

agradecimentos

Infelizmente não me é possível agradecer toda a colaboração concedida por todos aqueles que contribuíram com informação e tempo para a compilação deste trabalho. Quero, contudo, expressar que os seus esforços são por mim profundamente reconhecidos.

Ao Professor Doutor Armando Luís Ferreira Leitão, gostaria de exprimir um agradecimento especial pela orientação científica deste trabalho, pela tolerância, paciência, sugestões, críticas e motivação constantes.

À Professora Doutora Sameiro Carvalho por ter assumido a responsabilidade de ser coorientadora científica.

A toda a equipa da Faurécia que participou activamente neste projecto ao facultar toda a informação necessária, bem como à direcção desta empresa na pessoa do Sr. Eng^o. Jorge Hilário por ter permitido que este trabalho fosse possível.

Um agradecimento muito sentido ao Paulo, meu marido e melhor amigo, pelo companheirismo e suporte emocional prestados ao longo dos anos bem como pela inestimável ajuda na informática.

A todos os amigos um bem hajam pela amizade e apoio que sempre me manifestaram, especialmente nos momentos particularmente difíceis.

Definição de Metodologias de Manutenção para a Indústria – Caso Prático

Resumo

As empresas industriais desenvolvem actualmente um grande esforço no sentido de promover a flexibilidade dos equipamentos. Neste contexto, com o presente trabalho, é pretendido otimizar a estrutura da manutenção de uma empresa industrial. Para o efeito, através de um registo histórico de dados, estuda-se o comportamento fiabilístico dos equipamentos cujo conhecimento relativo às falhas e ao seu atendimento deve ser compreendido. A análise fiabilística efectuada permite identificar os equipamentos críticos com o intuito de identificar oportunidades de melhoria e de estabelecer metodologias de manutenção coerentes. Estas metodologias têm subjacentes a estatística das avarias e a avaliação de custos.

Definition of Maintenance Methodologies for the Industrial Company – Practical Case

Abstract

Industrial Companies currently develop a major effort to promote equipments flexibility. Bearing this fact in mind, the present work aims to optimize the maintenance structure in an industrial company. A strategic bases of reliability analysis of failure time data is implements in order to understands equipment behaviour and to support the appropriate maintenance methodologies.

Índice

Glossário	xvii
Siglas usadas	xxiii
Símbolos usados	xxv
1 Introdução	1
2 Síntese bibliográfica	3
2.1 A função manutenção	3
2.1.1 Conceito de manutenção	4
2.1.2 Perspectiva histórica dos sistemas de manutenção	4
2.2 Níveis de manutenção	7
2.3 Filosofias de manutenção	7
2.3.1 Manutenção preventiva sistemática	7
2.3.2 Manutenção preventiva condicionada	8
2.3.3 Manutenção correctiva	9
2.3.4 Manutenção de melhoria	10
2.3.5 Manutenção produtiva total – TPM	10
2.3.6 Manutenção centrada na fiabilidade – RCM	14
2.4 Escolha e implementação de um modelo de manutenção	16
3 Conceitos e fundamentos teóricos	19
3.1 Introdução	19
3.2 Sistemas reparáveis versus não reparáveis	19
3.3 Noção de fiabilidade	20
3.3.1 Fiabilidade de sistemas reparáveis	22

3.3.2	Fiabilidade de sistemas não reparáveis	29
3.4	Curva de sobrevivência ou de mortalidade	33
3.5	Teste de Laplace	35
3.5.1	Aplicação do teste a sistemas reparáveis	35
3.5.2	Aplicação do teste a sistemas não reparáveis	38
3.5.3	Aspectos a considerar aquando da aplicação do teste	39
3.5.4	Limitações do teste	41
3.6	Distribuições estatísticas para estudo da sobrevivência	42
3.6.1	Distribuição de Poisson	42
3.6.2	Distribuição exponencial negativa	43
3.6.3	Distribuição de Weibull	44
3.7	Noção de manutibilidade	51
3.7.1	Distribuições estatísticas que caracterizam a manutibilidade	52
3.7.2	Indicadores de avaliação e medida da manutibilidade	52
3.8	Noção de disponibilidade	54
3.9	Ferramentas para análise de modos de avarias	56
3.9.1	Análise de Pareto	56
3.9.2	Diagrama de Ishikawa	57
3.9.3	Outras Ferramentas	57
3.10	Metodologia estatística para modelação de dados	57
3.10.1	Identificação de uma distribuição estatística passível de representar os dados	58
3.10.2	Cálculo dos parâmetros das distribuições previamente seleccionadas	60
3.10.3	Teste de qualidade de ajuste	66
3.11	Fiabilidade de sistemas	69
3.11.1	Sistema série	70
3.11.2	Sistemas paralelos ou redundantes	71
3.11.3	Outros sistemas	73
4	Análise de resultados	75
4.1	Apresentação do registo histórico	75
4.2	Metodologia utilizada na análise exploratória dos dados	77
4.3	Análise de eventos por equipamento	78

4.3.1	Quantificação de ocorrências	78
4.3.2	Indicadores de performance da manutenção	81
4.4	Análise de sistemas reparáveis	84
4.4.1	Um exemplo de fiabilidade crescente: 13005 – Ems	84
4.4.2	Um exemplo de fiabilidade constante	89
4.4.3	Um exemplo de fiabilidade decrescente	95
4.4.4	Indicadores fiabilísticos para os restantes equipamentos reparáveis	99
4.5	Análise fiabilística dos componentes instalados em vários sistemas	100
4.5.1	Estudo de um componente com tempos entre avarias não IID (tendência para fiabilidade decrescente)	101
4.5.2	Estudo de um componente com tempos entre avarias não IID (tendência para fiabilidade crescente)	103
4.5.3	Estudo de um componente com tempos entre avarias IID e função de risco crescente	105
4.5.4	Estudo de um componente com tempos entre avarias IID e função de risco decrescente	109
5	Conclusões finais e perspectivas de trabalho futuro	115
A	Indicadores fiabilísticos obtidos com a aplicação desenvolvida	119
B	Papel de Weibull e limites de confiança do parâmetro de forma	122
C	Deficiências do registo histórico	125
D	Tabelas diversas	127
D.1	Quantificação de intervenções correctivas por equipamento	128
D.2	Indicadores de performance da manutenção	129
D.3	Códigos de identificação usados no diagrama de Pareto	130
D.4	Valores de Euler	132
D.5	Valores críticos de Kolmogorov-Smirnov (K-S)	133
D.6	Função de distribuição normal reduzida	135
D.7	Registo histórico do equipamento 2002	137
D.8	Registo histórico do equipamento 13006 – dobradora horizontal	139

Referências Bibliográficas

145

Lista de Figuras

3.1	Formas de representação da função densidade de probabilidade.	22
3.2	Evolução da taxa de avarias com o tempo – “curva da banheira”.	24
3.3	Taxa de avarias acumulada.	25
3.4	Modelo de Duane (representação gráfica).	26
3.5	Modelo de Crow (representação gráfica).	27
3.6	Função de risco e taxa de avarias.	32
3.7	Inconvenientes da informação sobreposta.	41
3.8	Os tempos de avaria transformados para a análise de tendência.	41
3.9	Influência do factor de forma na densidade de probabilidade.	45
3.10	Influência do factor de forma sobre a fiabilidade.	46
3.11	Influência do factor de forma sobre a função de risco.	47
3.12	Periodicidade óptima.	50
3.13	Sistema série.	70
3.14	Sistema paralelo ou redundante.	71
3.15	Redundância passiva ou <i>stand-by</i>	73
4.1	Intervenções de carácter correctivo.	78
4.2	Tempo médio de espera (MWT).	82
4.3	Tempo médio de reparação (MTTR).	83
4.4	Tempo médio entre avarias (MTBF).	84
4.5	Gráfico de Pareto do equipamento “13005” – análise por anomalia tipificada.	85
4.6	Gráfico de Pareto do equipamento “13005” – análise por componente que desencadeia a avaria.	87
4.7	Tempo de reparação das avarias desencadeadas pelos componentes do equipamento “13005”.	87
4.8	Alguns indicadores fiablisticos referentes ao equipamento 13005 – EMS.	88

4.9	Taxa de avarias do equipamento “13005”	90
4.10	Gráfico de Pareto do equipamento “13006” – análise por anomalia tipificada.	90
4.11	Gráfico de Pareto do equipamento “13006” – análise por componente que desencadeia a avaria.	91
4.12	Tempo de reparação das avarias desencadeadas pelos componentes do equipamento “13006”	93
4.13	Alguns indicadores fiabilísticos obtidos para o equipamento 13006.	94
4.14	Fiabilidade do equipamento “13006”	94
4.15	Alguns indicadores fiabilísticos obtidos para o equipamento 2002.	95
4.16	Gráfico de Pareto do equipamento “2002” – análise por anomalia tipificada.	96
4.17	Gráfico de Pareto do equipamento “2002” – análise por componente que desencadeia a avaria.	97
4.18	Tempo de reparação das avarias desencadeadas pelos componentes do equipamento “2002”	98
4.19	Alguns indicadores fiabilísticos obtidos para diversos componentes.	100
4.20	Resultados intermédios do teste de Laplace aplicado aos dados do componente <i>rolamento</i>	104
4.21	Resultados intermédios do teste de Laplace aplicado aos dados do componente <i>correia</i>	107
4.22	Alguns indicadores Fiabilísticos obtidos para o componente <i>cavilha</i>	107
4.23	Resultados intermédios do teste de Laplace aplicado aos dados do componente <i>cavilha</i>	107
4.24	Fiabilidade do componente <i>cavilha</i>	108
4.25	Alguns indicadores fiabilísticos obtidos para o componente <i>rótula</i>	109
4.26	Resultados intermédios do teste de Laplace aplicado aos dados do componente <i>rótula</i>	112
4.27	Fiabilidade do componente <i>rótula</i>	112
A.1	Indicadores fiabilísticos obtidos com a aplicação desenvolvida.	120
A.2	Indicadores fiabilísticos obtidos com a aplicação desenvolvida (continuação).	121
B.1	Papel de Weibull.	123
B.2	Limites de confiança do parâmetro de forma (β).	124

Lista de Tabelas

3.1	Hora de ocorrência das avarias.	40
3.2	Os tempos de avaria transformados para a análise de tendência.	40
3.3	Tempos de ocorrência das avarias do componente <i>cavilha</i>	62
3.4	ttf's e tempos suspensos do componente <i>cavilha</i>	62
3.5	ttf's e tempos suspensos ordenados do componente <i>cavilha</i>	63
3.6	ttf's e correspondente ordem média de avaria do componente <i>cavilha</i>	63
3.7	ttf's e correspondente $F(i)$ do componente <i>cavilha</i>	64
3.8	Resultados obtidos pela aplicação do teste K-S.	69
4.1	Distribuição dos tipos de intervenção.	76
4.2	Tempo de Reparação das avarias registadas para a máq. 13005 – Ems.	86
4.3	Tempo de reparação das avarias desencadeadas pelos componentes do equipamento 13006 – Dobradora Horizontal.	92
4.4	Tempo de reparação das avarias desencadeadas pelos componentes do equipamento 2002.	98
4.5	Histórico das ocorrências desencadeadas pelo componente rolamento	102
4.6	Histórico das ocorrências desencadeadas pelo componente correia.	103
4.7	Horas de ocorrência corrigidas devido à informação sobreposta e tempo total do teste.	104
4.8	Cálculos intermédios para obtenção das horas de ocorrência corrigidas	104
4.9	Histórico de avarias desencadeadas pelo componente <i>cavilha</i>	105
4.10	Horas de ocorrência corrigidas devido à informação sobreposta e tempo total do teste.	106
4.11	ttf's e tempos suspensos do componente <i>cavilha</i>	106
4.12	Histórico de avarias desencadeadas pelo componente <i>rótula</i>	110
4.13	Tempo de ocorrência das avarias do componente <i>rótula</i>	110

4.14 Resultados obtidos pela aplicação do teste K-S.	111
D.1 Quantificação de intervenções correctivas por equipamento.	128
D.2 Indicadores de performance da manutenção.	129
D.3 Códigos usados no diagrama de Pareto para identificar as anomalias verificadas.	130
D.4 Códigos usados no diagrama de Pareto para identificar os componentes. . .	131
D.5 Valores de Euler.	132
D.6 Valores críticos de K-S (para $N \leq 40$).	133
D.7 Valores críticos de K-S (para $N > 40$).	134
D.8 Função de distribuição normal reduzida.	136
D.9 Registo histórico do equipamento 2002.	138
D.10 Registo histórico do equipamento 13006.	139
D.11 Registo histórico do equipamento 13006 (continuação).	140
D.12 Registo histórico do equipamento 13006 (continuação).	141
D.13 Registo histórico do equipamento 13006 (continuação).	142
D.14 Registo histórico do equipamento 13006 (continuação).	143

Glossário

As designações presentes neste glossário são as estabelecidas na terminologia das Normas Portuguesas de Manutenção à excepção dos termos assinalados por um asterisco (*).

Algoritmo conjunto de regras ou processos bem definidos para a solução de um problema num número finito de passos.

Avaria Ocorrência que determina a degradação ou cessação da aptidão de um bem para desempenhar uma função requerida.

Bem Produto concebido para assegurar uma determinada função.

Burn-in Técnica a cuja utilização se recorre sempre que se pretendam eliminar itens cujas falhas possam ser prematuras

Ciclo de vida (fases de intervenção de manutenção) Um ciclo de vida é constituído pelas seguintes fases no que concerne à intervenção da manutenção: Pré-projecto, definição do projecto, concepção e desenvolvimento do projecto, construção, utilização e eliminação (desclassificação e abate).

Ciclo de vida de um bem durável Período dividido em fases que decorre desde a determinação de uma necessidade, abrange o desenvolvimento e a utilização em serviço e termina com a eliminação progressiva e abate final.

