéricos .

Se forem feitas as suposições de que $v(t)$ e $\lambda(t)$ são constantes ter-se-á :

$$MTTR = \frac{1}{v}$$

4.37

e o tempo médio até a falha, $MTTF$:

Algumas normas técnicas fazem referência à disponibilidade, tais como a família de normas FAR, citadas por LOMAX, [33] - para aviação civil - pois, além de baixa disponibilidade significar prejuízo certo para o operador, também é um indicativo de que a manutenção ou a operação da aeronave não está a contento. Para o meio militar sua importância é notória, também prevista e definida pelas normas MIL, como citado na referência [1] e, um ramo de atividade que está particularmente interessado neste conceito

de todo errônea se o tempo tende ao infinito. Felizmente, para muitos dos sistemas sujeitos a manutenção corretiva como os eletrônicos, pelo menos a taxa de falhas assume valor constante, já que a função densidade de probabilidade associada a este tipo de componente é exponencial [3]. E a hipótese não é

E interessante notar que nem mesmo é considerada a dependência temporal da disponibilidade.

4.40

$$A = \frac{t_{op}}{t_{op} + t_{pr}}$$

Mas o $MTTF$ é proporcional ao tempo de operação de equipamento (t_{op}) e o $MTTR$ é proporcional ao tempo de paralisação do mesmo (t_{pr}). Logo, com estas suposições, tem-se a maneira mais comum com que a literatura sobre manutenção (sobretudo a literatura nacional como NEPOMUCENO[5]) caracteriza a disponibilidade ;

Segundo o autor em referência, esta expressão da disponibilidade assintótica pode ser usada como uma aproximação mesmo para definir a disponibilidade de equipamentos mais complexos, onde a taxa de reparo e a taxa de falhas podem não ser constantes ao longo da vida operacional.

4.39

$$A^*(\infty) = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR}$$

Assim, de acordo com LEWIS [18], a disponibilidade assintótica terá a forma :

4.38

$$MTTF = \frac{1}{\lambda}$$

pela natureza de suas operações é o hospitalar, atividade que já constitui uma escola à parte em manutenção.

A disponibilidade pode ser aumentada, obviamente, reduzindo-se a taxa de falhas, ou usando técnicas para aumentar a manutenção. O uso de projetos de sistemas visando aspectos ergonômicos, deixando o acesso aos componentes, é um exemplo de ampliação da manutenção. Dotar o sistema de um "lay-out" que permita uma prospecção estruturada e precisa da falha também é uma solução apontada.

O tempo de reparo pode ter uma componente maior dizendo respeito à diagnose - como em sistemas eletrônicos onde detectar a origem de um problema pode levar horas e substituição de um módulo ser feita em poucos segundos - ou às substituições e regulagens - relativamente simples, mas substituí-lo é tarefa um tanto árdua.

Para facilitar a execução e reduzir o tempo de diagnose, foi desenvolvido o procedimento chamado "troubleshooting", já apresentado neste trabalho, que consiste em determinar quais os causadores de um sintoma de falha e indicar a ação a ser tomada. Uma ferramenta muito útil para elaborar este procedimento é a FTA, pois também parte do sintoma de uma falha e identifica o(s) evento(s) inicial(is) que provocam a ocorrência da mesma. O uso do FMEA pode indicar a ação corretiva a ser tomada. Qualquer manual de produtos eletrônicos domésticos hoje em dia possui um "troubleshooting" para a correção de problemas simples que não exigam especialização para serem executadas. A Figura 4.17 traz um exemplo de "troubleshooting" para uma impressora da marca HEWLETT PACKARD, extraído de [34].

A prática de manutenção preventiva também é de interesse para a ciência da confiabilidade, pois a princípio, sua função é manter a menor degradação possível da confiabilidade. Entretanto, embora seja admirada no ambiente empresarial, a manutenção preventiva está envolta em uma série de equívocos. O primeiro deles, diz respeito à afirmação comum em conversas nos setores de manutenção das empresas de que a manutenção preventiva aumenta a confiabilidade do sistema.

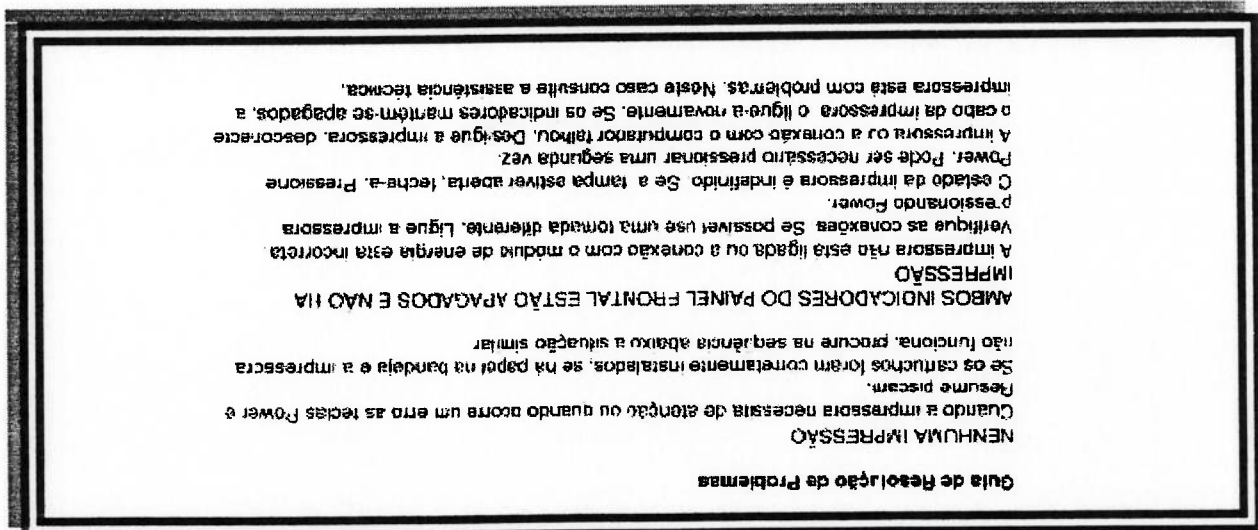
O gráfico da Figura 4.18 ilustra com clareza que a confiabilidade não se restaura apenas a curva da confiabilidade, após a ação da manutenção, se torna idêntica àquela do instante inicial quando do início da vida operacional do equipamento ou sistema.

onde $R_m(t)$... confiabilidade do sistema após a manutenção preventiva.

$$R_m(t) = R(t) \cdot R(t-T) \Rightarrow T \leq t \leq 2T \quad 4.41$$

Considere-se a seguinte situação do gráfico constante da Figura 4.18, onde o sistema opera até o instante T no intervalo $[0, T]$. Neste instante, será feita uma intervenção preventiva. Supondo que a manutenção retorne o sistema à condição de "novo", no próximo intervalo $[T, 2T]$ - lembrar que a manutenção preventiva é executada a intervalos fixos - a confiabilidade neste novo intervalo será, segundo LEWIS [18] :

Figura 4.17 - Exemplo de "troubleshooting" para uma Impressora Tipo Jato de Tinta, [34]



m ...parâmetro de forma da distribuição;

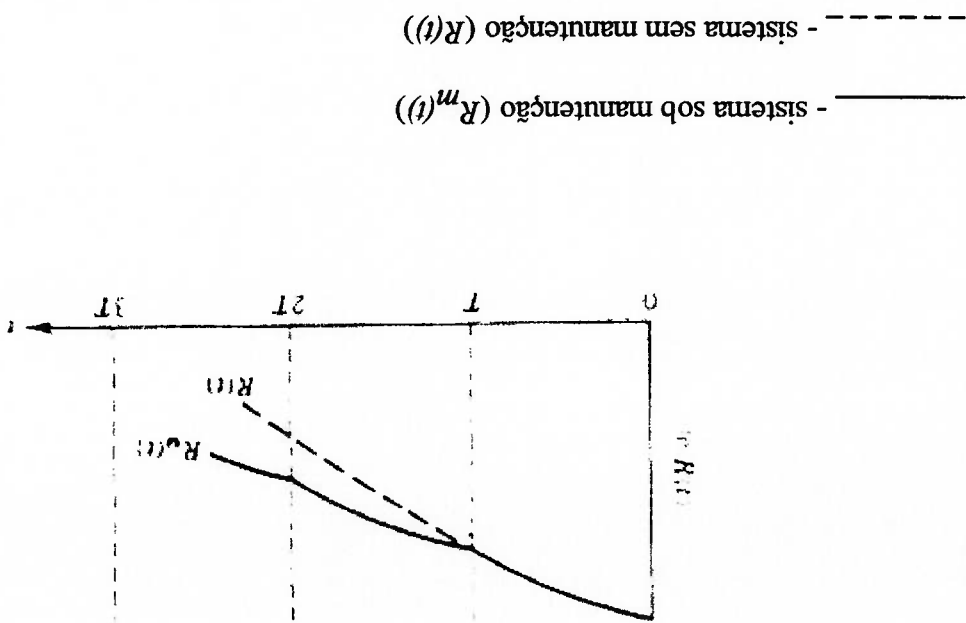
onde:

$$R(t) = \exp \left[- \left(\frac{t - t_0}{\eta} \right)^m \right]$$

4.42

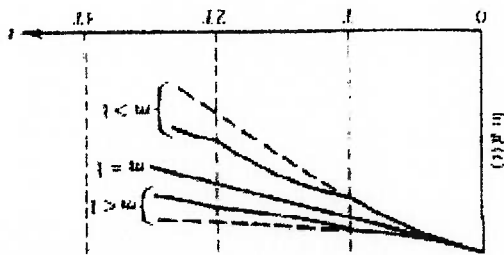
Outro equívoco diz respeito à hipótese de que a manutenção preventiva é aplicável a todo e qualquer tipo de sistema ou situação. Deve-se empregar esta prática se forem verificados benefícios em termos da confiabilidade. Estes benefícios relacionam-se não só à rentabilidade de um equipamento, mas também à sua segurança. Acompanhe-se a situação representada pelo gráfico da Figura 4.19, adaptada de [18], onde m é o expoente da distribuição de WEIBULL, apresentada na equação 4.42, a qual é usualmente utilizada para representar a confiabilidade de equipamentos ou componentes dos mesmos :

Figura 4.18 - Confiabilidade do Sistema versus t , com e sem Manutenção Preventiva, [18]



— sistema sob manutenção ($R^m(t)$)
 - - - sistema sem manutenção ($R(t)$)

t_0 ...valor inicial da distribuição e η ...valor característico da distribuição, são os parâmetros da distribuição. O parâmetro m controla o formato da distribuição, sendo de fundamental importância na identificação da taxa de falhas associada ao equipamento ou sistema.



— Sistema sob Manutenção Preventiva
 - - - Sistema sem Manutenção Preventiva

Figura 4.19 - Comportamento da Confiabilidade $R(t)$ em Função do Exponente m , [18]

Assim, segundo LEWIS [18], m tem os seguintes significados :

- $m < 1$ - taxa de falhas decrescente;

- $m = 1$ - taxa de falhas constante;

- $m > 1$ - taxa de falhas crescente.

Logo, acompanhando-se o gráfico da Figura 4.19, nota-se que ações preventivas de manutenção são indiferentes se $m = 1$ ou seja, é inútil adotar manutenção preventiva para sistemas com taxa de falhas constante. Se $m < 1$, a manutenção preventiva acaba por prejudicar ainda mais o equipamento, fazendo com que o sistema seja entregue em situação pior que aquela existente antes da intervenção. E se $m > 1$, a manutenção preventiva é requerida como a prática mais adequada para reduzir a degradação da confiabilidade do equipamento.

Portanto, manutenção preventiva deve ser empregada quando se tem taxas de falhas crescentes, típicas de desgaste. Por isso mesmo, os sistemas mecânicos são afetados e exigem manutenção preventiva.

Já a manutenção preditiva tem o interesse da ciência da confiabilidade por permitir uma prorrogação na utilização de componentes cujas falhas possam ser aleatórias ou não, porém apresentando um tempo de desenvolvimento, como apresentado na Tabela 4.1. Mas em termos de sua caracterização matemática não apresenta novidades, pois constatada uma situação onde a falha tenha se tornado intolável, o equipamento é paralisado e a partir de então o procedimento é semelhante ao da manutenção corretiva, com a vantagem desta prática permitir a programação da parada e, obviamente, não permitindo que o equipamento sofra os efeitos da falha consumada. Portanto, a manutenção preditiva está relacionada à confiabilidade na medida em que o modo de falhar e o comportamento estatístico da falha fornecem indicações sobre a conveniência de sua aplicação, sem no entanto contribuir para reduzir a degradação na confiabilidade do sistema. Quando utilizada unicamente como recurso para prorrogar a utilização de itens sujeitos à manutenção preventiva, pode haver inclusive aceleração no processo de degradação da confiabilidade, podendo-se analisar a Figura 4.18, extraída de [18]. Utilizar a manutenção preditiva visa assegurar que, durante a operação, o item analisado está desempenhando suas funções dentro de níveis estabelecidos de desempenho.

4.4.2) Apresentação das Práticas de Manutenção Centradas em Confiabilidade

As práticas expostas acima não são necessariamente centradas em confiabilidade, mas a decisão de optar por uma ou outra certamente depende das considerações sobre análise de confiabilidade feitas desde o início do trabalho. Decidir incorretamente pode significar a diferença entre a operação normal e a catástrofe, seja ela financeira, material, ambiental, humana ou todas estas juntas. Por isso, maior atenção passou a ser dada à relação entre manutenção e confiabilidade, especialmente a partir da década de setenta nos Estados Unidos e no Japão, no caso da indústria em geral. A união de diversas idéias acerca da aplicação da confiabilidade à manutenção deu origem à RCM ou MBC (respectivamente RELIABILITY CENTRED MAINTENANCE e MANUTENÇÃO BASEADA EM CONFIABILIDADE, hoje rebatizada de MCC - MANUTENÇÃO CENTRADA EM CONFIABILIDADE).

Defini-la seria simples : é a aplicação de todos os conceitos discutidos até esta seção na tomada de decisão em manutenção. Mas não é tão óbvio assim. Primeiro porque para aplicar a RCM é necessário que se tenha objetivos a serem atingidos e a confiabilidade por si só é uma finalidade. Diversos aspectos se interpoem entre as necessidades do operador de um sistema qualquer, seus objetivos e os recursos de que dispõe para alcançá-lo.

Outro problema é que para alguns autores (em geral consultores empresariais), RCM passou a ser sinônimo do emprego da manutenção preventiva, da preditiva e do FMEA. Assim, segundo MOURRAY [16], sistemas cujos modos de falha não sejam compatíveis com as práticas preventiva e preditiva, continuam sendo considerados como estritamente aleatórios. Tem-se ainda, o fato de que muito tempo é consumido no conhecimento acerca do equipamento, mas pouca atenção é dedicada às solicitações impostas ao mesmo em sua operação. Isto torna a adoção da RCM sem maiores análises incompleta sob o ponto de vista da confiabilidade, pois, como já foi visto neste trabalho, a definição deste conceito pressupõe o conhecimento das condições operacionais às quais está sujeito o sistema e as solicitações, sem dúvida, são parte destas condições.

Este trabalho propõe a elaboração de um procedimento de manutenção procurando dar maior ênfase ao aspecto das solicitações atuantes no sistema e a partir daí avaliar os possíveis modos de falha que poderiam ser apresentados pelos componentes do sistema, tendo em vista o mecanismo de transmissão destes esforços entre os diversos componentes. Além do modo de falhar, procurar-se-á avaliar os mecanismos que são responsáveis pelo desenvolvimento da falha, tais como fadiga ou desgaste, fornecendo subsídios para avaliação do comportamento da taxa de falha e, portanto, embasando o processo de tomada de decisão em manutenção.

Após a análise dos fatores que explicam as falhas dos componentes, o passo seguinte consiste em verificar qual o efeito das solicitações ao longo do sistema, ampliando o raciocínio empregado com os componentes e explorando a contribuição de cada um deles na falha do sistema global considerado.

A seguir, é necessário explorar as especificidades da atividade na qual o equipamento ou sistema está envolvido e em como as mesmas afetam a manutenção do sistema por meio

dos conceitos relacionados a esta atividade e de regulamentos específicos do setor, para que seja tomada a decisão correta, quer tecnicamente, quer legalmente.

A partir de então, é possível selecionar as práticas de manutenção adequadas a cada caso, com base nos modos de falha e no comportamento da taxa de falhas, visando assegurar a manutenção da confiabilidade dos sistemas estudados através de um eficaz plano de manutenção.

Especificamente, neste trabalho, aplica-se esta metodologia para o caso da atividade aeronáutica, tendo em vista a grande quantidade de regulamentos e normas que regem o setor, as quais exercem grande influência sobre o processo de tomada de decisão em manutenção.

Para verificar a validade da proposta do plano de manutenção, será feita a comparação com as diretrizes de manutenção do fabricante - no caso o MPG (do inglês *Maintenance Planning Guide*).

ESPECIFICIDADES DA MANUTENÇÃO NA ATIVIDADE AERONÁUTICA

CAPÍTULO 5

5.1) Considerações Iniciais

Neste capítulo, apresentar-se-ão as especificidades da atividade aeronáutica, as quais influenciam as decisões sobre o planejamento e a execução da manutenção de uma aeronave. O objetivo do capítulo é ressaltar alguns aspectos relativos aos requisitos de utilização de uma aeronave, que influenciam o seu projeto e a sua operação, incluindo o sistema de manutenção.

Estas informações servirão de subsídio para execução de um plano de manutenção para componentes de uma aeronave, tal como apresentado no capítulo 6 desta dissertação.

5.2) Requisitos de Utilização de um Sistema

Um equipamento é construído para atender a finalidades específicas. Componentes são dispostos em um arranjo que permita ao sistema do qual fazem parte satisfazer, a estas finalidades.

Do ponto de vista da confiabilidade, o importante é conhecer as variáveis relacionadas ao comportamento do sistema, de modo a assegurar uma operação isenta tanto quanto possível de problemas, dentro de limites especificados, como pode ser visto nas possíveis definições do termo já apresentadas no capítulo 3.

Os requisitos de utilização de um sistema são definidos a partir do momento em que se concebe um novo produto, pois, contando com maior ou menor influência de cada um, os seguintes públicos estão envolvidos com o ciclo de vida de um produto :

- fabricante/projetista;
- agente comercial (vendedores, representantes, etc.);
- o operador;
- o usuário;

- as agências governamentais.

Estes públicos agem por vezes simultaneamente, como no caso dos usuários de serviços de transportes e agências governamentais. Isto gera uma complexidade crescente em relação aos requisitos de um novo sistema qualquer que venha a ser sua natureza. Mas todos esperam obter vantagens na interação com o produto, vantagens estas diferentes para cada um destes públicos. Siga-se o exemplo de um fabricante de aeronaves, conforme HEMKE, [4] e SILVA, [35].

O fabricante espera contar com um produto de boa aceitação no mercado, com margens de lucro satisfatórias, custos reduzidos e de preferência, obter o domínio do mercado para seus produtos, o que só acontecerá com a produção de aeronaves comprovadamente seguras.

O operador deseja um avião de baixo custo operacional (incluindo a previsão do consumo de combustível, custo do treinamento de tripulantes e técnicos, manutenção), com boa disponibilidade (na verdade, as empresas aéreas se referem à despachabilidade da aeronave, como sendo uma medida qualitativa da facilidade e confiabilidade nas operações executadas pelo avião), peças de reposição acessíveis, intervalos entre revisões cada vez maiores e segurança - acidentes também maculam o nome do operador - para citar alguns aspectos.

O usuário deseja um meio de transporte rápido, confortável e obviamente seguro, onde segurança significa partir e chegar sem sobresaltos no decorrer da viagem.

E as agências governamentais, controlando a operação de equipamentos caros, sofisticados e potencialmente perigosos, desejam reunir a maior quantidade possível de informações sobre o projeto, construção, operação e manutenção das aeronaves. SILVA [35] aponta claramente as exigências de todos estes públicos quando do desenvolvimento e comercialização das aeronaves EMB-110 (Bandeirante) e EMB-120 (Brasil).

Do que foi exposto acima, pode-se extrair alguns requisitos básicos para a utilização de um sistema, levando em consideração pontos de vista distintos dos públicos envolvidos com a operação do mesmo :

- lucratividade;

- facilidade de operação;
- manutenção;
- capacidade;
- documentação;
- desempenho e
- SEGURANÇA.

Alguns setores da indústria podem ser pouco influenciados pelos usuários ou agências governamentais, embora esta realidade esteja se modificando em virtude de preocupações ambientais e de ordem sanitária principalmente. Mas em qualquer atividade, um sistema só vem à operação se contemplar os interesses de todos os seus públicos.

Pois bem, para contemplar estes interesses, é esperado um desempenho específico para o sistema sob condições de utilização também específicas. É muito comum que estas condições de utilização sejam balizadas por legislações ou normas, as quais são fontes de consulta para estabelecer requisitos iniciais para a utilização de um sistema.

À medida em que aumenta a complexidade dos sistemas, mais presente se faz a manutenção entre seus requisitos operacionais. Adicionalmente, sistemas cuja operação envolva riscos à integridade de pessoas ou do ambiente, além daqueles cuja parada possa gerar perdas econômicas de grande monta como as usinas siderúrgicas, têm sido cada vez mais exigidos no que se refere à ações de manutenção.

Portanto, a manutenção é, seguramente, um importante requisito de utilização de um sistema sob o ponto de vista da confiabilidade, chegando até a fazer parte de sua definição, tal como indicado no item 4.1 deste trabalho. A própria confiabilidade é um objetivo a ser alcançado dentro dos atuais requisitos de utilização de um sistema, seja como um índice, ou como é mais comum, em valores relativos à ocorrência de eventos desfavoráveis em um dado número de operações. Os regulamentos como a família FAR 25 - família de normas aeronáuticas destinadas aos requisitos a serem cumpridos por uma aeronave para sua homologação, autorizando sua operação em serviços de qualquer natureza - segundo LOMAX, [33], estabelecem por exemplo a ocorrência de um evento catastrófico - a perda total da aeronave e de vidas a bordo ou em terra - a cada cem mil operações (ciclos,

compreendidos como a ocorrência dos eventos decolagem, vôo propriamente dito e pouso) de uma aeronave comercial como um valor aproximado para a sua probabilidade de falha, sendo que este valor também é considerado como referência para a probabilidade de falha associada a alguns componentes considerados vitais para a operação da aeronave, basicamente os elementos estruturais, os quais podem apresentar colapso por fadiga.

5.3) Procedimentos de Manutenção de Aeronaves

5.3.1) Introdução

Segundo HEMKE, [4], o simples fato de uma aeronave operar em um meio que não é habitual ao ser humano já a torna uma máquina distinta das demais. Sua operação, sua fabricação, seu projeto exigem uma gama de conhecimentos particulares a esta atividade. E assim é com sua manutenção.

Já foi citado na seção 4.1 o fato de que qualquer sistema e seus componentes possuem um intervalo de tempo no qual sua utilização, cumprindo alguns requisitos dentro os quais está a manutenção, se dá em valores admissíveis de confiabilidade e que, devido à natureza de operação de cada um dos sistemas, são diferentes os modos pelos quais estes atingem o fim de sua vida útil - conceito definido como modo de falha.

A engenharia aeronáutica, particularmente a manutenção aeronáutica, acompanha os modos de falha dos sistemas e seus componentes observando um conceito bastante importante no estabelecimento das decisões acerca da intervenção no sistema : os limites. Retorcendo esta afirmação, HEMKE, [4] ressalta que "...o avião é uma complexa máquina composta de inúmeros órgãos, conjuntos e sistemas, individualmente formados por milhares de peças de acordo com considerações básicas de projeto. Além de conhecer as partes que compõem esta máquina e de saber como estas funcionam, o engenheiro de manutenção deve saber quais os cuidados especiais e quais as precauções são necessárias para mantê-las trabalhando e o tempo que elas trabalham e o tempo que elas recebem estes cuidados. Em outras palavras, o engenheiro de manutenção precisa saber quais são as limitações da máquina" - grifo do autor citado.

5.3.2) Limites de uma Aeronave

Todo o público envolvido com a operação de uma aeronave comercial deve atentar para os limites, inclusive os passageiros, senão vejamos, as restrições quanto ao peso

Pelo fato acima citado, tem-se um exemplo de como a eficiência no uso das aeronaves pode ser afetada pelos limites. Por isso, apesar de ser um parâmetro de capital importância para a operação de uma aeronave, os limites são rígidos mas não inmutáveis. Estabelecidos em conjunto por fabricantes, agências governamentais e atualmente operadores (caso do McDONNELL DOUGLAS MD-11, BOEING'S 737-300 em diante, 747-400, 757, 767 e 777 e de toda a família AIRBUS, para citar os maiores fabricantes), os limites são fruto do acúmulo de experiência e conhecimento acerca da aeronave. Operadores também podem acumular este conhecimento e através de estudos detalhados solicitar, inicialmente ao fabricante, depois às agências reguladoras, a ampliação destes limites.

Mas, avançando um pouco mais pela questão, pode-se perceber que, algumas vezes, atender aos limites pode significar comprometer a eficiência no uso da aeronave. Por exemplo, pode-se citar o caso do peso máximo de decolagem que sofre reduções conforme a altitude do aeroporto em uso e o comprimento de suas pistas. A imprensa especializada (como a revista FLAP Internacional) à época da inauguração do Aeroporto Internacional de Guarulhos, relatava o caso das companhias aéreas que operavam vôos transoceânicos, descontentes com o então recém inaugurado terminal, pois em 1985 - ano de sua inauguração - a pista principal (nomenclatura 09L - 27R) era 1000 metros mais curta que sua extensão atual e sua altitude de quase 1000 metros acima do nível do mar impedia o embarque de todos os passageiros que a aeronave poderia comportar, ou deveria haver redução na carga transportada ou no combustível utilizado. Quase todas adotavam a escala no Aeroporto do Galeão, no Rio de Janeiro, pois além de suas longas pistas, o mesmo situa-se no nível do mar, em condições muito satisfatórias para a decolagem. O inconveniente vem à tona se for lembrado o fato de que antes do Aeroporto de Guarulhos, o Galeão foi o aeroporto utilizado para a partida destes vôos. Aterrisar em Guarulhos, decolar com restrições de peso e lotação e ainda por cima aterrisar novamente no Rio de Janeiro para cumprir a restrição imposta pelos limites das aeronaves foi sem dúvida muito dispendioso para as empresas.

No caso de aeronaves civis, a primeira razão para a imposição de limites é a segurança, tópico em que concordam agências governamentais, fabricantes e operadores, segundo HEMKE, [4] e VIEIRA, [36].

de alguns equipamentos eletrônicos a bordo ilustram exemplos de limites que os passageiros máximo a ser transportado no interior da aeronave e em seus porões, e as proibições do uso devem respeitar.

Comumente são atendidos e ao longo do tempo, um mesmo tipo de avião passa a ter limites distintos para cada operador. HEMKE, [4], afirma que os limites vão se adaptando ao longo da vida útil da aeronave segundo o critério de máxima segurança e eficiência.

Evidentemente, pela complexidade inerente aos aviões, os limites usualmente não são alterados como um todo, mas para cada componente, sistema ou característica de desempenho específicos. E por conta da variedade de sistemas e de situações experimentadas por uma aeronave, os limites, segundo HEMKE, [4] e LOMAX, [33] subdividem-se em cinco categorias básicas abaixo listadas, e que são explicadas na sequência deste texto :

- i) operação
- ii) crescimento
- iii) reparo
- iv) serviço
- v) desgaste.

5.3.2.1) Limites de Operação

Inicialmente, tem-se os Limites de Operação definidos como os limites impostos ao avião por considerações de ordem aerodinâmica e estrutural. A não observância destes limites acarreta, segundo HEMKE, [4], consequências como desempenho reduzido, falha estrutural e efeitos negativos à segurança de voo.

Como exemplo dos limites de operação temos velocidades máximas ou mínimas (caso da velocidade de "estol"), limites de peso e balanceamento, potência ou rotação máxima a serem imprimidas aos motores, temperaturas e pressões em sistemas e na cabine (pressão diferencial). Um exemplo recente de desrespeito aos limites de operação da aeronave foi o acidente com um avião do tipo ERJ-145 ocorrido em dezembro de 1998 no Aeroporto Afonso Pena em Curitiba, onde a aeronave ultrapassou em três vezes a velocidade vertical de descida, a velocidade de cruzamento da cabecceira (V_{Rcrl}) caiu abaixo do previsto no manual da aeronave, a carga na asa e na fuselagem ultrapassou os limites de operação admissíveis e o resultado pode ser visto na Figura 5.1, extraída de [37], havendo a fatura de toda a seção transversal da fuselagem da aeronave.

É importante ressaltar que os manuais das aeronaves são elaborados seguindo uma estrutura prevista em norma (ATA 100 para civis e MIL para militares) a qual permite um grande número de revisões. O que foi dito a respeito de CHT e alterações de projeto, segundo HEMKE, [4] e KERMODE, [39], (apenas para citar dois autores pois é um tópico citado com frequência na literatura aeronáutica), é válido para todos os outros tipos de

visa indicar que modificações são indiscutivelmente caras e laboriosas. dos manuais das aeronaves por meio do envio de revisões a todos os operadores. O grito partir de uma determinação governamental, o CHT não é necessário, mas haverá alteração alteração partir dos fabricantes dos componentes, dos sistemas ou das aeronaves, ou ainda, modificar sua aeronave, então a modificação de projeto será emitida como um CHT. Se a componentes quanto aos pilotos, construtores e oficinas. Se um operador individual deseja de CHT - Certificado de Homologação de Tipo - orientado tanto à aeronaves e seus órgão competente. Temos no Brasil, conforme VIEIRA, [38], um documento denominado uma ampliação nos limites, exige análise e modificações de projetos, testes e autorização do potência - quando passam a ser denominados de "de-rated". Qualquer alteração, sobretudo cruzeiro. Mas também é frequente o caso de motores exigirem um rebaixamento em sua normal. É comum por exemplo, motores admitirem aumento de potência contínua ou de dependendo de como o sistema ou componente desempenha suas funções em operação - Os limites de operação podem ser modificados - ampliados ou reduzidos -

o Pouso, [37].

Figura 5.1 - Aeronave ERL-145 após ter Excedido Limites de Operação Estabelecidos para



limites a serem apresentados adiante neste trabalho, bem como a qualquer característica que se deseje ou necessite alterar em aeronaves.

O assunto modificação de aeronaves e seus sistemas é bastante complexo e regido por uma rígida regulamentação. Há outros mecanismos de notificar operadores sobre alterações em seus aparelhos como diversos tipos de boletins e circulares, como os NOTAM's (do inglês *NOTICES for Air Men*), os *bulletins* (boletins) e as temidas AD's (*Advisory Circular*), as quais exigem cumprimento imediato de modificações impostas pelas autoridades. Cada um destes documentos é emitido segundo diretrizes específicas e ao lado das revisões têm validade mundial, ao contrário dos CHT's que são apenas nacionais, se tanto.

O interesse nos limites de operação está no fato de que todas as fases da atividade aeronáutica interagem com seu estabelecimento ou cumprimento. Os autores da área aeronáutica e os manuais de procedimentos de todos os fabricantes ressaltam que, nas palavras de HEMKE, [4], "*...eles constituem uma verdadeira bíblia...*" para tripulações, departamentos das companhias aéreas, usuários, fabricantes e oficinas. São os limites mais rigorosamente fiscalizados pelas agências reguladoras.

5.3.2.2) Limites de Crescimento

Outra categoria de limites impostos a uma aeronave é representada pelos limites de crescimento, definidos, segundo HEMKE, [4], como os limites impostos por fatores inerentes ao próprio projeto da aeronave - em geral limitações de ordem estrutural ou aerodinâmica - os quais determinam o desempenho máximo a ser obtido por uma unidade por meio de modificações. Esta categoria de limites não necessita estar legalmente publicada, até porque os limites de crescimento nem sempre são precisamente definidos. A primeira razão, como apontado por HEMKE, [4], é o fato dos fabricantes não serem capazes de prever todos os acréscimos, sobretudo devido à considerações de ordem tecnológica. Para ilustrar este argumento, pode-se recorrer a um exemplo de limite de crescimento impensável no início da aviação comercial a jato, em fins da década de 50 : o raio de ação, ou alcance - o qual é uma medida de distância a cobrir sem reabastecimento, em geral em milhas náuticas (NMI) - ou autonomia - uma medida de tempo, sempre em horas na aviação comercial. Um vôo entre o Rio de Janeiro e Europa não podia ser planejado sem prever uma escala técnica na África (em geral Dacar - capital do Senegal). Também não podia ser realizado por aeronaves com apenas dois motores como hoje é

realizado pelos BOEING's 767ER, 777, e pelos AIRBUS A-330 (operação conhecida como ETOPS, do inglês "*Extended Range Twin-Jet Operations*" que em livre tradução significa operações de longo curso realizadas com bi-jatos). O desenvolvimento de motores mais econômicos e sobretudo com maior confiabilidade tornou possível aumentar o alcance e a autonomia, possibilitando a realização de vôos de até catorze horas em jatos bimotores.