Certificado de segurança Documento escrito e assinado autorizando o acesso a um equipamento e que define as condições e regras de segurança exigíveis para a execução de um trabalho de manutenção.

Componente Elemento que constitui parte de um equipamento e que contribui para o desempenho da sua função.

Custo de posse dos stocks Total das despesas originadas pelas existências em stock que incluem os juros correspondentes ao capital imobilizado em stocks e despesas de armazenagem e de seguros.

Custo directo de manutenção Total das despesas de mão-de-obra, materiais e serviços efectuadas (incluindo as de subcontratação) na actividade de manutenção.

Custo indirecto de manutenção Valor da “produção não produzida” originada pelas paragens de produção motivadas pela manutenção (manutenção correctiva e preventiva com paragem de produção). Inclui os encargos fixos não cobertos, os encargos variáveis não incorporados e a margem de lucro perdida.

Diagnóstico Identificação da causa provável de uma avaria com a ajuda de um raciocínio lógico baseado num conjunto de informações provenientes de uma inspecção, de um ensaio de variáveis de controlo ou dos elementos constantes do registo histórico.

Disponibilidade Aptidão de um bem sob o aspecto combinado de fiabilidade e manutenção para desempenhar a função que lhe é requerida num dado momento ou ao longo de um determinado período de tempo.

Durabilidade Medida da resistência de um bem ao desgaste e às variações fisico-químicas sob determinadas condições de uso ou armazenagem.

Equipamento* Designação genérica de um bem que possui uma função e utilização própria e independente.

Especificação Documento que descreve em pormenor os requisitos a que o produto ou serviço têm de obedecer.

Estratégia de manutenção* Conjunto de objectivos, definições, princípios e políticas referentes à função manutenção que determinam o desenvolvimento e aplicação dos seus recursos.

Existência (stock) Conjunto de bens que uma organização deve manter na sua posse para permitir a continuidade e regularidade de produção de bens e serviços.

Failure mode effects analysis (FMEA) Método de análise de avarias e dos seus efeitos aplicado com o objectivo de encontrar soluções que reduzam ou anulem a sua ocorrência.

Failure mode effects and critically analysis (FMECA) Método de análise de avarias, dos seus efeitos e da sua criticalidade aplicado com o objectivo de encontrar soluções que reduzam ou anulem a sua ocorrência.

Fiabilidade Aptidão de um bem para realizar uma determinada função durante um dado período e em condições bem definidas.

Grau de urgência Classificação atribuída às requisições de trabalho de manutenção que determina a prioridade de execução.

Heurística* Forma de resolução de problemas em que as regras utilizadas são determinadas pela experiência ou intuição.

Índice de ruptura de existência Relação entre o número de requisições não satisfeitas e o número total de requisições efectuadas durante um determinado período de tempo.

Manual técnico Documento que em relação a uma dada instalação ou equipamento fornece dados e informações abrangendo os seguintes assuntos: a) Finalidade; b) Modo de operar; c) Descrição técnica; d) Manuseamento, instalação e armazenagem em trânsito; e) Instruções de manutenção; j) Programação de manutenção; g) Lista de componentes; h) Descrição e registo de operações de manutenção e modificações; i) Instruções para abate.

Manutenção Combinação das acções de gestão, técnicas e económicas aplicadas aos bens para optimização dos seus ciclos de vida.

Manutenção condicionada Manutenção preventiva subordinada à evolução condicionada de parâmetros funcionais de um determinado bem durável para decidir o momento óptimo de uma determinada intervenção.

Manutenção melhorativa* (*Design out-maintenance*) Tipo de manutenção efectuada com o objectivo de reduzir ou eliminar necessidades de manutenção através da introdução de modificações que melhorem a fiabilidade e manutibilidade dos equipamentos.

Manutenção preventiva Manutenção realizada em intervalos de tempo pré-determinados ou de acordo com critérios prescritos com o objectivo de reduzir a probabilidade de avaria de um bem durável.

Manutenção programada Tipo de manutenção organizada com antecedência em que são fixadas as tarefas, os métodos, as ferramentas, as máquinas, a mão-de-obra, o tempo requerido e o momento recomendável para as acções de manutenção.

Manutenção sistemática Manutenção preventiva de natureza cíclica estabelecida em função do número de unidades de utilização de um bem durável.

Manutibilidade Aptidão de um bem em condições de uso especificadas para ser mantido ou restaurado de tal modo que possa realizar as funções que lhe são exigidas quando a manutenção é realizada em condições definidas utilizando procedimentos e recursos prescritos.

Material de consumo corrente Conjunto de bens de utilização corrente que são de consumo corrente exauridos normalmente seja em operação seja em intervenções de manutenção.

Método de classificação ABC* (ou lei de Pareto) Método de classificação de artigos por ordem de quantidades e valores o que origina normalmente a criação de três grupos ou classes em que o grupo ou classe A é constituído por uma pequena percentagem da totalidade dos artigos com uma grande percentagem da totalidade do valor, seguindo-se os grupos B e C com aumentos das percentagens da totalidade dos artigos e diminuição das percentagens do seu valor em relação ao valor total.

Modelo de manutenção* Uma determinada combinação das variáveis da gestão de manutenção (meios, métodos e políticas) com o objectivo de otimizar a sua eficácia e eficiência.

Modificação Alteração feita a um bem com o objectivo de introduzir melhorias no seu desempenho e que é geralmente executada como resultado de uma mudança de concepção.

Peça de reserva Peça destinada a substituir uma outra peça degradada ou defeituosa sendo capaz de desempenhar todas as funções desta.

Pert* Método de planeamento e controlo de projectos e trabalhos complexos (ex: revisão geral de uma fábrica ou instalação) em que se representam graficamente as actividades por setas e os acontecimentos por círculos formando uma rede sequencial e em que os tempos previstos das actividades são calculados com base probabilística de suporte. O método permite a determinação do caminho crítico que se caracteriza por ser o conjunto de actividades com margem de execução nula e que define o prazo mínimo de realização.

Planeamento da manutenção Organização da manutenção efectuada com antecedência através de planos que definem a sequência das acções de manutenção ao longo de um ciclo.

Política de manutenção* Descrição da forma, conteúdo e condições da manutenção que deve ser aplicada a um bem durável.

Preparação de trabalho Especificação de um trabalho descrevendo o modo operativo a utilizar, a sequência de operações, materiais e peças a aplicar, ferramenta e aparelhagem de medida a utilizar, especialização, qualificação e quantidade de executantes, normas de segurança a observar e tempos previstos de execução.

Produtividade* Relação entre a produção gerada e os factores utilizados para a obter.

Produtividade do trabalho de manutenção* Relação entre o volume da produção de horas \times homem efectuado e os encargos de pessoal verificados, durante um período de tempo determinado.

Programa de manutenção Conjunto de acções baseadas no tempo afectando actividades de manutenção específicas a períodos definidos.

Programação É a definição prévia das tarefas, métodos, materiais, de manutenção ferramentas, máquinas, mão-de-obra, prazos e datas requeridas para as intervenções de manutenção.

Registo histórico Registo das intervenções de manutenção efectuada das num bem ao longo do seu ciclo de vida.

Reparação Intervenção de manutenção efectuada num bem durável conducente ao estabelecimento das funções para as quais foi concebido através da remoção, substituição ou recuperação das peças danificadas.

Reportório de Equipamentos* Listagem de todos os equipamentos pertencentes a uma dada instalação, fábrica ou área de produção subordinados a uma mesma linha hierárquica de gestão.

Requisição de trabalho Documento que solicita a execução de um trabalho.

Revisão Conjunto de acções de inspecção, controlo e intervenções efectuadas num bem durável com vista a reduzir a probabilidade de ocorrência de avarias grandes ou críticas durante um determinado período de tempo ou unidades de funcionamento.

Sistema pericial (*expert system*) Sistema baseado na inteligência artificial que pode resolver problemas utilizando o conhecimento de especialistas humanos e informações sobre o contexto. É composto por regras, factos e heurísticas que lhe são fornecidas por especialistas.

Taxa de rotação de existência É a relação entre a quantidade ou valor das saídas de armazém e a quantidade ou valor médio da respectiva existência (stock).

Teste ou ensaio Exame de comprovação de uma ou mais propriedades ou características de um bem.

Visita (de manutenção) Operação de manutenção preventiva que consiste num exame detalhado e pré-estabelecido de todos ou parte dos diferentes elementos de um bem, podendo implicar desmontagens.

Siglas usadas

CEN/TC 319 (*Technical Committee on Standardization*) Comité Técnico de Normalização Europeu.

CPM (*Critical Path Method*) Método do Caminho Crítico.

EFNMS (*European Federation of National Maintenance Societies*) Linhas Mestras da Manutenção na Europa.

FMEA (*Failure Mode Effects Analysis*) Análise de modos de falha e de seus efeitos.

FMECA (*Failure Modes, Effects and Criticality Analysis*) Análise de modos de falha, seus efeitos e criticalidade.

FTA (*Fault Tree Analysis*) Análise por árvore de falhas.

IID Independente e identicamente distribuídas.

K-S (*Kolmogorov-Smirnov*) Valores de Kolmogorov-Smirnov.

MDT (*Mean Down Time*) Tempo médio de paragem.

MTBF (*Mean Time Between Failures*) Tempo médio entre avarias.

MTTF (*Mean Time To Failure*) Tempo médio até à falha.

MTTR (*Mean Time To Repair*) Tempo médio de reparação.

MV Máxima Verosimilhança.

MWT (*Mean Waiting Time*) Tempo médio em fila de espera.

PERT (*Program Evaluation and Review Technique*) Técnica usada no planeamento de actividades.

RCM (*Reliability Centered Maintenance*) Manutenção centrada na fiabilidade .

TPM (*Total Productive Maintenance*) Manutenção produtiva total.

TTF (*Time To Failure*) Tempo até à falha.

TTR (*Time To Repair*) Tempo de reparação.

WT (*Waiting Time*) Tempo em fila de espera.

MM Manutenção de Melhoria (usada na terminologia da empresa).

MP Manutenção Preventiva (usada na terminologia da empresa).

MC Manutenção Correctiva (usada na terminologia da empresa).

Símbolos usados

$\hat{\gamma}$ - estimador da taxa de avarias;

\hat{B} - parâmetro de forma (modelo de Crow);

\hat{A} - parâmetro de escala (modelo de Crow);

η - vida característica (Weibull);

λ - taxa de avarias;

α - nível de significância do teste, factor de crescimento da fiabilidade (modelo de Duane);

β - declive (modelo de Crow), parâmetro de forma (Weibull);

μ - média do tempo de vida dos componentes;

γ - vida garantida (Weibull);

Γ - função Gama;

σ - desvio padrão;

Π - produtório;

λ_{Σ} - taxa de avarias acumulada;

$\lambda(t)$ - taxa de avarias instantânea;

λ_i - taxa de avarias do item i ;

λ_S - estimador da taxa de avarias do sistema;

Δt - intervalo de tempo;

$D(t)$ - disponibilidade instantânea;

$E(t)$ - esperança matemática;

ET - estatística do teste;

$ET(\alpha)$ - valor crítico;

F_β - factor F;

$F(i)$ - percentagem acumulada de avarias;

$F(t)$ - função probabilidade ou função distribuição acumulada (FDC);

$f(t)$ - função densidade de probabilidade;

$F_0(x)$ - função de distribuição populacional;

$H(t)$ - função de risco acumulada;

$h(t)$ - função de risco;

H_0 - hipótese nula;

H_1 - hipótese alternativa;

\ln - logaritmo neperiano;

m - número médio de avarias;

M - manutibilidade;

$R(t)$ - função fiabilidade;

R_i - fiabilidade do item i ;

R_S - fiabilidade do sistema;

$S(x)$ - função de distribuição empírica ou da amostra;

t_0 - tempo total actual;

t_i - tempo de ocorrência da avaria i .

Capítulo 1

Introdução

Equipamentos inoperacionais em momentos inoportunos pode significar quebra de produção e eventuais perdas irre recuperáveis perante a concorrência no momento em que o mercado procura o produto. As paragens devidas a problemas com os equipamentos são, geralmente, uma das principais causas de baixos níveis de desempenho e de baixa produtividade o que conduz a que os custos das operações sejam agravados retirando competitividade às organizações. O correcto desempenho dos equipamentos no que concerne à sua fiabilidade e disponibilidade para o sector produtivo, constitui um dever de um sector da manutenção devidamente organizado. É este sector que deve diligenciar para que se diminuam, tanto quanto possível, os períodos de imobilização derivados das avarias sem, contudo, se descurarem os custos de manutenção por bem produzido. É neste contexto que se pretende caracterizar a estrutura organizacional do sector da manutenção de uma empresa industrial do ramo automóvel - caracterizado por um mercado em fase de maturidade e por forte agressividade - sediada na cidade de Bragança. Com a informação proveniente de um registo histórico de dados é possível conhecer a fiabilidade operacional dos equipamentos, a sua taxa previsível de avarias e se estas são aleatórias ou se são derivadas do tempo de funcionamento e ainda a sua manutibilidade e disponibilidade. Com base nestes indicadores será possível estimar e compreender o comportamento dos equipamentos no que diz respeito às falhas e ao seu atendimento. Assim, de forma fundamentada, poder-se-ão definir quais as políticas de manutenção mais adequadas a cada equipamento e aos componentes neles inseridos, o que institui os objectivos deste trabalho. Para se atingirem os objectivos propostos, usam-se técnicas e métodos específicos apresentados ao longo desta dissertação que está organizada em cinco capítulos. No fim são apresentadas as referências bibliográficas que foram citadas ao longo do texto. Além desta introdução constam:

Capítulo 2 – Síntese bibliográfica. Apresentação de uma breve abordagem à importância da função Manutenção no seio da empresa e às várias filosofias de manutenção existentes.

Capítulo 3 – Conceitos e fundamentos teóricos. Enunciam-se os conceitos básicos da fiabilidade, manutibilidade e disponibilidade, caracterizam-se as principais leis de probabilidade usadas em fiabilidade, que aplicadas a dados históricos dos equipamentos, fundamentarão as decisões no que concerne a metodologias de manutenção a aplicar.