A segunda razão, ainda segundo HEMKE [4], é que na aviação comercial, o operador nem sempre pode ter vantagens como resultado dos acréscimos em sua aeronave, em virtude de modificações, pois pode haver perdas no desempenho operacional da aeronave - em geral o aumento no consumo de combustível - ou ainda os custos das modificações atingirem valores impossíveis de serem absorvidos pela operação comercial de uma aeronave. Como exemplo do que foi afirmado acima, tem-se a aquisição por parte de uma grande empresa aérea brasileira da versão de curta distância do AIRBUS A-300 - jato para aproximadamente 250 passageiros, denominada de B2, no início da década de oitenta. Aquela época, a versão em questão foi escolhida por oferecer suficiente autonomia para as rotas da empresa, exclusivamente domésticas (nacionais). Quando passou a explorar rotas internacionais dentro da América Latina, a empresa solicitou à AEROSPATIALE - fabricante das aeronaves - estudos para aumentar a autonomia daquelas aeronaves. Ocorre que a diferença entre a versão de curta distância (B2) e a de média distância (B4) é a existência de tanques centrais de combustível na variante B4. Mas após construída, a inserção dos tanques exige a desmontagem parcial da célula, trabalho que chega a ser impossível em algumas aeronaves, em virtude da complexidade da montagem de uma fuselagem - como se pode observar na Figura 5.2 - e que nos A-300, apesar de possível, é dispendioso a ponto de inviabilizar economicamente sua execução. Até os dias atuais as aeronaves estão voando com a mesma autonomia, sendo utilizadas em apenas uma rota internacional, repleta de escalas (Salvador - Rio de Janeiro - São Paulo - Porto Alegre - Buenos Aires).

Uma aeronave que constitui um feliz exemplo de alterações sucessivas em seus limites de crescimento é o BOEING 737, como pode ser visto nas Tabelas 5.1 (a) e 5.1 (b), adaptadas de [40].

Alterações nos limites de crescimento são mais complexas de serem efetuadas e dependem não apenas da análise das modificações no projeto da aeronave, testes e ensaios, como também da aprovação das agências reguladoras. Ressalta-se aqui a importância de não confundir as modificações executadas dentro dos limites de crescimento com as alterações nos limites de crescimento.

agências governamentais.

- sem que, segundo VIEIRA, [38], haja a obrigatoriedade de aprovação por parte das estruturas, tamanho e características aerodinâmicas - em geral, são fatores interdependentes legislação, no que concerne aos aspectos de resistência mecânica dos componentes sofrer alterações dentro de valores que respeitem os fatores de segurança exigidos pela limites intermediários de crescimento, ou seja, estabelece a possibilidade de a aeronave ao menos uma estimativa para os limites de crescimento e em geral, o faz por meio dos Pelo fato de interterirem com os limites de operação, o fabricante deve estabelecer

Figura 5.2 - - Aspecto da Montagem da Fuselagem de um Grande Jato Comercial

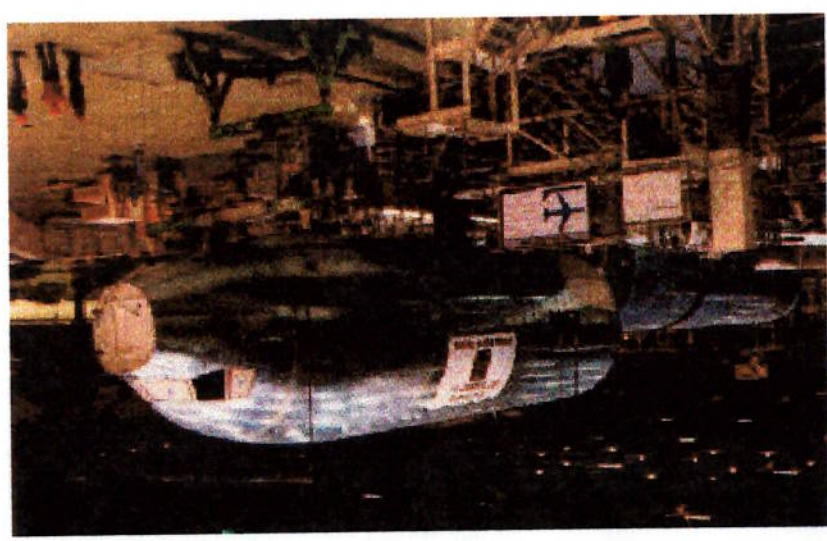


Tabela 5.1 - Evolução dos Limites de Crescimento do BOEING 737, [40]

(a) - Limites de Crescimento Aproximados para o BOEING 737

| 737-100 Limite de Crescimento | |
|-------------------------------|---------|
| Passageiros | ~ 150 |
| Peso Máx. Decolagem | ~ 56000 |
| Alcance (km) | ~ 5000 |

(b) - Valores Reais das Três Primeiras Versões do BOEING 737

| 737-100 737-200 737-300 | |
|---------------------------|-------------------|
| Passageiros | 115 130 149 |
| Envergadura (m) | 28,35 28,35 28,88 |
| Comprimento (m) | 28,65 30,48 33,4 |
| Altura (m) | 11,28 11,28 11,13 |
| Peso Máx. Decolagem (kgf) | 44000 52390 56472 |
| Vel. de Cruzeiro (km/h) | 925 927 899 |
| Alcance (km) | 3860 4075 4225 |
| Teto de Serviço (m) | 9145 9145 10670 |

Este avião foi lançado na versão 737-100 em 1967 como um típico avião para curtas distâncias, com capacidade ao redor dos 100 passageiros. Embora à época de seu lançamento a versão -300 sequer estivesse sendo planejada, estimava-se que este seria o limite de crescimento do 737, com os valores previstos pelo fabricante constantes na Tabela 5.1 (a), datados de 1967, [40]. Em 1968, foi lançada a versão -200 (no Brasil operando pela VARIG e pela VASP além de centenas de operadores ao redor do mundo até hoje), com diversas alterações em relação ao 737-100, mas dentro de seu limite de crescimento. Em 1980 foi lançada a versão -300, cujo primeiro voo e entrada em serviço ocorreram em 1984, e a Tabela 5.1 (b) nos mostra que, exceto pela capacidade de passageiros e principalmente pelo peso máximo de decolagem, as alterações foram de pouca monta. Ressalta-se que a diferença no teto de serviço a favor do modelo 737-300, embora em torno de 10%, representa um dos mais difíceis parâmetros de serem alterados em uma aeronave por razões estruturais e de desempenho. Como os motores da versão -300 são diferentes dos motores das primeiras versões, foi possível auferir este acréscimo de aproximadamente 1500 m para o BOEING 737-300. Entretanto, os requisitos de utilização para as aeronaves da categoria

do 737 em 1984 já eram outros, exigindo maior alcance e mais capacidade (e surgimento de outra categoria de aviões para até 170 passageiros). O BOEING 737-300, embora semelhante às versões antigas na aparência, era outro avião, incorporando tecnologia diferente que abrangiam desde os motores ao sistema de navegação, mas a célula básica do BOEING 737 já tinha atingido seu limite de crescimento, embora com um desempenho bastante confiável segundo SMITH, [40].

A BOEING AIRCRAFT Co., dos Estados Unidos, decidiu realizar estudos para ampliar o limite de crescimento da família 737 lançando mão do conhecimento acumulado ao longo, até então, de mais de duas décadas de operação. Aliás, resgatar informações e conhecimentos acumulados com a experiência em um determinado tipo de aeronave, quer por operadores, quer por fabricantes, é procedimento comum na indústria aeronáutica segundo KAMIYAMA, [43], confirmando o que foi citado no início da seção 5.3.2. Em 1986, com a alteração nos limites de crescimento já aprovadas pela FAA, a BOEING lançou a versão -400, com ratió de ação similar ao do -300 e capacidade para 165 passageiros. Com o novo limite de crescimento estabelecido, veio a versão encurtada -500, para 108 passageiros, mas incorporando cada vez mais avanços tecnológicos. Recentemente, a BOEING ampliou ainda mais estes limites, lançando as versões -700, -800 e -900, com equipamentos de proteção ao voo inéditos na família 737, como alarmes e controladores automáticos ativos para evitar colisões, além de motores mais potentes que os da série -300, -400 e -500, novas asas mais longas, maior autonomia graças à capacidade maior de combustível, 189 passageiros de capacidade na versão -900, além de uma série de melhorias no desempenho. Basta citar que em fins de 1998, uma aeronave BOEING 737-700 percorreu o trecho Miami - Porto Alegre - ao redor de 8000 quilômetros - em nove horas sem reabastecimento, quando da realização de seu voo de entrega para a empresa brasileira VARIG, como relata a imprensa especializada em aeronáutica, [41].

Outra aeronave que até o presente momento atingiu o limite de crescimento da célula é o ERL-145, derivado do EMB-120 (Brasil). O comprimento máximo foi atingido com o ERL-145 e, devido à esbeltez da fuselagem, não é mais possível, ao menos com os materiais disponíveis atualmente, construir uma célula mais longa com o atual diâmetro, como afirma SILVA, [42].

As considerações tecidas sobre limites de crescimento procuram apresentar um confronto entre aspectos técnicos e implicações econômicas e legais aplicáveis, segundo HEMKE, [4], à aviação civil. A aviação militar, em que pesem as reduções em orçamentos

de programas bélicos em quase todo o planeta, procura atender primeiramente aos requisitos técnicos não apenas da aviação, mas também da atividade militar, atribuindo ao fator econômico um peso menor que o peso atribuído pela aviação civil. De qualquer maneira, a máquina, tanto civil, quanto militar, está sujeita a restrições no desenvolvimento de novas versões, restrições essas que tendem, como visto no exemplo da família 737, a serem menores a cada dia devido à evolução tecnológica.

5.3.2.3) Limites de Reparo

Os limites de reparo dizem respeito aos valores toleráveis de danos ocorridos com a aeronave, os quais, se mantidos dentro de uma faixa de valores, não colocam a operação da aeronave em risco. Os principais componentes afetados pela necessidade destes reparos são os elementos estruturais, como o revestimento - que nas modernas aeronaves tem função estrutural -, longarinas das asas e partes estruturais dos trens de pouso. Os principais danos cujo limite de reparo deve ser observado são rachaduras, trincas, redução de espessuras e dimensões de perfurações.

Esta categoria de limite é inicialmente estabelecida pelos fabricantes e fornecida aos operadores como parte dos manuais de manutenção de aeronaves. Agências reguladoras também estabelecem limites de reparos, sobretudo para aeronaves não fabricadas em série. Limites de reparos podem ser modificados, mas esta possibilidade está fortemente relacionada à experiência acumulada pelos operadores e fabricantes ao longo da utilização do equipamento. Qualquer modificação neste limite deve ser previamente aprovada pela agência reguladora.

De modo a estabelecer a extensão dos danos já impostos à aeronave, as normas da família FAR 23 e FAR 25 prevêem três classificações, as quais são de acordo com a referência [32]:

- danos desprezíveis : exigem pouca ou nenhuma ação de manutenção corretiva, como amassados de pouca profundidade na fuselagem;

- danos reparáveis : exigem reparos por solda, remendos ou outros meios que fabricantes e agências reguladoras julguem necessários, como é o caso de rachaduras nas longarinas das asas;

- danos irreparáveis : exigem substituição do item avariado, como no caso de deformações ou rachaduras nas pernas dos trens de pouso.

As modificações nestes limites exigem estudos detalhados pois componentes estruturais modernos, sobretudo em jatos e turbo-hélices, suportam valores elevados de carga e podem operar em temperaturas suficientemente baixas para favorecer a ocorrência de fraturas frágeis. Neste regime, qualquer trinca ou rachadura pode desencadear a ruptura da peça, sendo difícil a determinação de uma dimensão crítica.

O conhecimento dos limites de reparo, segundo HEMKE, [4], é essencial na operação de qualquer tipo de aeronave, pois a necessidade de reparos se observa devido fundamentalmente à duas causas : acidentes (pousos duros, choques com veículos de apoio no solo, escadas e fontes externas, por exemplo) e fadiga. As considerações tecidas por HEMKE, [4], referem-se a componentes construídos em metal, sobretudo ligas ferrosas e alumínio. Mas os conceitos presentes nas normas FAR dizem respeito também aos componentes em ligas de titânio, tungstênio e compostos, cada vez mais presentes nas estruturas aeronáuticas atuais.

5.3.2.4) Limites de Serviço

Limites de serviço são os limites dos prazos durante os quais a operação da aeronave se dá de maneira segura, sem que nenhuma ação de manutenção seja requerida. A maneira mais comum de caracterizar os limites de serviço é em horas de voo. As causas da necessidade da execução das ações de manutenção no caso dos limites de serviço são o desgaste, a sobrecarga, fadiga e ação química (sobretudo a corrosão). Deste modo, estão sujeitos aos limites de serviço os componentes propensos a apresentarem os quatro modos de falha citados acima, como motores, elementos estruturais, sistema de ar condicionado e sistemas hidráulico e pneumático, por exemplo. Com a entrada em serviço de aeronaves equipadas com componentes eletrônicos, estes também podem estar sujeitos aos limites de serviço, pois embora não falhem por nenhum dos mecanismos citados acima (talvez por sobrecarga de corrente elétrica ou tensão), podem exigir testes, ajustes e até a substituição de componentes.

Dentre os limites de serviço mais difíceis de serem determinados, em função da quantidade das variáveis que o influencia, está a vida útil da estrutura do avião. Tanto é que os fabricantes colocam a aeronave em operação e os testes de impacto e fadiga prosseguem

mesmo após os primeiros anos de serviço de um novo modelo, como afirma KAMYTAMA, [43].

O estabelecimento destes limites é responsabilidade do operador da aeronave, sendo um requisito previsto em norma para companhias de transporte aéreo regular, isto porque a operação de uma aeronave é diferente conforme o ambiente onde esteja sendo empregada. Tanto isto é verdade que as primeiras versões das aeronaves BOEING 737 operadas no Brasil são diferentes das operadas em outras partes do mundo, quer nos seus sistemas, quer nas exigências quanto aos limites de serviço. Aos fabricantes, cabe a recomendação quanto ao valor dos intervalos entre as intervenções de manutenção e às agências reguladoras, cabe a fiscalização quanto ao cumprimento destes limites. Ao lado dos limites operacionais, são de grande interesse para o operador, face aos requisitos impostos até mesmo pelos fabricantes, os quais não garantem sistemas cuja manutenção não esteja em dia (nos termos aeronáuticos, em conformidade).

Resumindo esta idéia, o fabricante estabelece uma estimativa inicial, que o operador deve alterar - o que quase sempre é necessário - de modo a compatibilizar os limites de serviço às suas operações. As agências fiscalizadoras cabe o papel de checar o cumprimento dos prazos recomendados pelo fabricante, o estudo do operador acerca dos limites de serviço e - após aprovar o estudo e as alterações propostas - fiscalizar o cumprimento dos novos limites estabelecidos.

As modificações, em geral, são propostas pelos operadores no sentido de ampliar os prazos, uma vez que isto leva a uma utilização prolongada da aeronave e seus componentes, bem como, torna menores os custos com mão de obra e peças sobressalentes. Neste caso, os estudos a serem realizados pelo operador devem incluir a revisão de desenhos, cálculos e procedimentos operacionais, de modo a explicitar a possibilidade de ampliação, aprovada de comum acordo pelas agências governamentais, fabricantes e operador(es). As alterações podem ser concedidas a um operador em particular, ou a todos os operadores de um mesmo tipo de aeronave. Também é possível e muito comum a redução nos prazos, seja por recomendação do fabricante, seja pelas dificuldades do operador em lidar com itens cuja taxa de falhas seja elevada.

Os serviços de que trata esta categoria de limite são divididos em :

- serviços de rotina : lubrificação, limpeza, ajustes e calibragem de pneus;

- inspeção : exame dos componentes previstos no manual de manutenção por pessoal qualificado, com ou sem auxílio de equipamento especiais;

- revisão : desmontagem ou retirada de componentes e reparo ou substituição das peças avariadas e

- prova : verificação do desempenho dos sistemas da aeronave sujeitos aos limites de serviço por meio de testes em bancada.

Os sistemas e subsistemas da aeronave sujeitos a este limite são muitas vezes complexos, como os motores e sistemas hidráulicos, constituídos de várias peças para sua operação. Estas peças são fabricadas por diversos fornecedores, assim como o próprio motor, conforme afirma SILVA, [35], para quem "...na indústria aeronáutica são raros os exemplos de fabricantes de aeronaves que produzam seus próprios motores, a ponto de até mesmo a gigante BOEING legar a terceiros, com sucesso, esta tarefa...". Logo, estes componentes não são contemplados em detalhes pelos manuais dos fabricantes das aeronaves porém, sujeitos que estão à regulamentação aeronáutica, devem possuir documentação nos moldes previstos por norma. Assim, cada fabricante de itens aeronáuticos, por menor que seja, confecciona seus próprios manuais, estabelecendo limites e tarefas a serem executadas. A este conjunto de informações dá-se o nome de limites detalhados de serviço. Para ilustrar o que foi falado, o BOEING 777 possui, sem considerar as milhares de partes de cada motor, mais de 400 mil itens, a maioria fabricados por terceiros, como a EMBRAER - Empresa Brasileira de Aeronáutica. A Tabela 5.2 mostra como são fornecidas pelo fabricante as recomendações relativas aos limites de serviço do BOEING 377, um quadrimotor a pistão da década de 50, utilizado na Europa como aeronave cargueira da AIRBUS INDUSTRIE e nos Estados Unidos pela BOEING para o transporte de fuselagens entre suas unidades de montagem.

Tabela 5.2 - Limites de Serviço para os Componentes dos Motores do BOEING 377, [4]

| Componente | Publicante | Limite | Inspeções Intermediárias |
|---|---|----------------|---|
| Motor | PMM R-2800 | 1800 h (TM) | 120h-op. A 250h-op. B 375h-op. C Inspeção de banco cada TM |
| Carburador | STRUMBERG | 2 TM | |
| Controlador Automático de Mistura | FRS80-17 | | |
| Hólice | Hamilton Std. | 680 h | |
| Par | 3280 - 15 | 1200h | |
| Hólice | Hamilton Std. | 6000h (Total) | |
| Par | 2H17AC-3-48R | | |
| Par | Hamilton Std. | | |
| Motor de Partida | 43260 Hamilton Std. 6862-12 | 2 TM | O.C. |
| Carador | WALKER - 12 | TM | |
| Controlador de Regulmetro | G. E. 28MB8C1 KOLLMANN8010-01 (AMS247-2) | TM | |
| Regulador ADT | Modificado P4W 104400E Hamilton Std. | 2 TM | |
| Magneto | SOLA-84 Bendix-Saintille | TM | Prova de banco de 1/2 TM |
| Transmissor RPM | DM-10 Pioneer 2210G | TM | |
| Bomba de Gasolina | 25-A5-1 Thompson | TM | |
| Bomba Hidráulica | 172E100 Vickers M24 | TM | |
| Bomba e Motor Elétrico Auxiliares do Sist. Hid. | 3908-30-BCDE Champion | 3000 h | |
| Veias de Ignição | H3751 e R265 | TM | |
| Alavala Elétrica de Controle de Gasolina | | 375 h | |
| Bomba Elétrica Auxiliar de Gasolina | Paseo 121088-022-03(D) | | |
| Bomba e Motor de P. B. | 121026-021-03(E) Paseo 1E-777-71 | 2000 h (Op. 7) | |
| Bomba Elétrica de ADI | Romeo | 2250 h | |
| Filtro (Tq. Hid.) | | 2000 h | |
| Compressor Primário | Stratos S-60-11A | 1000 h | |
| Compressor Secundário | Alreseroh 82362 | 3000 h | |
| Separador d'Água | Alreseroh 80396 | 3000 h | |
| Radador e Válv. Term. | Alreseroh 19310 | TM | |

5.3.2.5) Limites de Desgaste

Os limites de desgaste dizem respeito às dimensões que determinados elementos sujeitos a este modo de falha podem alcançar antes que seja reparado ou substituído, com a finalidade de manter a operação da aeronave dentro de níveis admissíveis de desempenho e

segurança. Em razão disto, HEMKE, [4], afirma que esta categoria de limite é relacionada aos limites operacionais e essencial na determinação dos limites de serviço, já que o mecanismo de desgaste pode assumir um comportamento conhecido ao longo do tempo. Além disso, como as dimensões de alguns itens são difíceis de serem avaliadas ou reparadas, é mais conveniente a adoção de um prazo para a execução das ações de manutenção.

Sendo constituídos por muitos sistemas mecânicos, são vários os itens em um avião os quais estão sujeitos aos limites de desgaste, como :

- fuselagem : parafusos, pinos, buchas, espaçadores e lurações do trem de pouso e fixação das asas, dobradiças e vedação das portas, suportes de cabos e acionamentos, suportes de acessórios, entre outros;

- motores : pistões, bielas, rolamentos, válvulas e suas hastes e assentos, anéis, roscas, cilindros e turbinas e compressores no caso dos jatos e turbo-hélices;

- acessórios : engrenagens, válvulas, hastes, suportes de rolamento, diâmetro de orifícios e no caso de aeronaves de alta velocidade, freios das rodas, espessura do revestimento da fuselagem, para citar apenas alguns dentre milhares de itens em uma aeronave.

O estabelecimento dos valores dos limites de desgaste é inicialmente uma atribuição dos fabricantes. Em geral, são publicados três valores para as dimensões do desgaste dos elementos : mínimo, máximo e um valor para substituição. Estes valores são publicados como tolerâncias, mas nada tem em comum com as tolerâncias dimensionais de fabricação do componente. O valor de substituição estará em uma posição intermediária entre os valores mínimo e máximo de desgaste, assim, por razões de segurança, o componente será substituído antes que atinja seu valor máximo de desgaste admissível.

Para a verificação do desgaste de uma peça, é necessário medi-la e comparar o valor medido com as tolerâncias para o desgaste. Assim, no caso de um mancal, deve-se medir o eixo e sua sede, para verificar o desgaste de ambos, embora se espere que o eixo se desgaste mais rapidamente que a sede. Neste exemplo, as tolerâncias para o desgaste dos elementos são estreitas, pois deve-se evitar que a folga do mancal esteja dentro dos limites de desgaste, mas que o eixo esteja além do desgaste admissível.

Como a previsão da vida útil de algumas peças é de muitos meses de operação, alguns valores de limites de desgaste não são publicados na entrada em operação de uma

nova aeronave. Os fatores de influência sobre o desgaste de um elemento e suas consequências, em que pese principalmente o emprego do FMEA, são muitos e a precisão dos limites de desgaste só pode ser alcançada com o acúmulo de horas de operação.

O operador também pode estabelecer ou alterar limites de desgaste, em virtude do que foi dito acima. Mas esta será sempre uma operação arriscada e envolta em incertezas. Basta utilizar um componente de marca diferente para que um limite mais amplo favoreça a ocorrência de um acidente. AL GARNI et al., [44], experimentaram problemas na determinação dos limites de desgaste dos conjuntos dos freios da aeronave FOKKER F-27, onde as condições operacionais do avião aceleravam a deterioração daqueles componentes, tornando difícil até mesmo a adoção dos limites recomendados pelo fabricante da aeronave.

Segundo HEMKE, [4], ao operador é mais importante o valor da taxa de desgaste que o valor do limite de desgaste, isto porque o operador é capaz de controlar as variáveis de influência no desgaste. Além disso, um desgaste que ocorra mais aceleradamente pode prejudicar outros sistemas com os quais esteja envolvido. Por exemplo, pneus que se desgastam rapidamente sobrecarregam os sistemas de freios, os quais sobrecarregam a estrutura do trem de pouso e suas fixações e assim por diante. Os operadores podem ter surpresas ao verificar que a redução em um limite de desgaste pode, ao invés de aumentar os custos da manutenção, resultar na redução global desta despesa, ainda que em relação ao item cujo limite foi reduzido, o custo seja invariavelmente maior.

A verificação dos limites de desgaste é executada por meio de inspeções e revisões, sendo que os fabricantes dos componentes sujeitos a este controle introduzem nestes características que permitem a rápida determinação do desgaste, como marcas de desgaste, pinos e janelas indicadoras e até mesmo alarmes nas aeronaves mais modernas, como é o caso dos conjuntos de freios dos jatos da família BOEING, como o modelo 737-300, [40].

Pelo que foi apresentado, é possível perceber a relevância do conhecimento dos limites para a elaboração de um planejamento da manutenção que aliie segurança com eficácia operacional.

5.3.3) Métodos de Manutenção Aeronáutica

As ações de manutenção na atividade aeronáutica são similares às ações adotadas nos outros tipos de atividade, até porque, desde a manutenção preventiva, todas foram, em maior ou menor grau, inspiradas na manutenção aeronáutica. Entretanto, a nomenclatura e

as especificidades da atividade aeronáutica - sobretudo seus requisitos técnicos e legais - justificam as diferenças. As ações de manutenção são baseadas nos limites das aeronaves, mas seria impraticável publicar um manual de manutenção expondo os limites dos componentes da aeronave e exigir seu cumprimento. Assim, os limites foram agrupados de forma a sistematizar as ações de manutenção.

Neste ponto, torna-se interessante fornecer a nomenclatura para os tempos a serem controlados pela manutenção aeronáutica :

- TSN ("*time since new*") : é o tempo em que o componente operou desde "novo";

- TSI ("*time since installed*") : é o tempo que um componente reparável operou, contado a partir de sua última instalação na aeronave;

- TBO ("*time between overhaul*") : o mais utilizado, é quase sinônimo de manutenção preventiva, caracterizando os intervalos entre revisões em itens reparáveis;

- TBUR ("*time before unscheduled removal*") : é o tempo em que o componente operou, desde sua instalação ou última revisão, até a pane;

- TSO ("*time since overhaul*") : tempo de operação desde a última revisão.

O controle da manutenção utilizando este conjunto de tempos é conveniente na medida em que a muitos dos itens das aeronaves são controlados por horas de voo, ou por ciclos (como definido na seção 5.2 deste trabalho). Assim, pode-se ter, por exemplo, TSI medido em horas ou em ciclos, dependendo do item. Alguns destes tempos - TBO, TBUR e TSN - são necessários para a construção de um histórico do componente ou da aeronave, servindo para determinar novos limites de serviço, por exemplo. Também prestam-se ao planejamento da manutenção e à tomada de decisões em cada um dos tipos de manutenção a serem estudados, sendo usualmente empregados na prática da manutenção aeronáutica. Além disso, as aeronaves - de qualquer tipo ou tamanho em uso civil - têm diversos de seus componentes controlados por meio de cadernetas, principalmente motores e hélices (quando houver), como afirma VIEIRA em [38].

Em termos de práticas de manutenção de aeronaves, em primeiro lugar, tem-se a manutenção corretiva. Como visto em seção anterior neste trabalho, este tipo de manutenção se dá após a falha e consiste em substituir ou reparar os itens avariados. A falha,

no meio aeronáutico é denominada de pane, terminologia a ser utilizada daqui em diante. A manutenção, segundo VIEIRA, [20], é uma rotina metodológica, consistindo em :

- identificar a pane;

- isolar a pane, verificando quais componentes ou sistemas podem ter sido afetados;

- correção da pane;

- testes e retorno à operação.

Nas modernas aeronaves, principalmente as construídas após a década de 60, a pane pode ser tolerada para alguns sistemas que permitam a duplicação ou a redundância. Até mesmo em sistemas vitais, como navegação e sistema hidráulico, a manutenção corretiva pode ser admitida sem problemas pois, além da redundância e/ou duplicação dos sistemas, seus componentes muitas vezes estão sujeitos a modos de falha que não dão indicações de que irão ocorrer, ou seja, são aleatórios. Assim, a pane não pode ser evitada, apenas suas consequências podem ser abrandadas. Com a crescente utilização da eletrônica e da informática nos aviões, a manutenção corretiva justifica seu emprego, pois estes componentes são típicos do modo de falha abrupto. Evidentemente, panes inesperadas podem ocorrer em outros sistemas, como os motores, em virtude de acidentes, erros operacionais ou simplesmente por conta de fatores não previstos no projeto da aeronave.

O problema com a manutenção corretiva na atividade aeronáutica não está só nas consequências das panes mas também na sua correção. Se o problema ocorrer em um sistema mecânico, a identificação pode ser rápida, mas o tempo dedicado a um reparo pode ser de grande monta, até porque a falha pode se propagar por outros sistemas, tal como citado no item 1.2 deste trabalho. Se o problema for no sistema elétrico ou em componentes eletrônicos, o reparo é simples - em geral a troca de módulos - mas a diagnose em um sistema complexo como uma aeronave pode ser demorada. Por isso, a aeronáutica é uma grande beneficiária do uso do "troubleshooting", onde uma falha pode ser rapidamente identificada, isolada e corrigida. As aeronaves são fornecidas pelos fabricantes com um manual denominado Manual de Isolação de Panes, a ser utilizado pelos pilotos - em vôo , permitindo a estes identificar alguns tipos de falha. Os mecânicos e engenheiros fazem uso dos manuais de manutenção e um dos exemplos pode ser visto na Figura 5.3, onde se vê um procedimento de isolamento e correção de uma pane para a aeronave EMB-121 XINGU, fabricada pela EMBRAER, extraído do manual de manutenção para esta aeronave [45].

Neste exemplo, a pane se dá em um sistema mecânico, especificamente no sistema de acionamento dos profundores.

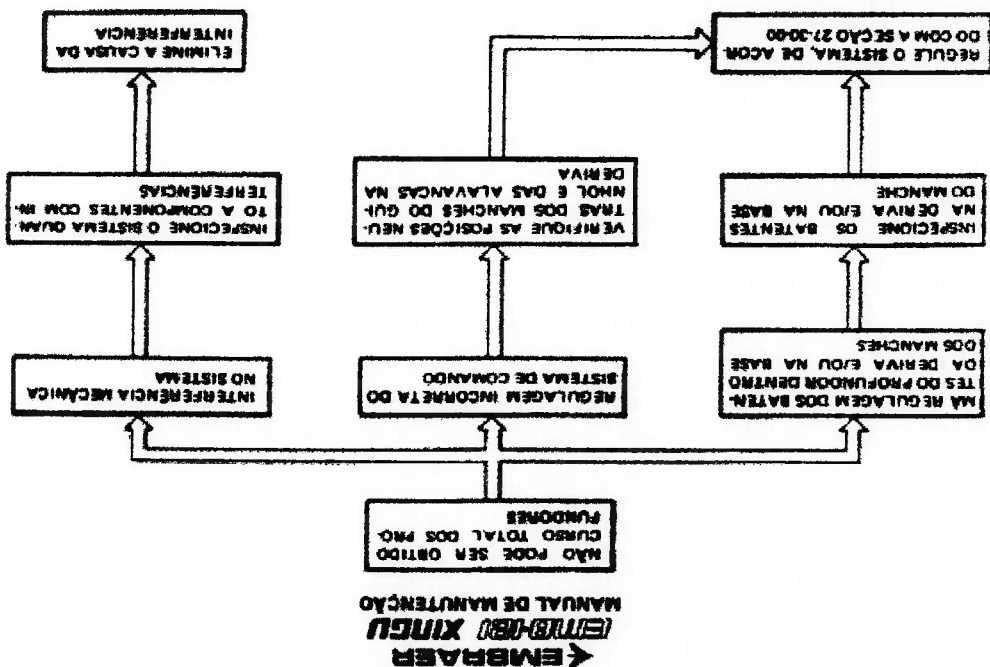


Figura 5.3 - Exemplo de Debelação de Pane para o EMB-121 XINGU, [45]

A manutenção preventiva também é prevista na atividade aeronáutica, mas sua execução pode se dar segundo os conceitos de tempos-limite "hard-time" - onde os componentes devem ser substituídos ao fim de um prazo denominado tempo-limite, revisões periódicas e "overhaul", este último referindo-se a revisões em itens reparáveis sujeitos à manutenção preventiva, sobretudo, os motores. O termo manutenção preventiva em aeronáutica está envolto em controvérsias, já que este público considera que, excetuando-se o tipo corretivo, qualquer outro tipo será preventivo. Por isso, esta terminologia raramente é utilizada em aviação.

Em geral, a manutenção preventiva está vinculada à execução de outras atividades, como a manutenção calendária e progressiva (a serem vistas adiante). Assim, as revisões são programadas para coincidir com os tempos-limite ou com os TBO dos componentes associados. E, obviamente, esta sincronia da manutenção preventiva se presta muito bem às revisões periódicas. Há de se ressaltar que os tipos de manutenção não são executados isoladamente, mas relacionados com pacotes de revisão por medida de padronização e economia.

A manutenção preventiva em aeronáutica envolve desde limpeza e exames visuais diários até tarefas mais complexas, como as compiladas revisões em motores e sistemas hidráulicos.