Capítulo 4 – Análise de resultados. Exposição e interpretação dos resultados obtidos segundo as metodologias descritas no terceiro capítulo.

Capítulo 5 – Conclusões e perspectivas de trabalhos futuros. A partir das conclusões tecidas no capítulo anterior expõem-se orientações e sugestões para trabalhos futuros de forma a colmatar algumas das lacunas verificadas e assim se poder contribuir, de forma válida, com o conhecimento aqui reunido e explorado.

Capítulo 2

Síntese bibliográfica

Neste capítulo apresenta-se uma breve abordagem acerca da importância da manutenção no seio da empresa. Neste âmbito, são descritos um conjunto de aspectos que permitem compreender a evolução da manutenção através da sua perspectiva histórica e expõe-se uma sucinta revisão bibliográfica acerca das várias filosofias de Manutenção existentes.

2.1 A função manutenção

A actividade de manutenção tem vindo progressivamente a assumir maior importância nas empresas industriais como consequência do seu cada vez maior impacto económico nos resultados, e da sua decisiva contribuição para a qualidade dos produtos, cumprimento dos prazos de entrega e rendimento dos equipamentos da produção. Outrora, a importância da função manutenção era normalmente associada à disponibilidade dos equipamentos, contudo, não poderá de forma alguma estar ligada apenas à garantia de operacionalidade, visto que os custos de execução das intervenções de manutenção e das peças de substituição, assumem, em geral, valores relevantes e não negligenciáveis para a gestão da empresa. Acresce ainda realçar a ligação estreita entre a manutenção e a qualidade dos bens produzidos pois após a detecção das falhas deve recorrer-se a inspecções sistemáticas para controlo com o intuito de averiguar eventuais alterações ao nível da qualidade dado que é vulgar a presença de produtos não conformes aquando do arranque das máquinas. Em suma, pode considerar-se que a manutenção é uma actividade geradora de mais valias na medida em que pode interferir de forma significativa na produtividade e consequentemente na geração

de riqueza para a empresa.

2.1.1 Conceito de manutenção

Duas definições formais de manutenção são as seguidamente apresentadas:

“A manutenção é a combinação de todas as técnicas administrativas e acções de gestão aplicadas durante o ciclo de vida de um bem de forma a mantê-lo ou restaurá-lo a um estado em que possa desempenhar as funções requeridas” (CEN/TC 319).

“Conjunto de acções que permitem manter ou restabelecer um bem num determinado estado ou em condições de assegurar um determinado serviço” (Normas portuguesas de manutenção industrial).

Poder-se-á dizer que fazer manutenção consiste em observar e acompanhar o desempenho dos equipamentos por forma a que estes estejam aptos a assegurar a continuidade do processo produtivo. Para tal, será portanto necessário realizar um conjunto de acções como operações de lubrificação, reparações e melhoramentos, que visam providenciar a execução correcta e atempada das operações necessárias de forma a garantir a disponibilidade e qualidade prescritas. Todas estas acções são efectuadas com o intuito de melhorar a fiabilidade dos equipamentos – o que se consegue através da diminuição do número de avarias verificadas – e a sua manutibilidade – o que se consegue pela diminuição dos tempos de reparação – tendo como resultado o aumento da disponibilidade o que preconiza um dos principais objectivos do sector da manutenção de qualquer organização inserida em ambientes competitivos. Na prossecução destes intentos é necessário atender atempadamente ao aprovisionamento de peças de substituição, à disponibilidade de mão-de-obra própria, à necessidade de ferramentas e equipamentos específicos e ainda à eventual subcontratação de tarefas.

2.1.2 Perspectiva histórica dos sistemas de manutenção

Desde o início deste século a manutenção sofreu uma nítida evolução o que derivou do desenvolvimento de novos métodos de gestão e organização industrial que por sua vez foram o resultado dos avanços tecnológicos registados. Atendendo a esse contexto de transformação verificado, foram surgindo novas filosofias de manutenção para fazer face às

mudanças e às necessidades existentes no que diz respeito ao aumento do tempo de vida útil dos equipamentos. Se inicialmente a manutenção era considerada como um serviço que se limitava a agir após a ocorrência das avarias, actualmente, cada vez mais se espera que a manutenção garanta os equipamentos em laboração e que os mantenha em condições de produzir bens ou serviços de acordo com as suas especificações, por forma a assegurar a competitividade das empresas no mercado.

Segundo Moubray [9], a evolução da manutenção poderá ser distinguida como tendo sido realizada ao longo de três gerações:

Primeira geração a manutenção de primeira geração cobre todo o período até à segunda guerra mundial. Na época anterior à revolução industrial os artigos eram produzidos pelo artesão e desta forma, além da indústria ser relativamente rudimentar, para os poucos sistemas mecanizados que existiam, os tempos de paragem não eram considerados significativos. A simplicidade dos equipamentos não exigia grandes intervenções, nem tão pouco recursos qualificados para as executar, pelo que a prevenção de avarias não era uma prioridade, podendo até considerar-se praticamente inexistente. Na era industrial clássica (1900 a 1950), viveu-se o início da industrialização, altura em que os produtos além de simples satisfaziam as necessidades dos seus utilizadores. Durante esse período a procura era significativamente maior que a oferta, e como tal, os artigos, não requeriam grandes preocupações com a sua fiabilidade uma vez que toda a produção era absorvida pelo mercado.

Segunda geração após a segunda guerra mundial, nomeadamente entre 1950 e 1990, os países desenvolvidos conheceram um pleno progresso industrial, proporcionado pela crescente automatização, o que propiciou a que a indústria comesse a depender dos equipamentos. Essa evolução tecnológica, que impôs maior complexidade aos equipamentos, aumentou a possibilidade de falhas e começou a generalizar-se a ideia que as mesmas poderiam e deveriam ser evitadas, levando ao surgimento da manutenção preventiva. Na década de 60 a manutenção preventiva repercutia-se em revisões efectuadas aos equipamentos em intervalos de tempo pré-determinados. Por sua vez, o aparecimento da indústria aeronáutica propiciou a necessidade de estudos de fiabilidade o que ainda se intensificou mais durante a segunda guerra mundial, face à sofisticação na tecnologia militar, à complexidade na aviação e ao grande uso de equipamentos electrónicos como os radares, de comunicação e de de automação. O aumento da complexidade dos equipamentos conduziu igualmente a um crescimento dos custos da manutenção, levando a gestão de topo a dar

outra ênfase à importância da manutenção.

Terceira geração desde os meados dos anos 70, o processo de mudança na indústria conduziu a alterações ainda mais profundas. O tempo de paragem afectou a capacidade produtiva dos bens físicos, o que se repercutia na redução do seu “output”, no aumento dos respectivos custos operacionais e ainda na prestação do serviço ao cliente. Na actualidade, a crescente mecanização e automatização levou a que a fiabilidade e a disponibilidade das instalações sejam pontos chave em todos os domínios da indústria quer sejam as de processo, as de transportes, ou as de telecomunicações. O aumento da automatização levou à existência de cada vez mais avarias, apresentando estas diversos modos, o que eventualmente poderia afectar a capacidade de satisfazer os requisitos da qualidade. Para contornar estas situações, nos últimos anos, inúmeras técnicas foram desenvolvidas, como por exemplo a manutenção condicionada e ferramentas de suporte à decisão tal como estudos de riscos, FMECAS, FMEAS e FTA's.

Em resumo, da manutenção de carácter correctivo, praticada até à década de 50, com o intuito de reparar os sistemas avariados, evolui-se para a manutenção preventiva sistemática, em que as intervenções são efectuadas através de inspecções periódicas e planeadas em função da vida esperada dos equipamentos que é conhecida a partir das respectivas leis de degradação e determinadas a partir dos dados resultantes de períodos de funcionamento anteriores. Ultimamente, durante a década de 70, desenvolveu-se a manutenção preventiva condicionada, baseada na condição ou estado dos equipamentos, que mercê do desenvolvimento tecnológico, rapidamente se desenvolve com apoio em meios informáticos. Contudo, este progresso ainda não terminou uma vez que assistimos a uma evolução simultânea dos meios e dos métodos utilizados. Em casos muito complexos aplicam-se técnicas baseadas em inteligência artificial com o intuito de elaborar diagnósticos aos equipamentos. Segundo Carlos Pinto [11, p. 227], para o futuro da função manutenção, pode prever-se que nos aspectos de funcionamento e técnicos, a função manutenção irá evoluir de acordo com o desenvolvimento da tecnologia, das técnicas de manutenção, da gestão e de informação, e de uma forma cada vez mais nítida em maior consonância com os objectivos da função produção. A acompanhar essa evolução, será cada vez mais exigente a formação e qualificação dos especialistas de manutenção.

2.2 Níveis de manutenção

A função manutenção para concretizar os seus intentos efectua diversos trabalhos destinados a prevenir e resolver deficiências de funcionamento e demais avarias dos equipamentos que asseguram a produção. A caracterização do conteúdo dos diferentes tipos de trabalho de manutenção é descrito nas normas francesas (NF X 60-010) que distinguem cinco níveis de classificação e contemplam, igualmente, o seu grau de complexidade técnica, a qualificação requerida dos seus executantes e os meios técnicos envolvidos na sua execução.

2.3 Filosofias de manutenção

Em [11, p. 49] pode ler-se que de acordo com as características do regime de produção e do tipo dos equipamentos produtivos em presença, dever-se-ão explicitar claramente o tipo de acções a efectuar nos equipamentos a cargo do sector da manutenção. Em suma, dever-se-ão estabelecer quais as politicas de manutenção a implementar, sendo possíveis as seguintes opções:

- Manutenção preventiva sistemática e preventiva condicionada
- Manutenção correctiva
- Manutenção de melhoria ou de projecto
- Manutenção produtiva total – TPM
- Manutenção centrada na fiabilidade – RCM

2.3.1 Manutenção preventiva sistemática

Ao antevermos a possibilidade de uma avaria num item ou num subsistema, antes que ela aconteça, será possível agir antecipadamente de forma a evitar a sua ocorrência. As acções desencadeadas nesse sentido permitirão impedir as consequências que daí poderão advir. É neste âmbito que se efectuam operações de manutenção, fixadas a intervalos pre-determinados ou de acordo com critérios prescritos, destinadas a reduzir a probabilidade de falha ou da degradação do funcionamento de um bem. Em síntese, estas intervenções

programadas no tempo constituem acções de manutenção preventiva sistemática que visam eliminar previamente a necessidade de conserto ao invés de uma atitude passiva de esperar para posteriormente corrigir. Uma das vantagens deste tipo de manutenção é a de possibilitar um planeamento de médio/longo prazo para as intervenções, o que permite prever as cargas de trabalho, os sobresselentes necessários, as ferramentas e equipamentos requeridos.

Na implementação da manutenção preventiva sistemática, baseada nas referidas acções programadas e executadas periodicamente, surge a dificuldade em estabelecer correctamente o intervalo de tempo entre intervenções. A periodicidade estabelecida fundamenta-se nos estudos de fiabilidade dos equipamentos e seus componentes e na sua relação com a probabilidade de ocorrência de avarias conforme descrito na secção 3.3. Com o conhecimento proveniente das análises fiabilísticas efectuadas, é possível definir os intervalos de tempo entre acções de manutenção preventiva na base da fixação de uma dada probabilidade de ocorrência de avarias. Quando esta é elevada efectua-se uma intervenção de manutenção de forma a repor a fiabilidade no seu valor inicial. Uma das actividades típicas da manutenção preventiva consiste em operar a substituição de itens antes que falhem, estimando o momento apropriado através da distribuição de probabilidade de falhas por desgaste. A política de substituição de itens caracteriza-se por uma estratégia de substituição com o mínimo custo total o que é conseguido quando o custo da falha é maior que o custo de substituição conforme explanado em §3.6.3 na subsecção “Periodicidade de substituição preventiva”.

2.3.2 Manutenção preventiva condicionada

Esta metodologia surgiu na década de 70 e caracteriza-se como um conceito evoluído da manutenção preventiva sistemática em que, ao invés de acções de manutenção em intervalos de tempo definidos, ter-se-ão acções de inspecção em intervalos de tempo definidos. Nestas inspecções são observados pontos críticos do equipamento com o intuito de averiguar se existem situações em que os valores de referência sejam ultrapassados. Para realizar o controlo de condição é muito importante saber quais os parâmetros a controlar uma vez que deles dependem as técnicas a utilizar. As mais divulgadas são a medição e análise das vibrações do equipamento, as análises de óleo, as medições de pressões, de temperaturas e de ruído. O controlo de tais parâmetros pode ser realizado pelas seguintes formas:

- em contínuo, em que as variáveis controladas estão em vigilância permanente através de aparelhos de medição e de controlo adequados;
- periodicamente, através da medição periódica das variáveis controladas efectuadas por um executante equipado com aparelhagem de medida apropriada, e efectuando eventualmente a recolha de amostras do óleo de lubrificação para posterior análise laboratorial.

A partir da análise oriunda dessa informação, será possível inferir sobre o estado de conservação ou de condição do equipamento, diagnosticando, inclusive, o progresso de eventuais avarias. Esta possibilidade de previsão de avarias conduz a que a manutenção condicionada seja também conhecida por manutenção predictiva. Poder-se-á então dizer que a manutenção preventiva condicionada é uma técnica usada para otimizar a manutenção preventiva e reduzir, tanto quanto possível, a manutenção correctiva. O método baseia as intervenções de manutenção no controlo do estado actual de degradação dos equipamentos, de forma a que a intervenção se processe quando a condição do equipamento deixe de estar adequada ao desempenho que se pretende dele. Em [5] pode ler-se que “a manutenção preventiva condicionada está subordinada a um acontecimento pré-determinado revelador do estado de degradação do bem”. Em síntese, por controlo de condição, executa-se a manutenção só quando a inspecção o revele necessário.