Outro tipo de manutenção a ser enfatizado é a manutenção calendarária ou cronológica, relacionada à exigências governamentais ou a equipamentos cuja vida útil dependa mais do tempo que qualquer outra variável, como sistema de extinção de incêndio, iluminação, acessórios e baterias. A prática de manutenção calendarária mais difundida na aviação é a IAM ou Inspeção Annual de Manutenção, onde, a cada ano, uma lista de itens especificados - os quais incluem os registros de manutenção da aeronave como cadernetas de motores e hélices - é verificada pela autoridade reguladora por meio de revisões, testes, inspeções e substituições quando necessário. No caso da IAM, os itens inspecionados não são necessariamente aqueles que falham com o tempo, mas os que, apresentando qualquer modo de falha, estejam relacionados às condições básicas de aeronavegabilidade do equipamento, ou seja, o mínimo necessário para uma operação com desempenho previsto em projeto e segura. A palavra mínimo não significa que são poucos itens, ao contrário, quase toda a aeronave é inspecionada. No caso da aviação comercial, onde as aeronaves podem voar até 3000 horas por ano, há revisões frequentes e a IAM pode até coincidir com alguma destas revisões.

controlados por FC.

O nome progressiva se explica pelo fato de que a cada novo "check" o número de tarefas executadas e sua complexidade aumenta. Em geral, as revisões progressivas são designadas por letras (A, B, C, D e E, mais frequentemente) as quais expressam a complexidade crescente das revisões. Assim, uma revisão ("check") A é mais simples que uma revisão B. E uma revisão B engloba os itens da revisão A, as revisões C englobam as revisões B e assim por diante. Numa revisão de 1000 horas, um BOEING 737 pode passar 10 dias no hangar. Após as 10000 horas de operação, a maioria das aeronaves comerciais

preve uma ampla revisão onde tudo é desmontado (à exceção da estrutura das asas e fuselagem) e revisado, testado ou reparado.

Durante as revisões progressivas, também são realizados os testes e ajustes necessários ao bom funcionamento dos sistemas eletrônicos das aeronaves, envolvidos em incertezas devidas ao modo de falhar de seus componentes e sempre relacionados a operações vitais ao voo.

Os aviões não podem permanecer em solo aguardando o reparo de um componente que tenha sofrido uma pane, como por exemplo, um componente do piloto automático ou até um motor. Assim, o operador deve possuir sobressalentes para pronta substituição. Porém o avião, até por razões econômicas, possui muitos componentes reparáveis. Logo, não se pode descartá-los a cada pane, pois são caríssimos (um GPS do modelo mais simples para uso em aviação comercial custa a partir dos US\$20 mil, [46], e é dos mais baratos!). Assim, são reparados pelas oficinas do operador ou do fabricante e mantidos como sobressalentes. Esta prática corresponde à manutenção por rotação de peças, erroneamente chamada de canibalismo pelos leigos.

Neste tipo de manutenção, os tempos TSI, TSN, TBUR, TSO e TBO mostram sua importância. A rotação dos componentes não precisa ocorrer após a pane e o reparo de um componente. Se uma aeronave entra em revisão e permanecerá 10 dias no hangar, pode ser que seus motores não estejam próximos do TBO, apesar dos esforços dos programadores de manutenção em fazer coincidir estes tempos com as revisões. Assim, poderá ser utilizado em outra aeronave em pane, que utilize o mesmo tipo de componente (por exemplo, os McDONNELL DOUGLAS MD-11 e BOEING 767-300 da VARIIG utilizam o mesmo tipo de motor). Porém, se o motor estiver muito próximo de seu TBO, pode não ser vantajoso fazer a rotação com este motor da aeronave em revisão, o mesmo se aplicando a qualquer componente reparável. Também não é vantajoso, por exemplo, utilizar componentes cujo TSI esteja próximo ao de sua vida útil, pois logo teria de ser removido. A análise neste tipo de manutenção deve ser cuidadosa, mas sua utilização é de fundamental importância para a rentabilidade da operação das empresas aéreas ou para a prontidão das frotas militares.

A intercambiabilidade é indispensável para que se possa aplicar este tipo de manutenção, pois a padronização - sempre presente em aviação - permite rapidez e a execução de ações de manutenção corretas e seguras.

O próximo tipo de manutenção é a denominada sob condição ("on condition"). Este tipo de manutenção é uma forma de assegurar o cumprimento dos limites de serviço e de desgaste, como afirma VIEIRA, [20]. Caberia a discussão sobre a aplicabilidade da manutenção "on condition" em itens sujeitos aos limites de reparo, possibilidade não mencionada pelas fontes consultadas. Consiste em inspecionar, a intervalos pré-definidos, componentes que possuem limites de serviço ou de desgaste, mas que não os atingiam coincidentemente com as revisões. Mais recentemente, com o advento da eletrônica embarcada, este tipo de manutenção passou a servir também aos componentes que não se enquadram em nenhuma categoria de limites apresentadas nesta seção, como foi possível apurar em conversas mantidas com o fabricante da aeronave EMB-120.

No caso dos limites de desgaste, o componente é substituído caso atinja este limite, embora, como dito anteriormente, a substituição possa estar prevista em função do número de horas, o que é mais conveniente. No caso dos limites de serviço, o componente pode exigir a inspeção, mas pode não estar requerendo, em função de seu estado, qualquer ação de manutenção. HEMKE, [4], enfatiza que, em geral, este tipo de manutenção se presta a itens que não contribuem para a segurança de voo. Entretanto, atualmente é cada vez mais difícil encontrar tais itens a bordo. Ainda que se considere que a obra de HEMKE data de 1958, sua afirmação acerca da manutenção "on condition" pode ser refutada analisando-se as diretrizes de manutenção das modernas aeronaves e o exemplo ilustrativo de um sistema de transferência do piloto automático a ser exposto adiante neste trabalho. Este componente, vital para a segura operação da aeronave, é tipicamente um item sujeito à manutenção "on condition".

Mais recentemente (a partir da década de 70), a manutenção preditiva passou a ser empregada nas aeronaves. Atualmente, aeronaves como o ERJ-145 (fato produzido pela EMBRAER) e todos os grandes jatos comerciais contam com a possibilidade de possuírem um registrador de dados, programado para registrar os sinais vitais dos componentes da aeronave, principalmente dos motores, sistema hidráulico, sistema elétrico, pressurização e ar condicionado. Estes sinais podem ser lidos ao fim de cada voo, embora o comum seja sua decodificação a cada vez que a aeronave esteja em sua base operacional, e a interpretação das medidas pode gerar decisões sobre a programação de intervenções corretivas, ou a manutenção da aeronave em operação até que os dados registrados atinjam níveis de alerta.

De modo algum, a manutenção preditiva corresponde à manutenção sob condição, pois nesta última, as verificações são executadas em instantes específicos e na manutenção preditiva, há o monitoramento durante a operação normal do componente.

Estas são as linhas gerais sobre as práticas de manutenção aeronáutica. No âmbito das oficinas, o detalhamento é maior, com as tarefas a serem realizadas em cada tipo de manutenção - inclusive corretiva - sendo minuciosamente exibidas nos manuais. Além disso, os componentes fabricados por outros fornecedores que não o fabricante do avião têm seus próprios manuais, os quais muitas vezes, nem são encontrados nas oficinas dos operadores. Em geral, as ordens de serviço para as revisões e inspeções são emitidas automaticamente por sistemas informatizados de gerenciamento, baseados no documento emitido pelos fabricantes das aeronaves denominado de MPG (do inglês "*maintenance planning guide*") ou guia de planejamento de manutenção o qual, até o nível de sub-sistema da aeronave, indica o tipo e a periodicidade de manutenção.

Há autores como VTEIRA, [47], que optam por dividir a manutenção aeronáutica em programada e não programada, subdividindo-as em tarefas preventivas, corretivas, calendarísticas, condicionais e assim por diante. A definição de cada um dos tipos, entretanto, é a mesma que a apresentada neste trabalho. A abordagem apresentada aqui foi escolhida em função da similaridade com a abordagem adotada pela indústria em geral.

CAPÍTULO 6

ELABORAÇÃO DE PROCEDIMENTOS DE MANUTENÇÃO PARA COMPONENTES DA AERONAVE EMB-120 BRASÍLIA

6.1) Considerações Iniciais

As seções anteriores deste trabalho foram dedicadas a apresentar métodos e ferramentas de análise de confiabilidade a serem empregadas em qualquer fase do ciclo de vida de um sistema, desde sua concepção, projeto, passando pela manufatura até sua operação.

Neste capítulo, o interesse consiste em dirigir os conhecimentos já explorados para a aplicação em manutenção visando confiabilidade, pesquisando sobre seu emprego na atividade de manutenção aeronáutica. O objetivo do capítulo é sugerir diretrizes para a elaboração do plano de manutenção a partir dos requisitos inerentes à atividade aeronáutica tendo em vista as diferentes condições operacionais de dois sistemas distintos, sendo um sistema mecânico e um sistema elétrico.

O plano de manutenção é elaborado para dois componentes da aeronave EMB-120 Brasília, fabricado pela Empresa Brasileira de Aeronáutica (EMBRAER), os quais são o trem de pouso principal e a "TRANSFER-BOX" do sistema de piloto automático. Para verificar a validade da proposta desenvolvida neste trabalho, é feita a comparação desta com as diretrizes de manutenção do fabricante.

6.2) Apresentação da Aeronave

Tendo realizado seu primeiro voo em julho de 1983, o EMB-120 - BRASÍLIA - apresentada na Figura 6.1, já teve mais de 300 unidades comercializadas ao redor de todo o planeta. Trata-se de um turbo-hélice de concepção avançada no que se refere aos seus sistemas de navegação, gerenciamento de sistemas, soluções aerodinâmicas e elementos estruturais, como afirma SILVA, [35], mesmo que já tenham se passado mais de 15 anos de seu lançamento. Sua capacidade é de 30 passageiros, sendo que - para emprego civil - está disponível a versão cargueira. O peso máximo de decolagem é de 13000 N e seu alcance máximo está ao redor de 2500 km, embora com 30 passageiros e carga, com peso máximo de decolagem, este valor não possa ser alcançado. Em virtude de estar em fabricação até os dias atuais, com pedidos em carteira, além de ser um produto concebido rigorosamente

dentro das normas aeronáuticas de projeto, operação e homologação, tendo dado origem a um família de aeronaves sofisticadas como os jatos ERL-145 e ERL-135, esta aeronave foi escolhida para ser estudada neste trabalho. Além disso, como já está estabelecida no mercado, o acesso à sua documentação é facilitado, possibilitando analisar diversos aspectos relacionados à sua manutenção.



Figura 6.1 - Aeronave EMB-120 BRASILIA

Visando a aplicação de conceitos de confiabilidade para definição de procedimentos de manutenção e/ou sistemas desta aeronave, optou-se pelo estudo de dois sistemas diferentes, sendo um mecânico, no caso o trem de pouso principal, e outro elétrico, a “*TRANSFER BOX*” do sistema de piloto automático. Após o desenvolvimento da proposta de procedimento de manutenção para estes sistemas, compara-se os resultados destas propostas com as publicações técnicas do fabricante, com a finalidade de verificar a validade dos mesmos, buscando obter subsídios para reafirmar a utilidade dos conceitos de confiabilidade na definição de procedimentos de manutenção de sistemas.

6.3) Elaboração do Procedimento de Manutenção do Trem de Pouso Principal do EMB-120

Por exigência dos regulamentos, a concepção e operação de qualquer componente aeronáutico segue uma metodologia, a qual leva em consideração a finalidade do item e da aeronave da qual fará parte, as solicitações, a previsão de vida útil e os procedimentos de operação e manutenção, como afirmam HEMKE [4], LOMAX, [33] e KERMODE [39].

Assim o é com o trem de pouso e seus componentes. Inicialmente é interessante verificar nas referências [33] e [33] os tipos de trem de pouso pois, conforme sua configuração, os esforços podem atuar de maneira diferente.

O EMB-120 é uma aeronave classificada como triciclo, ou seja, as rodas direcionais estão localizadas no nariz (frente) do avião, denominando-se trem do nariz ou "*nose landing gear*". O conjunto instalado na parte de trás, no caso do BRASÍLIA nas nacelles (coberturas) do motor (as quais estão por sua vez fixas nas asas), é denominado de trem de pouso principal ou "*main landing gear*" e na configuração de triciclo estão presentes dois conjuntos, um de cada lado da aeronave. A denominação em inglês deve ser apresentada em virtude deste idioma ser o adotado nas operações e nas publicações das aeronaves em nível mundial. A estrutura onde são fixas as rodas, suspensão e freios, além de faróis é chamada de perna do trem de pouso.

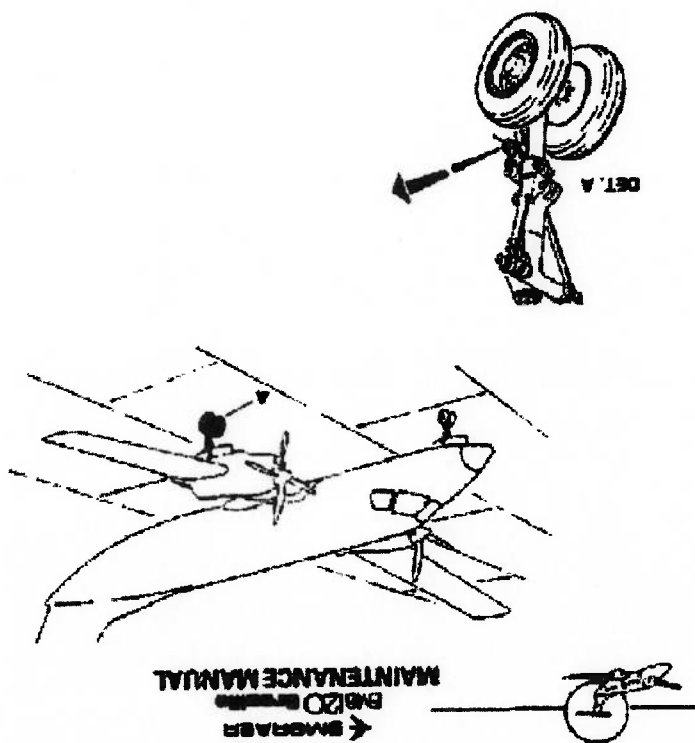
A configuração triciclo é preferida pelos projetistas de todos os aviões comerciais produzidos a partir da década de 50, pois facilita a manutenção dos sistemas (muitos deles localizados no nariz do avião) e o recolhimento de todas as unidades do trem de pouso durante o voo proporcionando maior eficiência aerodinâmica e consequente economia e maior velocidade, além de ser mais fácil de ser operada durante os pousos e decolagens pela melhoria nas condições de visibilidade que esta configuração proporciona.

Este trabalho estará enfocando a estrutura das pernas do trem de pouso principal, ilustrada na Figura 6.2, [48], pois os esforços sobre o mesmo apresentam magnitude superior aos atuantes no trem de pouso do nariz, [33].

As pernas do trem de pouso principal da aeronave EMB-120 são sistemas constituídos por diversos tipos de componentes, cujas funções são detalhadas a seguir. A Figura 6.3, extraída de [48], apresenta o aspecto e a disposição dos principais componentes sujeitos a esforços mecânicos presentes no trem de pouso.

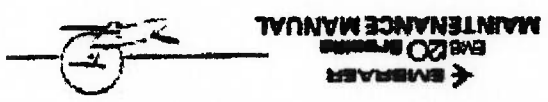
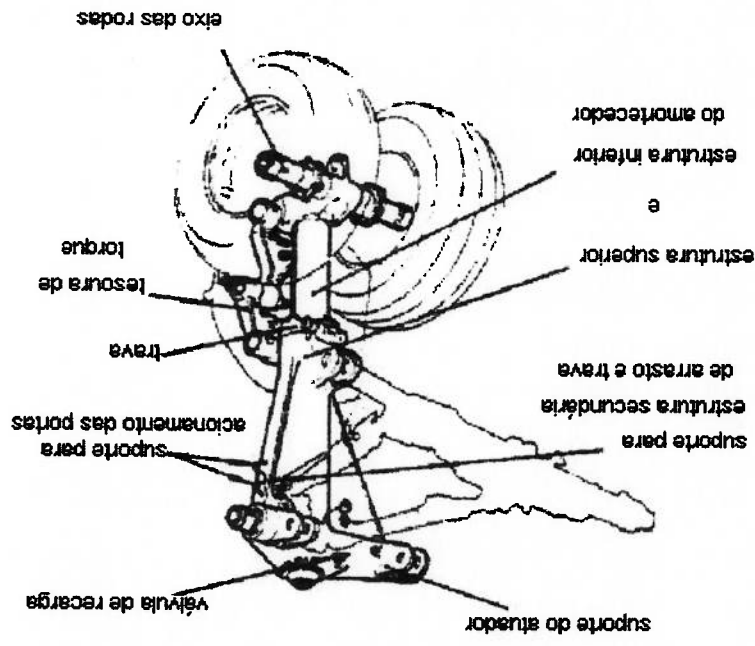
6.3.1) Caracterização dos Componentes do Trem de Pouso Principal do EMB-120

Figura 6.2 - Localização e Aspecto da Perna do Trem de Pouso Principal do EMB-120, [48]



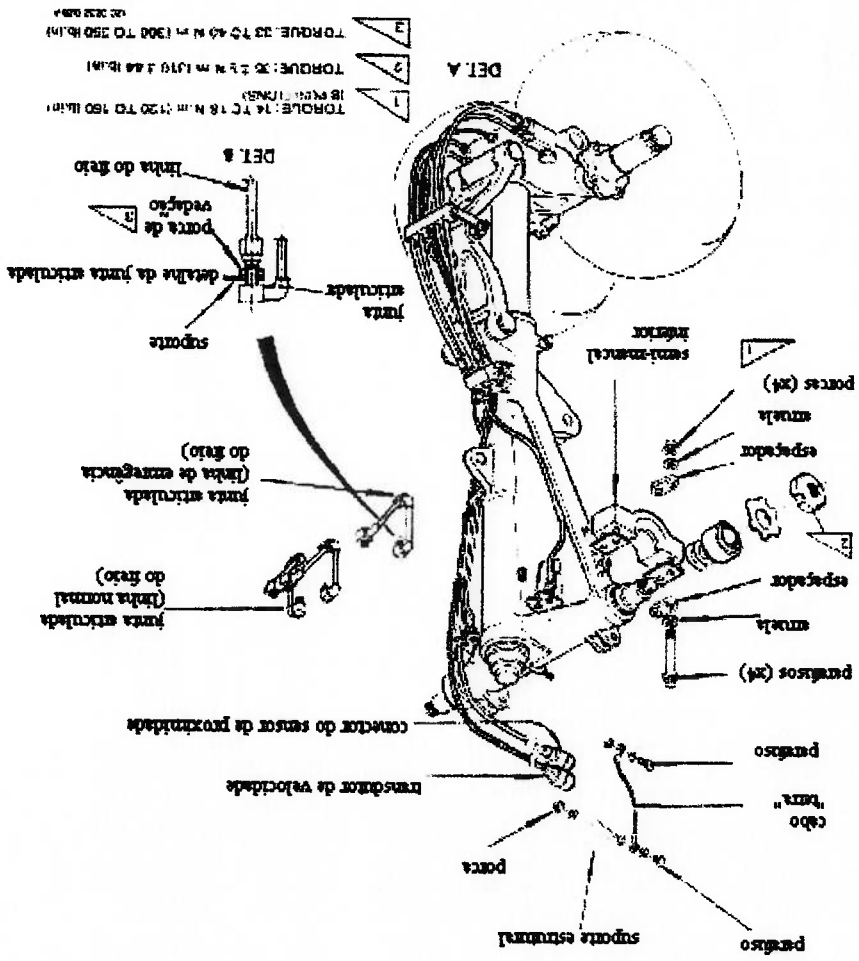
As pernas principais do trem de pouso do EMB-120 são intercambiáveis, ou seja, podem ser utilizadas do lado direito ou do lado esquerdo da aeronave. O conjunto destas pernas é constituído por uma estrutura denominada "oleo structure", ou estrutura do amortecedor, dividida em duas partes : a inferior, que faz as vezes de pistão do amortecedor e se liga às rodas e seus componentes e a parte superior, que abriga o pistão do amortecedor, além de ser a parte do trem de pouso ligada à estrutura das nacelles, permitindo a fixação e articulação do conjunto, o qual recolhe para a frente, de modo a abrigar-se na nacelle dos motores. Pode-se ter uma ideia do recolhimento das pernas principais observando a Figura 6.2, [48]. Cabe à esta estrutura a conexão ao mecanismo de retração/extensão, o que se faz em diversos pontos, podendo este ser visualizado também na Figura 6.3, [48]. Ainda nesta estrutura, estão os componentes necessários à sua fixação e articulação na nacelle dos motores, como pode ser visto na Figura 6.4, [48].

Figura 6.3 - Aspecto e Disposição dos Componentes do Trem Principal do EMB-120, [48]



O amortecedor da perna principal merece um análise mais detalhada, em virtude de sua importância para a segurança da aeronave, sobretudo no pouso, como diz o manual de manutenção da mesma [48]. Também merece destaque o fato de que o amortecedor é constituído por partes de duas partes da estrutura : o amortecedor - parte inferior - e a câmara - parte superior. Este componente é responsável pela absorção da maior parte das cargas de choque , como citado em [33] e [48], e pela função de suspensão da aeronave, buscando não transmitir as oscilações à estrutura da aeronave, tornando-a mais segura e confortável. O amortecedor possui um orifício para o reabastecimento por óleo (especificação MIL-H-5606, [48]) e pressurização por meio de nitrogênio (especificação BB-N-411, [48]), já que é do tipo hidráulico-pneumático, o que permite seu funcionamento como amortecedor e mola ao mesmo tempo. As restrições à passagem do óleo entre as

Figura 6.4 - Componentes de Fixação e Acessórios da Perna do Trem de Pouso Principal, [48]



câmaras quando o amortecedor é sollicitado são feitas por meio de orifícios de restrição e diafragma. O esquema de sua montagem interior, bem como o funcionamento na extensão/retração do conjunto é mostrado esquematicamente na Figura 6.5, [48].

Na extensão, o fluido passa pelos orifícios de restrição (b), empurrando a mola existente na câmara inferior. Já durante a compressão, o fluido passa pelos orifícios de restrição (a), empurrando a mola existente na câmara superior.

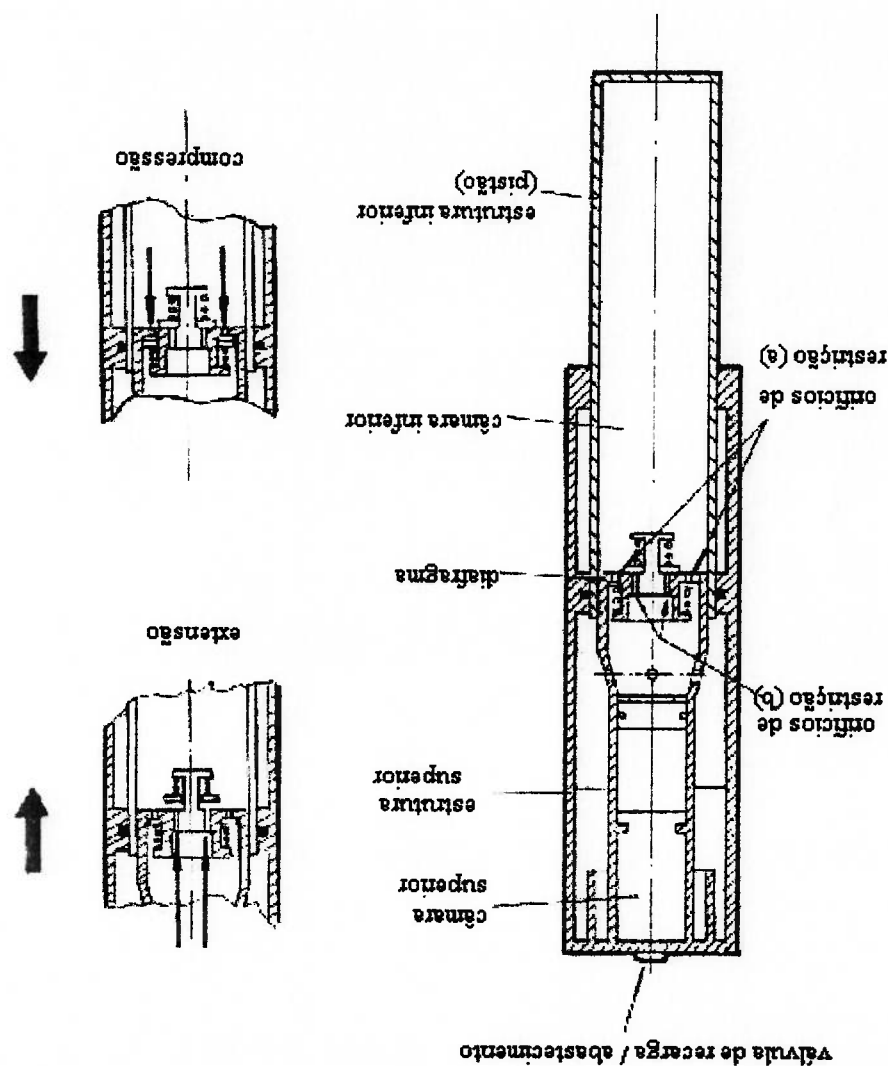


Figura 6.5 - Amortecedor do Trem Principal EMB-120, [48]

Além da "oleo structure", a perna principal é constituída pela denominada estrutura de arrasto, ou acionamento para recolhimento. Esta estrutura, embora não esteja sendo analisada neste trabalho em virtude de estar sujeita a esforços de menor magnitude quando

comparada à estrutura principal, também possui suas subdivisões e é constituída de dispositivos de acionamento hidráulico e elementos estruturais para proverem a movimentação necessária ao recolhimento ou extensão das pernas do trem principal. Mais do que prover esta movimentação, a função desta estrutura de arrasto é travar o conjunto nas posições recolhida ("gear up") ou estendida ("gear down"), condição essencial para a segurança em voo e nas manobras de solo, sobretudo decolagens e pousos. A propósito do acionamento do trem de pouso, é conveniente esclarecer que o mesmo é constituído por um sistema principal, onde um relé conectado à alavanca da cabine de pilotos, como na Figura 6.6, [49], envia sinais ao circuito hidráulico, que aciona os três conjuntos do trem de pouso (dois principais e o trem do nariz). Este é o sistema principal, prioritário e que deve atuar salvo estando em pane.

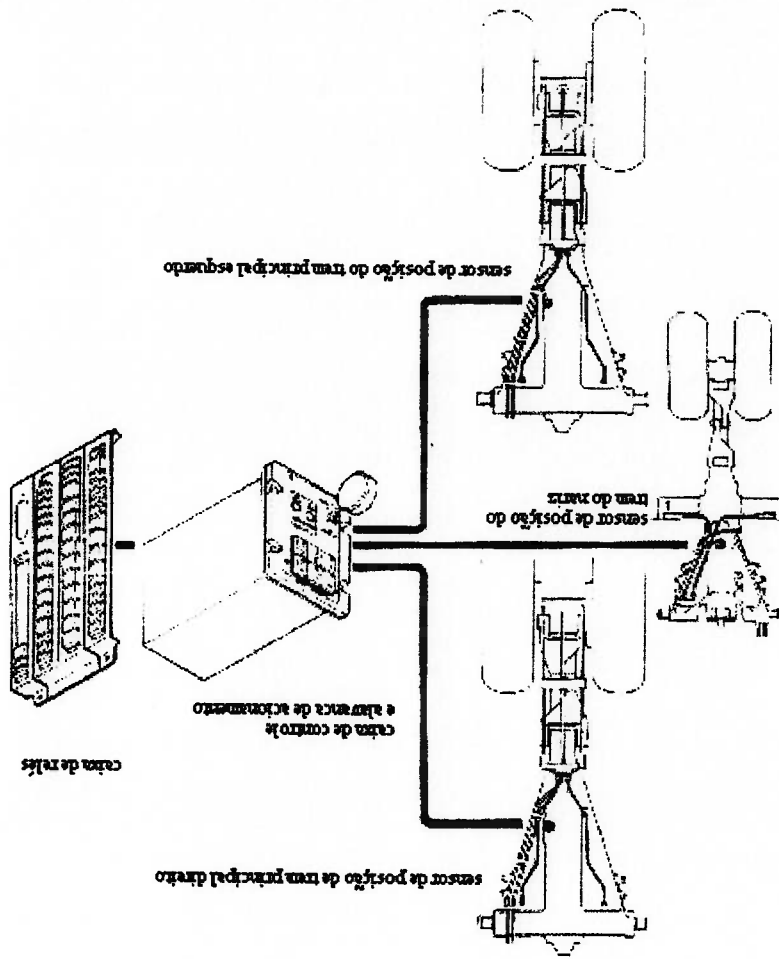


Figura 6.6 - Circuito Principal de Acionamento do Trem de Pouso, [49]

Há um sistema de emergência, secundário, denominado de "*free fall circuit*", ou por gravidade, que deve ser utilizado no caso de pane do primeiro, retratado na Figura 6.7, extraída de [48]. Apesar deste nome, há a necessidade do uso de uma alavanca a ser encaixada em local específico na cabine de pilotagem. Após liberar a pressurização do sistema de recolhimento/extensão por meio de comutadores no painel da alavanca do trem (indicado na Figura 6.6), a alavanca deve ser encaixada em seu receptor para recolher os ganchos, cuja função é travar o trem de pouso (principal e do nariz) nas posições recolhido e estendido, liberando as travas e em seguida, sendo girada, abaixa as pernas do trem de pouso e as trava mecanicamente - novamente com os ganchos - nesta posição.

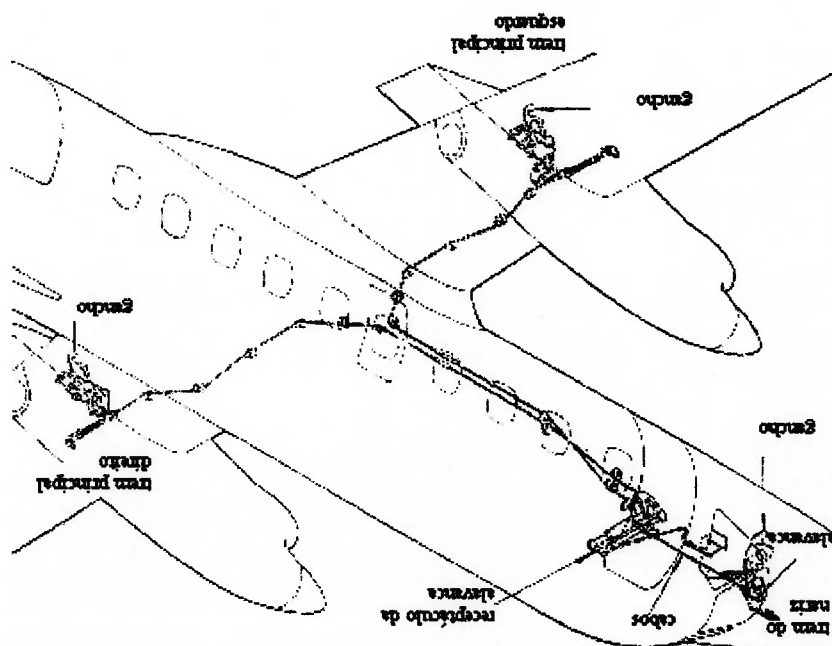
Durante a operação normal da aeronave, os ganchos atuam auxiliando no travamento do trem de pouso nas posições recolhido e estendido. Porém, sua atuação é apenas um reforço ao circuito normal de operação do travamento/extensão do trem de pouso, pois estas operações são realizadas hidráulicamente. Ainda durante a operação normal, os ganchos são travados e destravados por ação hidráulica, o que seria impossível no caso de pane deste sistema de acionamento.

O problema com este sistema é que cada perna deve ser abaixada separadamente, à custa de esforço manual, resultando em três operações para todas as pernas do trem de pouso da aeronave em questão. E esta operação também consome tempo, sendo problemática em emergências como a perda dos motores (que fornecem a energia necessária a todos os sistemas da aeronave), pois esta é uma situação onde o pouso deve se dar rapidamente e pode não haver tempo hábil para o acionamento de todas as pernas. Esta, no entanto, é uma situação extremamente crítica, sendo que os tripulantes da aeronave estudada consultados pelo autor deste trabalho relataram nunca terem vivenciado esta experiência.

Por fim, tem-se o componente denominado de tesoura de torque ("torque link"), que mantém alinhadas e sempre dirigidas à frente as rodas do trem principal. Além disso, ela liga a parte inferior à parte superior do amortecedor, não fazendo, entretanto, parte de nenhuma delas. A Figura 6.8, extraída de [48], apresenta em detalhes a articulação central deste componente e a Figura 6.3 traz a localização do mesmo no trem de pouso. As articulações nas partes inferior e superior do trem de pouso são similares à apresentada na Figura 6.8.