2.3.3 Manutenção correctiva

Quando as avarias surgem de forma inesperada estas serão solucionadas por acções de manutenção cuja finalidade será a de reduzir a severidade da sua ocorrência e a de restabelecer as condições operacionais do equipamento. Pode então dizer-se que a manutenção é de carácter correctivo sempre que as operações destinadas a recolocar um equipamento em condições de executar as funções que lhe são destinadas, se efectuem após a ocorrência de avarias imprevisíveis levando a que o sector da manutenção intervenha de emergência. É pois necessário que o sector da manutenção detenha uma organização do trabalho dita eficiente por forma a que seja capaz de responder com celeridade e eficácia a tais solicitações, nomeadamente, nos casos em que haja riscos no que concerne a percas de produção, ou para as instalações ou para as pessoas.

2.3.4 Manutenção de melhoria

Na manutenção de melhoria incluem-se todas as modificações ou alterações efectuadas ao equipamento, destinadas a reduzir as acções de manutenção, melhorar o seu desempenho e as suas características operacionais, bem como o ajuste a novas condições de funcionamento. É uma metodologia de manutenção aplicada, sobretudo, na fase de concepção do projecto.

2.3.5 Manutenção produtiva total – TPM

Conceito, objectivos, áreas de aplicação e vantagens

O acrónimo *TPM* deriva do inglês *Total Productive Maintenance* que significa manutenção produtiva total. Trata-se de uma metodologia conduzida com a participação de todos, desde os operadores das máquinas e do pessoal da manutenção, até ao nível superior da gestão, passando pelos quadros intermédios, ou seja, congrega a participação de todos o que faz juz ao nome que a identifica. O método, além de procurar esbater a tradicional e clássica divisão estrutural da empresa por funções, nomeadamente em produção e manutenção, abrange um vasto conjunto de actividades de manutenção que visam melhorar o desempenho e a produtividade dos equipamentos de uma fábrica, atingindo o máximo rendimento global do parque instalado.

Em [4] pode ler-se que a metodologia TPM tem como objectivo principal a eliminação das falhas, defeitos e outras formas de perdas e desperdícios, visando a maximização global da eficiência das máquinas e dos equipamentos, com o envolvimento de todos a todos os níveis.

Segundo Carlos Pinto [11, p. 56] o modelo tem como envolvente o conceito do ciclo de vida dos equipamentos que considera os custos de aquisição, utilização, manutenção e abate, e como objectivo a maximização da disponibilidade dos equipamentos para produção o que se consegue através da meta “zero avarias” com a conseqüente eliminação das perdas de produção. A disponibilidade dos equipamentos é alcançada pela eliminação das perdas originadas por avaria, por mudanças e ajustamentos nas linhas de produção quando ocorre alteração do produto, por redução da cadência dos equipamentos em relação ao seu valor nominal e ainda das resultantes dos períodos de arranque e até à estabilização da produção. O primeiro principio para a eliminação das perdas é conseguido com a prática dos três S’s

correspondentes às palavras Japonesas *SEIRI* – eliminar o que é inútil – *SEITON* – arrumar e manter de forma racional cada coisa no seu lugar a fim de eliminar perdas de tempo e *SEICO* – manter os equipamentos limpos o que permite a melhor procura e detecção de fugas de óleo, água, ar comprimido e outros fluídos utilizados. Um esclarecimento mais detalhado acerca destas perdas pode ser visto em “Organização e Gestão da Manutenção” de José Saraiva Cabral – [4].

Destacam-se a seguir os princípios básicos da TPM utilizados no intuito de se atingirem os resultados desejados, em conformidade com os parâmetros convenientemente escolhidos dentro de todo o processo produtivo:

- promover acções na procura da maximização do rendimento operacional global dos equipamentos;
- efectuar de forma integrada o diagnóstico ao sistema onde se considera o ciclo de vida do próprio equipamento, através de um programa de prevenção de manutenção, manutenção com introdução de melhorias e manutenção preventiva, o que proporciona, em síntese, um incremento na produtividade operacional;
- promover o envolvimento e a participação de todos;
- melhorar a estrutura orgânica da empresa, através do envolvimento das pessoas e dos equipamentos;
- eliminar as perdas devido a quebras e paragens temporárias.

Instrumentos na TPM: FMEA, FMECA e FTA

Failure Mode and Effect and Criticality Analysis – FMECA

É um método de análise de avarias, aplicável na concepção dos equipamentos e nos estudos de engenharia de manutenção, que visa encontrar soluções para as evitar. A técnica visa assegurar que cada modo de avaria potencialmente concebível foi devidamente considerado e estudado. Este método e a sua aplicação vêm descritos nas normas francesas AFNOR X 60-510 e na britânica BS 5760 Part 5.

Failure Mode and Effect Analysis – FMEA

É uma técnica usada para identificar potenciais problemas e oportunidades para acções correctivas com o objectivo de produzir bens e serviços de qualidade e desta forma promover a satisfação dos clientes

Fault tree analysis – FTA

Os objectivos da análise de uma árvore de falha são os seguintes:

- identificar sistematicamente todos os acontecimentos desfavoráveis na vida do produto;
- fornecer uma representação sinóptica de todos os modos de funcionamento e de avaria;
- construir uma base teórica para fazer evoluir a concepção do produto.

Os oito pilares da TPM

A filosofia TPM destaca algumas linhas mestras, denominadas de pilares da TPM, como principais agregadoras e direccionadoras para as suas acções. Na proposição original da TPM foram estabelecidos cinco pilares:

- Educação e formação
- Controlo do ciclo de vida
- Melhorias específicas
- Manutenção planeada
- Manutenção autónoma

Com o passar do tempo, na natural procura de aprimorar a metodologia, outros pilares foram acrescentados visando compatibilizar os preceitos da TPM com as procuras exigidas pela sociedade e pelos novos cenários da gestão industrial. Assim foram adicionados três novos pilares:

- Segurança e meio ambiente
- Manutenção de qualidade
- Controlo administrativo

Aprofundemos o pilar da manutenção autónoma que será, porventura, o traço mais distintivo do TPM, pois permite aplicar os cuidados básicos de manutenção da máquina através do operador. Segundo José Saraiva Cabral [4] são sete as etapas para a aplicação da manutenção autónoma: limpeza inicial, medidas de combate contra a fonte de sujidade e local de difícil acesso, elaboração de normas de limpeza e lubrificação, inspecção geral, inspecção autónoma, organização e ordem, consolidação.

O desafio “zero avarias”

Em [5] pode ler-se que o TPM se baseia na prática dos zero defeitos. Logo que este princípio é aplicado, a produtividade das instalações e do pessoal melhora, o custo de fabrico baixa e os stocks diminuem. A eficiência interna de uma empresa, que se baseia na execução correcta das actividades, é medida, de acordo com a filosofia TPM, através do indicador “Overall Equipment Efficiency” um indicador cujo desempenho global relaciona e associa a disponibilidade, a produtividade e a qualidade.

Os resultados esperados com a aplicação da metodologia TPM são:

Tangíveis:

- Praticamente zero avarias
- Fiabilidade das máquinas
- Redução dos tempos de paragens de produção
- Diminuição dos defeitos de qualidade
- Incremento da produtividade
- Redução dos acidentes de trabalho
- Economia de energia e outros recursos

Intangíveis:

- Aumento da motivação para o trabalho
- Criação de um ambiente agradável de trabalho
- Melhoria da imagem da empresa.

Pelo exposto depreende-se que a TPM advoga o fim do entendimento de que a “manutenção é um mal necessário”, quando precisamente pelo contrário, ela é parte necessária e vital ao negócio, essencialmente por possibilitar um melhor planeamento da produção através da diminuição de paragens não planeadas. Estas, geralmente, são programadas de acordo com o programa diário de produção a fim de que a manutenção de emergência ocorra a um nível tão baixo quanto possível e de forma que não interfira com o processo produtivo.

2.3.6 Manutenção centrada na fiabilidade – RCM

O acrónimo RCM deriva do inglês *Reliability Centered Maintenance* cujo nome nos indica que as decisões, em gestão da manutenção, são fundamentadas na fiabilidade dos equipamentos e seus componentes. Uma definição formal desta metodologia é a que se pode ler em [9]:

É um processo usado para determinar as necessidades de manutenção de um bem físico inserido no seu contexto operacional.

Inicialmente aplicada na indústria aeronáutica americana e actualmente extensível a quase todos os tipos de indústria, a metodologia, segundo Jonh Moubray, considerado o seu principal precursor, pode ser generalizada em quatro etapas:

- divisão do sistema;
- determinação de itens significativos;
- classificação de falhas;
- determinação de tarefas de manutenção.

A metodologia RCM é portanto caracterizada por este conjunto de procedimentos que se aplicam no intuito de identificar quais os factores que contribuem para a não fiabilidade de um equipamento, bem como as medidas a empreender no sentido de contrariar tais resultados. Para isso, a metodologia seguida por este modelo, identifica de uma forma sistemática, as avarias críticas dos equipamentos e as suas consequências na segurança dos bens e das pessoas, no ambiente e na continuidade da produção, para de seguida, através de uma metodologia específica, determinar qual a política de manutenção mais vantajosa que

deve ser aplicada a cada um dos equipamentos tendo em conta os riscos assumidos pelas consequências das avarias e pelos custos. O método visa também preservar a funcionalidade de um sistema produtivo, em oposição à funcionalidade de um equipamento específico e isolado.

As técnicas subjacentes ao método pressupõem o domínio dos conceitos de fiabilidade, manutibilidade e disponibilidade – sobre os quais de discorre no capítulo 3 – e consideram-se também os defeitos e as possibilidades de avaria que podem surgir durante a produção, armazenagem, operação e manutenção dos equipamentos.

Esta metodologia promove a aplicação de políticas de manutenção fundamentadas no completo conhecimento das funções do equipamento no contexto em que está a operar e no conhecimento profundo dos seus tipos de avaria e dos seus efeitos e consequências não apenas na produção mas também na segurança de pessoas e bens e no ambiente. É prestada uma particular atenção às consequências das “avarias ocultas” pois estas não afectam de imediato a produção e como tal não têm efeitos imediatamente visíveis, mas poderão, eventualmente, originar graves consequências nos equipamentos, pessoal e ambiente, como é o caso das avarias que ocorrem nos sistemas de protecção e segurança dos equipamentos.

Em conformidade com [10], a manutenção centrada na fiabilidade pode ser descrita pela consideração dos seguintes princípios:

- Preservar a função do sistema;
- Identificar os modos de falha que trazem prejuízo para as funções do sistema;
- Priorizar as funções necessárias através dos modos de falha;
- Enfatizar apenas a aplicação das actividades de manutenção preventiva que efectivamente reduzam a possibilidade de falha ou perda da função.

Como a manutenção centrada na fiabilidade é identificada como uma metodologia de identificação de necessidades de manutenção em processos físicos ou industriais, além de recomendar actividades preventivas, define igualmente um modelo consistente para determinar a periodicidade dessas actividades. Segundo Jonh Moubray [9] o processo utilizado consiste na procura de respostas a um conjunto estruturado de questões que identificam, sequencialmente, os seguintes aspectos do equipamento:

Funções principais o que o usuário espera do equipamento;

Falhas funcionais impossibilidade de executar a função;

Modos de falha eventos que causam falhas funcionais;

Efeitos das falhas o que decorre dos modos de falha;

Consequências das falhas como os efeitos afectam o meio ambiente, a segurança, a operação e a economia do processo.

Com base nas consequências das falhas, a metodologia propõe, através de uma lógica estruturada, as tarefas mais aplicáveis e efectivas para combater cada modo de falha, entre as seguintes opções:

Serviço Operacional suprimento de consumíveis e lubrificantes;

Inspecção Predictiva inspecções para detectar falhas potenciais;

Inspecção Funcional ensaios para localização de falhas ocultas;

Restauração Preventiva recuperação antes do final da vida útil;

Substituição Preventiva substituição antes do final de vida útil;

Reparação recuperação ou substituição após a falha.

Na impossibilidade técnica-económica de uma ou mais destas actividades, a manutenção centrada na fiabilidade, recomenda operar até que a falha ocorra, ou, em casos de ameaça à segurança do meio ambiente, realizar uma revisão do projecto.