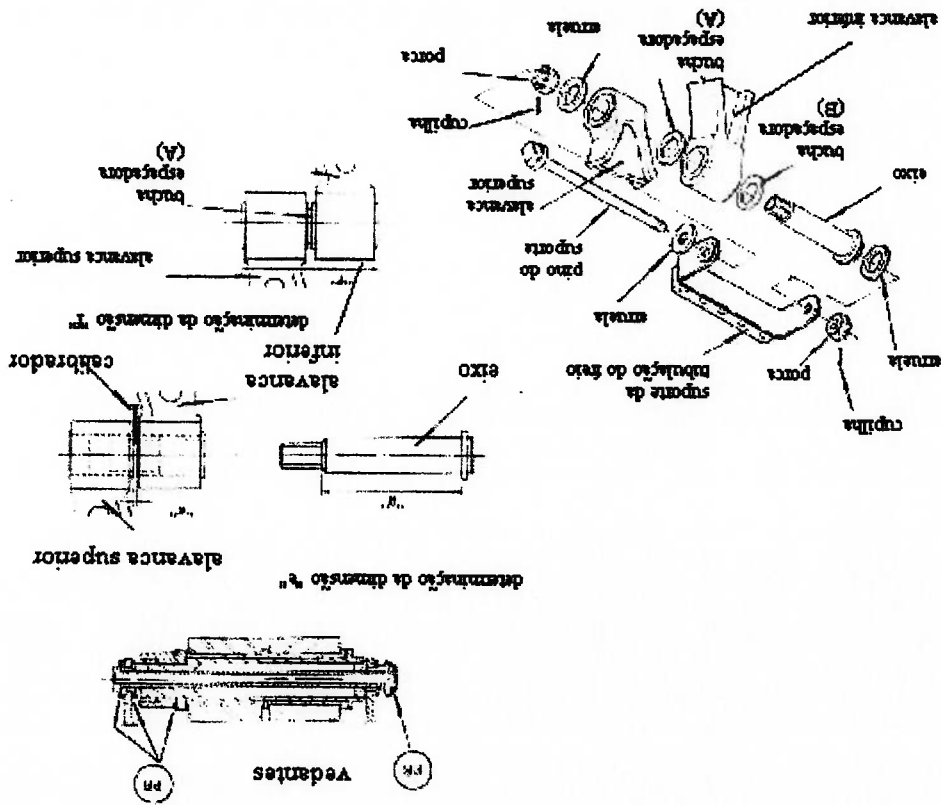
Prosseguindo o detalhamento dos componentes da perna do trem de pouso principal, tem-se as rodas, compostas pelos pneus, aros, conjunto de freios e cubos de roda, havendo, para cada perna do trem principal, dois destes conjuntos. As Figuras 6.3 e 6.4 retratam sem riqueza de detalhes o conjunto das rodas do trem principal. As rodas estão montadas na parte inferior da estrutura principal ("oleo structure").

Figura 6.7 - Mecanismo de Atuação por Gravidade, [48]



Com relação aos materiais com os quais são confeccionados estes componentes detalhados neste item, à exceção dos pneus e de algumas buchas de bronze, todos são fabricados com ligas de aço (sendo que os manuais consultados não especificam estas ligas), sofrendo diversos tipos de processos de fabricação conforme a geometria requerida. Em geral, são feitos a partir de aço laminado e usados para garantir acabamento superficial controlado, com vistas principalmente, à prevenção da corrosão e da nucleação de trincas. Todas as peças, após serem manufaturadas são inspecionadas, conforme as possibilidades, por raios-x, ultra-som, líquido penetrante e medidas eletronicamente, [48]. Isto visa reduzir as incertezas associadas ao processo de fabricação - principalmente no acabamento superficial e introdução de defeitos tipo trincas - que podem influir na resistência à fadiga dos componentes metálicos, como afirma NIEMANN, [50]. Além disso, são desmagnetizadas para não interferirem com instrumentos de navegação, sobretudo bússola e equipamentos de radio-navegação, como afirma VIEIRA, [36]. Após estes procedimentos, as peças recebem uma identificação ("part number" ou p/n), que a identificará como peça

Figura 6.8 - Tesoura de Torque do Trem Principal, Articulação Central, [48]



aeronáutica e servirá para controle durante toda sua vida útil, permitindo a determinação dos períodos referidos no item 5.3.3 deste trabalho.

Com a finalidade de analisar o sistema constituído pela perna principal do trem de pouso, sem considerar o acionamento por motivos já descritos anteriormente, o primeiro passo é caracterizar o conjunto da estrutura da perna do trem de pouso como um sistema, determinando a relação entre seus componentes. Propõe-se que seja construído o diagrama de blocos para este sistema, o qual não é complexo para esta finalidade. Porém, há um detalhe que diferencia a estrutura do trem de pouso, dificultando sua representação em diagrama de blocos : a tesoura de torque. Este componente não faz parte da estrutura principal ("*oleo structure*") nem da interior, apesar de interagir com as duas porções da mesma, ligando-as fisicamente e transmitindo esforços, mantendo as rodas sempre alinhadas à frente. Uma alternativa para a obtenção de um diagrama de blocos aproximado para a estrutura da perna do trem principal pode consistir em considerar a tesoura de torque como um outro sistema, interligado à estrutura principal. Esta tentativa pode dificultar o cálculo do valor da função confiabilidade do sistema por meio de expressões como as apresentadas nas equações 3.12 ou 3.17, mas possibilita a análise dos efeitos que os esforços no trem de pouso causarão nos componentes. Assim, a Figura 6.9 ilustra o diagrama proposto.

Inicialmente, deve-se destacar que os procedimentos referentes ao estabelecimento das cargas atuantes na perna do trem de pouso principal do EMB-120 são previstos nas normas FAR 25.473 e FAR 25.479-485, conforme indicado em THURSTON, [32] e

EMB-120

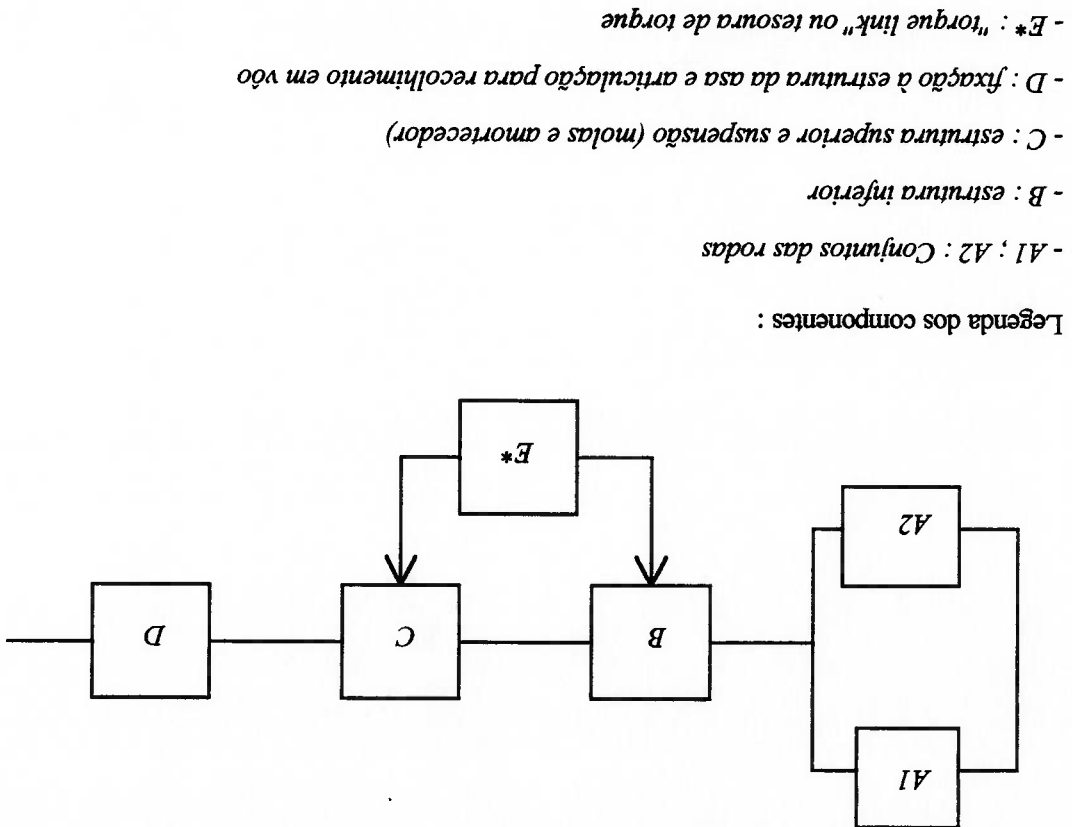
6.3.2) Caracterização dos Esforços Atuantes na Perna do Trem de Pouso Principal do

estrutura da perna do trem principal. Com vistas a elaborar um plano de manutenção, a etapa seguinte exige que se determine em detalhes as solicitações às quais estão submetidos os componentes da

Neste diagrama, optou-se por considerar os dispositivos de fixação e articulação da perna do trem principal como um componente separado da parte superior da estrutura, isto porque estes dispositivos são compostos por itens que realmente não são solidários à estrutura, como pinos, travas, porcas, arruelas, buchas e espaçadores.

EMB-120.

Figura 6.9 - Diagrama de Blocos Adaptado para a Estrutura da Perna do Trem Principal do



LOMAX, [33]. Os valores destas cargas para o EMB-120 não estão disponíveis, mas a apresentação das equações e dos esforços visa prover condições para a análise de seus efeitos sobre os componentes da perna do trem principal da aeronave estudada.

Para resistir às súbitas variações de carregamento, estas normas prevêem a adoção de fatores de carga a serem empregados na determinação dos esforços solicitantes nos trens de pouso. Os valores dos fatores de carga para projeto do trem de pouso recomendados por estas normas da família FAR 25. Posteriormente, através de testes com o avião, o comportamento do conjunto do trem principal e sua resistência aos diversos tipos de cargas atuantes nas manobras requeridas na operação normal da aeronave são verificados. Estes fatores de carga podem ser considerados como coeficientes de segurança parciais aplicados ao carregamento quando da execução do dimensionamento dos componentes estruturais do trem de pouso.

Estes fatores de carga se referem aos esforços efetivamente observados em cada manobra da aeronave, sendo que seu efeito prático corresponde a uma amplificação do peso da aeronave quando da execução das manobras. Como em condições reais de operação, a medição dos esforços para a determinação dos fatores de carga é difícil, a família de normas FAR 25 - como citado por THURSTON, [32] - estabelece que sejam adotados ensaios práticos, sendo o mais utilizado e recomendado, para avaliar o comportamento da aeronave no pouso, o ensaio de queda livre.

Neste tipo de ensaio, são empregadas a estrutura real dos trens de pouso projetada a partir dos fatores previstos em norma e a estrutura da aeronave, podendo-se, por questões de custo e praticidade, substituir a estrutura da aeronave por um dispositivo que simule as condições de carregamento do avião. O dispositivo que contém o trem de pouso é liberado de uma altura que permita ao mesmo atingir o solo com a velocidade de descida observada nos pousos quando da operação da aeronave. A velocidade vertical de descida prevista para as aeronaves comerciais, segundo LOMAX, [33], varia entre 500 ft/min e 700 ft/min (na terminologia aeronáutica -500 fpm e -700 fpm, com o sinal negativo indicando que se trata de velocidade de descida). Abaixo de -700 fpm, o pouso será considerado "duro". Acima dos -500 fpm, diz-se que há flutuação e corre-se o risco de consumir muito comprimento de pista para frear o avião. Em geral, quando a pista estiver molhada ou sob ação de ventos fortes, a velocidade vertical será - em módulo - maior, ou seja, o pouso será mais abrupto, como cita KERMODE [39].

As reações atuantes no trem de pouso são então medidas com auxílio de balanças ou dinamômetros, e os fatores de carga reais são determinados de acordo com as equações apresentadas mais adiante neste trabalho. Ensaio semelhante é realizado para determinar os fatores de carga que atuam durante as manobras de solo (táxi) e de frenagem da aeronave, empregando-se um dispositivo que simule a velocidade da aeronave quando do taxiamento e frenagem, [32].

Resumidamente, as normas FAR 25 propõem a seqüência citada abaixo para o dimensionamento do trem de pouso :

- i - projeto inicial levando-se em consideração os fatores de carga para as manobras recomendadas pela FAR 25;
- ii - realização de ensaios simulados específicos para cada manobra (pouso, taxiamento e frenagem) para a obtenção dos valores das reações que ocorrem nas manobras em referência;

iii - cálculo dos fatores de carga reais a partir das reações observadas nos ensaios;

iv - comparação dos fatores de carga obtidos pelo cálculo com os valores recomendados pela norma, observando-se que os fatores de carga calculados não devem nunca ultrapassar os fatores de carga recomendados pela norma FAR 25 e

v - alterações na configuração da aeronave (como por exemplo balançamento, peso máximo de pouso e decolagem e velocidade de pouso) se os fatores de carga calculados excederem os recomendados por norma.

Para o projeto inicial do trem de pouso, a norma FAR 25, como indicado em [33], estabelece o uso de fatores de carga a serem multiplicados pelo carregamento estático ou pelos esforços efetivamente atuantes durante as manobras, com valores entre 1,0 e 2,0 - o que depende do tipo de aeronave, suas dimensões e tipo de manobra que está sendo realizada - de forma a prover uma resistência adicional, necessária sobretudo no caso de solicitações imprevistas, tais como as geradas pelas irregularidades na pista ou pelos pousos duros. A seguir, para determinar os valores reais dos fatores de carga atuantes durante as manobras da aeronave, são realizados os ensaios (como queda livre, táxi, frenagem) para determinar os valores das reações durante a operação do avião. A partir destas reações, são calculados os valores reais dos fatores de carga e estes devem ser comparados com os

valores recomendados pela norma FAR 25, observando-se que os valores reais jamais podem exceder os valores dos fatores de carga recomendados pela norma. Por esta razão, os fatores de carga recomendados pela norma FAR 25 podem ser considerados como coeficientes parciais de segurança. Se ocorrer de os fatores de carga reais (calculados a partir das reações obtidas em ensaios) excederem os valores recomendados por norma, deve-se proceder a alterações de projeto, como modificar o balançamento da aeronave, modificação nos parâmetros das manobras, sobretudo a velocidade vertical de descida no pouso, ou mesmo providenciar a redução no peso da aeronave.

O uso destes fatores de carga acaba conduzindo ao superdimensionamento dos componentes do trem de pouso, o que é necessário já que uma aeronave está sujeita a tripulações com diferentes graus de habilidade, variações na sua lotação e consequentemente no seu peso, condições atmosféricas e estado da superfície das pistas e pátios dos aeroportos, [33]. Porém este superdimensionamento deve ser criteriosamente adotado, pois, como cita THURSTON, [32], é preferível tolerar algum dano na estrutura do trem de pouso que na ligação asa-fuselagem, ponto essencial na integridade estrutural da aeronave e de extrema importância, pois frequentemente aí estão depositados combustível e acionamento das superfícies de controle, sendo uma falha nesta junção potencialmente perigosa.

A ação das cargas verticais e das cargas paralelas ao solo, no caso dos pousos normais, onde os trens principais tocam o solo simultaneamente e na velocidade vertical adequada, é considerada como característica de projeto. A utilização dos fatores de carga se justifica mais fortemente, segundo LOMAX [33], devido aos pousos imprecisos, onde apenas um dos trens principais toca o solo e a ação dos ventos, os quais geram cargas laterais. E a operação das aeronaves estará sujeita, sempre, à ação destes ventos oblíquos em relação à direção (proa) da pista, os chamados ventos cruzados.

Já no solo, as irregularidades da pista provocam oscilações, as quais, segundo o manual de manutenção do EMB-120 [48], devem ser absorvidas pelos amortecedores hidráulicos (a óleo pressurizado) e pelas molas da suspensão do trem de pouso. Estes são os esforços que mais solicitam estes componentes dos trens de pouso por ocorrerem a frequências e velocidades elevadas. Outra ocorrência que pode danificar os trens de pouso e a estrutura da aeronave como um todo é sua extensão em velocidades acima das especificadas, no caso do EMB-120 ao redor dos 190 kt (190 nós ou Nm/h), o que resulta em aproximadamente 352 km/h. O arrasto ao qual está submetido o trem de pouso ocasiona as cargas que podem comprometer a estrutura, como citado em [48].

As manobras de taxi, sobretudo as curvas fechadas, também impõem esforços severos à aeronave, como cita LOMAX [33], sobretudo se forem feitas sobre uma das pernas como pivô, utilizando-se o recurso da frenagem diferencial, que consiste em mobilizar o trem principal de apenas um lado da aeronave por meio dos pedais da cabine. Como o EMB-120 é uma aeronave regional, os aeroportos pequenos são uma rotina em sua operação e o uso deste recurso é constantemente requerido. O manual de manutenção do EMB-120, capítulo 32 [48], ressalta que esta é uma manobra que afeta as fixações e o mecanismo de trava da direção das rodas do trem principal (chamado de tesoura de torque e que une a estrutura inferior ao corpo do amortecedor mantendo a direção das rodas sempre à frente).

LOMAX [33] cita que as manobras capazes de provocar as cargas de maior magnitude nos trens de pouso são as seguintes :

- pouso padrão em dois pontos;

- pouso em três pontos;

- pouso em um ponto;

- rolagem na pista durante o pouso e decolagem;

- frenagem;

- curvas com pivotamento e

- decolagem rejeitada ou RTO (do inglês "*rejected take-off*").

Para cada manobra citada, reitera-se que a norma FAR 25 prevê ensaios simulados, como o ensaio de queda livre.

Nesta seção da dissertação são detalhados os esforços atuantes no trem de pouso principal, em função dos diversos tipos de pouso e das manobras de solo que podem ser executadas por esta aeronave.

Para cada uma destas manobras, a família de normas FAR 25 estabelece hipóteses para a validação dos cálculos das forças envolvidas.

Inicialmente, tem-se as hipóteses que embasam a determinação dos esforços envolvidos no pouso padrão, de acordo com as hipóteses indicadas pelas normas FAR 25.473, 25.479 e 25.481, citadas na referência [33], as quais são :

- empuxo dos motores tem a mesma magnitude do arrasto;

- o peso tem a mesma magnitude que a sustentação;

- a velocidade de descida situa-se em valores próximos a -600 fpm (-700 fpm é tolerado), sendo o sinal negativo a tradicional indicação de que se trata de velocidade de descida.

O pouso padrão, mostrado na Figura 6.10, extraída de [33], é definido como a manobra onde as rodas das pernas principais tocam o solo ao mesmo tempo. Para efeito de simplificação, assume-se o avião como um corpo rígido, embora levando em consideração os efeitos da suspensão e da elasticidade dos pneus.

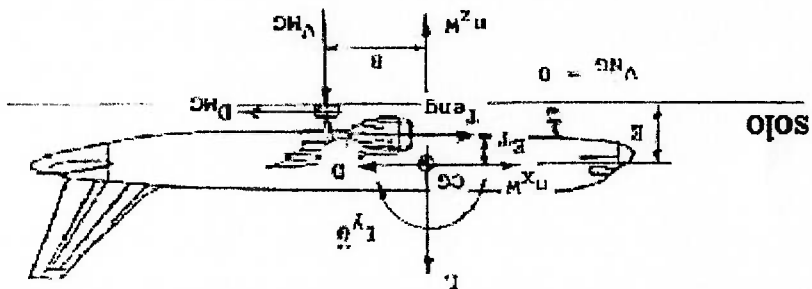


Figura 6.10 - Pouso padrão em "dois pontos", [33]

Nesta Figura tem-se :

-CG : centro de gravidade da aeronave;

- n_z : fator de carga na direção vertical;

- n_x : fator de carga na direção longitudinal;

- W : peso da aeronave;

- L : sustentação;
- E : distância vertical entre a linha horizontal que passa pelo CG e a superfície horizontal do solo;
- E_T : distância vertical entre o eixo dos motores e o eixo longitudinal da aeronave, o qual passa pelo CG;
- D : força de arrasto;
- T_{eng} : empuxo dos motores;
- $I_{\dot{\theta}}^y$: momento angular referido ao eixo y ;
- V_{MG} : reação vertical nos trens de pouso principais;
- D_{MG} : reação horizontal nos trens de pouso principais;
- V_{NG} : reação vertical no trem de pouso do nariz;
- B : distância horizontal entre o trem principal e o CG.

Para que se possa determinar os esforços atuantes no trem de pouso durante as manobras, é necessário estabelecer a convenção dos eixos, como indicado na Figura 6.11.

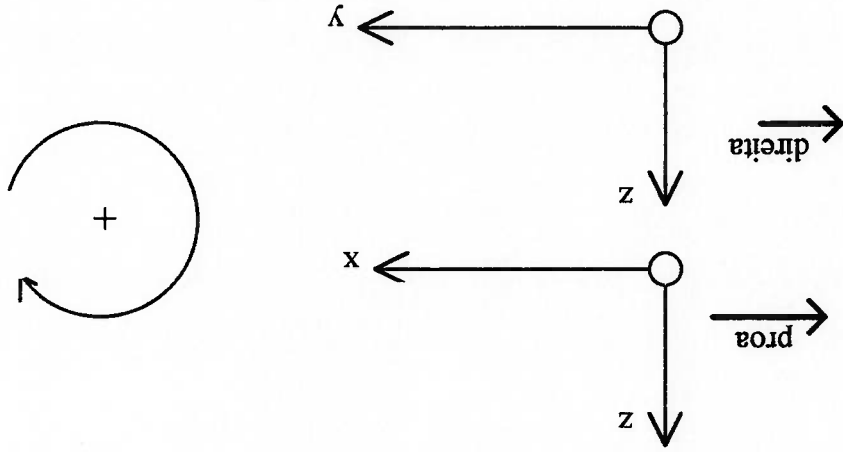


Figura 6.11 - Convenção dos Eixos Para Determinação dos Esforços Atuantes no Trem de Pouso Principal

As equações referentes à determinação dos fatores de carga são provenientes da referência [33]. Inicialmente, obtêm-se os valores das reações verticais no ensaio de queda livre para o pouso padrão, [32]. De posse destes valores, tal como indicado na equação 6.1, [33], a qual expressa a somatória das forças na direção z, pode-se determinar o fator de carga n_z agindo durante o pouso em dois pontos (padrão).

$$\sum F_z = 0 : V_{MGI} + V_{MGR} = n_z W - L \quad 6.1$$

- V_{MGR} : reação vertical no trem principal direito;
 - V_{MGI} : reação vertical no trem principal esquerdo, sendo o restante dos parâmetros definidos como na Figura 6.10.

Rearranjando os termos da equação 6.1 e observando que, segundo a norma FAR 25.473, citada por LOMAX, [33], durante o pouso assume-se que a sustentação seja igual ao peso, ou $L = W$, além de considerar o avião como um corpo rígido, o fator de carga vertical a ser considerado na análise desta manobra é expresso pela equação 6.2, [33]:

$$n_z = 1 + (V_{MGI} + V_{MGR}) / W \quad 6.2$$

Para determinar o fator de carga horizontal longitudinal nas pernas principais, recorre-se à somatória das forças na direção x, onde as reações D_{MGI} e D_{MGR} são obtidas por meio de ensaio, [32], expressa pela equação 6.3, [33].

$$\sum F_x = 0 : (D_{MGI} + D_{MGR}) = n_x W - D + T_{eng} \quad 6.3$$

onde :

- D_{MGI} : reação horizontal longitudinal no trem principal esquerdo;

- D_{MGR} : reação horizontal longitudinal no trem principal direito, sendo o restante dos parâmetros como definidos na figura 6.10.

Rearranjando os termos da equação 6.3 e assumindo que no pouso o arrasto é igual ao empuxo dos motores, ou $D = T_{eng}$, o fator de carga a ser utilizado para as reações horizontais é expresso pela equação 6.4, [33] :

$$n_x = (D_{MGI} + D_{MGR}) / W \quad 6.4$$

A norma FAR 25.479 parte c-2, conforme indicado em [33], estabelece que a carga horizontal agindo sobre os trens principais deve ser assumida como 0,25 do valor da máxima reação vertical. Assim, o fator de carga longitudinal pode ser expresso em função do fator de carga vertical como na equação 6.5.

$$n_x = 0.25(n_z - 1)$$

De posse dos valores das reações verticais e horizontais obtidas no ensaio de queda livre, através da aplicação das fórmulas constantes das equações (6.2) e (6.4), define-se o valor real respectivamente dos fatores de carga vertical e horizontal. Estes valores reais obtidos devem ser comparados com os valores previstos na norma FAR 25, não podendo excedê-los em hipótese alguma.

LOMAX [33] afirma que o momento em torno do eixo y ("pitching" ou momento de aragem) pode ser desprezado em relação aos demais carregamentos atuantes sobre o trem de pouso principal, em função das baixas acelerações envolvidas.

Outra condição de pouso corresponde ao pouso em três pontos, como na Figura 6.12, [33], onde todos os conjuntos tocam o solo ao mesmo tempo. Esta condição de pouso é frequentemente impossível de ser obtida, pois, segundo LOMAX [33], depende das condições atmosféricas no campo de pouso, que podem impossibilitar uma aproximação realizada com velocidades verticais corretas que permitam esta condição de toque da aeronave no solo.

Para a obtenção das reações observadas nesta manobra, é realizado um ensaio de queda livre com a configuração do pouso em três pontos, utilizando-se os valores destas reações para o cálculo dos fatores de carga reais. Os valores destes fatores de carga reais devem então ser comparados com os valores recomendados pela norma FAR 25 e, a exemplo de outras manobras, jamais excedê-los.

Nota-se que diferentemente do que ocorre com o pouso em dois pontos, este fator de carga não assume a condição de que $D = T^{eng}$. Isto ocorre em virtude do pouso em três pontos exigir a aplicação de potência para manter a velocidade horizontal, o que é mais difícil se comparado ao pouso padrão. Para a hipótese de estrutura rígida, no entanto,

$$n_x = (D_{NG} + D_{MGI} + D_{MGR} + D - T^{eng}) / W \quad (6.9)$$

$$\sum F_x = 0 : (D_{NG} + D_{MGI} + D_{MGR}) = n_x W - D + T^{eng} \quad (6.8)$$

ambas constantes na referência [33].

Procedimento análogo é feito para a determinação dos esforços horizontais, expressos pela equação 6.8 e para o fator de carga longitudinal, expresso pela equação 6.9,

$$n_z = 1 + (V_{NG} + V_{MGI} + V_{MGR}) / W \quad (6.7)$$

n_z a equação 6.7, [33].

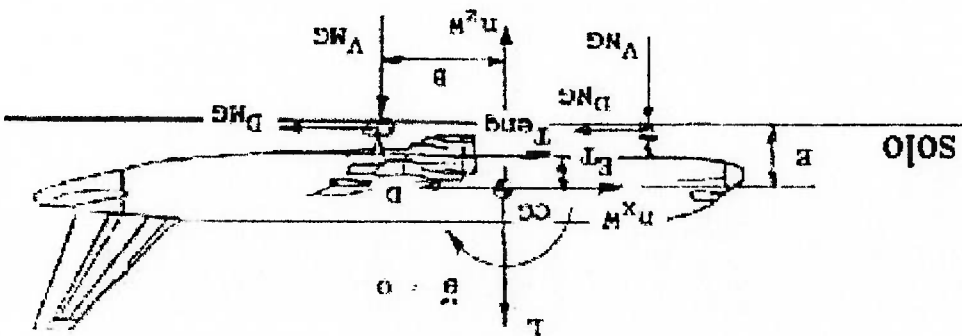
Observando novamente o disposto na norma FAR 25.473 parte a-2, onde $L=W$ e rearranjando-se os termos da equação 6.6, obtêm-se para expressar o fator de carga vertical

$$\sum F_z = 0 : V_{NG} + V_{MGI} + V_{MGR} = n_z W - L \quad (6.6)$$

[32].

Os parâmetros da Figura 6.12 são os mesmos já definidos na Figura 6.10. Assim sendo, é possível determinar a somatória das forças na direção vertical expressa pela equação 6.6, [33], sendo as reações verticais obtidas por meio do ensaio de queda livre,

Figura 6.12 - Pouso em Três Pontos, [33]



pode-se assumir esta condição, e o fator de carga longitudinal pode ser expresso pela equação 6.5. LOMAX, [33], afirma que o pouso em três pontos é bastante severo para o trem de pouso dianteiro, pois sua condição de toque no solo é difícil de ser alcançada, podendo este componente vir a sofrer impactos para os quais não está dimensionado.

Outro tipo de pouso, bastante comum devido às condições atmosféricas, sobretudo na velocidade e direção do vento cruzado sobre a pista, é o pouso em um ponto, mostrado na Figura 6.13, [33]. Neste tipo de pouso apenas um dos conjuntos do trem principal toca o solo. O efeito poderia ser considerável, já que a carga sobre uma das pernas poderia dobrar de valor, assumindo a carga relativa à perna ainda em voo, porém a norma FAR 25.483 [33] estabelece que a carga suportada por uma das pernas do trem de pouso principal deve ser a mesma observada no caso do pouso em dois pontos, como citado por THURSTON, [32], isto porque, há sustentação proveniente das asas durante esta manobra, como cita LOMAX, [33]. Assim, se a primeira perna a tocar o solo for a direita, então a carga V_{MG} não deve exceder o valor da carga V_{MGR} , caso contrário, não deverá exceder o valor de V_{MGL} , calculadas para a condição de pouso em dois pontos, situação onde estas cargas alcançam seus maiores valores. Desta forma, o fator de carga a ser empregado nesta condição de pouso é o mesmo que para a condição de pouso em dois pontos, [32]

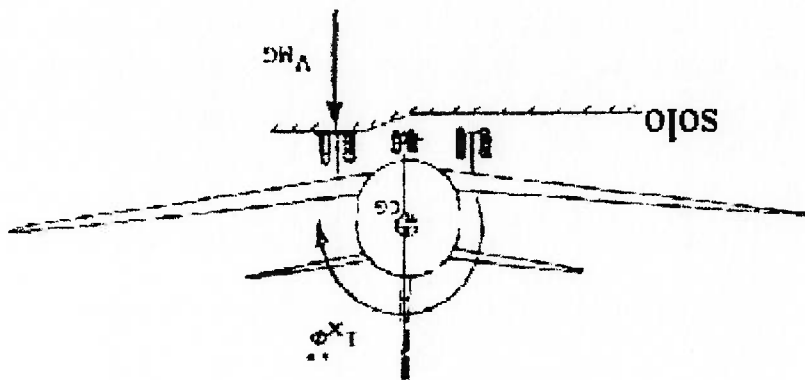


Figura 6.13 - Pouso em um Ponto, [33]

As manobras em solo, segundo THURSTON [31], impõem esforços menos intensos aos trens de pouso. As três manobras que mais solicitam esta parte da aeronave são, segundo LOMAX, [33] : o táxi, incluindo a corrida para decolagem, a frenagem durante o pouso e curvas do tipo "pião", onde um dos trens principais é utilizado como pivô.

Com referência ao táxi, a manobra que mais solicita o trem de pouso é a corrida de decolagem com a aeronave em seu peso máximo de decolagem, no caso do EMB-120, ao redor dos 130000 N. Esta aeronave acelera no solo até os 120 kt (~222 km/h). Para a configuração do EMB-120, com duas rodas para cada perna do trem de pouso, a norma FAR 25.491 estabelece o valor $n_z = 2,0$, estando o fator de carga horizontal n_x determinado pela equação 6.5, [33]. Portanto, para o táxi do EMB-120, $n_x = 0,25$. É interessante notar que em um avião do porte do BOEING 747, cujo peso máximo de decolagem situa-se ao redor dos 370000 N, e acelera na corrida de decolagem até 296 km/h, o valor do fator de carga vertical no táxi é de 1,67. Isto porque esta aeronave possui 18 rodas distribuídas em cinco pernas, sendo 2 rodas no trem de nariz e quatro rodas em cada uma das demais pernas. O uso destes valores é, na verdade, uma referência, pois depende muito das condições da pista em que a aeronave deve operar. Quanto mais irregular a pista, mais alto deve ser o fator de carga, como afirma LOMAX [33]. A verificação dos esforços nesta manobra é feita a partir das reações observadas em ensaio específico para o táxi, como citado por THURSTON, [32].

A frenagem também apresenta mais de uma configuração, sendo a primeira a frenagem nas três pernas (no caso de aeronaves que só possuem três, como o EMB-120), e que não solicita o trem principal tanto quanto a segunda configuração, a frenagem em dois pontos, no caso, apenas nas pernas do trem principal. Este tipo de frenagem tem a desvantagem, segundo LOMAX, de provocar cargas transversais intensas devidas ao desbalanceamento da aeronave, como mostrado na Figura 6.14. O fator de carga a ser aplicado depende da pressão dos pneus e da rugosidade da pista, o que determinará o coeficiente de atrito entre o pneu e o solo a ser utilizado. Mas a norma FAR 25.493 parte b-1 estabelece o valor 0,80 para o coeficiente de atrito entre o solo e os pneus ($\mu_{MG} = 0,80$) e 1,2 para a fator de carga vertical ($n_z = 1,2$) Não se tem disponível o valor para o fator de carga horizontal na frenagem, recomendado pela FAR 25. A exemplo das manobras já citadas, a norma FAR 25 prevê a realização de ensaio específico para a simulação da frenagem, de onde se obtém os valores para as reações durante esta manobra..

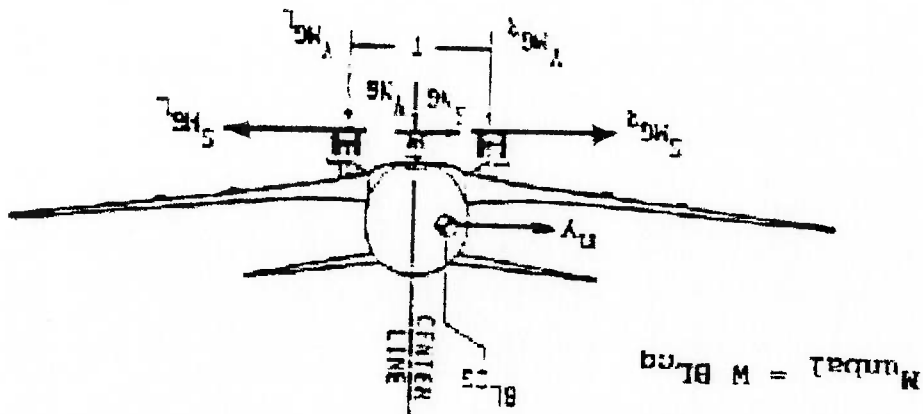


Figura 6.14 - Cargas no Trem de Pouso Durante a Frenagem, [33]

Na Figura 6.14, tem-se :

- BL_{cg} : excentricidade do CG sobre o eixo y, medida como uma distância horizontal entre o centro de gravidade e o plano de simetria vertical da aeronave;

- S_{MG2} : carga transversal no trem principal direito;

- S_{MG1} : carga transversal no trem principal esquerdo;

- S_{NG} : carga transversal no trem do nariz;

- T : distância entre as duas pernas do trem principal;

- n_Y : fator de carga transversal, estando os demais parâmetros da Figura já definidos anteriormente.

Na condição de maior exigência do trem principal, ou seja, frenagem em dois pontos, quando as cargas no trem do nariz têm valor zero, os esforços durante a frenagem podem ser obtidos pelas equações 6.10 a 6.14, [33] :

$$V_{MG2} = n^z W (0,50 + BL_{cg} / T)$$

6.10

$$V_{MG1} = n^z W - V_{MG2}$$

6.11

6.14

$$D_{MGI} = \mu_{MG} \cdot V_{MGI}$$

6.13

$$D_{MGR} = \mu_{MG} \cdot V_{MGR}$$

6.12

$$S_{MGR} = S_{MGI} = 0$$

As reações presentes nas equações 6.10 a 6.14 são obtidas por meio do ensaio de frenagem. Os valores dos fatores de carga obtidos devem, novamente, ser comparados aos constantes nas normas FAR 25, devendo, sempre, ser menores que estes.

Ainda associada à condição de frenagem, tem-se a decolagem rejeitada, ou RTO. Esta manobra é executada se antes da aeronave alcançar uma velocidade denominada de velocidade de decisão ou VL - definida como a velocidade além da qual deve-se prosseguir na decolagem - for detectado algum problema que impeça ou coloque em risco o voo. É uma manobra onde a agilidade em tomar a decisão por parte do piloto é crucial e por isso mesmo, muitos acidentes ocorrem nesta fase da decolagem. Rejeitar ou abortar uma decolagem exige a aplicação de toda a potência disponível nos freios, reversão de potência dos motores (quando houver este recurso) e aplicação de pista relativamente curta, a menos que sejam pistas de 3000 metros de extensão ou mais. Pneus e freios não sobrevivem a uma RTO, pois a temperatura que atingem exige sua substituição após este evento, sendo que os pneus podem mesmo chegar a estourar. A respeito das cargas no trem de pouso durante a RTO, sabe-se apenas que, frequentemente, podem ultrapassar os valores das cargas determinadas para a frenagem normal (equações 6.13 e 6.14), como citado por LOMAX em [33], o que pode vir a ocorrer em função da potência exigida dos freios. Em virtude deste fato, após a ocorrência de uma RTO, deve-se proceder a uma detalhada inspeção na estrutura do trem de pouso para verificar a presença de trincas ou deformações oriundas desta manobra, como citado por THURSTON, [32].

O último dos esforços de interesse no caso das manobras em solo é a curva "pião", ou pivotamento, a qual é executada aplicando-se frenagem diferencial, já que os aviões têm pedais independentes para os trens de pouso localizados em cada um dos lados da aeronave. Em geral, é uma manobra feita a velocidades baixas, em torno dos 7 km/h, até porque seu objetivo é economizar espaço. Os valores das reações nas pernas do trem principal podem ser calculados utilizando-se a condição estática da aeronave em virtude da baixa velocidade na execução da manobra. Esta manobra é uma das poucas a causar cargas de torção no trem

de pouso. O torque sobre a perna do trem de pouso travada, ou seja, o pivô, é expresso pela equação 6.15, [33].

$$T_{PIV} = V_{MGV} \cdot \mu_{MGV} \cdot K_{PIV} \cdot L_{PIV}, \quad 6.15$$

onde :

$$- K_{PIV} = 1,33 \text{ (constante da manobra de pivotamento);}$$

$$- L_{PIV} = 0,50F \text{ (largura de pivotamento), no caso de aeronaves que possuam, como o EMB-120, duas rodas por perna do trem de pouso e}$$

$$- F = \text{distância entre rodas em um mesmo eixo (não confundir com a distância } I \text{ da Figura 6.14).}$$

Estes não são todos os esforços atuantes em um trem de pouso, mas são aqueles apontados pelas referências como os mais significativos. As equações e Figuras apresentados nesta seção referem-se a aeronaves com trem de pouso triciclo, como o EMB-120. De posse destes esforços, pode-se agora propor um procedimento de manutenção para a estrutura da perna do trem de pouso principal do EMB-120.

6.3.3) Avaliação dos Modos de Falha dos Componentes do Trem de Pouso Principal

Os dois itens anteriores permitem desenvolver conhecimentos a respeito dos principais aspectos necessários à elaboração de um procedimento de manutenção que vise a confiabilidade : o sistema analisado, seus componentes, a relação entre eles - expressa pelo diagrama de blocos adaptado, apresentado na Figura 6.9 - e as solicitações envolvidas em sua operação.

Para obter uma indicação que permita selecionar a prática mais adequada ao sistema analisado como um todo, chegando ao nível de seus componentes, é necessário conhecer como as solicitações os afetam. Assim, será determinado o modo de falhar, sendo possível até mesmo estabelecer as consequências da ocorrência de uma falha em um componente sobre o restante do sistema, empregando-se um FMEA simplificado.

Examinando-se a Figura 6.9 , embora tratando-se de um diagrama adaptado e bastante simplificado, é possível perceber que o sistema analisado é em sua maior parte constituído por componentes ligados em série. Assim, como os esforços no trem de pouso -

à exceção das cargas aerodinâmicas de arrasto em voo - são provenientes de seu contato com o solo, haverá efeitos desde os pneus até as articulações, afetando em diferentes graus todos os diversos componentes detalhados. Partindo-se dos conjuntos das rodas, embora estes não sejam o objeto da análise realizada neste trabalho, pode-se estabelecer como as diversas cargas afetam o componente.

O conjunto das rodas, constituído pelos freios, cubos de roda, aros e pneus, é, sem dúvida nenhuma o mais afetado por todos os esforços detalhados neste trabalho. O primeiro dos componentes a receber qualquer esforço é o pneu. As cargas verticais, longitudinais e transversais, provenientes do taxiamento, pousos e frenagem aceleram seu desgaste. Os impactos tendem a deformar sua estrutura e sua banda de rodagem. O "pião" ou pivotamento também solicita severamente os pneus. Um parâmetro importante não apenas para o desempenho do pneumático, mas para a segurança da aeronave é a pressão interna dos pneumáticos. O calor da frenagem, embora não esteja descrito como esforço, também acelera a deterioração do pneu. Os freios não chegam a ser afetados pelas cargas estabelecidas na seção 6.3.2, mas a presença de partículas abrevia em muito sua vida útil, como relatam AL GARNI et al. [44]. Os cubos de roda, com uma função estrutural mais destacada são fortemente afetados pelas cargas verticais, sobretudo os impactos.

A porção inferior da estrutura, à qual estão ligados os cubos de roda e que faz as vezes de pista do amortecedor é afetada pelas cargas verticais, mas como se movimenta no interior da câmara do amortecedor, estas cargas são - como seria de se esperar para este componente - parcialmente amortecidas. Mas as cargas longitudinais e transversais (D^{MG} e S^{MG}), provenientes do atrito, da frenagem, do desbalançamento (excentricidade do centro de massa da aeronave) e da ação dos ventos cruzados afetam fortemente este componente, como mostrado na Figura 6.15, onde se pode apreciar os efeitos de outras manobras sobre o componente. A reação às cargas longitudinais só é possível porque o componente está parcialmente embutido na estrutura superior, o que resulta em um engastamento, o qual provocará uma reação por meio de um momento fletor e a consequente flexão desta haste. Este engastamento possibilita a reação às cargas horizontais, sejam elas transversais ou longitudinais, e sua importância está no fato de que estas solicitações são mais severas que as solicitações verticais (V^{MG}), pois estas últimas são absorvidas em parte pelo amortecedor. O fato destas cargas serem variáveis, seja de pousos para pousos, seja em virtude de quando o trem está recolhido não haver carga atuando sobre o mesmo, além do comprimento da haste inferior (*) variar com o peso da aeronave, fazendo também variar o momento fletor e por conseguinte a tensão atuante, predispõe o componente a falhar por fadiga, exigindo atenção

redobrada para este aspecto. As cargas aerodinâmicas, se mantida a velocidade limite para a extensão do trem de pouso, não é motivo para maiores preocupações, segundo o fabricante [48]. Como, segundo o manual de manutenção do EMB-120 [48] esta peça não é pintada, apesar de seu acabamento superficial liso, está sujeita também à corrosão, a qual pode ser acelerada pela presença de riscos ou arranhões provenientes do impacto com objetos ou passaros. Sendo ligada à tesoura de torque, também sofre cargas de torção, sobretudo no pivotamento. A porção inferior da estrutura da perna do trem principal deve permanecer sempre alinhada à frente, pois os cubos de roda são rigidamente ligados a ela. Sem a tesoura de torque, a torção deste componente é livre.

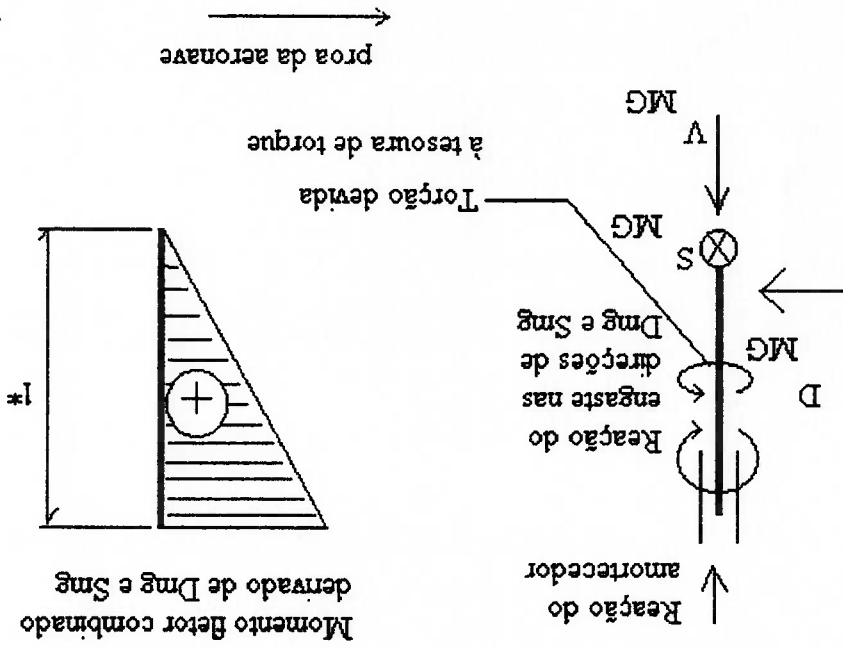


Figura 6.15 - Esforços Atuantes e Diagrama de Momento Fletor Combinado das Cargas Transversais e Longitudinais

A porção superior da perna do trem principal, chamada de "oleo structure" é o maior e mais complexo dos componentes da perna do trem principal. É ligada às asas da aeronave em sua porção superior, e também ao mecanismo de retração/extensão (arrasto) em diversos pontos, já que tal mecanismo é bastante complexo. A Figura 6.3 mostra os diversos pontos onde este componente se conecta ao mecanismo de arrasto. Em seu interior, estão localizados os componentes responsáveis pela suspensão da aeronave - as molas, a câmara do amortecedor e as válvulas de restrição à passagem do fluido. Além destes, a tesoura de torque também é conectada a este componente, pois o mesmo é articulado

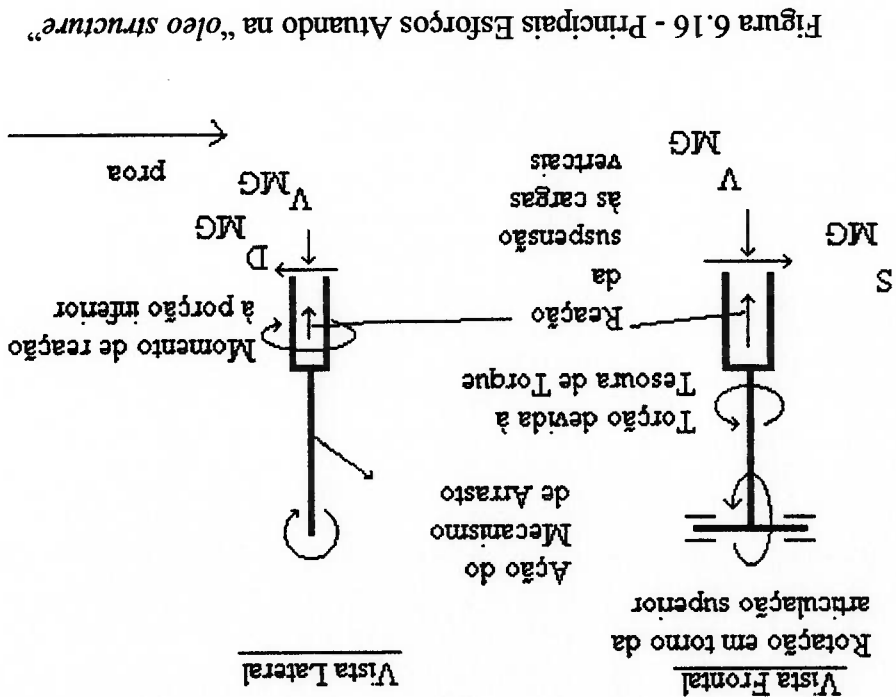
apenas para permitir que o trem seja recolhido à frente, não havendo rotação ao longo de seu eixo longitudinal. As cargas verticais afetam bastante este componente, pois o mesmo transmite estes esforços para a estrutura da aeronave. Embora haja o amortecimento destas cargas, é o componente que mais atenção exige em função das mesmas. As cargas verticais, sobretudo os impactos, podem causar danos nos pinos de fixação da parte superior da estrutura (estes pinos são parte deste componente), no próprio corpo da estrutura e no amortecedor. As cargas verticais provenientes do taxiamento em alta velocidade (como em uma decolagem), por serem de frequência elevada em comparação com o impacto no pouso, provocam rápido desgaste dos componentes internos do amortecedor, e fadiga as molas das válvulas, vistas em detalhe na Figura 6.5. Além disso, estas cargas verticais do taxiamento danificam também o diáfragma, pois causam variações de pressão súbitas, alcançando valores acima da carga suportável por este elemento. Os pousos duros (onde a velocidade vertical de descida é de -700 fpm ou menor) são os esforços que mais solicitam os amortecedores, de acordo com o manual de manutenção do EMB-120 [48]. Já as cargas horizontais podem provocar danos aos amortecedores à medida em que a parte inferior da estrutura está engastada em seu interior, podendo haver deformação da câmara. As cargas transversais (S^{MG}) provocam esforços adicionais nos pinos da parte superior e no corpo da estrutura. Já as cargas longitudinais (D^{MG}) solicitam os pinos de ligação com o mecanismo de arasto, os pinos de fixação e o corpo da estrutura. Por fim, tem-se a torção durante o pivotação, afetando o ponto de ligação com a tesoura de torque, os pontos de ligação com mecanismo de arasto, os pinos de fixação da parte superior e o corpo da estrutura. Alguns dos esforços relatados podem ser melhor visualizados na Figura 6.16, que representa a porção superior da estrutura da perna do trem principal ("oleo structure"). Este componente, como um de seus modos de falha usuais apresenta a fadiga de seus elementos estruturais e o desgaste dos elementos do amortecedor, inclusive vazamento do fluido de preenchimento, o que exige cuidados preventivos para que seu desempenho seja assegurado.

Prosseguindo, tem-se os componentes de fixação da perna principal à asa, como buchas, porcas, espaçadores, arruelas, cupilhas e suportes dos mancais, como na Figura 6.4. A principal solicitação imposta a estes componentes é o atrito devido a articulação do trem de pouso, para permitir seu recolhimento/extensão. Como se trata de atrito, o desgaste nestes componentes é o modo de falha mais acentuado, [48]. Mas deformações devidas à ação das cargas verticais, sejam elas de impacto ou não, além das deformações devidas aos efeitos das cargas horizontais são modos de falha esperados.

Por fim, tem-se a tesoura de torque, apresentada na Figura 6.8, um sistema considerado separado da estrutura da perna do trem principal, que é solicitado por cargas de flexão, sejam as alavancas das tesouras ou os pinos que conectam este sistema entre si e ao trem de pouso. Há que se lembrar que as cargas de flexão na tesoura de torque são cargas de torção na estrutura da perna do trem principal.

Há componentes, como os elementos vedantes do amortecedor que podem falhar independentemente das solicitações, por mecanismo de envelhecimento ou desgaste. Por isso, não haviam sido mencionados até este ponto.

A partir desta análise de transmissão de esforços, pode-se afirmar que os principais modos de falha do trem de pouso principal são :



A análise da modelagem destes modos de falha é apresentada na sequência deste texto.

6.3.4) Detalhamento dos Modos de Falha dos Componentes do Trem de Pouso Principal

Neste item, procura-se apresentar os fundamentos da modelagem dos modos de falha dos componentes do trem de pouso principal de uma aeronave, identificando a possibilidade de detectar-se a progressão da falha, fato de grande importância para a programação das atividades de manutenção destes componentes.

6.3.4.1) Fadiga

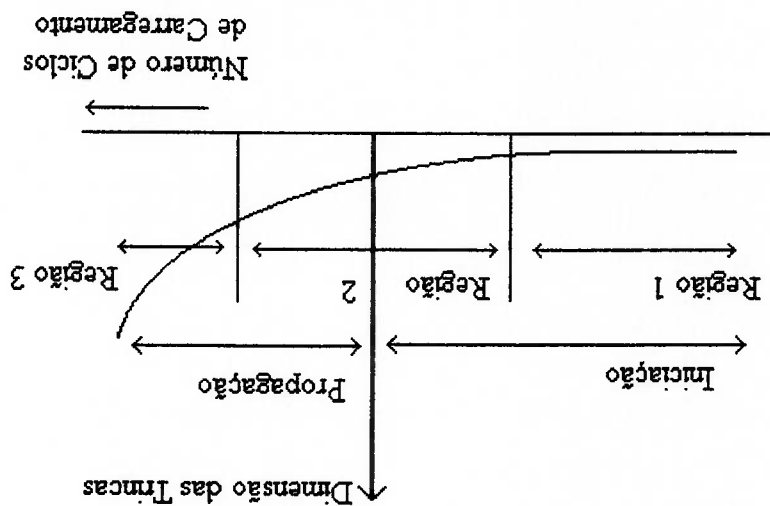
O termo fadiga é usualmente empregado para descrever o efeito da ação de um carregamento cíclico sobre a resistência de um componente ou estrutural. A falha por fadiga é caracterizada pela progressão do crescimento de uma trinca, a qual pode causar a fratura da estrutura quando a sua dimensão atingir um dado valor específico.

Usualmente, a vida de um componente mecânico ou estrutural, submetido à ação de tensões cíclicas, é definida como o número total de ciclos de tensão necessários para a formação de uma trinca, adicionado ao número total de ciclos de tensão necessários para a propagação desta trinca, até a ocorrência da fratura do componente, como citado por ROLFE e BARSON, [56]. Esta vida, de um modo simplificado, é função da magnitude das tensões cíclicas e da tensão média atuantes no componente, e do ambiente no qual a estrutura ou componente estará operando.

Uma representação esquemática da relação entre o período de iniciação das trincas e o período de propagação das mesmas é apresentado na Figura 6.17. A questão de quando uma trinca deixa de ser "iniciante" para se tornar "propagante" é um pouco filosófica, e depende do nível de observação do tamanho da trinca, tais como imperfeições cristalinas,

microtrincas, ou trincas com dimensões superiores a 0,1 mm, usualmente utilizadas em engenharia para definição do tamanho inicial de uma trinca em uma estrutura.

A relação entre o número de ciclos de tensão necessários para a iniciação e o número de ciclos necessários para a propagação da trinca até um tamanho crítico, é altamente dependente da qualidade do acabamento superficial do componente, de forma que um melhor acabamento superficial implica em um maior número de ciclos de tensão necessários para a iniciação da trinca.



Região 1 : Dificuldade na Definição da Dimensão da Trinca

Região 2 : Trincas Podem ser Observadas sob o Ponto de Vista da Engenharia Mecânica

Região 3 : Crescimento da Trinca Pode Ser Observado

Figura 6.17 - Representação Esquemática do Crescimento de uma Trinca, [56].

A metodologia de análise do fenômeno fadiga centrada no estudo das tensões cíclicas atuantes na estrutura ou componente mecânico é baseada na utilização da curva S-N, a qual incorpora os estágios de nucleação e propagação da trinca em uma formulação contínua, caracterizada experimentalmente. Muitos códigos de projetos de estruturas, tais

como o do "AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE", API, [60], para estruturas oceânicas, e da "AMERICAN WELDING SOCIETY", AWS, [61], para estruturas soldadas, representam a resistência à fadiga de materiais metálicos utilizados em projeto estrutural com o auxílio da curva S-N, esquematicamente representada na Figura 6.18, a qual fornece o número de ciclos de tensão (N) de magnitude constante, com amplitude S, necessários para causar falha por fadiga, caracterizada pela ruptura do componente.

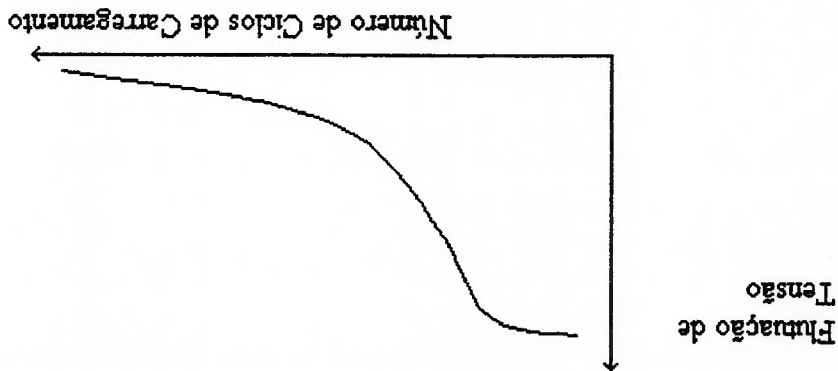


Figura 6.18 - Curva S-N para Análise de Fadiga

Componentes mecânicos, como eixos, engrenagens ou molas, são usualmente projetados considerando a possibilidade de falha por fadiga e os critérios de projeto dos mesmos são baseados na aplicação da curva S-N, SHIGLEY, [59].

Uma simplificação da análise de aplicação da curva S-N é necessária quando da análise de componentes mecânicos ou estruturas submetidos à ação de tensões cíclicas de magnitude variável ao longo do tempo. Esta análise é executada pela aplicação da regra de acumulação de dano de PALMGREN-MINER, citada por FUCHS e STEPHENS, [62]. De acordo com esta regra, a vida de um componente submetido à ação de tensões cíclicas de magnitude variável no tempo é expressa pela fração da vida gasta pela aplicação de um certo número de ciclos a um dado nível de amplitude de tensão, sendo igual à razão entre o número de ciclos aplicados, n , e o número de ciclos total que provocaria a ruptura por fadiga. A vida do componente é expressa pela soma das razões calculadas em função do número de condições de carregamento de amplitude constante atuante no mesmo. Quando esta soma for igual a 1,0, há a ruptura do componente, caracterizando o modo de falha por fadiga.

Usualmente, para componentes mecânicos, a vida em fadiga é definida com o emprego da curva S-N, pois em função das dimensões dos mesmos, o período de nucleação da trinca é muito grande quando comparada com o período de propagação da mesma, de forma que uma vez ocorrida sua nucleação, sua propagação dar-se-á de forma muito rápida. Dessa forma, para as molas do trem de pouso principal pode-se afirmar que a vida das mesmas é definida pela aplicação da curva S-N, e a fase de nucleação da trinca é o período dominante no processo de fadiga. Certamente, em função da variação do carregamento atuante sobre as mesmas, estas são projetadas considerando a ação de um carregamento equivalente, sendo utilizado um coeficiente de segurança que representa as incertezas associadas à resistência à fadiga do material da mola e à magnitude do carregamento atuante sobre a mesma.

Portanto, caso seja observada a presença de uma trinca na mola, esta deve ser imediatamente substituída, pois o período de propagação da trinca será muito reduzido e a ruptura da peça ocorrerá muito rapidamente, prejudicando a operação da aeronave. Segundo BLOCH e GEITNER, [54], a taxa de falha média associada a molas operando em componentes de máquinas varia de $0,01 \times 10^{-6}$ /hora a $0,1 \times 10^{-6}$ /hora, para elementos operando sob cargas reduzidas, enquanto para molas operando sob carregamentos de elevada magnitude, esta taxa varia entre $0,8 \times 10^{-6}$ /hora a $2,5 \times 10^{-6}$ /hora.

Para o caso de componentes mecânicos ou estruturais de grandes dimensões, pode-se afirmar que os processos de fabricação empregados na construção dos mesmos tendem a introduzir defeitos, que podem ser considerados como trincas já nucleadas. Portanto, a análise do processo de fadiga destes componentes deve ser baseada na hipótese de que os mesmos são elementos que já apresentam trincas, e que a sua vida operacional é determinada pelo número de ciclos de tensão, com uma dada magnitude, necessários para propagar uma determinada trinca, de dimensões iniciais conhecidas, até uma dimensão crítica, que induza à fratura da estrutura.

Os métodos de análise de propagação de trincas sob ação de carregamento cíclico são baseados em conceitos de Mecânica da Fratura. Dentre estes métodos, um dos mais utilizados na análise de fadiga de estruturas é o baseado na Mecânica da Fratura Linear Elástica, com o emprego da Lei de PARIS, SOUZA, [58].

De acordo com este metodologia de análise, o crescimento da trinca é governado pelo fator de intensificação de tensões associados à trinca, o qual é dependente da

magnitude da tensão cíclica, das dimensões e da geometria da trinca, e da própria geometria da estrutura. Conforme FUCHS e STEPHENS, [62], a equação que descreve o crescimento da trinca, denominada Lei de PARIS, é expressa por :

$$\frac{dN}{da} = C \Delta K^{-n} \quad \text{para} \quad \Delta K > \Delta K^{th} \quad 6.16$$

onde:

a ... dimensão da trinca;

N ... número de ciclos de tensão;

ΔK ... flutuação do fator de intensificação de tensões;

C, m ... parâmetros da Lei de PARIS, definidos através de experimentos, sendo característica de um dado material;

ΔK_{TH} ... limite inferior do fator intensificador de tensões, abaixo do qual o crescimento da trinca se dá a taxas extremamente reduzidas, podendo o mesmo ser considerado nulo.

A flutuação do fator de intensificação é calculada por :

$$\Delta K = \Delta S \cdot f(a) \sqrt{\pi \cdot a} \quad 6.17$$

onde:

f(a) ... função dependente da geometria da trinca e da estrutura;

ΔS ... flutuação de tensão, induzida pela ação do carregamento externo.

O fator f(a) é um elemento de fundamental importância para a definição do processo de propagação da trinca, e este encontra-se tabelado para algumas geometrias típicas, tal como apresentado por FUCHS e STEPHENS, [62], e ROLFE e BARSON, [56].

Considerando-se o fator f(a) como uma constante, igual a Y, a equação 6.16 pode ser integrada, e a dimensão da trinca após N ciclos de flutuação de tensão é definida por SOUZA, [58] :

$$a(N) = \left[a_0^{1-\frac{2}{m}} + \left(1 - \frac{2}{m} \right) \cdot C \cdot \Delta S_m \cdot Y_m \cdot \pi \cdot \frac{2}{m} \cdot N \right]^{\frac{m}{2}}$$

, $m \neq 2$

onde :

a_0 ... dimensão inicial da trinca;

$a(N)$... dimensão da trinca após N ciclos de tensão.

Quando a dimensão da trinca atinge um dado valor crítico, denominado a_{cr} , considera-se que a estrutura falhou por fadiga. Este tamanho crítico pode ser definido através de princípios de Mecânica da Fratura Linear Elástica, correspondendo à dimensão de trinca que causaria a fratura frágil da estrutura, quando esta é solicitada pelas condições de carregamento consideradas na modelagem do processo de fadiga. Uma outra forma de definir este valor crítico é a partir da consideração de um limite de serviço, ou seja, como tamanho crítico de trinca define-se um valor considerado o máximo admissível para a estrutura, de forma que a sua presença não prejudique a operação normal da mesma.

A equação 6.18 envolve uma variedade de incertezas, tais como as associadas aos parâmetros (C, m) da Lei de PARIS, advindas das incertezas associadas ao comportamento mecânico dos materiais, as associadas à definição da dimensão inicial da trinca presente na estrutura, bem como à magnitude do carregamento cíclico.

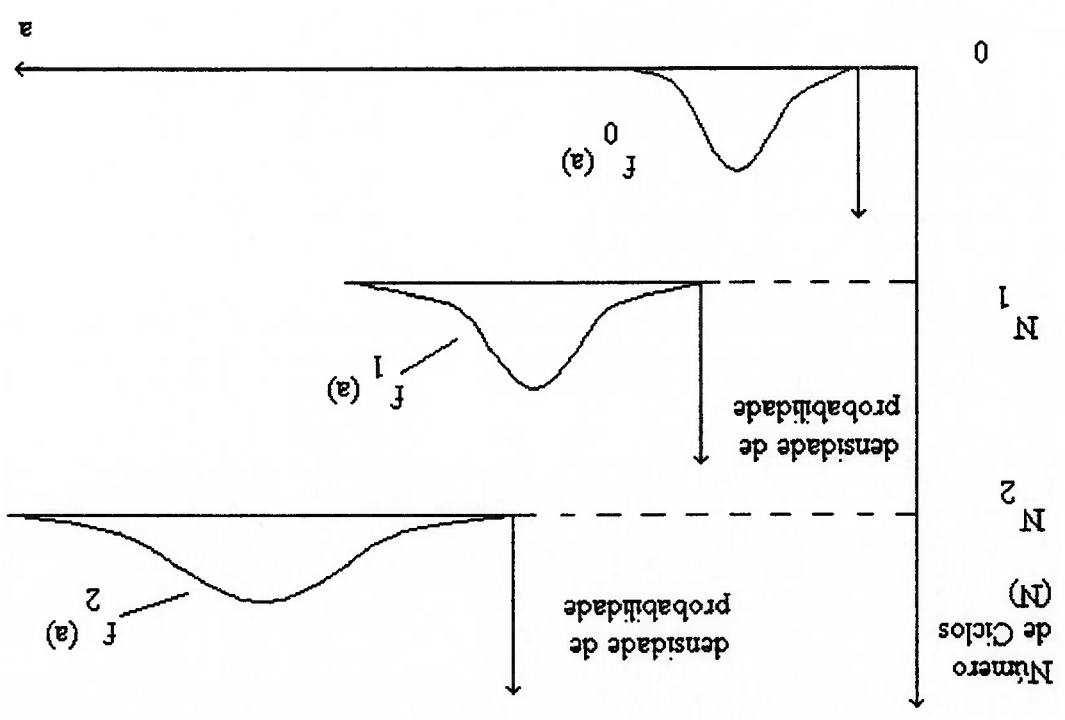
A indústria aeronáutica considera os efeitos destas incertezas sobre o processo de propagação da trinca e procura definir o tamanho da trinca, após N ciclos de carregamento de forma probabilística, tal como indicado na Figura 6.19, baseada em GALLAGHER et al. [57].

De posse desta distribuição, define-se a probabilidade da trinca atingir a dimensão crítica após N ciclos de carregamento da estrutura.