2.4 Escolha e implementação de um modelo de manutenção

As avarias inesperadas, por vezes, provocam interrupções de produção e as acções de manutenção devem centrar-se na diminuição dessas interrupções através do estabelecimento de políticas de manutenção adequadas. As políticas de manutenção são estabelecidas de acordo com as características dos equipamentos e condicionamentos da produção e devem ser seleccionadas tendo em conta as diferentes opções possíveis acima referidas, escolhendo-se a solução mais adequada ao equipamento ou instalação que se esteja a considerar, ou

combinando diversas opções de forma a otimizar os custos. Dado que não é justificável e exequível que todos os equipamentos sejam sujeitos à manutenção preventiva sistemática e que as técnicas de controlo de condição não são extensíveis a todo o tipo de equipamentos e ainda porque é impossível prever todo o tipo de avarias, o modelo de manutenção a adoptar deve incluir, em menor ou maior escala, os diversos tipos de manutenção designadamente de carácter correctivo e preventivo. Idealmente, toda a actividade de manutenção deveria ser previamente planeada, de forma a maximizar os recursos existentes e a minimizar os inconvenientes decorrentes da paragem dos equipamentos. Contudo, na realidade, uma parte significativa da actividade de manutenção é de carácter correctivo, quer porque nem todas as avarias são previsíveis ou susceptíveis de ser evitadas, ou porque este tipo de manutenção continua a ser o mais adequado para determinados equipamentos. Como a escolha do modelo influencia de forma determinante a função manutenção e tem uma preponderância significativa nos custos de produção, o gestor da manutenção, deverá manter uma permanente vigilância sobre a disponibilidade operacional verificada nos equipamentos, com ênfase nos denominados críticos. Deverá igualmente promover a aplicação do tipo de manutenção preventiva que minimize simultaneamente os tempos de interrupção para manutenção preventiva e a ocorrência de avarias, estudar e realizar acções de manutenção de melhoria que aumentem a fiabilidade e a manutibilidade dos equipamentos de forma a assegurar a qualidade técnica das acções realizadas. No conjunto das acções a empreender, deve incluir-se também a análise e estudo de melhorias na logística de manutenção – nomeadamente, ferramentas, stocks de peças de reserva, nível de conhecimento dos executantes e meios de transporte – e na organização dos serviços – planeamento e preparação das intervenções, tipo e localização das equipas de intervenção e tempos de resposta às solicitações. Contudo, não se pode descurar que todas as medidas para melhorar a disponibilidade dos equipamentos deve ser vista na óptica do custo-benefício. Por isso, a implementação de uma política de manutenção é cada vez mais explicitada na fase de projecto e baseada em informação objectiva oriunda da análise estatística de um conjunto de dados históricos e dos resultados decorrentes das inspecções efectuadas. Em jeito de conclusão, a escolha da política de manutenção deve considerar os seguintes aspectos:

- Fiabilidade do equipamento e sua taxa previsível de avarias;
- Manutibilidade do equipamento: acessibilidade e facilidade de execução de acções de manutenção;

- Tipos de avarias: se ocorrem em função do tempo de funcionamento ou se são imprevisíveis ou puramente aleatórias;
- Criticalidade do equipamento em relação à sua influência nos custos indirectos de manutenção, como por exemplo, perda de produção e de imagem;
- Consequências de uma avaria no equipamento em termos de segurança de pessoal, do próprio equipamento e da fábrica ou instalação e no ambiente;
- Existência de aspectos legais relativos a inspecções e vigilância obrigatórias do equipamento;
- Viabilidade técnica e económica da detecção antecipada de possíveis avarias por controlo de variáveis de funcionamento;
- Viabilidade técnica e económica das alternativas de substituição, ou reparação imediata no local e suas implicações nos stocks;
- avaliação económica comparativa do benefício resultante das diversas opções possíveis de manutenção a aplicar.

Capítulo 3

Conceitos e fundamentos teóricos

O objectivo primordial deste capítulo é o de enunciar os conceitos e fundamentos teóricos que aplicados a dados históricos de equipamentos justificarão os cálculos e as conclusões tecidas nos capítulos subsequentes.

3.1 Introdução

A previsão de avarias efectuada para um determinado horizonte temporal, só poderá ser considerada em termos probabilísticos em virtude da incerteza e da variação com que essas avarias acontecem. Por conseguinte, este capítulo centra-se na exposição das principais técnicas estatísticas inerentes a um processo de estimação que se pretenda efectuar bem como na apresentação dos modelos teóricos que lhe são subjacentes. A metodologia usada fundamenta-se no ajuste de modelos de fiabilidade uma vez que esta assume particular importância no que concerne à definição de metodologias de manutenção a aplicar aos equipamentos e seus componentes. Aborda-se ainda a teoria subjacente a um conjunto de indicadores da fiabilidade, manutibilidade e disponibilidade que, depois de apurados, serão no Capítulo 4, objecto de exposição e análise, com o intuito de proporcionar informação relevante à tomada de decisões no âmbito da planificação e do estabelecimento de metodologias de manutenção.

3.2 Sistemas reparáveis versus não reparáveis

Para Ascher e Feingold, 1984, um sistema reparável é recolocado ao serviço depois de sujeito a operações de manutenção efectuadas com o intuito de eliminar qualquer irregularidade

detectada, enquanto que, um sistema não reparável, é substituído por outro igual logo após a primeira falha, ou seja, a partir do momento em que deixa de realizar de forma satisfatória a função que lhe é destinada.

Poderemos então dizer que num sistema reparável, normalmente associado ao conceito de equipamento, a ocorrência de uma ou mais avarias não significa o fim da sua operacionalidade, mas apenas certa descontinuação enquanto são restituídas as condições nas quais possa, novamente e de forma conveniente, desempenhar as funções entretanto suspensas; pelo contrário, num sistema não reparável, normalmente associado ao conceito de componente ou item, não sendo económica ou tecnologicamente passível de reparação, só ocorre uma única falha, após a qual será substituído por outro do mesmo género em virtude de ter ficado inutilizado.

Como exemplos de sistemas reparáveis poder-se-ão referir todos os géneros de electrodomésticos, como por exemplo um ferro de engomar ou uma máquina de lavar loiça; por sua vez, como exemplos de sistemas não reparáveis poder-se-ão citar os seguintes bens: lâmpadas, rolamentos, velas, filtros de óleo e correias de distribuição de um automóvel.

A necessidade de distinguir e esclarecer os conceitos de sistemas reparáveis e não reparáveis prende-se com o facto de a previsão e quantificação da fiabilidade se efectuar distintamente, consoante se trate de um, ou de outro, dos sistemas.

3.3 Noção de fiabilidade

As normas Internacionais definem fiabilidade como

a probabilidade de um sistema desempenhar correctamente, sem falhas, a função requerida durante um dado período de tempo e em condições específicas.

Pode-se então dizer que a fiabilidade tenta garantir que um produto não deixe de funcionar durante certo período de tempo de forma a assegurar que permanecerá em boas condições para desempenhar as funções para o qual foi projectado.

Trata-se pois de um conceito que relaciona o estado de funcionamento com o tempo, podendo esta métrica ser substituída por outro tipo de unidade de contagem como, por exemplo, horas trabalhadas, Km percorridos, ciclos de operação executados, entre outras.

De modo a exprimir esta relação matematicamente consideremos a variável T como o tempo de vida de um determinado sistema (reparável ou não). Expressar-se-á a fiabilidade

até ao tempo t , como a probabilidade de $T > t$, vindo a Função Fiabilidade, denotada por $R(t)$, matematicamente expressa por:

$$R(t) = P_r(T > t), \quad (3.1)$$

com $R(t) \geq 0$.

A fiabilidade de um determinado sistema, reparável ou não, diminuí à medida que o tempo aumenta, de tal modo que: $\lim_{t \rightarrow 0} R(t) = 1$ e $\lim_{t \rightarrow \infty} R(t) = 0$.

A cessação de funcionamento do sistema provocará avaria, sendo a sua probabilidade nesse instante t expressa pela Função Probabilidade de Avaria. Denota-se por $F(t)$ e é uma função complementar de $R(t)$, portanto:

$$F(t) + R(t) = 1 \quad (3.2)$$

Desta equação pode-se deduzir uma expressão para a função $F(t)$:

$$F(t) = 1 - R(t) \quad (3.3)$$

A probabilidade de um sistema avariar, aumenta à medida que t aumenta, isto é: $\lim_{t \rightarrow \infty} F(t) = 1$.

A fiabilidade pode, alternativamente, ser caracterizada pela função densidade de probabilidade de Avaria. Esta função representa-se por $f(t)$ e expressa a densidade do tempo de falha. Matematicamente será definida como:

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt}, \quad (3.4)$$

teremos então

$$\frac{dR(t)}{dt} = -f(t), \quad (3.5)$$

pelo que, a função probabilidade de avaria, $F(t)$, será obtida pela integração da função densidade de probabilidade:

$$F(t) = \int_0^t f(t)dt, \quad (3.6)$$

A função fiabilidade virá expressa por

$$R(t) = 1 - \int_0^t f(t)dt, \quad (3.7)$$

o que é equivalente a

$$R(t) = \int_t^{\infty} f(t)dt. \quad (3.8)$$

A função $f(t)$ é habitualmente definida através de fórmulas, sendo todavia, susceptível de ser representada graficamente, apresentando uma configuração que será função das distribuições estatísticas que caracterizam o comportamento dos sistemas. Na bibliografia que versa sobre esta temática encontram-se como configurações ou formas mais comuns as apresentadas na Figura 3.1.

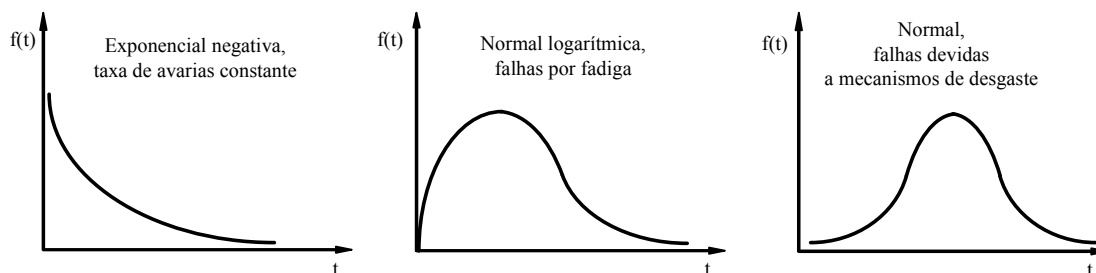


Figura 3.1: Formas de representação da função densidade de probabilidade.

Em conclusão, a função $R(t)$ é associada à fiabilidade ou probabilidade de funcionamento, a função $F(t)$ está relacionada com probabilidades acumuladas de avaria e a função $f(t)$ é usada para caracterizar uma distribuição de avarias.

Atendendo aos conceitos de sistemas reparáveis e não reparáveis anteriormente descritos, facilmente se depreende que o conceito de fiabilidade não poderá ser interpretado literalmente da mesma forma em ambos os casos. A devida distinção e a forma de a quantificar, consoante se trate de um dos dois géneros de sistemas, são os assuntos dos próximos pontos.

3.3.1 Fiabilidade de sistemas reparáveis

A interrupção ou ineficaz funcionamento de um sistema reparável pode ser provocada por inúmeras razões como sejam a má utilização, actividade em condições adversas, falhas de concepção, de fabricação ou dos seus componentes, e ainda por desgaste, entre outras.

Para O'Connor [10] a fiabilidade de um sistema reparável, representa a probabilidade de não se verificar qualquer género de avaria durante um dado período de tempo, no qual se considera possível a ocorrência de mais que uma avaria.

Esta afirmação leva, inevitavelmente, a precisar o conceito de avaria que de acordo com as normas portuguesas, é revestido do seguinte significado:

Alteração ou cessação da capacidade de um bem ou equipamento para realizar a sua função específica.

Poder-se-á então dizer que a fiabilidade de um sistema reparável expressa a capacidade de o sistema desempenhar adequadamente a sua função ao longo de um certo tempo, ou seja, quando o seu funcionamento está isento de qualquer género de interferências (como por exemplo: sintomas anormais, produção defeituosa, rendimento abaixo do esperado) que justifiquem intervenções do serviço de manutenção de forma a que possa atingir o nível de desempenho esperado.

A frequência à qual as avarias ocorrem designa-se taxa de avarias, denota-se por $\lambda(t)$ e define-se como a variação do número esperado de avarias relativas a um determinado instante de tempo. A expressão matemática que lhe corresponde é a seguidamente apresentada:

$$\lambda(t) = \frac{\partial}{\partial t} E[N(t)], \quad (3.9)$$

ou seja, a derivada em ordem ao tempo da esperança matemática do número de avarias no instante t .

A taxa de avarias, é um conceito que deve ser associado a acontecimentos repetitivos observados por unidade de tempo, constituindo-se por conseguinte, como um indicador utilizado, exclusivamente, na quantificação da fiabilidade de sistemas reparáveis.

Ao longo do tempo as avarias podem ocorrer de três formas distintas: serem independentes e identicamente distribuídas (IID) ou seja, ocorrem aleatoriamente do ponto de vista do sistema e neste caso $\lambda(t)$ é constante; podem ocorrer de forma não independente e identicamente distribuídas (NIID) e neste pressuposto $\lambda(t)$ pode ser uma função decrescente (a que corresponde uma fiabilidade crescente), ou então, ser uma função crescente (a que corresponde uma fiabilidade decrescente). É esta variação da $\lambda(t)$ verificada ao longo do tempo que configura ou modela, como se observa na Figura 3.2, a “Curva em forma de uma banheira” caracterizada por três fases distintas: a *fase I* cuja fiabilidade é crescente devido ao decréscimo da taxa de avarias, a *fase II* cuja fiabilidade e taxa de avarias são constantes e a *fase III* cuja fiabilidade é decrescente devido ao incremento da taxa de avarias. Uma descrição mais pormenorizada acerca deste assunto é apresentada na Secção 3.4 – curva de sobrevivência ou mortalidade. A averiguação de uma taxa de avarias crescente, decrescente ou constante, pode ser efectuada por recurso ao teste de Laplace, método cujo desenvolvimento é efectuada na Secção 3.5.

Taxa de avarias decrescente

Observa-se em produtos cuja probabilidade de avaria vai diminuindo à medida que o tempo de funcionamento decorre, pelo que o pressuposto IID não é verdadeiro, ou seja, as avarias não ocorrem segundo um processo de Poisson homogéneo. A taxa de avarias destes produtos molda a *fase I* da Figura 3.2 a qual se designa zona de falhas precoces.

A qualidade de um produto depende essencialmente do grau de ajuste entre as características do produto fabricado e as especificações do projecto que o concebeu onde, implicitamente, se pressupõe estarem presentes os requisitos e necessidades do utilizador. À luz das filosofias da Qualidade total, pretende-se atingir a plena satisfação dessas necessidades, o que tem como consequência a diminuição do número de peças produzidas fora das especificações, levando a que o período de falhas precoces tenda a ser anulado ou reduzido a um mínimo. Além das normas subjacentes à filosofia da Qualidade Total que visam o cumprimento das especificações, existem outras técnicas específicas como *burn-in* e *debuging* a cuja utilização se recorre com a finalidade de eliminar antecipadamente os itens cujas falhas possam ser prematuras. Uma vez que falhem, procede-se à sua substituição por outros da mesma natureza, mas com melhores características, o que contribuirá para a melhoria de performance do equipamento onde estão inseridos.