Método de Monte Carlo.
 com a solução da equação 6.18, envolvendo a aplicação de técnicas de simulação como o carregamento, onde o número de ciclos é usualmente considerado determinístico, é obtida a definição da distribuição estatística da dimensão da trinca, após N ciclos de quando da análise de fadiga.

inspeção do componente garante que as trincas de maiores dimensões sejam consideradas rapidamente, a utilização da distribuição das dimensões das trincas detectadas quando da fabricação do mesmo. Como no processo de fadiga, as trincas maiores se propagam mais inferiores à capacidade de detecção do método de inspeção não destrutivo utilizado durante quando da inspeção do componente, pois podem existir outras trincas de dimensões Ressalta-se que esta distribuição está relacionada com as trincas efetivamente detectadas destrutivas executadas ao longo da fabricação do componente ou elemento estrutural. estatística da dimensão inicial da trinca baseia-se nos resultados das inspeções não cíclicas, das propriedades do material e da dimensão inicial da trinca. A distribuição Tal definição é baseada nas distribuições estatísticas da magnitude das tensões

Figura 6.19 - Distribuição da Dimensão da Trinca em Função dos Ciclos de Operação



Esta metodologia de análise de fadiga deve ser aplicada para avaliação do crescimento de uma trinca presente no trem de pouso principal e do trem de pouso do nariz (triquilha) das aeronaves, incluindo o EMB-120, analisado nesta dissertação.

Embora o fabricante da aeronave não forneça os detalhes de projeto do trem de pouso, da mesma forma que foram analisados os carregamentos que podem atuar no mesmo, pode-se estimar os tipos de defeitos presentes na sua estrutura, a partir da análise de dados publicados para outras aeronaves.

FUJIMOTO e GALLAGHER, [55], apresentam os resultados de uma análise de defeitos, tipo trinca, encontrados em componentes estruturais do trem de pouso de aeronaves militares. Os resultados desta pesquisa são apresentados na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 - Dimensões Iniciais de Trincas em Componentes Estruturais de um Trem de Pouso, [55]

| Causa do Dano | Dimensões (mm) | Comentários |
|-------------------------------------|----------------|--|
| Operações do Processo de Acabamento | 2,54 - 0,076 | Ocorre no aço durante a retificação |
| Martensita Temperada Localizada | 2,54 - 0,076 | |
| Martensita não Temperada Localiz. | 2,54 - 0,203 | Profundidade da Trinca igual à Profundidade da Camada de Cromo |
| Fratura no Cromo | 2,54 - 0,203 | |
| Defeitos Latentes no Material | 3,18 - 0,127 | |
| Inchões | 2,54 - 0,127 | |
| Defeitos de Foyramento | 2,54 - 0,508 | Dimensões para Dobras Foyadas |
| Danos Mecânicos na Usinagem | 2,54 - 0,127 | |
| Danos Induzidos no Aço | 6,35 - 0,508 | |
| Danos Induzidos no Alumínio | 12,7 - 0,076 | |
| Marcas Induzidas por Ferramentas | 2,54 - 0,076 | |

A origem das trincas pode ter três fontes básicas : 1) danos causados por operações de acabamento superficial, 2) defeitos do material e 3) danos causados em operações de usinagem.

Os danos causados em operações de acabamento superficial são induzidos por operações de retificação visando a melhoria do referido acabamento das partes em regiões de instalação de elementos de vedação ou de tolerância dimensional muito reduzida, ou mesmo como preparação da superfície para uma posterior operação de deposição de acabamento superficial, como o cromado, visando a proteção do componente com relação ao fenômeno da corrosão.

Já os danos relativos aos defeitos do material englobam inclusive os mesmo defeitos induzidos por operações de conformação plástica, como o forjamento.

Finalmente, existe a classe de danos causados por operações de usinagem, quando da fabricação do componente, os quais tendem a ter maiores dimensões que os danos acima citados. Ao longo da pesquisa bibliográfica executada neste trabalho, não foi possível a obtenção de dados estatísticos relativos à dimensão destas trincas.

Para efeito de atividades de manutenção, é necessário saber qual o limite tolerável para a dimensão da trinca presente na estrutura, pois o processo de inspeção é capaz de detectar trincas, e mesmo determinar a dimensão das mesmas por meio das técnicas não destrutivas, como líquido penetrante, ultra-som, raió-x ou partículas magnéticas, SUNDARARAJAN, [21] e VIEIRA, [36]. Caso a dimensão da trinca supere o limite tolerável para a estrutura, o componente deve ser obrigatoriamente substituído.

Desse modo, para os elementos estruturais do trem de pouso principal, é necessário haver um acompanhamento do crescimento das trincas ao longo da vida operacional da aeronave.

6.3.4.2) Deformação Devido a Ação de Cargas de Compressão

O estudo da deformação dos elementos estruturais do trem de pouso sob cargas de compressão é de particular interesse durante a manobra de pouso, pois neste caso, a estrutura recebe os esforços mais severos de compressão, LOMAX [33].

Neste caso, a falha do componente não é usualmente caracterizada pela fratura, mas pela ocorrência de deformações plásticas (permanentes) as quais devem ser evitadas. Esta é uma das razões pela qual se emprega os fatores de carga descritos na seção 6.5 deste trabalho.

Ainda que sejam empregados os fatores de carga, a falha por deformação permanente à compressão pode ocorrer devido às incertezas associadas à resistência mecânica do material e à magnitude do carregamento de compressão.

A estas duas grandezas, podem ser associadas funções densidade de probabilidade, sendo comum que o carregamento apresente variação do tipo Log-normal e a resistência mecânica apresente variação do tipo Weibull, MADSEN, [63].

O problema reside exatamente nesta dispersão nos valores das grandezas de carregamento e resistência, pois é possível que haja situações onde o valor das tensões de compressão (σ) ultrapasse o limite de resistência, no caso a tensão de escoamento (σ_e), do material caracterizando a falha, como ilustra a Figura 6.20.

Nos trechos onde o valor da carga (C) superar o valor da resistência (R), haverá a falha, a qual pode variar da deformação plástica à fratura do componente, situação usualmente não observada nos trens de pouso de aeronaves da categoria do EMB-120, LOMAX, [33].

Quanto mais distantes estiverem as duas curvas, menor a possibilidade de ocorrência de uma falha por tensões de compressão. Isto é possível adotando os coeficientes de segurança parciais (γ), [63], no caso, função cumprida pelos fatores de carga.

Para efeitos de manutenção, ao atingir qualquer grau de deformação plástica, o componente deve ser substituído, o que explica a necessidade de inspeções visuais do trem de pouso da aeronave, além de verificações mais acuradas por meio de instrumentos de medição periodicamente.

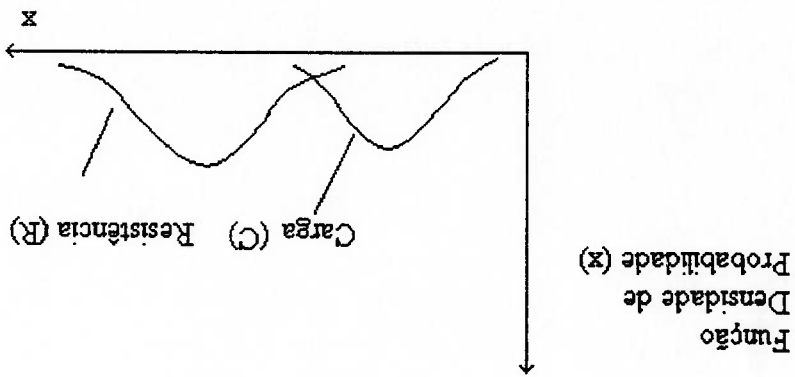


Figura 6.20 - Incertezas nos Valores do Carregamento de Compressão e na Resistência Mecânica do Trem de Pouso

6.3.4.3) Fratura

O mecanismo de falha por fratura de um componente é caracterizado por uma propagação muito rápida de uma trinca, quando este componente é submetido a uma dada condição de carregamento.

O processo de fratura pode ser o estágio final do processo de crescimento estável de uma trinca, sob ação de um carregamento cíclico, ou mesmo pode ocorrer em função de uma sollicitação mecânica muito elevada, que causa a propagação rápida de uma trinca já existente no componente.

A resistência à fratura de um material é expressa em termos da tenacidade à fratura, do inglês "*notch toughness*", sendo definida com a habilidade de um material em absorver energia, usualmente quando submetido à ação de carregamento dinâmico, quando há a presença de uma trinca. A tenacidade à fratura pode ser medida através de ensaios em corpos de prova, sendo o ensaio CHARPY um dos mais utilizados para este fim, [56].

Tradicionalmente, a resistência à fratura dos materiais é expressa por uma curva que indica a energia absorvida para a ocorrência da fratura em função da temperatura do ensaio, tal como indicado na Figura 6.21. Esta forma de apresentação desta propriedade deve-se ao fato de que alguns materiais, principalmente os aços de baixa e média resistência mecânica, tipicamente os aços carbono e os aços de baixa liga, apresentam uma transição da fratura frágil para fratura dúctil em função da variação da temperatura. A fratura dúctil é precedida pela ocorrência de deformação plástica do material, enquanto que a fratura frágil ocorre com a presença de pouca ou nenhuma deformação plástica do material.

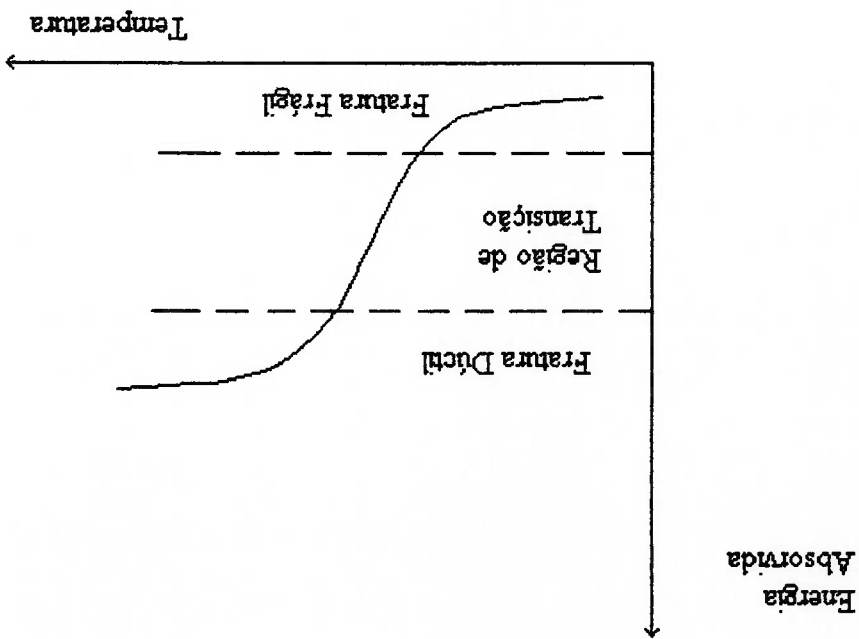


Figura 6.21 - Resistência à Fratura em Função da Temperatura, [56].

Desta análise, verifica-se que a fratura frágil ocorre sem deformação plástica, portanto, quando a estrutura está submetida a tensões abaixo do limite de escoamento do material e, conforme ROLFE e BARSON, [56], a velocidade de propagação de trinca é muito elevada.

De acordo com GALLAGHER et al, [57], a USAF avalia a possibilidade de ocorrência de fratura frágil nos elementos estruturais de uma aeronave, principalmente os fabricados em aço com o emprego dos conceitos da Mecânica da Fratura Linear Elástica, principalmente após as falhas estruturais ocorridas com as aeronaves C-5A e F-111, [57].

Segundo a Mecânica da Fratura Linear Elástica, a resistência à fratura de um material é expressa pelo denominado fator de intensificação de tensões crítico (K_{Ic}). Este fator é obtido experimentalmente, com a aplicação de procedimento de ensaio definido pela ASTM (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS), com o código ASTM E399: *Standard Test Method for Plane Strain Fracture Toughness of Metallic Materials*, [64].

A estrutura ou componente estrutural irá apresentar falha por fatura frágil quando o fator de intensificação de tensões induzido pelo carregamento externo for igual ou superior à resistência à fatura do material, ou seja :

$$K_{ext} = K_c$$

6.19

onde :

$$K_{ext} = S_{ext} \cdot f(a) \cdot \sqrt{\pi \cdot a}$$

sendo :

K_{ext} ... fator de intensificação de tensões induzido pelo carregamento externo;

S_{ext} ... tensão de tração induzida pelo carregamento externo e

$f(a)$... já comentado quando da discussão do mecanismo de falha por fadiga.

Dessa forma, para uma dada dimensão de trinca presente na estrutura ou componente, há um dado valor de carregamento admissível para o mesmo de forma a evitar a ocorrência da fatura frágil.

Portanto, no caso do trem de pouso, há a possibilidade de sua fatura, mesmo quando a trinca presente na estrutura tiver dimensão inferior ao limite máximo admissível como condição de projeto da aeronave, denominada dimensão crítica.

Isto pode ocorrer, caso em uma manobra de pouso, as cargas atuantes na estrutura ultrapassem os limites utilizados quando do projeto da mesma.

Para reduzir a probabilidade de ocorrência desta falha, utiliza-se os fatores de carga para definir os carregamentos de projeto dos componentes do trem de pouso, como indicado no item 6.3.2, de forma a maximizar o carregamento estrutural. Além disso, a dimensão máxima admissível para uma trinca presente na estrutura também é definida de forma criteriosa, visando a minimização da probabilidade de falha por fatura.

Sob o ponto de vista das atividades de manutenção, tal como já citado para o mecanismo de fadiga, a redução da probabilidade de falha por fatura é obtida com a verificação das dimensões das trincas presentes nos componentes, as quais não devem ultrapassar a dimensão crítica recomendada para as mesmas.

6.3.4.4) Corrosão

Segundo GENTIL, [65], corrosão é o processo espontâneo de deterioração de um material, em geral metálico, por ação química ou eletroquímica do ambiente, aliada ou não a esforços mecânicos.

Sob o aspecto dos mecanismos de falha do trem de pouso, o processo de corrosão tende a degradar a resistência estrutural, seja por reduzir a espessura dos componentes estruturais ou por degradar as propriedades mecânicas do material, principalmente a resistência à fadiga. Portanto, a corrosão não é exatamente um mecanismo de falha, mas sim, um fator de aceleração para a ocorrência de outros mecanismos de falha já descritos neste trabalho.

Segundo FUJIMOTO e GALLAGHER, [55], é usual a ocorrência de corrosão por pites em componentes estruturais de trens de pouso, os quais podem ser considerados pontos de nucleação de trincas. Segundo estes mesmos autores, a ocorrência destes pites em pontos de concentração de tensões é extremamente crítica, sob o ponto de vista de aceleração do mecanismo de falha por fadiga.

Usualmente os elementos estruturais do trem de pouso sofrem um processo de acabamento superficial que envolve a deposição superficial de um material resistente à corrosão, usualmente uma camada de cromo, ao menos no caso de aeronaves militares, ou mesmo em aeronaves civis como as fabricadas pela BOEING.

De acordo com FUJIMOTO e GALLAGHER, [55], a detecção e remoção destes pites com operações de polimento é uma atividade usualmente executada nas seqüências de manutenção de aeronaves.

6.3.4.5) Falha nos Elementos de Fixação

O trem de pouso principal possui uma série de uniões executadas com o auxílio de elementos rosqueados, as quais têm por objetivo a ligação entre elementos que compõem o trem de pouso, ou mesmo a importante ligação entre o trem de pouso principal e a estrutura da asa da aeronave.

O projeto de uniões rosqueadas usualmente segue critérios de projeto bem definidos, que levam em consideração a resistência do elemento de fixação, a espessura e a resistência

dos elementos a serem fixados e a carga a ser suportada pelos elementos de fixação, SHIGLEY, [59].

Para a obtenção de uma força de compressão entre os elementos da união, de forma a mantê-los unidos, é necessária a ação de uma força de tração no elemento rosqueado, a usualmente um parafuso. Esta força de tração é obtida com a aplicação de um torque, comumente denominado torque de aperto, sobre o parafuso.

A falha de uma junta parafusada se dá, basicamente, de três maneiras distintas, BLOCH e GEITNER, [53] :

- i) os elementos a serem fixados escorregam um sobre o outro, modificando a posição relativa entre os mesmos, mas ainda havendo contato físico;
- ii) os elementos fixados se separaram um do outro, não havendo mais contato físico entre os mesmos;
- iii) quebra do parafuso ou de um dos elementos a serem unidos.

Os modos de falha i e ii acima citados podem ser evitados com a execução de um projeto minucioso da união rosqueada, baseado num cuidadoso estudo da magnitude e natureza - estática ou dinâmica - a serem suportadas pelos elementos da união. A aplicação de um torque de aperto suficiente para garantir a resistência a estes esforços é de fundamental importância quando da montagem da união rosqueada.

Com relação ao terceiro modo de falha, BLOCH e GEITNER, [53], apresentam uma série de fatores que podem causar a quebra do elemento rosqueado, os quais são reproduzidos na Tabela 6.2.

Quanto à causa da falha, verifica-se que tanto a existência de elementos rosqueados defeituosos, como a operação do equipamento em situações que ultrapassem os limites estabelecidos em projeto, são os grandes causadores de quebra de elementos rosqueados. A parcela relacionada a problemas de montagem é bastante reduzida quando comparada às demais.

Já com relação aos modos de falha, ressalta-se a grande porcentagem atribuída aos mecanismos que envolvem a acumulação de dano, como fadiga e fluência.

Uma vedação dinâmica é empregada para controlar ou restringir a passagem de um fluido entre duas regiões distintas, quando existe movimento relativo entre os componentes que fazem parte da junta.

O elemento de vedação é um componente montado entre duas superfícies visando a restrição da passagem de fluido entre elas. Vedações estáticas, como gaxetas e anéis "O", são empregadas para prevenir vazamento em uma junta quando não há movimento relativo entre as superfícies dos elementos que a compõem.

6.3.4.6) Falha nos Elementos de Vedação

Dessa forma, a ação de manutenção em uniões rosqueadas deve envolver basicamente a verificação da presença de folga na união, pois este é um indicativo bastante preciso da deterioração da mesma. De uma forma até simplificada, pode-se afirmar que a ação de manutenção básica envolve a verificação e a manutenção do torque de aperto do elemento rosqueado, dentro dos níveis exigidos pelo projeto do equipamento.

Porém, toda vez que for necessário um reparo de um elemento rosqueado, é conveniente verificar o estado do mesmo, a fim de observar a presença de trincas, corrosão, ou deformações excessivas, que podem estar causando a redução da força de compressão que o parafuso impõe na união, o que pode levar ao "afrouxamento" da mesma. Finalmente, BLOCH e GEITNER, [54], afirmam que a taxa de falha de parafusos é da ordem de $0,001 \times 10^{-6}$ /hora a $0,007 \times 10^{-6}$ /hora.

| Causa da Falha | |
|--|----|
| Problemas do Elemento Rosqueado (fabricação, material) | 50 |
| Problemas de Operação do Equipamento | 40 |
| Problemas de Montagem | 10 |
| Mecanismos da Falha | |
| Falha por Fadiga | 40 |
| Falha por Flutuação | 20 |
| Fratura Frágil | 10 |
| Deformação Plástica | 20 |
| Corrosão | 10 |

Tabela 6.2 - Mecanismos e Causas de Falha de Elementos Rosqueados

Distribuição Percentual

De acordo com IRESON et al, [52], o principal modo de falha apresentado por elementos de vedação é a permissão da ocorrência de vazamento. Na Tabela 6.3 é apresentado um quadro que relaciona os principais mecanismos de falha de um elemento de vedação.

Tabela 6.3 - Mecanismos de Falha de um Elemento de Vedação, [52].

| Modo de Falha | Mecanismo de Falha | Causa da Falha |
|---------------|---------------------|---|
| Vazamento | Desgaste | Presença de contaminantes, lubrificação inadequada |
| | Deformação Elástica | Temperaturas muito elevadas, acima da recomendada para a utilização do elemento |
| | Distorção | Desalinhamento, falta de circularidade do eixo, excentricidade do elemento de vedação |
| | Dano Superficial | Lubrificação inadequada |

Já na Tabela 6.4 são apresentadas taxas de falha médias para alguns tipos de elementos de vedação.

Tabela 6.4 - Taxas Médias de Falha de Elementos de Vedação, [54].

| | |
|-------------------|---------------------------------|
| Vedador | Taxa de Falha (x 0,000001/hora) |
| Anéis "O" | 0,1 a 0,7 |
| Selos Hidráulicos | 8,0 a 10,0 |
| Selos Mecânicos | 25,0 a 200,0 |

Sob o ponto de vista de execução da manutenção deste tipo de componentes, pode-se afirmar que o modo de falha vazamento não dá sinais de evolução da falha, simplesmente ocorrendo em um dado momento. Porém, caso durante alguma operação de desmontagem do equipamento, seja possível verificar o elemento de vedação, há a possibilidade de execução de uma avaliação do mesmo, permitindo a observação de danos superficiais, desgaste ou distorções, que são indicadores de evolução de um dado mecanismo de falha, a qual pode causar a ocorrência de vazamentos. Neste caso, cabe à equipe de manutenção não apenas trocar o elemento de vedação, mas também, procurar identificar as causas do mecanismo de falha, visando a sua eliminação, afim de evitar ou reduzir a possibilidade de futuros vazamentos.

Após a avaliação dos principais mecanismos de falha associados aos modos de falha dos componentes do trem de pouso principal, pode-se avaliar a consequência da falha nos mesmos sobre a operação do trem de pouso e da própria aeronave.

A metodologia mais adequada para o estudo do efeito da propagação da falha de um componente sobre o sistema é o FMEA, tal como indicado no Capítulo 4. Desse modo, aplica-se esta técnica para avaliar os efeitos de eventuais falhas dos componentes do trem de pouso principal sobre a operação do mesmo.

Para a elaboração do FMEA, é necessário conhecer o diagrama da Figura 6.9, identificando os principais componentes da estrutura do trem de pouso principal, bem como a relação entre estes componentes, de modo a estabelecer como a falha em um dos componentes afeta o conjunto do trem de pouso e a aeronave como um todo.

O FMEA é apresentado na Tabela 6.5 e alguma simplificação se faz necessária em virtude de não se possuir dados numéricos relativos às taxas de falha exatas para cada componente do trem de pouso principal do EMB-120.

O trem de pouso é um componente essencial para a aeronave em suas manobras de solo, sobretudo no pouso e na decolagem em virtude das velocidades envolvidas. Assim, a ocorrência de uma falha poderá estar sujeitando o avião a um acidente de grandes proporções. Ressalta-se que a falha em qualquer um dos componentes do trem de pouso principal, como visto no FMEA da Tabela 6.5, pode afetar todo o sistema do trem de pouso. Para efeito de exemplo, uma falha no amortecedor, como a falta de pressão, poderá ocasionar impactos na estrutura e rompimento dos componentes de fixação, causando o desprendimento do conjunto, o que é uma falha gravíssima. Portanto, toda atenção deve ser dedicada aos diversos componentes do trem de pouso, de modo a gerar um eficaz plano de manutenção que impeça a ocorrência de falhas como a descrita acima, por meio da adoção da política correta requerida por cada um de seus itens, em nome da segurança da aeronave e de sua eficiência operacional.

Tabela 6.5 - FMEA Simplificado para a Estrutura do Trem de Pouso Principal do EMB-120

| Item | Função | Falha | Causa | Efeitos | Observações |
|----------------------------|--|---|--|---|---|
| Conjunto das Rodas | Contato da aeronave com o solo | Desgaste dos pneus, fadiga | Cargas das manobras em solo | Estouro dos pneus, trincas | Impactos na estrutura do trem de pouso |
| Estrutura Interior | Atuar como pista do amortecedor /suspensão | Fadiga | Cargas cíclicas atuantes em sua operação normal, impactos em manobras | Trincas na estrutura inferior, deformações | Risco de fratura da estrutura do trem de pouso |
| Estrutura Superior | Suspensão do conjunto | Fadiga da estrutura e molas do amortecedor, desgaste dos elementos do amortecedor | Cargas cíclicas atuantes em sua operação normal, fluido do amortecedor, impactos em manobras | Trincas na estrutura de vazamento de fluido do amortecedor, travamento da asa da aeronave | Risco de fratura da estrutura do trem de pouso e danos severos à aeronave |
| Componentes de Fixação | Fixação e articulação do conjunto | Fadiga dos elementos rosqueados, desgaste e corrosão dos elementos de fixação, deformações | Cargas da operação normal, impactos em manobras, ambiente contaminado | Trincas nos elementos de fixação, deformações, torque de aperto | Risco de desprendimento do conjunto de manobras de solo |
| Tesoura de Torque ("Link") | Manter alinhamento das rodas sempre à frente | Fadiga nas alavancas, corrosão e desgaste dos elementos de fixação à estrutura do trem de pouso | Cargas da operação normal, ambiente contaminado (corrosão) | Folgas e deformações na tesoura de torque | Dificuldade em manter o controle direcional da aeronave no solo |

6.3.5) Proposta de Procedimento de Manutenção do Trem de Pouso Principal

Neste item do trabalho, a partir da definição dos modos de falha dos componentes do trem de pouso apresentados no item 6.3.3, e considerando os fundamentos da modelagem e evolução destes modos de falha, procura-se desenvolver a proposta de um plano de manutenção para os componentes do trem de pouso principal.

Nesta proposta de plano de manutenção, procura-se levar em consideração tarefas de manutenção periódicas, levando em conta a operação normal da aeronave.

Eventos como RTO, extensão do trem de pouso em velocidades acima dos 190 kt [48], colisão com pássaros e pousos duros - que devem ser relatados nos diários de bordo por exigência regulamentar, [38] - já exigem inspeção específica, dividida em duas etapas compostas pela inspeção de numerosos itens [48], sendo que se a primeira resultar negativa, não haverá necessidade de proceder à etapa seguinte. Por isso, os procedimentos de manutenção aqui listados referem-se apenas às tarefas programadas. Há de se ressaltar que como prática de manutenção calendarária, após cada pernoite (pernoite é definido como a imobilização da aeronave por mais de 4 horas seguidas) ou a cada nova tripulação que assume o voo, uma inspeção superficial é obrigatoriamente realizada, sendo que dela consta a verificação do estado dos trens de pouso, quanto à presença de trincas e deformações da estrutura e estado dos pneus e rodas, [38].

Segundo HEMKE [4], os componentes do sistema analisado devem obedecer aos limites de serviço, pois seus modos de falha exigem intervenções periódicas, limites de desgaste, pois é um sistema mecânico que se movimenta e há contato entre peças metálicas nestes movimentos, limites de reparo, pois a dimensão de alguns furos de seus elementos deve ser controlada, além de sua relação com os limites operacionais, pois o peso máximo de decolagem, o peso máximo de pouso e a velocidade vertical de descida são parâmetros de bastante importância para a operação do trem de pouso. Assim, o procedimento de manutenção elaborado neste trabalho estará baseado nos modos de falha desgaste e fadiga, os quais afetam todos os seus componentes. Como a fadiga é um modo de falha progressivo e o desgaste conduz a taxa de falhas destes componentes a apresentar um comportamento crescente, as tarefas relacionadas terão uma ênfase preventiva, de caráter programável.

A periodicidade estimada para as intervenções leva em conta o emprego regional destas aeronaves, onde se tem sua utilização intensa em dias de semana e em muitas ocasiões, sua paralisação aos fins de semana, sobretudo aos domingos, como cita SILVA, [35]. Assim, as intervenções serão baseadas em múltiplos de uma semana, quando a aeronave pode realizar aproximadamente 50 ciclos (em geral, menos do que isto). Os danos progressivos, como as deformações, podem ser examinados a intervalos maiores

Tendo-se estas considerações a respeito dos modos de falha nos componentes, o procedimento de manutenção proposto para cada um deles pode ser expresso nas seguintes linhas gerais :

i) conjunto das rodas :

- inspeção visual diária verificando a presença de trinças e deformações;

- calibragem periódica dos pneus a cada 50 ciclos (semanal), pois a correta pressão dos pneumáticos é condição para a segura operação da aeronave, sobretudo em caso de chuva;

- substituição no caso de RTO devido ao intenso calor gerado na frenagem e às deformações na banda de rodagem;

- exame visual da banda de rodagem no caso de pouso duro e substituição dos pneus no caso de cortes ou bolhas;

- inspeção periódica, podendo ser semanal ou a cada 50 ciclos, nos freios, examinando suas marcas de desgaste (indicadores), para verificar o limite de desgaste e substituição dos conjuntos quando requerido, constatado pela observação dos indicadores;

- inspeção periódica (mensal ou a cada 200 ciclos) dos cubos de roda, desmontando o conjunto das rodas (inclusive os freios) para verificar a presença de trinças por meio de líquido penetrante, ou verificar a presença de deformações utilizando gabaritos de medição pois as solicitações neste componente provocam sua flexão e impactos podem dar origem à trinças ou acelerar as trinças já originadas por fadiga, substituindo os cubos em caso de serem detectados danos desta monta;

- limpeza e lubrificação periódica dos cubos de roda, podendo ser realizada a cada 200 ciclos (ou 1 mês) e substituição no tempo limite indicado pelo fabricante;

ii) estrutura interior do amortecedor :

- verificação diária : esta peça faz as vezes de pistão do amortecedor além de suportar cargas verticais em todas as manobras. Por isso, recomenda-se a verificação periódica (diária) visual de seu estado geral - corrosão, presença de trinças e deformações, presença de vazamento de fluido do amortecedor (os quais podem ser resultado de sobrecargas durante o pouso), presença de riscos, sobretudo estrias longitudinais que indicariam a ocorrência do contato indevido entre peças metálicas em virtude do desprendimento ou deformação de partes internas do amortecedor, devendo ser esta peça substituída no caso de serem constatados estes danos;

- limpeza para retirada de partículas com fluido específico (solvente mineral) impellido por ar comprimido e lubrificação com graxa de sabão de lítio aplicada com almotolia ou engraxadeira a ar comprimido a cada 200 ciclos;

- verificação visual das condições do ponto de ligação da tesoura de torque mensalmente ou a cada 200 ciclos, checando visualmente - nestes 200 ciclos - quanto à presença de deformação dos furos, folga nos pinos e sinais de partículas metálicas, indicando tratamento das articulações, desmontagem da tesoura de torque a cada 2400 ciclos, medição com paquímetro, dos furos e pinos para verificar se estão dentro dos limites de desgaste, utilização de calibradores para controlar o formato dos furos e substituição do componente para reparo nos furos no caso de furos ovalados ou excessivamente desgastados;

- lubrificação a cada 200 ciclos dos pontos de ligação da tesoura de torque com graxa de sabão de lítio aplicada por almotolia ou engraxadeira a ar comprimido. Esta política preventiva está associada aos modos de falhar dominantes neste sistema, quais sejam desgaste e fadiga.

iii) estrutura superior do amortecedor :

- verificação diária : por sua complexidade, é a parte do trem de pouso que mais atencões requer, pois, como visto no FMEA da tabela 6.5, sua falha repercute em todo o trem de pouso e até mesmo, na estrutura da aeronave. Por isso, recomenda-se a verificação periódica (diária) visual ou preferencialmente com o emprego de lanternas do estado geral, presença de corrosão, presença de trincas e estado da pintura (é o único componente pintado do trem de pouso) pois a tinta aplicada neste componente é bastante elástica e o aparecimento de trincas ou alteração em sua aparência podem indicar a presença de danos de maior monta originados por fadiga ou choques, proceder a uma revisão de hangar - prevendo a medição do componente e ensaios não destrutivos, sobretudo o líquido penetrante - no caso de haver irregularidades denotadas pela presença de trincas e alterações na pintura do componente, com a possível substituição do componente se forem constatados danos de maior monta como trincas, sinais de corrosão ou deformação; No caso de serem constatados danos que denotem a ocorrência de desgaste acentuado ou trincas originadas por fadiga e choque, o componente deve ser substituído, pois além de sua função estrutural, tem-se o fato da estrutura superior conter a pressurização do amortecedor, sendo que qualquer dano pode vir a inutilizá-la para estas funções;

- retirar anualmente (aproximadamente 2400 ciclos) para inspeção geral o conjunto da perna do trem principal, checando estado e dimensões dos pinos, presença de trincas ou partículas metálicas por meio de ensaio não destrutivo, verificar estado do ponto de ligação à tesoura

- verificar o estado da fixação às asas, visualmente a cada 200 ciclos, e a cada 2400 ciclos retirar o conjunto e examinar, por meio de ensaios não destrutivos e medição de suas dimensões para verificar o desgaste sofrido, pois são os elementos que transmitem os esforços à estrutura das asas, podendo sofrer avarias sob impactos ou sobrecargas além do desgaste natural devido ao movimento do trem, pois estes componentes cumprem também a função de articulações;

- verificar mensalmente (ou a cada 200 ciclos), visualmente, o estado dos pontos de ligação ao mecanismo de arrasto, deformações nos furos, folgas excessivas, interior, sinais de partículas metálicas, a cada 2400 ciclos, desmontar o mecanismo de arrasto, medindo os pinos e furos e utilizando calibradores para verificar deformações, substituindo o componente se forem encontrados danos ou desgastes acima do limite recomendável, o mesmo se aplicando para os pontos de ligação à tesoura de torque;

- verificar e reabastecimento periódico a cada 200 ciclos (mensalmente) de fluido MIL-H-5606, verificar a pressão interna e realizar a pressurização com gás BB-N-411 (amortecedor) por meio de dispositivo provido de manômetro para a exata calibração do amortecedor, com a aeronave sobre macacos e sem desmontar o trem de pouso, utilizando-se dos terminais de pressão da parte superior da estrutura, desmontagem dos amortecedores a intervalos fixos, porém espaçados, podendo ocorrer a cada 2400 ciclos (1 ano), para substituição periódica do diafragma, molas e verificação do estado dos orifícios de restrição e da câmara do amortecedor, nesta ocasião, substituir "o rings";

- verificar diariamente quanto a sinais de vazamento do fluido do amortecedor pelo ponto de reabastecimento/pressurização, pois o amortecedor é pressurizado, permitindo que atue como mola da suspensão e vazamentos causados por desgastes de vedações ou sobrecargas em sinal de que a pressão interna é insuficiente, comprometendo a segurança nas manobras em solo a altas velocidades, substituir os terminais da extremidade superior, reabastecer o amortecedor e verificar novamente;

- verificar diariamente a presença de sinais de impacto contra passaros ou pequenos objetos, substituir o componente no caso de haver sinais de impactos mais fortes ou de remoção da pintura;

- verificação visual diária e verificação periódica do estado geral, sinal de partículas metálicas, recolhendo a aeronave ao hangar se forem encontrados sinais de partículas metálicas, estado das alavancas da tesoura, estado dos pinos e das furções a cada mês ou a

v) embora não faça parte da estrutura analisada, a tesoura de torque :

(200 ciclos);

pinos e parafusos, por isso, não são inspecionadas a cada ano (2400 ciclos), mas a cada mês podendo vir a sofrer desgaste acentuado e fadiga em alguns de seus componentes como sobrecargas, sendo solicitadas também quando do recolhimento/extensão do trem de pouso, exigidas durante as manobras dependentes do trem de pouso e particularmente sensíveis à espáduas, etc.), tarefas a serem executadas a cada 200 ciclos. Estas peças são duramente fixação para substituição e ajuste das peças (artueas, suporte de mancal, porcas, almotolia), verificar a presença de partículas metálicas e desmontagem do conjunto de (engraxadeira a ar comprimido, pois a localização destes componentes não permite o uso de para o reaperto, a aeronave esteja sobre macacos, lubrificação com graxa de sabão de lítio torquímetro, observando que, tanto para a desmontagem dos componentes de fixação, como - e reaperto periódico (mensal ou a cada 200 ciclos) das porcas e parafusos com - desmontagem dos componentes de fixação - sem a necessidade da retirada do trem de

trincas ou deformações;

substituídas, pois são em sua maioria elementos rosqueados, os quais não admitem desgaste, indícios de peças rompidas, estas peças, se desgastadas, devem ser imediatamente uma revisão de hangar se forem encontrados, visualmente, sinais de folgas excessivas ou soltas, utilizando torquímetro e estando a aeronave apoiada sobre os macacos, proceder a rompidas, ou o recolhimento da aeronave ao hangar para o simples reaperto das peças soltas ou rompidas, promovendo sua substituição no caso de serem encontradas peças - verificação periódica (diária) do estado geral dos componentes, presença de folgas, peças

iv) componentes de fixação :

de falha relatados, exigem a substituição dos componentes afetados; reveladas por meio de ensaios não destrutivos, que denotam danos ocasionados pelos modos acentuado, comprovado pela medição dos componentes, deformações, ou de trincas modos de falhar mais comuns a fadiga e o desgaste, sendo que a presença de desgaste de todos os pontos de articulação com graxa de sabão de lítio, tendo este componente como de torque, estado dos furos e dos pinos, sinais de partículas metálicas, limpeza e lubrificação

cada 200 ciclos, substituindo as peças desgastadas, ou todo o conjunto se as alavancas da tesoura estiverem deformadas

- lubrificação a cada 200 ciclos com graxa de sabão de lítio dos pontos de articulação;

vi) conjunto do trem de pouso principal :

- limpeza com solvente mineral específico para esta tarefa impellido por ar comprimido e lubrificação periódica, ambas a cada 200 ciclos (mensal), observação diária dos relatórios de voo da aeronave (redigidos pelos pilotos), realizando as verificações e reparos se necessário;

- remoção, posicionando a aeronave em cavalete próprio para esta operação e desmontagem de todo o conjunto (anualmente), incluindo rodas e seus acessórios, estruturas inferior e principal, dispositivos de fixação, tesoura de torque e mecanismo de arrasto, pois são componentes sujeitos à fadiga, modo de falha que os faz atingir o tempo limite indicado pelo fabricante. Nesta ocasião, todas as tarefas descritas anteriormente para a manutenção dos componentes do trem de pouso devem ser realizadas (verificações, medições, calibração do amortecedor, substituição de componentes desgastados, etc.).

Os mecânicos que lidam com aeronaves são especializados, ou seja, apenas trabalham com estruturas, ou motores, ou sistemas hidráulicos, etc. Por isso, nas revisões realizadas em hangar como as de 200 e de 2400 ciclos, várias partes do avião são examinadas simultaneamente por diversas pessoas, para que a disponibilidade da aeronave seja a maior possível. Uma empresa do porte da RIO-SUL (subsidiária regional da VARIIG - Viação Aérea Rio-grandense), que é a maior operadora de EMB-120 da América Latina, ocupa um dia inteiro, ou três turnos de trabalho de oito horas cada um, envolvendo todas as áreas de manutenção, como estruturas, trem de pouso, motores e hélices, aviônicos - instrumentos de cabine - e medidores, sistemas hidráulicos e pneumáticos, sistemas elétricos, combustível, controles de voo e interiores, sendo as áreas típicas para a manutenção de um avião a hélice, como afirma HEMKE, [4]. Já a revisão de um ano, dura no mínimo uma semana, sendo de cinco a sete dias de três turnos de trabalho a duração da indisponibilidade da aeronave, observando que todas as áreas da manutenção estarão trabalhando juntas na mesma.

O conjunto do trem de pouso (cubos de roda, estrutura inferior, estrutura superior, tesoura de torque e componentes de fixação) tem um tempo limite, que sinaliza para o fim de sua vida útil, como comentado na seção 5.3 deste trabalho, indo o qual, qualquer que

seja seu estado, deve ser retirado e substituído, devendo o conjunto retirado ser destruído. Esta prática é uma imposição da regulamentação aeronáutica para itens cuja vida útil e modo de falhar sejam conhecidos. No caso do trem de pouso, o desgaste e, principalmente, a fadiga, são os mecanismos pelos quais o conjunto atinge o fim de sua vida útil. Para a estrutura de uma aeronave regional, a vida útil está, de acordo com as normas brasileiras e americanas (respectivamente CTA - Centro Técnico Aeroespacial e FAA - do inglês "Federal Aviation Administration"), prevista para um valor em torno de 60000 ciclos, e assim deve ser com o trem de pouso. Portanto, ao redor dos 60000 ciclos, qualquer que seja o estado do trem de pouso, o mesmo deve ser substituído.

Alguns dos componentes do trem de pouso principal (como as estruturas inferior e superior do amortecedor) são reparáveis. Isto significa que, se não tiverem atingido o fim de sua vida útil (tempo limite) ou não apresentarem danos excessivos, podem ser reparados (como a colocação de buchas em furos excessivamente desgastados), retornando à operação. Como comentado na seção 5.3 deste trabalho, os ciclos de voo das peças são cuidadosamente controlados, permitindo monitorar com exatidão todo o histórico da peça, o que impede que um componente que já tenha atingido o fim de sua vida útil seja reparado e volte a operar.

A falta de dados numéricos impossibilita determinar exatamente os períodos mencionados no procedimento, porém, o importante é ter em mente a possibilidade e a exigência de se realizar tarefas programadas, no caso preventivas, ao lado de verificações não programadas, mas previstas por regulamentos.

A comparação com a publicação do fabricante, já que estão sendo levadas em consideração apenas as tarefas programadas, devem ser feitas com base no MPG, ou guia de planejamento de manutenção, onde o fabricante lista os prazos de todas as tarefas relacionadas a cada sistema ou componente, desde sejam tarefas programadas. Logo, nem todos os sistemas de uma aeronave estão presentes no MPG, principalmente, aqueles

sujeitos a ocorrência de falhas aleatórias. O MPG é surpreendentemente sucinto, estabelecendo prazos em FC (ciclos de voo) ou FH (horas de voo).

A Tabela 6.6, adaptada do MPG do EMB-120, [51], mostra as ações programadas para a estrutura da perna do trem de pouso principal.

Tabela 6.6 - Periodicidade das Tarefas Relacionadas no MPG da Aeronave EMB-120, [51]

| ITEM | TIPO DE TAREFA | DESCRIÇÃO | Nº DA TAREFA | PERIODICIDADE |
|----------------------------|----------------|---|--------------|---|
| Conjunto do trem principal | Diária | verificar trinças e vazamento | | 24 ou 75 FH |
| Amortecedor | Serviços | reabast. e pressurização | 32-01 | 2400 FC ou 1 ano |
| Amortecedor | Substituição | válvulas | 32-03 | 15000 FC |
| Amortecedor | Substituição | lubrificar molas | 32-05 | 400 FC (cheque A) |
| Amortecedor | Substituição | substituir molas | 32-06 | 15000 FC |
| Mecanismo de artasto | Substituição | substituir estrutura auxiliar | 32-07 | 15000 FC |
| Conjunto de trem principal | Inspeção | funcionamento | 32-24 | C ou 2 anos |
| Conjunto de trem principal | Lubrificação | mecanismo por gravidade | 32-32 | 2C ou 4 anos |
| Freios | Inspeção | funcionamento e desgaste | 32-30/45 | indeterminado |
| Estrutura | | | 32-48/49 | NT - a critério do fabricante do componente |
| Cubos de roda | | | 32-54/56 | NT - a critério do fabricante do componente |
| | | Revisão A - 400 FC Revisão C - 4000 FC | | |

Pelas normas brasileiras de homologação de aeronaves (CTA) e pelas americanas (FAA), os tempos limite (vida útil) de alguns componentes são, [51] :

- buchas, "torque link", pinos : 104054 FC;

- estrutura da perna do trem principal : 90000 FC;

- pistão e tubo interno do amortecedor : 30000 FC;

- molas do amortecedor : 12000 p/ mola inferior, 15000 p/ mola superior;

As normas britânicas (CA/UK), menos tolerantes, a serem também adotadas pela comunidade europeia prevêem, [51] :

- buchas, torque link, pinos : 69369 FC;

- estrutura da perna do trem principal : 60000 FC;

- pistão e tubo interno do amortecedor : 20000 FC;

- molas do amortecedor : 12000 p/ mola inferior, 15000 p/ mola superior;

Se uma aeronave realizar ao redor de 2400 ciclos por ano, como estima o MPG [51], pelas normas americana e brasileira (FAA/CTA) o trem de pouso principal só precisaria ser substituído completamente após aproximadamente 37,5 anos de uso, o que representa mais que os 60000 ciclos para o qual a aeronave foi concebida, segundo SILVA [35]. Trata-se de um componente robusto, aliás trata-se de uma aeronave robusta, que permitiu o desenvolvimento de uma família de jatos (ERJ-135 e ERJ-145) a partir de sua célula básica. Evidentemente, as condições operacionais reais tendem a encurtar a vida útil da estrutura da perna do trem de pouso principal, pois há uma gama enorme de fatores imprevisíveis.

O MPG [51] parece pouco detalhado, mas sua função é apenas e tão somente possibilitar a estruturação de uma oficina de manutenção de forma a cumprir os prazos recomendados pelo fabricante. Algumas tarefas são explicadas em detalhes, especificamente no capítulo 32, que é uma identificação universal prevista pela norma ATA-100 (*Air Transport Association of America*), que trata da padronização para publicações técnicas aeronáuticas civis, para designar o sistema de trem de pouso. Nos manuais da BOEING, AIRBUS, EMBRAER, CESSNA e qualquer outro fabricante de aviões civis, o trem de pouso ocupará sempre o capítulo 32.

Da comparação entre o procedimento proposto e o estabelecido pelo MPG [51], nota-se que os conceitos de confiabilidade são especialmente úteis no estabelecimento de uma política de manutenção, o que inclui análise dos sistemas e solicitações envolvidas em sua operação, até chegar no estabelecimento das práticas a serem adotadas, ao menos para sistemas que permitam manutenção programada. O emprego dos conceitos de confiabilidade permitiram elaborar uma política mais detalhada que o MPG da aeronave EMB-120, pois os modos de falha foram cuidadosamente analisados, permitindo justificar a realização de determinadas tarefas. Evidentemente, muitas hipóteses simplificadoras foram feitas e há que

se considerar o fator humano na manutenção, o qual pode modificar todo um planejamento em função de aspectos como treinamento de mão de obra, imperfeições na manutenção (que vão acentuar os modos de falha existentes e favorecer a ocorrência de outros, [6]) e a percepção de novas situações, as quais, por melhor que seja a motivação teórica envolvida com a política de manutenção, apenas o conhecimento profundo a respeito do equipamento operado pode revelar e isto, ao longo do tempo. Este conhecimento do equipamento permitiu que o MPG elaborado pelo fabricante seja menos conservador que a política de manutenção para o trem de pouso proposta neste trabalho, sendo que seu nível de detalhamento visa contribuir para a operação segura e confiável da aeronave.

6.4) Elaboração de Procedimento de Manutenção da "TRANSFER BOX" do EMB-120

Procedimento semelhante ao empregado para o trem de pouso principal será realizado com este componente do piloto automático, constituído por componentes funcionais exclusivamente elétricos envolvidos por uma caixa de alumínio hermeticamente selada, sujeitos principalmente a falhas aleatórias, como afirma O'CONNOR [3]. Assim, serão pesquisadas as medidas a serem tomadas no caso destes componentes, tendo em mente a importância de suas funções na segurança da operação da aeronave. As decisões possíveis à manutenção serão propostas e comparadas com os manuais da aeronave.

6.4.1) Apresentação do Sistema

A "TRANSFER BOX" é um dispositivo de transferência fabricado pela EMBRAER a partir de reles e diodos comprados prontos, cuja função é enviar os sinais dos dois computadores que controlam o piloto automático para os quatro servo-motores que acionam as superfícies de controle da aeronave (*ailerons*, leme, profundores e compensadores), além de fornecer ao painel do piloto automático informações sobre a desconexão de algumas das superfícies de controle ao final de manobras programadas, indicando que o piloto automático não mais estará atuando até que seja comandado novamente. A Figura 6.22 mostra o esquema de funcionamento para o sistema de piloto automático, do qual o componente estudado faz parte e a Figura 6.23 mostra a localização da "TRANSFER BOX", que é aparafusada à estrutura da aeronave.

Para compreender o funcionamento deste componente, é necessário conhecer o funcionamento do sistema de piloto automático (A/P) da aeronave EMB-120. Então, este

Figura 6.23 - Localização da "TRANSFER BOX" na Cabine de Comando, [48]

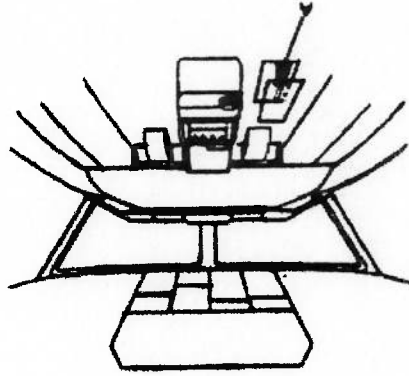
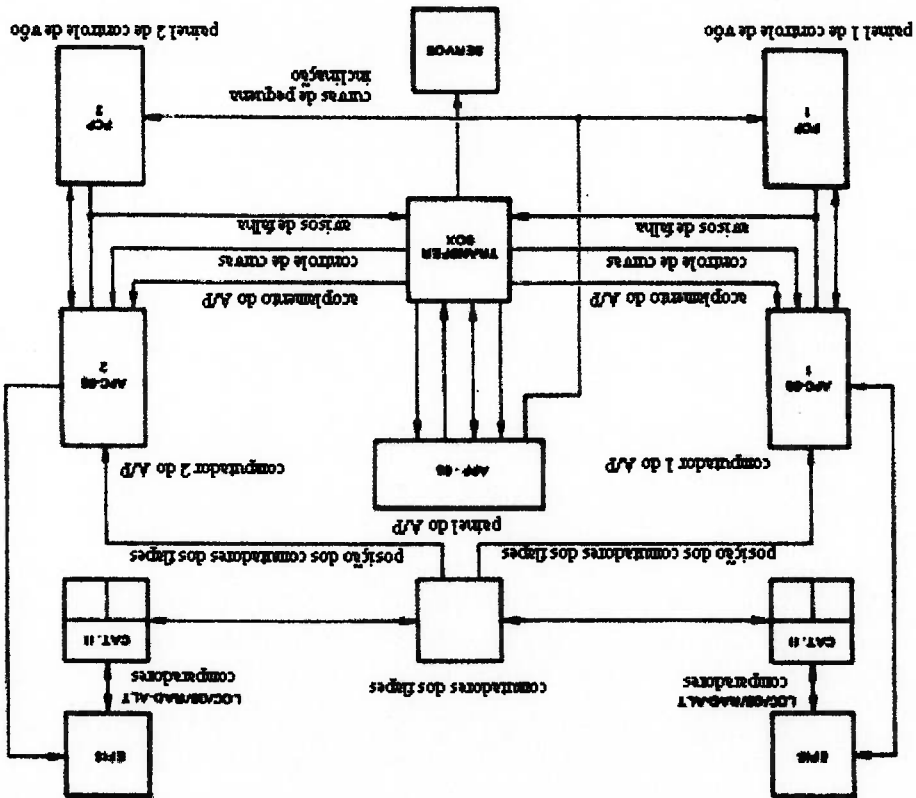


Figura 6.22 - Esquema de Funcionamento do Piloto Automático do EMB-120, [48]



trabalho pretende apresentar um relato sucinto sobre a operação do A/P, detalhar os componentes da "TRANSEFER BOX", a exemplo do que foi feito com a perna do trem principal, pesquisar os modos de falha destes componentes e estabelecer uma política de manutenção para a "TRANSEFER BOX".

Algumas considerações a respeito da confiabilidade de componentes elétricos devem ser feitas, já que a eles é atribuída a característica de falhar aleatoriamente, o que dificulta sua manutenção. O'CONNOR [3] cita o fato de que estes tipos de componentes apresentam taxas de falhas que podem ser assumidas como constantes, sobretudo se for considerado um sistema de componentes elétricos. Um dos argumentos do autor em referência é que a predição da confiabilidade de um sistema eletrônico é frequentemente sujeita a largas margens de erro. Logo, não faz muita diferença assumir taxa de falhas constantes para equipamentos elétricos, sobretudo no caso de sistemas reparáveis, onde haverá componentes de diferentes idades e qualidades, além de ações imperfeitas de manutenção.

A conjugação destes fatores segundo O'CONNOR [3], induz, ao menos em sistemas elétricos reparáveis, como é o caso da "TRANSEFER BOX", a ocorrência de taxas de falhas constantes.

6.4.2) Breve Descrição do Funcionamento do Piloto Automático e da "TRANSEFER BOX"

Ao sistema de controle da aeronave denominado de "piloto automático", cabe a função de manter o avião em sua rota e altitude programados, a execução automática de determinadas manobras rotineiras - como aumento e redução na altitude, curvas e aproximações para pouso por instrumentos - estando integrado a outros sistemas que controlam a velocidade e a potência aplicada à aeronave.

No que tange ao componente analisado, as funções de interesse dizem respeito ao controle da trajetória e da atitude (posição da aeronave com relação aos seus três eixos), pois são os resultados da deflexão das superfícies de controle, quais sejam :

- os ailerons (do francês "aileron"), que controlam a inclinação da aeronave em relação ao eixo longitudinal, dita rolagem;

- o leme, que controla a inclinação em torno do eixo vertical, dita guinada e

- os profundores, que controlam a inclinação em torno do eixo transversal da aeronave, dita aragem.

A localização das três superfícies citadas, em qualquer aeronave, pode ser visualizada na Figura 6.24.

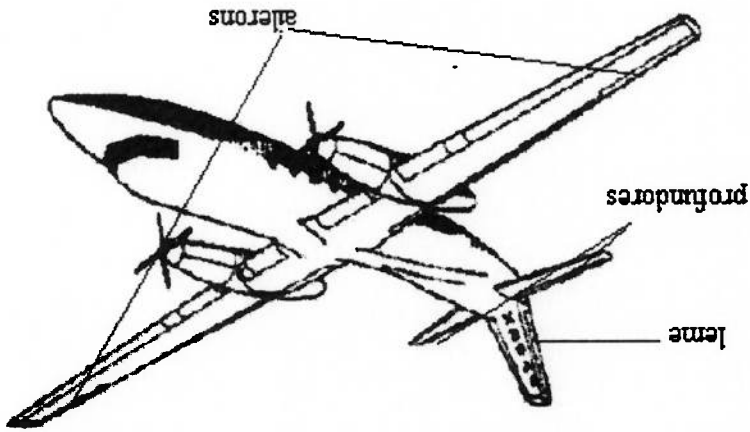


Figura 6.24 - Localização das Superfícies de Controle de uma Aeronave.

Além destas três superfícies, para cada um dos eixos tem-se os compensadores, que nada mais são do que pequenas superfícies de controle cuja função é compensar pequenos desvios na atitude (a palavra é esta mesmo) da aeronave causadas por desbalançamento de como a movimentação de passageiros em seu interior ou a redução na quantidade de combustível durante o voo, que altera a posição do centro de gravidade da mesma, ou por pequenas variações na intensidade e direção da velocidade do vento.

A "TRANSFER BOX" é responsável ainda pelos avisos de desconexão das superfícies de controle percebidos no painel do piloto automático, quando a aeronave completa manobras programadas para serem executadas por este recurso. Após completada a manobra, o computador do piloto automático (APC65 1 ou 2) passa à programação seguinte - se houver - ou retorna a aeronave ao controle manual do piloto.

No console do piloto automático (AP do inglês "AUTO PILOT"), o tripulante insere vários dados, como a altitude pretendida, a velocidade, a altitude, o rumo magnético (proa) ou estação de VOR - do inglês "VHF Omnidirectional Range", conhecido em português apenas pela sua sigla VOR - o qual é um importante auxílio à navegação por meio de sinais de rádio que orientam a trajetória da aeronave com relação à localização da antena de VOR

(ou estação) a partir de 360 divisões denominadas de radiais. Assim, um VOR é definido por uma frequência VHF (108,00 MHz a 117,95MHz, com divisões de 50 Hz), como afirmado em [48] mais a radial em graus que se pretende seguir - além de dados particulares a cada novo voo.

Este valores, no EMB-120, são enviados para os computadores de voo do AP (APC65 1 e 2), estes os verdadeiros responsáveis pela geração dos sinais de 28V (corrente contínua) para a "TRANSFER BOX", a partir dos dados obtidos por meio de diversos sensores de pressão e giroscópicos, como afirma o manual desta aeronave [48].

A Figura 6.25 mostra a ligação da "TRANSFER BOX" com os motores hidráulicos que acionam as superfícies de controle da aeronave.

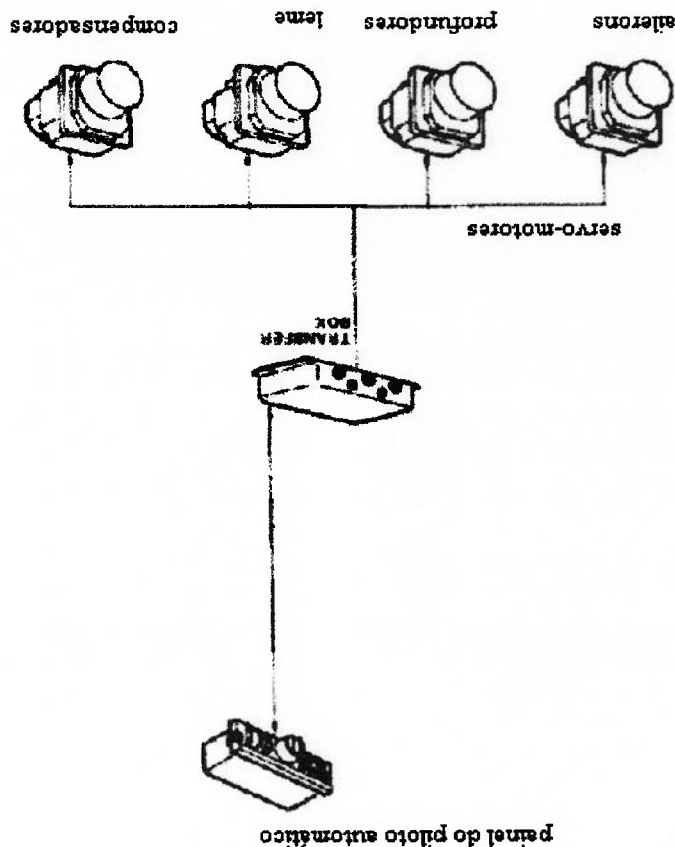


Figura 6.25 - Esquema da Conexão da "TRANSFER BOX" com os Servo-Motores das Superfícies de Controle, [48].

De todas as funções concernentes à *"TRANSFER BOX"* a mais solicitada é a atuação dos compensadores, os quais, em algumas situações, vibram em frequências da ordem de 20Hz ou mais, para manterem a atitude (inclinações, proa e altitude) da aeronave na presença de alterações atmosféricas, notadamente a velocidade do vento, a qual varia vetorialmente (intensidade e direção).

Trata-se de um componente simples em comparação ao sistema completo do AP (vide Figura 6.22), mas sem sua presença, o piloto automático não operaria as funções de controle das atitudes da aeronave, o que é mais importante que o controle da potência - outra das funções do AP - e do balanceamento da aeronave através do contínuo bombeamento de combustível entre os tanques para manter a posição do centro de gravidade. Isto porque o EMB-120 é uma aeronave veloz (cruzando a cerca de 600 km/h) e que voa a altitudes elevadas (cerca de 7500 m - 25000 ft - acima do nível do mar), o que dificulta o controle manual e chega mesmo a impossibilitar a reação dos pilotos em um intervalo de tempo adequado ao desempenho do avião, acarretando problemas em manter a direção e a altitude de voo. Neste caso, a segurança da aeronave dependerá bastante da experiência e habilidade do piloto, sendo que em condições atmosféricas adversas, há o risco da ocorrência de acidentes como, em casos extremos, a queda da aeronave. Em geral, felizmente, o voo apenas se torna menos confortável.

Esclarecidas as funções e a importância do componente analisado nesta seção, este trabalho passará a analisar mais detidamente os fatores de influência na falha da *"TRANSFER BOX"*, verificando a relevância das solicitações encontradas em seu funcionamento normal.

6.4.3) Fatores de Influência na Falha da *"TRANSFER BOX"*

Durante sua operação normal, a *"TRANSFER BOX"* recebe intermitentemente sinais elétricos do computador de voo para acionar os servo-motores das superfícies de controle, algumas vezes simultaneamente. Assim, seus componentes sofrem um grande número de ciclos durante sua vida útil, sobretudo os dos compensadores que atuam mais frequentemente.

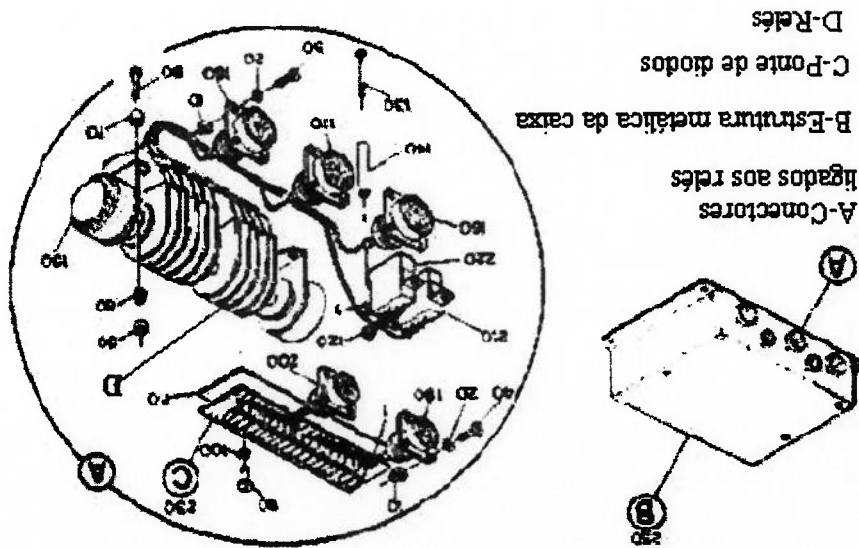
É oportuno verificar como é constituída a *"TRANSFER BOX"*, o que pode ser feito inspecionando-se a Figura 6.26, extraída de [48], onde se pode notar que a parte operacional do sistema é composta por uma grande quantidade de reles e diodos.

Aos fatores operacionais adicionam-se os fatores ambientais, como temperatura, presença de impurezas, perturbações magnéticas e elétricas externas ao sistema, fatores

componentes, prejudicando o ambiente em que operam e acelerando sua falha. esta nos picos alcançados nas variações, os quais acabam por aumentar a temperatura dos componentes elétricos, como afirma O'CONNOR [3]. Segundo este autor, o problema corrente e tensão a determinarem o fim da vida útil de diodos e relés, assim como da maioria Ainda relacionado aos fatores transitientes, tem-se as variações nos parâmetros como

uma solução eficaz, segundo O'CONNOR [3]. superdimensionar os componentes, pois deixariam de operar como projetado, ou seja, não é e corrente previstos em projeto para tais itens. É neste caso, dificilmente é suficiente de falha de componentes elétricos, pois comumente, são ultrapassados os valores de tensão O'CONNOR [3] e WASSSEL [17], a parcela transitória é de vital importância no mecanismo corrente são estáveis, com variações próximas de zero na tensão e corrente. Segundo tensão e corrente, e o regime permanente corresponde à parcela do sinal onde a tensão e a microssegundos. A parcela transitória é a parte onde os sinais apresentam alterações em sua regime transitório e o regime permanente, os dois podendo ter durações breves, da ordem de tem-se duas situações distintas entre a entrada e a saída do sinal pela "TRANSFER BOX": o Em se tratando de componentes elétricos, como é predominante neste sistema,

Figura 6.26 - Aspecto Interno da "TRANSFER BOX", [48].



difíceis de serem quantificados segundo WASSSEL [17]. Estes fatores podem fazer variar a resistividade e as características dielétricas dos componentes, provocar curto-circuitos e alterar substancialmente as características de projeto dos sistemas eletrônicos. Isto pode ser facilmente verificado no funcionamento das lâmpadas fluorescentes, onde perturbações que façam variar a tensão facilmente ocasionam o apagamento da lâmpada, ou a presença de íons próximos a televisores, capazes de distorcer as imagens.

Mas, segundo O'CONNOR [3], LEWIS [18] e WASSSEL [17], os problemas com os sistemas eletro-eletrônicos têm menos relação com os fatores operacionais, estando mais dependentes de fatores de sua qualidade. É neste tipo de sistema, segundo estas fontes, que alta confiabilidade se faz absolutamente necessária, pois sem ela, nem mesmo a utilização de dispositivos de redundância é capaz de assegurar uma operação isenta de falhas.

Em primeiro lugar, deve-se atentar para a qualidade de fabricação dos componentes elementares como diodos, resistores, capacitores e bobinas. O'CONNOR [3] menciona que, na indústria aeronáutica, deve-se testar os componentes um a um antes de sua montagem, pois o perfil de suas falhas corresponde a taxas decrescentes no início da vida útil até um comportamento de taxa de falhas constante durante a maior parte de sua utilização. Este teste inicial, denominado de "burn in", tem como objetivo eliminar componentes que têm vida útil reduzida, ou como comumente denominados, os componentes defeituosos. Nestes testes, os componentes são submetidos a solicitações que correspondem às condições de operação normal dos mesmos, durante um período de tempo pré-determinado. Este período de tempo, determinado pelo fabricante, deve ser igual ou superior ao período de tempo de correspondente à fase I da curva de variação da taxa de falhas em função do tempo de operação do componente, correspondente à mortalidade infantil, como na Figura 4.2, embora a curva da banheira não seja uma representação ideal do comportamento de componentes eletrônicos. Caso o período de tempo para a execução do "burn in" seja considerado longo, há a possibilidade de realização do ensaio denominado ESS - do inglês "Environmental Stress Screening" - o qual consiste em submeter o componente a solicitações mais severas que as encontradas pelo mesmo em sua operação normal. A aplicação de solicitações mais severas reduz o tempo para ocorrência das falhas dos itens defeituosos, diminuindo o tempo de ensaio. O único cuidado a ser tomado nesta situação é a seleção da condição de ensaio, a qual não deve ser tão mais severa que a condição de operação normal, para não degradar os componentes ditos "bons".

Na Tabela 6.7, são apresentadas taxas de falha médias associadas a alguns componentes eletrônicos, alguns dos quais empregados na montagem da "TRANSFER BOX".