Quando, pela aplicação do teste de Laplace, procedimento descrito na Secção 3.5, se conclui pela evidência estatística de taxa de avarias decrescente, torna-se necessário determinar uma estimativa para essa taxa. O Modelo de Duane ou o Modelo de Crow são dois métodos possíveis a utilizar nesse desígnio.

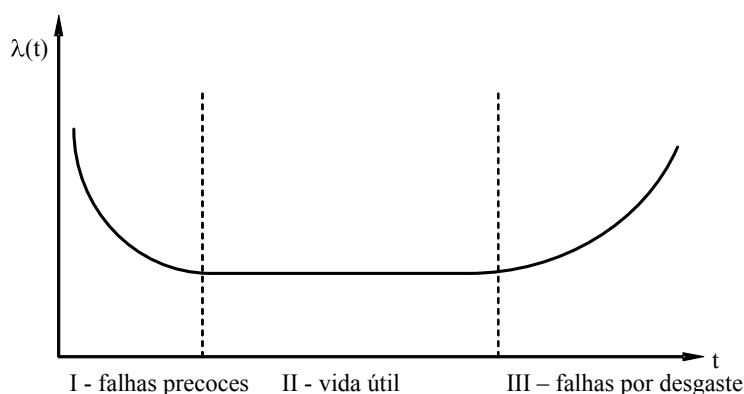


Figura 3.2: Evolução da taxa de avarias com o tempo – “curva da banheira”.

Modelo de Duane Observam-se $N(t)$ avarias ao tempo t , sendo a taxa de avarias pontual igual a $\frac{\partial N(t)}{\partial t}$ que vai oscilar entre zero (para ∂t 's com zero avarias) e valores elevadíssimos (para ∂t 's com avarias). Pode-se amortecer esta oscilação definindo a *taxa de avarias acumulada* como sendo:

$$\lambda_{\Sigma} = \frac{N(t)}{t} = kt^{-\alpha}, \quad (3.10)$$

com α o factor de crescimento da fiabilidade, e k constante.

Derivando $N(t)$ em ordem a t , a taxa de avarias no instante t será dada pela seguinte expressão:

$$\lambda(t) = \frac{\partial N(t)}{\partial t} = (1 - \alpha)kt^{-\alpha}, \quad (3.11)$$

com

$$\alpha = (1 - \alpha)\lambda_{\Sigma}. \quad (3.12)$$

Aplicando logaritmos naturais ou decimais vem:

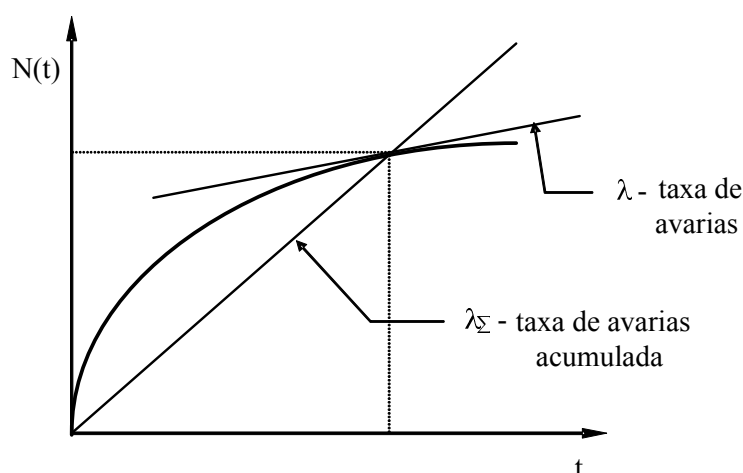


Figura 3.3: Taxa de avarias acumulada.

$$\ln \lambda = \ln(1 - \alpha) + \ln \lambda_{\Sigma} = \ln(1 - \alpha) + \ln k - \alpha \ln t,$$

em que

$$\ln \left(\frac{N(t)}{t} \right) = \ln k - \alpha \ln t, \quad (3.13)$$

O factor de crescimento, α , é medido através do declive da recta λ_{Σ} ou λ . O seu valor é proporcional ao crescimento das acções de manutenção, obviamente, quanto mais

elevado maior será o crescimento. Assim, consoante sejam os valores encontrados para α , poderemos interpretar que:

- $\alpha \approx 0.2$ – Crescimento dito de “rotineiro” obtido através de um esforço mínimo para melhoria da fiabilidade do produto;
- $\alpha \approx 0.6$ – Crescimento acentuado como resultado de uma actividade organizada e efectiva para melhorar o produto.

Assim a taxa de avarias estimada pelo modelo de Duane pode ser obtida por extrapolação no mesmo gráfico e será dada pela seguinte expressão:

$$\hat{\lambda}(t) = (1 - \alpha)kt^{-\alpha}. \quad (3.14)$$

Modelo de Crow Este modelo, também conhecido por método da máxima verosimilhança, é uma reformulação do modelo de Duane de modo a permitir testes estatísticos e a definição de intervalos de confiança. Apresenta maior simplicidade algébrica que o modelo de Duane e quando aplicado permite estimar a taxa de avarias segundo dois processos alternativos: por via gráfica e via analítica.

Estimativa por via gráfica A taxa de avarias por via gráfica pode ser estimada da seguinte maneira: considere-se $N(t)$ como o número de avarias esperadas até t

$$N(t) = \lambda t^\beta, \quad (3.15)$$

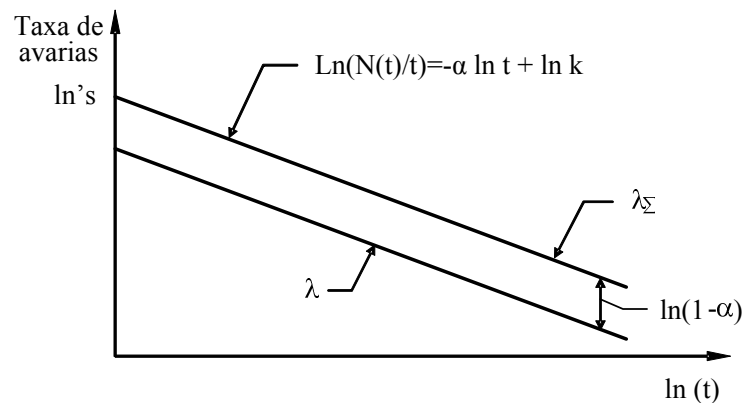


Figura 3.4: Modelo de Duane (representação gráfica).

aplicando logaritmos virá

$$\ln(N(t)) = \ln \lambda + \beta \ln t. \quad (3.16)$$

É assim possível estimar β e λ através de um gráfico do género do apresentado na Figura 3.5. A estimativa de β será dada pelo declive da recta e λ por leitura directa.

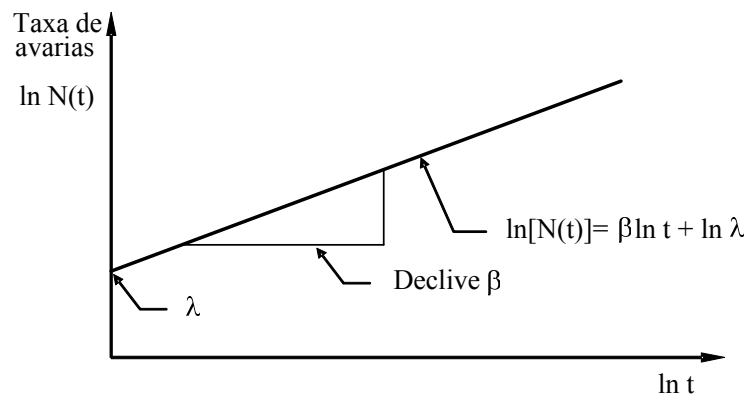


Figura 3.5: Modelo de Crow (representação gráfica).

Com os valores assim conseguidos para β e λ a taxa de avarias para um instante t será dada por:

$$\lambda(t_0) = \lambda \beta t_0^{\beta-1} = \frac{N(t_0)\beta}{t_0}, \quad (3.17)$$

com $t = t_0$ (tempo final do teste ou período de observação).

Estimativa por via analítica A taxa de avarias por via analítica pode ser estimada segundo o espaço temporal ou pelo número de ocorrências. As correspondentes expressões são as seguintes:

- *Teste limitado por tempo*

$$\hat{B} = \frac{N}{\sum_{i=1}^N \ln \left(\frac{t_0}{t_i} \right)}, \quad (3.18)$$

$$\hat{\gamma} = \frac{N}{t_0^{\hat{B}}}, \quad (3.19)$$

com N número de avarias, t_0 o tempo total, e t_i o tempo da avaria i .

- *Teste limitado por ocorrências*

$$\hat{B} = \frac{N}{\sum_{i=1}^{N-1} \ln \left(\frac{t_n}{t_i} \right)}, \quad (3.20)$$

$$\hat{\gamma} = \frac{N}{t_n^{\hat{B}}}, \quad (3.21)$$

com t_n o tempo da avaria n (última avaria).

Com os valores assim conseguidos para β e γ a estimativa da taxa de avarias será dada pela seguinte expressão:

$$\lambda(t) = \hat{\gamma} \cdot \hat{B} \cdot t^{\hat{B}-1}. \quad (3.22)$$

Como se pode constatar pela observação da Figura 3.2, com o passar do tempo, a taxa de avarias decresce para um valor inferior e mantém-se constante por um período relativamente longo, pelo que é plausível, com o valor de $\lambda(t)$ assim estimado, prever a fiabilidade de um sistema reparável através do modelo exponencial negativo, vindo conseqüentemente a fiabilidade expressa por:

$$R(t) = e^{-\lambda t}, \quad (3.23)$$

sendo t o tempo entre acontecimentos sucessivos.

Taxa de avarias constante

Quando o pressuposto IID é verdadeiro as avarias ocorrem segundo um processo de Poisson homogéneo pelo que a taxa de avarias é constante ao longo do tempo. Assim, a probabilidade de falha instantânea, condicionada a que o sistema está a funcionar, é a mesma em qualquer momento, motivo pelo qual é usual afirmar-se que o processo não tem memória.

Nestas circunstâncias é modelada a fase II da curva de sobrevivência, representada na Figura 3.2, a qual se designa zona de vida útil.

Para equipamentos em condições de taxa de avarias constante, uma estimativa de $\lambda(t)$ pode ser obtida pela aplicação da seguinte expressão

$$\lambda(t) = \frac{\text{N}^\circ \text{ de avarias}}{\text{Período de tempo de observação}}, \quad (3.24)$$

que representa a frequência à qual as avarias ocorrem durante um determinado período de tempo em observação.

Segundo O'Connor [10], para equipamentos reparáveis que se encontrem numa situação de taxa de avarias constante, a fiabilidade pode, alternativamente à taxa de avarias, ser quantificada pelo MTBF, abreviatura que deriva do Inglês *mean time between failures*. Segundo o mesmo autor, o MTBF ou valor esperado do tempo entre avarias, exprime o tempo médio de bom funcionamento, ou seja, o tempo que decorre, em média, entre duas avarias consecutivas. Pode ser obtido pela resolução da expressão matemática que define a média ou valor esperado de uma variável contínua:

$$MTBF = E(t) = \int_0^{\infty} tf(t)dt. \quad (3.25)$$

A previsão da fiabilidade de um sistema reparável, quando se conclui pela evidência estatística de taxa de avarias constante, pode, tal como anteriormente, ser efectuada por recurso ao modelo exponencial negativo, ou seja:

$$R(t) = E(t) = e^{-\lambda t}, \quad (3.26)$$

sendo t o tempo entre acontecimentos sucessivos.

Taxa de avarias crescente

Na terceira e última fase do ciclo de vida dos equipamentos verifica-se um desempenho que reflecte o processo normal e inevitável do envelhecimento e a taxa de avarias é, como prenunciado, incrementada à medida que o tempo decorre. Esta característica molda a *fase III* da curva de sobrevivência e designa-se zona de falhas por desgaste.

Para equipamentos na situação de taxa de avarias crescente não é usual prever o comportamento fiabilístico do equipamento através da taxa de avarias.

3.3.2 Fiabilidade de sistemas não reparáveis

Viu-se que a Fiabilidade é descrita como a probabilidade de um sistema funcionar sem avarias durante um certo período de tempo. Viu-se, igualmente, que num sistema não reparável, só acontece uma e apenas uma falha. Por conseguinte, a fiabilidade de um sistema não reparável, normalmente redutível ao componente ou item, traduz a probabilidade desse sistema novo operar sem incidentes durante um certo período T .

Perante sistemas não reparáveis, a fiabilidade pode ser avaliada e quantificada mediante a análise estatística de tempos de sobrevivência de múltiplos componentes do

mesmo género presentes, em um, ou mais equipamentos. Estes tempos que se caracterizam pelo tempo que medeia desde a entrada em serviço dos componentes novos e a sua falha e são vulgarmente representados pelo acrónimo *tff's* derivado de *time to failure*. Através da informação oriunda dessa análise estatística, cuja metodologia é apresentada na Secção 3.10.2, é possível obter uma estimativa para o MTTF, que ao indicar o tempo médio de sobrevivência até à ocorrência da falha, proporciona indicações acerca da performance do sistema não reparável em estudo.

O MTTF pode, alternativamente, ser obtido pela resolução da expressão matemática que define o valor esperado para uma variável contínua:

$$MTTF = \int_0^{\infty} tf(t)dt. \quad (3.27)$$

É de realçar o paralelismo que existe entre o MTTF e o MTBF. Tal paralelismo é evidente quando se compara a expressão (3.27) com a (3.25) anteriormente utilizada na definição do tempo médio entre avarias.

Segundo O'Connor [10], a fiabilidade de um sistema não reparável é caracterizada pela probabilidade de funcionamento, para além de um dado período de tempo, onde apenas uma única avaria pode ocorrer.

A probabilidade instantânea da primeira e única avaria é denominada função de risco, uma função que proporciona a probabilidade de falha imediata condicionada a que o componente está a funcionar. É sobre esta função que se discorre seguidamente.

Função de risco

A Função de Risco, denotada por $h(t)$, representa a probabilidade por unidade da variável (normalmente o tempo) de um item ou componente não reparável vir a falhar no intervalo de tempo $[t, t + dt]$, dado que sobreviveu até t .

Segundo O'Connor [10, p. 7], existem 3 formas básicas de avaria em sistemas não reparáveis, sendo a função de risco associada constante, crescente ou decrescente. A combinação das diferentes funções de risco dos vários modos de avaria geram a função de risco global do sistema.

Matematicamente este conceito pode ser representado pela seguinte equação:

$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)}. \quad (3.28)$$

A Função de Risco Acumulada, $H(t)$, será obtida pela resolução do seguinte integral:

$$H(t) = \int_{-\infty}^t h(t)dt. \quad (3.29)$$

Ebeling, [6, p. 28], procurando evidenciar a relação que há entre a fiabilidade do sistema e a sua função de risco, desenvolveu a expressão relativa a este conceito da seguinte maneira:

$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{f(t)}{1 - F(t)}. \quad (3.30)$$

Como

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = \frac{dF(t)}{R(t)} \frac{1}{dt}, \quad (3.31)$$

e

$$h(t) = \frac{d}{dt} (\ln R(t)), \quad (3.32)$$

integrando $h(t)$ em ordem ao tempo virá:

$$\int h(t)dt = -d \int \ln R(t). \quad (3.33)$$

Sendo

$$H(t) = -\ln R(t), \quad (3.34)$$

então, a expressão da fiabilidade em função de $h(x)$ será dada por:

$$R(t) = e^{-H(t)} = e^{-\int h(t)dt}, \quad (3.35)$$

e consequentemente pela equação (3.3) a função distribuição de avarias será dada por:

$$F(t) = 1 - e^{-H(t)} = 1 - e^{-\int h(t)dt}. \quad (3.36)$$

A partir da expressão (3.35) pode-se obter a função fiabilidade a partir de uma função de risco qualquer. De igual forma, a partir da expressão (3.36) pode-se obter a função distribuição de avarias, a partir de uma função de risco qualquer.

A Figura 3.6 ilustra a relação da taxa de avarias de um sistema composto por vários componentes e a função de risco de cada componente. Representa-se ainda na mesma, um sistema reparável com N modos de avaria e a sua respectiva função de risco, traçando-se para cada posição do componente a curva representativa da respectiva função entre avarias. Os componentes inseridos no sistema competem entre si para provocarem a próxima avaria,

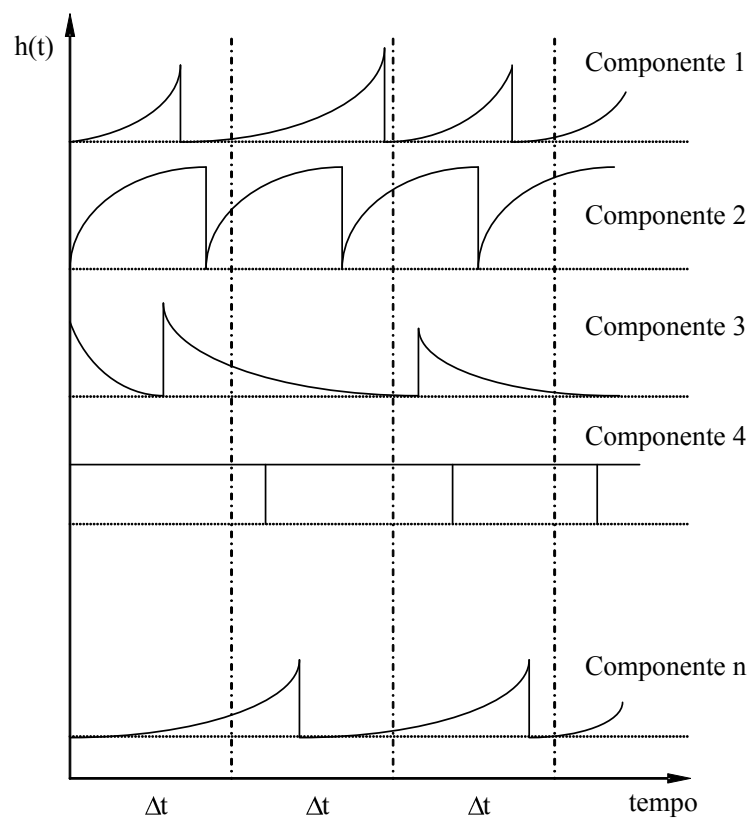


Figura 3.6: Função de risco e taxa de avarias.

sendo preponderante o valor que toma a ordenada da função de risco em cada instante de tempo. A taxa de avarias do conjunto será dada pela razão entre o número de avarias ocorridas em cada intervalo de tempo e o valor desse mesmo intervalo.

Pela observação da Figura 3.6. pode-se concluir que a taxa de avarias tende para um valor constante à medida que o tempo de funcionamento do sistema aumenta, ou seja, a tendência é para que em intervalos de tempo iguais (Δt) ocorram iguais número de avarias do sistema motivados por falhas dos seus componentes.

Parece-nos, neste ponto, ser oportuno discernir convenientemente os conceitos de taxa de avarias e de função de risco. A taxa de avarias surge como um conceito associado a sistemas reparáveis e como tal aplica-se a qualquer ocorrência repetitiva observada por unidade de tempo, pelo que não se pode aplicar a sistemas não reparáveis considerados isoladamente; o conceito de função de risco tem sido aplicado quase exclusivamente a sistemas não reparáveis (componente ou item) quando se pretende avaliar o seu tempo de sobrevivência; contudo, pode ser também associado ao tempo entre avarias, quando se trata de avaliar a evolução da função de risco global de um equipamento ao longo do tempo. Constitui, por isso, uma forma alternativa de caracterizar a fiabilidade de sistemas reparáveis.

Como é bem conhecido da teoria da fiabilidade, o conhecimento sobre o comportamento da função de risco é de extrema utilidade, na medida em que proporciona informação imprescindível relativamente à tomada de decisão sobre a substituição preventiva de componentes de acordo com um planeamento racionalmente económico. Previamente à substituição preventiva de componentes, será indispensável verificar se a função de risco é crescente, pois caso não o seja, a substituição não se revela viável em virtude de não proporcionar proveitos, quer em termos económicos quer operacionais. Na Secção 3.6 discorre-se sobre a metodologia que permitirá averiguar se a função de risco é crescente.

3.4 Curva de sobrevivência ou de mortalidade

A taxa de avarias ao longo da vida de um sistema muda e é esta variação que define três zonas distintas: período de arranque ou infância, período de vida útil ou maturidade e período de desgaste. A estas zonas corresponde, respectivamente, a generalização do comportamento de taxas de avarias decrescente, constante e crescente (ver Secção 3.3.1). Esta caracterização configura a curva de sobrevivência ou mortalidade que devido ao seu

formato, tal como se pode constatar na Figura 3.2, é habitualmente intitulada como “*Curva em forma de banheira*”. A forma desta curva pode ser ligeiramente diferente em função do género ou natureza do item: verifica-se que os sistemas electrónicos, em geral, têm longa vida útil e conseqüentemente a fase II é mais extensa na curva enquanto que os sistemas mecânicos, normalmente, entram mais rápido na fase III.

Ressalva-se que a curva em forma de banheira embora apresente a mesma configuração para sistemas reparáveis e não reparáveis, terá uma interpretação distinta: para os primeiros representa a taxa de avarias em função do tempo de serviço acumulado e nos segundos representa a variação da função de risco com a idade. Pode-se proferir que, em termos gerais, se fazem duas interpretações distintas como se de duas curvas diferentes se tratasse.

O seu período mais significativo é o representado pela fase II, que além de, regularmente, ter uma duração nitidamente superior às fases I e III é a única considerada operacional. As falhas verificadas durante este período são imprevisíveis ou puramente aleatórias considerando-se, portanto, que não há uma razão específica para o seu aparecimento. Pelo contrário, as falhas que ocorrem nas fases I e III são normalmente ocasionadas por motivos específicos e indesejáveis: em geral na fase I são originadas por problemas de concepção ou de fabricação ocultos enquanto que na fase III surgem, na maior parte das vezes, por desgaste ou fadiga associadas ao processo de envelhecimento do sistema. A fiabilidade crescente é o efeito que se obtém resultante de contínuas melhorias introduzidas no sistema, em resultado da análise do seu desempenho operacional e numa diminuição da taxa de avarias. A Fiabilidade decrescente é a consequência do aumento da frequência de avarias; todavia, será indispensável averiguar a presença de causas possíveis e assinaláveis que eventualmente induzam este comportamento, sem contudo de ter atingido a efectiva obsolescência do mesmo. A inexistência deste tipo de causas pode indiciar que o equipamento, provavelmente, estará próximo do seu limite de uso e conseqüentemente, a realização de operações de manutenção, não será suficiente para inverter o comportamento degenerativo do mesmo. A partir desse ponto, deve-se indagar sobre a necessidade de proceder a uma revisão geral, com o único objectivo de melhorar o seu funcionamento – obtido pela diminuição das suas incapacidades – ou, no limite, estudar a viabilidade económica da sua substituição pois, como é sobejamente conhecido, com o passar do tempo a degradação será inevitável. Se economicamente conveniente, poderá evitar-se temporariamente a fase de deterioração ou obsolescência pela aplicação de manutenção do tipo preventiva (ver Capítulo 2) uma vez que a detecção precoce de falhas e a substituição de peças e componentes, de acordo com

uma planificação racionalmente económica, poderá prolongar por mais algum tempo a fase operacional do equipamento.

A importância desta curva prende-se com o facto de se abordar um estudo fiabilístico em função do comportamento de falhas ao longo do tempo. Tal comportamento pode ser averiguado por recurso à aplicação do teste de Laplace, cujo método é seguidamente apresentado.

3.5 Teste de Laplace

O teste de Laplace é o procedimento a utilizar sempre que se deseje averiguar qual a tendência dos dados sob o ponto de vista do processo estocástico. A análise de tendência é um dos processos de inferência estatística, baseado na metodologia dos testes de hipóteses, a cuja utilização se recorre sempre que se queira verificar se os dados amostrais são ou não compatíveis com determinadas populações e se os modos de avaria são Independentes e Identicamente Distribuídos, constituindo um processo de Poisson homogéneo e tendo, portanto, uma taxa de avarias constante.

Segundo Leitão [8], antes de se ajustar qualquer distribuição estatística a um conjunto de dados, previamente dever-se-á analisar qual a sua tendência. O ajuste só será viável no caso de se concluir pela evidência estatística de tempos de ocorrências IID, pois na situação contrária, provavelmente, deparar-nos-emos com dados dependentes da ordem cronológica e/ou provenientes de mais que uma população.

Este procedimento deve ser efectuado distintamente, consoante se trate de sistemas reparáveis e de sistemas não reparáveis.

3.5.1 Aplicação do teste a sistemas reparáveis

A análise efectuada a sistemas reparáveis tem como objectivo indagar qual é a tendência que a frequência das avarias apresentam, ou seja, se há indícios estatísticos de taxa de avarias decrescente, constante ou crescente, tal como descrito na Secção 3.4, Curva da sobrevivência ou mortalidade.

Mediante um conjunto de dados cuja tendência seja desconhecida, começar-se-á por elaborar um teste do tipo bilateral – em que a hipótese alternativa é uma hipótese composta por não ficar completamente especificada – obtendo-se, inevitavelmente, a afirmação ou

negação de taxa de avarias constante.

O Procedimento desenrola-se de acordo com os seguintes três passos:

1. Especifica-se a hipótese nula, H_0 , em confronto com a hipótese alternativa, H_1 , do seguinte modo:
 - H_0 : taxa de avarias constante;
 - H_1 : taxa de avarias não constante.
2. Para apurar estatisticamente a veracidade da hipótese nula necessita-se de calcular o valor *Estatística do Teste* (ET) e identificar a distribuição amostral.

A Estatística do Teste aplicado ao histórico cronológico das avarias pode ser realizado segundo dois critérios distintos conforme se trate do espaço temporal ou de ocorrências. Assim teremos ([8]):

- Teste limitado por tempo

$$ET = \sqrt{12N} \left(\frac{\sum_{i=1}^N t_i}{Nt_0} - 0.5 \right). \quad (3.37)$$

- Teste limitado por ocorrência

$$ET = \sqrt{12(N-1)} \left(\frac{\sum_{i=1}^{N-1} t_i}{(N-1)t_0} - 0.5 \right). \quad (3.38)$$

com N o número de ocorrências ($N \geq 4$), t_i o tempo decorrido até à ocorrência i , e t_0 o tempo total actual.

3. Estabelece-se o nível de significância bilateral, α , e lê-se na tabela da Distribuição Normal Padronizada (Anexo D.6) o valor referente ao nível de significância definido, $z_{\frac{\alpha}{2}}$, que se compara com o valor de ET calculado no ponto anterior, procedendo de seguida à tomada de decisão de acordo com os seguintes critérios:
 - se o número de dados amostrais for significativo e $-z_{\frac{\alpha}{2}} \leq ET \leq z_{\frac{\alpha}{2}}$, ao nível de significância considerado, não se rejeita a hipótese nula – o teste diz-se inconclusivo – pelo que não há evidências estatísticas de taxa de avarias não constante.

- no caso de o valor de a ET ficar fora daquele intervalo, ao nível de significância considerado, rejeita-se a hipótese nula – o teste diz-se conclusivo – pelo que há evidências estatísticas de taxa de avarias não constante.

Neste caso, verificada a evidência estatística de ocorrências não IID, constituindo portanto um processo de Poisson não homogêneo, passar-se-á a averiguar qual a sua tendência, recorrendo-se para o efeito a um teste do tipo unilateral, em que a hipótese alternativa estabelecerá explicitamente que a taxa de ocorrências é decrescente ou então crescente, consoante se pretenda averiguar se deparamos com uma fiabilidade crescente ou decrescente. Nestas circunstâncias o processo desenrola-se sequencialmente nos seguintes 3 passos:

1. Especifica-se a hipótese nula, H_0 , em confronto com a alternativa, H_1 , do seguinte modo:

- H_0 : taxa de avarias constante;
- H_1 : taxa de avarias decrescente (caso de fiabilidade crescente);

Ou, para a segunda alternativa,

- H_0 : taxa de avarias constante;
- H_1 : taxa de avarias crescente (caso de fiabilidade decrescente).