Tabela 6.7 - Valores das Taxas Médias de Falha para Alguns Componentes Eletrônicos, [3]

| Tipo de Componente | Taxa de falhas (x 0,000001/h) |
|--------------------|-------------------------------|
| Resistor | 0,49 |
| Capacitor | 0,0042 |
| Diodo | 0,126 |
| Transistor | 0,105 |
| Microprocessador | 0,2555 |

Os cuidados devem se estender durante todo o processo de produção. Aliás, os cuidados relativos à obtenção de sistemas eletrônicos confiáveis, segundo WASSSEL, [17], devem ser redobrados desde a fase de projetos, pois a interação entre os componentes depois de montados nem sempre pode ser prevista da mesma forma que componentes mecânicos. Um grande inimigo dos sistemas eletrônicos é sua complexidade. É certo que nem sempre se pode fugir a esta complexidade, pois a sofisticação requerida dos sistemas é a responsável pelas configurações obtidas. Mas, quanto mais complexo o sistema, mais imprevisíveis serão os resultados da sinergia entre os componentes quando dispostos em um sistema e o projetista deve ter este fator em mente.

Outro problema levantado por WASSSEL, [17], e O'CONNOR [3], é o fato de que, por serem comprados prontos, estes componentes constituem-se em "caixas-pretas", das quais o projetista muitas vezes só possui o conhecimento das características de entrada e saída, ignorando sua operação. Se isto é favorável à rápida execução do projeto de novos sistemas, também constitui um risco inerente às inovações. WASSSEL, [17], aponta para a necessidade de que o projetista procure conhecer mais profundamente as características dos componentes comprados prontos para ter maior controle sobre as incertezas associadas ao projeto de um sistema.

Uma medida que pode resultar em sistemas eletrônicos mais confiáveis é projetá-los dentro do conceito de tolerantes à falha, seja dotando-o de alguma forma de redundância, seja empregando configurações que não causem efeitos de paralisação na

operação do equipamento, como os sistemas de comunicação preferencial apresentados na Figura 4.11, como aponta VÁRIO [11]. Além disso, a adoção de um rígido controle de qualidade de fornecedores, procurando a forma mais eficaz de testar componentes recebidos - pois em muitas aplicações, devido a cadência de produção é impossível testá-los um a um, como em uma fábrica de televisores - auxiliam na obtenção de sistemas mais confiáveis.

Durante o processo de produção, também é necessário um acompanhamento rigoroso e, segundo O'CONNOR, uma etapa bastante relevante sobre a qualidade do sistema a ser obtido é a soldagem, pois soldagens mal feitas podem ocasionar contatos deficientes, curto-circuitos e interferência entre componentes que sequer têm ligação entre si no projeto original. Esta é a causa mais comum de falhas prematuras em sistemas eletrônicos, aumentando sua participação conforme diminui o tamanho dos sistemas - "...e isto é particularmente verdadeiro em eletrônica, sobretudo quando se empregam microprocessadores..." - como afirma O'CONNOR, [3].

Por fim, o teste dos conjuntos antes de sua entrada em operação visa eliminar as montagens mal feitas (se testes de recebimento já foram executados) e este deve ser feito sempre em qualquer tipo de indústria.

As considerações tecidas aplicam-se ao projeto e fabricação dos componentes eletro-eletrônicos, mas já dão indicativos de como a manutenção deve estar situada frente a estes problemas, pois algumas variáveis operacionais estão sob seu controle. A seguir, será proposto o plano de manutenção para a "TRANSFER BOX".

Procedimento semelhante ao adotado para o FMEA do trem de pouso é efetuado para a "TRANSFER BOX", com a finalidade de estabelecer as ações a serem tomadas na manutenção deste componente. Segundo o manual de manutenção do EMB-120, [48], os componentes de maior influência na operação do piloto automático desta aeronave são o painel do piloto automático, os painéis de controle de voo (FCP 1 e 2), os computadores de voo (APC65 1 e 2), a "TRANSFER BOX" e os servo-motores. O FMEA proposto na Tabela 6.8 foi elaborado segundo as indicações fornecidas pelo manual de manutenção, [48], quando da execução dos procedimentos para debelagem de panes ("troubleshooting").

Tabela 6.8 - FMFA Simplificado para o Sistema de Piloto Automático do EMB-120

| Item | Função | Falha | Causa | Efeitos | Observações |
|---|---|---|---|---|---|
| Painel do Piloto Automático | Inserir a programação do AP e alertas | Queima de componentes internos | Oscilações na tensão e mau contato, falha na refrigeração | Ausência de avisos e alertas, falta de programação do AP | |
| Painel de Controle de Tripulantes a Voo (FCP 1 e 2) | Transmitir aos tripulantes a situação da aeronave (atitudes de voo, condições dos sistemas, informações climáticas) | Queima dos tubos de raios catódicos | Oscilações na tensão e mau contato, falha na refrigeração da aeronave | Apagamento do FCP, podendo ocorrer o apagamento de FCP, o controle deve ser feito pelos instrumentos dependentes da navegação | AP pode deixar de controlar a aeronave via informações sobre as condições da aeronave dificultando seu controle, exigindo intervenção |
| Computadores de Voo (APC65 1 e 2) | Receber e executar a programação interna do AP, transmitir avisos ao painel do AP e aos FCP 1 e 2 | Queima de componentes internos | Oscilações na tensão e falha corrente, falha nos sistemas de alimentação elétrica da aeronave | Impossibilidade de se programar funções do AP FCP 1 e 2 | O controle da aeronave só será possível manualmente, com restrições de altitude e velocidade |
| TRANSFER BOX | Transmitir aos servo-motores os sinais provenientes dos APC65 1 e 2 para execução das manobras programadas | Queima dos componentes internos, mau contato em cabos e terminais | Oscilações de tensão e calor excessivo | Não execução de manobras programadas no AP | Tripulante deve verificar quais funções não estão respondendo aos comandos do AP e assumi-las manualmente |
| Servo-Motores | Mover as superfícies de controle de voo | Vazamentos, fadiga, desgaste de componentes internos | Operação normal (idade), pressão excessiva de fluido hidráulico | Não execução de manobras comandadas pelo AP | Tripulante deve verificar quais funções não estão respondendo aos comandos do AP e assumi-las manualmente |

6.4.4) Ações de Manutenção Relativas à "TRANSFER BOX"

Os componentes da "TRANSFER BOX", sendo exclusivamente elétricos, tendem a apresentar falhas repentinas com comportamento aleatório. Porém, O'CONNOR [3] relata fatores de influência os quais, se observados, contribuem para ao menos ampliar o tempo de vida deste tipo de componente. A geração de calor excessivo, a qualidade dos componentes que podem ser montados e as oscilações na tensão e na corrente de trabalho podem ser controlados para favorecer a operação das peças elétricas.

A menos que haja variações bruscas na voltagem de trabalho da "TRANSFER BOX" (28V DC), os fatores operacionais - as solicitações verificadas durante a operação normal do sistema do AP - não auxiliam muito no estabelecimento de uma política de manutenção para seus componentes elétricos, pois conduzem a modos de falha aleatórios e sem a presença de sintomas, fato que desde já descarta a adoção das práticas preventivas relacionadas à substituição periódica de componentes, pois são falhas que não se enquadraram nesta categoria conforme cita a Tabela 4.1 deste trabalho. Um outro fator complicador à tomada decisões em manutenção para este sistema, diz respeito ao fato de a "TRANSFER BOX" não apresentar nenhum dos limites expostos na seção 5.3.2 deste trabalho

Os fatores ambientais, como a presença de impurezas, também não influem decisivamente na falha deste sistema, pois a "TRANSFER BOX" é hermeticamente fechada e isolada termicamente. Mas esta constatação já dá indicações de que nem só dos componentes elétricos deve se ocupar a manutenção, pois este isolamento é responsável pela operação confiável desta caixa. Assim, uma primeira preocupação consiste em verificar o estado desta vedação da caixa de alumínio onde estão alojados os componentes elétricos. A interferência com a operação de outros componentes eletro-eletrônicos, se a blindagem estiver em bom estado não é motivo para preocupação (aliás, todos os conjuntos desta natureza em uma aeronave devem ser blindados).

Em conversas mantidas com o fabricante do EMB-120 (e de sua "TRANSFER BOX"), foi possível constatar um fato bastante interessante : o componente "TRANSFER BOX" dificilmente apresenta falhas em todos os seus módulos, como sugere o FMEA da Tabela 6.8. Assim, no caso de falha, várias funções do piloto automático podem continuar operantes e para prosseguir o voo normal, basta que os pilotos desacomplem a função prejudicada, passando a assumi-la manualmente, cumprindo algumas restrições como

redução de altitude de cruzeiro e de velocidade, em virtude do desempenho e da complexidade desta aeronave que, como já dito, voa em altitudes e a velocidades elevadas.

Ainda levando em consideração a complexidade da aeronave, uma importante questão foi levantada junto ao fabricante : haveria um número mínimo de funções que não poderiam apresentar falha, ou seja, o piloto automático tem de operar uma quantidade de funções para permitir o prosseguimento de um voo seguro? Realmente há esta restrição, sobretudo no caso de voo por instrumento (guiado por um VOR, por exemplo) onde o piloto não tem a visibilidade externa como referência. Porém, o fabricante do EMB-120 (a EMBRAER) não precisou qual seria esta quantidade mínima - em aeronáutica, para equipamentos que podem ter alguma tolerância à falha possibilitando o voo seguro, adota-se a nomenclatura "go" - "no go", ou seja, se são cumpridos os mínimos requisitos de aeronavegabilidade o item permite a partida da aeronave ("go"), caso contrário, o voo deve ser cancelado ("no go") - pois esta é uma atribuição do fabricante do sistema de piloto automático (a EMBRAER fabrica apenas a "TRANSFER BOX").

Assim, pode-se realizar testes para verificar, a partir de uma entrada conhecida (sinais de 28V DC gerados por computador), a adequação das saídas correspondentes, já que este componente possui uma lógica de operação. Um problema associado a este componente é que uma falha pode ter ocorrido e se tornado latente, pois pode não ter sido requisitada a função associada ao módulo em pane quando nos testes em terra, vindo a aparecer já em voo - por exemplo, com a aeronave não executando manobras programadas pelo piloto automático - e isto, segundo o fabricante da aeronave, é de especial inconveniência e até de um certo risco em aproximações para pouso por instrumentos (ILS, do inglês "Instruments Landing System"), onde o tempo para reação dos pilotos é sempre reduzido.

Por este motivo, os testes aludidos devem ser periódicos, o que não se caracteriza como manutenção preventiva, mas sim como manutenção "on condition", ou seja, baseado nos resultados dos testes - condição do sistema - o mesmo pode continuar em voo indefinidamente (sequer há um limite de vida útil especificado para a "TRANSFER BOX") ou ser removido para reparos, pois trata-se de um item reparável.

Resumindo, a política de manutenção para este item não é satisfatoriamente definida apenas pelas variáveis operacionais - solicitações da operação normal - pois estas solicitações conduzem a falhas não detectáveis antes de sua ocorrência, como pode ser

concluído a partir da inspeção do FMEA da Tabela 6.8 onde as falhas relatadas são repentinas, e mesmo o mecanismo da falha não é bem conhecido, segundo O'CONNOR [3], ficando no terreno das hipóteses. Deve-se atentar para as características do sistema - o qual apresenta-se com algum grau de tolerância à falha - e para as variáveis ambientais, as quais, se o isolamento da caixa estiver em mau estado, compromete sua operação.

O grande problema com a "TRANSFER BOX" está no fato dela ser montada a partir de componentes elétricos prontos, exigindo atenção no seu projeto e construção, como apontado por O'CONNOR [3] e WASSSEL[17] e discutido na seção 6.4.3 deste trabalho, para se obter um sistema confiável e que possa, por suas características, prescindir de ações de manutenção, pois neste caso, apenas a manutenção corretiva se aplicaria, trazendo todos os inconvenientes de uma falha não prevista também já discutidos neste trabalho.

A manutenção da "TRANSFER BOX", em função de sua localização de difícil acesso, no piso da cabine de comando sob a poltrona do comandante, deve ser executada aproveitando-se as paralizações da aeronave para a manutenção de outros sistemas. Isto pode ser feito já que os modos de falhar dos componentes da "TRANSFER BOX" não requerem manutenção periódica, como já comentado na seção 6.4.3 deste trabalho. Assim, a manutenção desta caixa, aproveitando inclusive as paralizações para verificação do trem de pouso, pode ser sugerida da seguinte maneira :

i) caixa de alumínio e blindagem :

- verificação do estado da caixa e de sua fixação à estrutura da aeronave para evitar vibrações a cada 200 ciclos;

- verificação da vedação e da blindagem reparando se necessário a cada 200 ciclos;

- verificação a cada 200 ciclos (mensalmente) do estado das conexões e dos cabos, quanto a folgas nos pinos e quebras dos mesmos e de pontos dos cabos, substituindo se necessário, pois estes danos podem ocasionar mau contato e a operação incorreta ou mesmo a ausência de ação do piloto automático;

ii) componentes elétricos :

- testes periódicos, a cada 200 ciclos (1 mês) do sistema para verificar a presença de componentes defeituosos, verificando, pela entrada de sinais de 28V (CC) em pontos apropriados no sistema de piloto automático, se há a deflexão das superfícies de controle

(ailerons, leme e profundores) - estes testes podem ser realizados a partir do computador do piloto automático APC65 (1 ou 2), os quais têm a função de gerar os sinais para a "TRANSSFER BOX", substituindo o comp-onente em questão se necessário;

- teste de novos conjuntos antes da entrada em serviço nos mesmos moldes do teste anteriormente citado;

- teste dos componentes (um a um) a serem instalados - quando for o caso - e aferição periódica do piloto automático a cada 200 ciclos, para evitar indicações duvidosas de falha nos diversos componentes do sistema, evitando interpretar a falha em um servo-motor como falha da "TRANSSFER BOX", pois a falha em qualquer um deles é reportada ao painel do piloto automático através de alarmes;

- desmontagem, retirada, teste completo de todos os componentes do piloto automático (computadores APC65 1 e 2, unidades FCP 1 e 2, servo-motores, verificação da correta delação das superfícies de controle, painel do A/P, verificação do estado dos cabos e do estado da "TRANSSFER BOX") a cada 2400 ciclos (1 ano).

A exemplo do trem de pouso, a "TRANSSFER BOX" é um componente reparável, ou seja, pode ser retirada para sofrer intervenções e posteriormente voltar à operação. Porém, como não está sujeita a nenhum dos limites expostos na seção 5.3, nem possui uma vida útil definida, diferentemente do trem de pouso, a "TRANSSFER BOX" pode ser reparada indefinidamente, continuando em operação sem restrições.

6.4.5) Comparação com as Diretrizes do Fabricante

Muito pouco é mencionado sobre a "TRANSSFER BOX" nos manuais de manutenção do EMB-120 e isto se deve, segundo o fabricante, à impossibilidade de estabelecer uma relação precisa entre solicitações usuais e falhas deste item. O MPG ("Maintenance Planning Guide") não menciona nada especificamente sobre a "TRANSSFER BOX", pois na visão da EMBRAER, não compete a este item nenhuma ação planejável. As ações de manutenção, se a tanto chegarem, devem ser realmente "on condition", concordando com o fato deste componente não se encaixar em nenhum dos limites já apresentados, sequer tendo um tempo-limite definido para sua operação. O MPG apenas relaciona testes periódicos de todo o sistema do piloto automático a cada 250 horas de voo. Os procedimentos de deblação de panes ("troubleshooting") constantes do manual de manutenção do piloto automático não citam a "TRANSSFER BOX" - e são quase 100 - pois em geral, as falhas

ocorrem em outros componentes como computadores, servo-motores e flagão, muito mais exposta que a "TRANSFER BOX" a danos ocasionados por corrosão e atrito com suas fixações.

É de se supor então, que a EMBRAER seja bastante cuidadosa no projeto, seleção de componentes e construção de seus produtos como apontam O'CONNOR [3] e WASSER [17], obtendo componentes confiáveis e que requeram pouca ou até nenhuma ação de manutenção.

6.5) Comparação entre os Procedimentos de Manutenção para a Perna do Trem de Pouso Principal e para a "TRANSFER BOX"

Comparando os procedimentos de manutenção sugeridos para o trem de pouso e para a "TRANSFER BOX", nota-se que o primeiro é muito mais abrangente, detalhado e complexo. Isto se deve ao fato de que os fatores que influem na falha de seus componentes são bem conhecidos e na maioria dos casos, são conhecidos e mensuráveis também os efeitos das manobras usuais e de emergência, correspondendo a modos de falha previsíveis.

Assim, é exigida a manutenção preventiva de alguns de seus componentes, além das falhas darem indicação de sua ocorrência (como o crescimento de trincas, deformações, vibrações e ruídos para citar alguns sintomas). Logo, em que pese a manutenção preventiva estar sujeita a falhas humanas em sua execução e gerar custos relacionados aos sobressalentes, mão-de-obra, recursos e tempo de parada da aeronave, sua vantagem é poder ser programada e obviamente, se antecipar à ocorrência da falha, o que é de vital importância em uma atividade como a aviação civil, onde a segurança é o principal requisito.

Deve-se atentar ainda para o fato de que uma falha no trem de pouso pode gerar acidentes fatais, pois ele está envolvido com manobras a altas velocidades como o pouso e decolagem. Portanto, ainda que nenhum produto seja concebido com a finalidade principal de exigir manutenção, este é um aspecto que o torna seguro - deve-se interpretar não como a exigência de manutenção, mas como a exigência de antecipação à falha.

Com a "TRANSFER BOX", nada disto ocorre. Os mecanismos que levam seus componentes a falhar não são de conhecimento perfeitamente dominado, [3], e sua natureza leva a falhas abruptas (que ocorrem sem sintomas anteriores), porém parciais para o sistema, ou seja, a falha em um módulo da "TRANSFER BOX" não acarreta necessariamente a falha em todo o sistema do piloto automático. Assim, no caso de uma pane, a aeronave não ficará

descontrolada, pois os pilotos poderão assumir seu controle manualmente. Esta é uma forma de redundância do sistema. Evidentemente, é desejável que a falha não ocorra, sobretudo numa aproximação ILS por piloto automático, quando a aeronave navega por meio de sinais de rádio provenientes de estações em terra e tem sua trajetória totalmente controlada por meios automáticos.

É possível, antes de colocar a aeronave em operação, verificar se algum módulo do referido componente já está falhando por meio dos testes do sistema de piloto automático. Estes testes fornecem a indicação da condição da "TRANSEFER BOX", fornecendo dados para a decisão de mantê-la ou não em operação.

Este item do EMB120 deve ser projetado de modo a exigir o mínimo de ações de manutenção e seus problemas encontram-se mais na fase de projeto e produção que de operação. Não por acaso, a indústria aeronáutica é bastante rigorosa, balizada por muitos regulamentos, acerca da seleção de fornecedores, como foi visto ao longo deste trabalho. Segundo O'CONNOR [3], a chave para um produto elétrico confiável está num rigoroso controle de qualidade em todas as fases de sua produção. Ainda assim, em nome da segurança, a manutenção ainda se ocupa dos testes e verificações rotineiras, caracterizando-se como "on condition".

Finalizando, os objetivos da manutenção, tanto no caso do trem de pouso quanto na "TRANSEFER BOX", em que pesem suas diferenças, são os mesmos : reduzir a possibilidade da ocorrência de falhas.

Como muitos dos conceitos abordados acerca da confiabilidade tiveram origem na atividade aeronáutica, o exemplo ilustrativo orientou-se sobre a mesma, tendo em vista a quantidade de documentação disponível e os níveis de segurança requeridos pela aviação, tendo em mente que, sem uma adequada política de manutenção, o empreendimento pode tornar-se até mesmo inviável, em virtude dos custos decorrentes da adoção de políticas inadequadas de manutenção e dos possíveis acidentes que este descuido pode provocar, os quais, em aviação, podem resultar em verdadeiras catástrofes. No capítulo 5, os aspectos específicos da manutenção aeronáutica foram trazidos ao conhecimento, e no capítulo 6 um

O estudo sobre os conceitos de confiabilidade, como no capítulo 4, trouxe como alguns de seus benefícios a definição do conceito de taxa de falhas, essencial para estabelecer a prática adequada de manutenção, a comparação entre as ferramentas de análise da confiabilidade de um sistema, a definição e as discussões sobre o conceito de disponibilidade, cujo interesse se justifica por traduzir a eficácia da manutenção, contribuindo também para a rentabilidade de um empreendimento e, por fim, este capítulo esclareceu que a manutenção não tem a propriedade de aumentar o valor da confiabilidade de um sistema, cabendo a esta atividade tornar mínima a degradação desta confiabilidade.

A revisão sobre as práticas e os conceitos básicos de manutenção, apresentadas no capítulo 2 deste trabalho, mostrou que há uma forte relação entre manutenção e confiabilidade na medida em que os conceitos e ferramentas de análise desta última são essenciais para a seleção da ação de manutenção mais adequada a cada tipo de sistema. Também foi possível notar por meio dos artigos pesquisados relacionados ao tema, que as organizações têm dificuldades em implementar um programa de manutenção voltada à confiabilidade não apenas pelo custo que isto pode representar, mas porque não há o domínio dos fatores que levam um equipamento a falhar, pois a ênfase é concentrada neste.

A ciência da confiabilidade é um assunto bastante amplo e neste trabalho foram discutidos os aspectos de interesse na elaboração de um procedimento de manutenção que contemple não apenas os aspectos dos sistemas estudados, mas também, o comportamento das variáveis envolvidas na operação do mesmo, além de alguns dos requisitos de utilização relacionados aos componentes analisados.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

CAPÍTULO 7

sistema essencialmente mecânico - o da estrutura da perna do trem de pouso principal - foi completamente analisado nos aspectos de seus componentes e as solicitações envolvidas em sua operação, e a partir disto, foi elaborado um procedimento para a manutenção programada deste sistema, baseado nos conceitos de confiabilidade apresentados ao longo do texto.

No caso do trem de pouso, a comparação com o MPG da aeronave pôde comprovar que os conceitos de confiabilidade, aplicados de maneira correta, foram úteis na elaboração de uma proposta de procedimento de manutenção, ainda que não tenha sido possível estabelecer os prazos entre as intervenções. O procedimento proposto previu as principais ações de manutenção a serem tomadas, basicamente como práticas preventivas, as quais são as mais utilizadas na atividade aeronáutica.

No caso da "TRANSDER BOX", embora não haja referências sobre este componente no MPG ou nos manuais de manutenção do EMB-120, a abordagem da confiabilidade possibilitou trazer à luz os tópicos importantes na sua manutenção, pois foi possível verificar que o componente tem grande probabilidade de não falhar integralmente e que é possível realizar testes funcionais para verificar a correta operação do sistema de piloto automático da aeronave. A abordagem da confiabilidade prestou-se então, a elaborar procedimentos de manutenção para dois sistemas completamente distintos em sua natureza - um essencialmente mecânico e outro essencialmente eletrônico.

Se foi possível apurar este resultado em sistemas de uma aeronave, o qual possui alguma complexidade e tem sobre si requisitos rígidos quanto à segurança, também pode-se aplicar a análise efetuada neste trabalho à indústria em geral, pois o importante é conhecer os detalhes dos sistemas, os requisitos de sua utilização e as solicitações impostas ao mesmo.

Este trabalho pode ser ampliado, discutindo a influência dos procedimentos propostos sobre a disponibilidade da aeronave, ou de outros tipos de equipamentos, pois é um aspecto essencial ao bom desempenho das operações de uma empresa aérea.

A própria aplicação da análise feita neste trabalho à indústria em geral constitui-se em uma sugestão para futuros trabalhos pois, como afirma MOURAY [16], a indústria tem se ressentido da necessidade de dominar a ciência da confiabilidade e seus próprios equipamentos e operações, pois trazer a manutenção ao âmbito científico exige conhecimento.

Coletando-se dados em campo, seja em aviação, ou em outras atividades, pode-se estabelecer prazos reais para as intervenções programadas, ou verificar os resultados do emprego de práticas não programadas, podendo-se propor diferentes técnicas para a execução das tarefas de manutenção.

Outra possibilidade consiste em trazer ao estudo a análise de risco, explorando intensamente a relação entre manutenção, confiabilidade e segurança. Ainda dentro desta sugestão, pode-se acrescentar o fator humano como variável de influência na confiabilidade pois, em aviação, a qualificação da mão-de-obra e o intenso treinamento visam reduzir as incertezas associadas à ação do ser humano, o que nem sempre se verifica em outras atividades.

O assunto abordado neste trabalho é, como já dito, bastante amplo, mas os resultados aqui alcançados permitem concluir que o emprego dos conceitos de confiabilidade permite tomar decisões corretas em termos de manutenção.

1. ARINC Research Co., *Reliability Engineering*. New Jersey, Prentice Hall, 1964.
2. AHEARNE, J., How safe is safe enough. *Reliability Engineering and System Safety*, nº61, pp. 169-183, 1998.
3. O'CONNOR, P. D., *Practical Reliability Engineering*, 2ª ed. Suffolk, John Wiley & Sons, 1985.
4. HEMKE, H., *Engenharia de Manutenção de Aeronaves*. São José dos Campos, CTA, 1958.
5. NEPOMUCENO, L. X. *et alii*, *Práticas de Manutenção Preditiva*, 2v. São Paulo, Edgard Blücher, 1989.
6. CARDOSO, I.; BELHOT, R., Reflexos da Manutenção no Contexto Global da Organização. *Metallurgia-ABM*, vol. 50, ago-94.
7. CLARK, G.; PAASCH, R., Diagnosticsability of Systems and Systems Design. *ASME DTM'94*, 1994.
8. BEA, R. G., Marine Structural Integrity Programs. *Marine Structures*, vol. 7, nº1, pp. 51-76, 1994.
9. MOTTER, O., *Manutenção Industrial : o poder oculto na empresa*. São Paulo, Hemus, 1992.
10. MIRSHAWKA, V., *Manutenção Preditiva : caminho para zero defeitos*. São Paulo, Makron, 1991.
11. VAURIO, J. K., Reliability characteristics of components with tolerable repair times. *Reliability Engineering and System Safety*, nº 56, pp. 43-52, 1997.
12. HERNALSTEENS, A., TPM : A revolução do chão de fábrica à alta gerência. *Manutenção*, nº43, pp 28-32, jul/ago, 1993.
13. BLANCO, F., *Manutenção Classe Mundial*. *Manutenção*, nº60, pp A77-A82, set/out, 1996.
14. RIBEIRO, H., 5S, *A base da Qualidade Total*. *Manutenção*, nº43, pp 36-42, jul/ago, 1993.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CAPÍTULO 8

15. MORAIS V.; ELGRABLY, M.; SANTANDER, G.; QUEIROZ, J., TPM : Aplicação Prática na Refinaria da ALUMAR. *Manutenção*, nº49, pp 29-31, jul/ago, 1994.
16. MOUBRAY, J., RCM2 pelo seu criador. *Manutenção*, nº 64, pp 4-9, 1997.
17. WASSSELL, H.J.H., *Reliability of Engineering Products*. Oxford Press, s.d.
18. LEWIS, E., *Introduction to Reliability Engineering*. New York, John Wiley & Sons, 1987.
19. CARTER, A.D.S., *Mechanical Reliability*, 2ª ed. New York, McMillian Education, 1986.
20. VEIRA, M. G., *Introdução à Manutenção*. São Carlos, EESC, 1991.
21. SUNDARARAJAN, C., *Guide to Reliability Management : data, analysis, application, implementation and management*. New York, Van Nostrand Reinhold, 1991.
22. CHURCHMAN, C., *Teoria dos Sistemas*. Petrópolis, Vozes, 1972.
23. DRAGFFY, G., *The Design of a High Reliability Safety Critical Shutdown System. Reliability Engineering and System Safety*, nº 61, pp. 215-227, 1998.
24. CHATFIELD, C., *Statistics for technology*. New York, Chapman & Hall, 1970.
25. VAURIO, J., *On time-dependent availability and maintenance optimization of standby units under various maintenance policies. Reliability Engineering and System Safety*, nº 56, pp. 79-89, 1997.
26. EMBRAER, *EMB-810 Operations Handbook*. São José dos Campos, EMBRAER, 1976.
27. BRANCO, D., *Os dois gumes da automatização. Aero Magazine*, nº 55, 1998.
28. MODARRES, M., *What every engineer should know about reliability and risk analysis*. New York, Marcel Dekker, 1993.
29. POLOVKO, A., *Fundamentals of Reliability Theory*. New York, Academic Press, 1968.
30. LEITCH, R., *Reliability Analysis for Engineers : an introduction*. Oxford, Oxford University Press, 1995.
31. PAPAIOUGLOU, I., *Mathematical Foundations in Event Tree. Reliability Engineering and System Safety*, nº 61, pp. 169-183, 1998.

32. THURSTON, D., *Design for Flying*. New York, John Wiley & Sons, 1979.
33. LOMAX, T., *Structural loads analysis for commercial transport aircraft : theory and practice*. Reston, AIAA, 1996. (AIAA Educational Series)
34. HP-670C, *Manual de Operações - Guia de Resolução de Problemas*, p. 17.
35. SILVA, O., *A Decolagem de um Sonho : a história da criação da EMBRAER*. São Paulo, Lemos Editorial, 1998.
36. VIEIRA, M. G., *Tipos de Manutenção Aeronáutica*. São Carlos, EESC, 1991.
37. ZWERDLING, R., *Pouso para lá de duro*. *Aero Magazine*, nº58, pp. 30-31, 1999.
38. VIEIRA, M. G., *Características Gerais da Manutenção*. São Carlos, EESC, 1991.
39. KERMODE, A., *Flying without Formulae*. New York, Prentice Hall, 1980.
40. SMITH, P., *BOEING 737* portfolios. New York, Jane's, 1986.
41. ARGUELO, L., *Recorde de Distância*. *Aero Magazine*, ano 5, nº 58, pp 45, 1999.
42. SILVA O., *entrevista*. *Aero Magazine*, ano 5, nº 55, pp 40-42, 1998.
43. KAMIYAMA, T., *Scatter factor for fatigue life of civil aircraft structure*, s.n.t.
44. AL GARNI, A.; SAHIN, A.; AL-FARAYEDHI, A., *A reliability study of Fokker F-27 airplane brakes*. *Reliability Engineering and System Safety*, nº 56, pp 143-150, 1997.
45. EMBRAER, *EMB-121 Maintenance Manual*. São José dos Campos, EMBRAER, 1980.
46. ZWERDLING, R., *Querido GPS*. *Aero Magazine*, ano 5, nº53, pp 38, 1998.
47. VIEIRA, M., *Pesquisa, isolamento e deblação de panes*. São Carlos, EESC, 1992.
48. EMBRAER, *EMB-120 Maintenance Manual*. São José dos Campos, EMBRAER, 1986.
49. EMBRAER, *EMB-120 Illustrated Parts Catalog*. São José do Campos, EMBRAER, 1996.
50. NIEMANN, G., *Elementos de Máquinas*, vol. I. São Paulo, Edgard Blücher, 1971.
51. EMBRAER, *EMB-120 MPG - Maintenance Planning Guide*. São José dos Campos, EMBRAER, 1986.

52. IRESON, W. G.; COOMBS, Jr, C. F.; MOSRO, R. Y., Handbook of Reliability Engineering and Management, 2^a ed. New York, McGraw Hill, 1996
53. BLOCH, H. F.; GEITNER, F. K., Machinery Failure Analysis and Troubleshooting, vol. 2, 3^a ed. Houston, Gulf Publishing Company, 1997.
54. BLOCH, H. F.; GEITNER, F. K., An Introduction to Machinery Reliability Assessment, 2^a ed. Houston, Gulf Publishing Company, 1994.
55. GALLAGHER, J. P.; FUJIMOTO, W. T., Summary of Landing Gear Initial Faults, Report AFFDL-TR-77-125, Air Force Flight Dynamics, U. S. Air Force, Wright-Patterson Air Force Base, 1977.
56. ROLFE, S. T.; BARSON, J. M., Fracture and Fatigue Control in Structures : Applications of Fracture Mechanics, 2^a ed. New York, Prentice Hall, 1987.
57. GALLAGHER, J. P.; GIESSLER, F. J.; BERENS, A. P., USAF Damage Tolerant Design Handbook : Guidelines for the Analysis and Design of Damage Tolerant Aircraft Structures, Report AFWAL-TR-82-3073, Flight Dynamics Laboratory, U. S. Air Force, Wright-Patterson Air Force Base, 1984.
58. SOUZA, G. F. M., Fatigue Reliability Analysis Based on Probabilistic Fracture Mechanics Considering Residual Stress Effects, Technical Report, Center for Technology and Systems Management, University of Maryland, College Park, 1999.
59. SHIGLEY, J. E., Elementos de Maquinas, Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos, 1984.
60. AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE-API, API-RP-2A : Recommend Practices for Planning, Designing and Constructivity Fixed Offshore Platforms. Washington D. C., API, 1987.
61. AMERICAN WELDING SOCIETY-AWS, AWS D1.1 : Structural Welding Code. Miami, AWS, 1990.
62. FUCHS, H. O.; STEPHENS, R. I., Metal Fatigue in Engineering, 1^a ed. EVA, John Wiley & Sons, 1980.
63. MADSEN, H. O.; KRENK, S.; LIND, H. C., Methods on Structural Safety, 1^a ed. Prentice Hall, 1986.
64. AMERICAN SOCIETY for TESTING and MATERIALS - ASTM, Standard Practice E399-90 : Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials. Annual Book of vol.03.01, ASTM, 1999.
65. GENTIL, V., Corrosão, 2^a ed. Rio de Janeiro, Guanabara Dois, 1982.