2. Calcular ET do teste – expressões (3.37) ou (3.38) – e caracterizar a Distribuição Amostral pela $N(0, 1)$.

3. Estabelecer o nível de significância unilateral, α , e obter através da tabela da Distribuição Normal Padronizada (Anexo D.6), o valor referente ao nível de significância definido, $z\alpha$, que se compara com o valor de ET calculado no ponto anterior, procedendo de seguida à tomada de decisão de acordo com os seguintes critérios:

- se $ET \leq z\alpha$ e n significativo, o teste diz-se inconclusivo e aceita-se a hipótese nula; se, pelo contrário, n for de pequena dimensão, dever-se-ão adquirir mais dados e reavaliar novamente a situação;
- se $ET > z\alpha$, o teste diz-se conclusivo e rejeita-se a hipótese nula considerando-se a taxa de ocorrências crescente;

- se $ET \geq -z\alpha$ e n significativo, o teste diz-se inconclusivo e aceita-se a hipótese nula;
- se $ET < -z\alpha$, o teste diz-se conclusivo e rejeita-se a hipótese nula considerando-se a taxa de ocorrências decrescente.

A probabilidade α de a ET pertencer à região de rejeição designa-se por *Nível de Significância do Teste*. O nível de significância representa a probabilidade de rejeitar a hipótese nula, H_0 , quando esta hipótese é de facto verdadeira (designando-se em estatística por erro do tipo I).

Note-se que a decisão de rejeição ou não rejeição da hipótese nula é uma dicotomia artificial na medida em que a fixação do nível de significância é arbitrária e os dados amostrais podem contradizer a hipótese nula em maior ou menor grau. Ao maior ou menor grau de contradição da hipótese nula pelos dados amostrais chama-se *Valor de Prova* que segundo Guimarães e Cabral [7, p. 341], corresponde à

probabilidade de a estatística do teste tomar um valor igual ou mais extremo do que aquele que, de facto, é observado.

O valor de prova é calculado admitindo que H_0 é verdadeira e será dado por:

$$P = [ET \geq X|_{H_0}]. \quad (3.39)$$

Quanto menor for o valor de prova do teste maior será a segurança da decisão tomada, ou seja, maior será o grau com que a hipótese nula é contradita. Dada a importância desta informação é aconselhável a sua inclusão nos resultados dos testes de hipóteses a efectuar.

3.5.2 Aplicação do teste a sistemas não reparáveis

Quando a análise incidir sobre um sistema não reparável, sempre que possível redutível ao componente, o processo desenrola-se sequencialmente nos seguintes três passos:

1. Formulação das hipóteses subjacentes ao teste:
 - H_0 : ocorrências IID – (Independentes e Identicamente Distribuídas);
 - H_1 : ocorrências não IID.

2. Para averiguar estatisticamente a veracidade da hipótese nula necessita-se de calcular o valor *Estatística do Teste* (ET) – expressões (3.37) e (3.38) – e identificar a distribuição amostral.
3. Estabelece-se o nível de significância bilateral, α , e lê-se na tabela da Distribuição Normal Padronizada (Anexo D.6) o valor referente ao nível de significância definido, $z_{\frac{\alpha}{2}}$, que se compara com o valor de ET calculado no ponto anterior de forma a proceder à tomada de decisão de acordo com os seguintes critérios:
 - se o número de dados amostrais for significativo e $-z_{\frac{\alpha}{2}} \leq ET \leq z_{\frac{\alpha}{2}}$ há evidências estatísticas no sentido de não rejeitar a hipótese nula (o teste diz-se inconclusivo) pelo que é plausível, nesta e só nesta circunstância, prever o comportamento fiabilístico do sistema em estudo através de um ajustamento a um modelo teórico (processo descrito na Secção 3.10);
 - no caso de o valor de ET ficar fora daquele intervalo rejeita-se a hipótese nula (o teste diz-se conclusivo), e para o nível de significância considerado as ocorrências não serão IID no tempo, pelo que os dados, provavelmente, dependerão da ordem cronológica das avarias ou serão oriundos de mais que uma população, devendo essa tendência ser analisada com o propósito de se encontrarem as suas possíveis causas. Nesta situação, tal como referido por Leitão [8], não é plausível ajustar os dados a uma qualquer distribuição teórica.

3.5.3 Aspectos a considerar aquando da aplicação do teste

Sempre que o teste de Laplace seja aplicado a um conjunto de dados de um determinado componente da mesma natureza presente em mais que um sistema é indispensável proceder à actualização dos tempos de ocorrência das avarias (t_i), e do tempo total do teste (t_0), a fim de evitar os inconvenientes da informação sobreposta. De forma a explicitar esta questão, considere-se um caso fictício de um dado componente instalado em dois sistemas distintos, aqui designados por A e B, mostrando-se, para o efeito, na Tabela 3.1 as horas de avaria verificadas em cada um dos sistemas.

Como se pode verificar pelo exposto na mesma Tabela, o sistema B com um t_0 de 3300 horas, começou a funcionar 500 horas depois do sistema A ao qual corresponde um t_0 de 2500 horas de funcionamento. Trata-se portanto de uma situação de início e terminus não

Equip.	Início	Hora da avaria					t_0
A	0	231	885	1550	2100	–	2500
B	500	615	1270	1918	2600	3100	3300

Tabela 3.1: Hora de ocorrência das avarias.

Hora de ocorrência	Hora corrigida
231	231
615	$615 \times 2 - 500 = 730$
885	$885 \times 2 - 500 = 1270$
1270	$1270 \times 2 - 500 = 2040$
1550	$1550 \times 2 - 500 = 2600$
1918	$1918 \times 2 - 500 = 3336$
2100	$2100 \times 2 - 500 = 3700$
2600	$2600 + 2500 = 5100$
3100	$3100 + 2500 = 5600$

Tabela 3.2: Os tempos de avaria transformados para a análise de tendência.

coincidente, pelo que para efectuar a análise de tendência, de uma forma correcta, sobre os tempos de avaria, é necessário actualizar os novos t_i e t_0 da forma como se mostra na Tabela 3.2.

Como se pode verificar ao analisar a Figura 3.8, os novos t_i e t_0 expressam melhor a tendência de ocorrência das avarias, pelo que o cálculo da (ET) do teste, através das expressões (3.37) ou (3.38) tem que ser efectuado considerando estes novos valores.

Figura 3.7 Figura 3.8

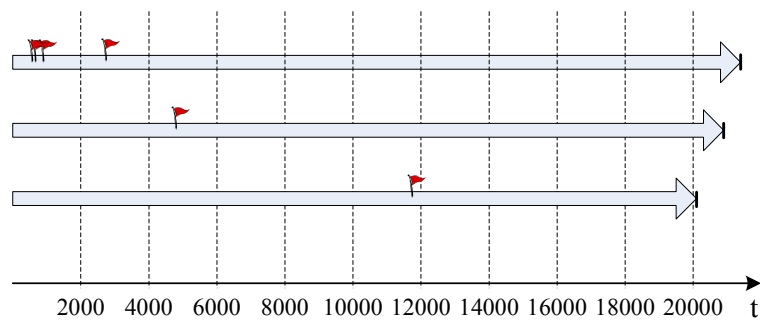


Figura 3.7: Inconvenientes da informação sobreposta.

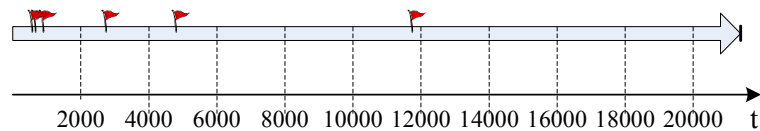


Figura 3.8: Os tempos de avaria transformados para a análise de tendência.

3.5.4 Limitações do teste

Apresentam-se seguidamente algumas das limitações teóricas inerentes ao teste descrito ([5]):

- o início da análise não coincidir com o início do funcionamento do sistema;
- quando há indícios que os tempos de funcionamento não serão forçosamente independentes;
- as reparações não serem perfeitas e não restituírem o estado de novo ao equipamento;

- alterações das avarias sempre que há alterações dos elementos da equipe de manutenção;
- o processo de registo poderá conter erros devido a incoerências na forma de inserir a informação;
- algumas das avarias não serem provocadas por qualquer avaria de componentes mas por outros motivos quaisquer como, por exemplo, utilização defeituosa;
- os sistemas que sofreram uma revisão geral frequentemente passam por uma fase de falhas precoces, apresentando taxa de avarias superiores logo após a reparação devido a componentes que noutras circunstâncias não teriam avariado.

3.6 Distribuições estatísticas para estudo da sobrevivência

Na Secção 3.2 foram apresentadas as funções matemáticas, nomeadamente a função fiabilidade, a função distribuição de avarias, a função densidade de probabilidade e a função de risco, que caracterizam ou descrevem a ocorrência de avarias para um determinado espaço temporal. Neste ponto, descrever-se-ão os modelos teóricos ou distribuições estatísticas mais utilizadas nessas caracterizações: são essencialmente as distribuições de Poisson, exponencial negativa, normal e de Weibull.

Posteriormente, na Secção 3.10, apresentar-se-ão os métodos e critérios utilizados para eleger qual destas distribuições melhor caracteriza o processo de avaria.

3.6.1 Distribuição de Poisson

A distribuição de Poisson é uma distribuição discreta cuja função de probabilidade vem definida pela seguinte expressão:

$$P(X) = \frac{e^{-m} m^X}{X!}, \quad (3.40)$$

em que

$$P(X) = \frac{e^{-\lambda t} (\lambda t)^X}{X}, \quad (3.41)$$

com X o número de avarias, e m o número médio de ocorrências. Trata-se de um modelo que pode ser usado para descrever os acontecimentos aleatórios num espaço amostral contínuo, como por exemplo, o número de ocorrências verificadas por unidade de tempo ou espaço. O parâmetro λ da distribuição representa a média ou valor esperado das ocorrências durante esse tempo ou espaço.

3.6.2 Distribuição exponencial negativa

A distribuição exponencial negativa é uma distribuição contínua à qual corresponde a seguinte função densidade de probabilidade:

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}. \quad (3.42)$$

A função distribuição (ou de probabilidade acumulada) de avaria obtêm-se pela resolução do integral de $f(t)$, compreendido entre $-\infty$ e x , cujo resultado é dado pela seguinte expressão:

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t}. \quad (3.43)$$

A função de risco é caracterizada pela seguinte expressão:

$$h(t) = \lambda. \quad (3.44)$$

E o desvio padrão é dado por:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{\lambda^2}}, \quad (3.45)$$

sendo λ a taxa de ocorrências de acontecimentos.

Tratando-se de um modelo que pode ser usado para descrever o espaço amostral entre acontecimentos, como por exemplo, tempos entre sucessivas avarias num dado equipamento, perante sistemas reparáveis, quando as ocorrências forem consideradas IID, será o modelo a utilizar na predição da fiabilidade, sendo por conseguinte, intimamente relacionado com o modelo de Poisson e utilizada para caracterizar o processo quando o sistema está na situação II da curva da banheira. Figura 3.2. Desta forma, a fiabilidade virá expressa por:

$$R(t) = e^{-\lambda t}, \quad (3.46)$$

sendo t o tempo entre acontecimentos sucessivos. Nesta situação, a fiabilidade do sistema pode ser quantificada pelo MTBF, cuja estimativa é dada por:

$$MTBF = \frac{1}{\lambda}, \quad (3.47)$$

em que

$$R(t) = e^{-\frac{t}{MTBF}}, \quad (3.48)$$

Partindo do pressuposto que no tempo t o sistema reparável possui X avarias, a estimativa da taxa de avarias e do MTBF pode ser obtida por:

$$\hat{\lambda} = \frac{X}{t}, \quad (3.49)$$

$$MTBF = \frac{t}{X}, \quad (3.50)$$

sendo o número médio de ocorrências m dado por:

$$m = \lambda t = \frac{t}{MTBF}, \quad (3.51)$$

e a probabilidade de existirem X avarias nesse período será expressa pela equação (3.41)

3.6.3 Distribuição de Weibull

A distribuição de Weibull é uma distribuição contínua cuja função densidade de probabilidade é definida pela seguinte expressão:

$$f(t) = \begin{cases} \frac{\beta}{\eta^\beta} (t - \gamma)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} & \text{para } t > 0, \\ 0 & \text{para } t < 0. \end{cases} \quad (3.52)$$

A função distribuição de avarias, obtida pela integração da função $f(t)$ entre $-\infty$ e x , é dada pela expressão seguinte:

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta}, \quad (3.53)$$

pelo que, perante este modelo, pela equação (3.3) a fiabilidade é expressa por:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta}. \quad (3.54)$$

A função de risco assume a seguinte expressão:

$$h(t) = \frac{\beta}{\eta^\beta} (t - \gamma)^{\beta-1}. \quad (3.55)$$

Nestas expressões γ , η e β têm, respectivamente, a denominação de *Vida Mínima Garantida*, *Vida Característica* e *Factor de Forma*, conceitos aos quais corresponde o seguinte significado:

Vida Garantida (γ) também denominada vida mínima ou ainda parâmetro de localização, corresponde a um tempo de funcionamento, para o qual se pode garantir a não ocorrência de avarias. É usual assumir-se que não há avarias antes de γ , atribuindo-se-lhe perante esta assumption o valor zero.

Vida Característica (η) ou parâmetro de escala, é o tempo para o qual existe a probabilidade de 63.2% dos componentes funcionais avariarem, ou seja, o tempo para o qual só 36.8% dos componentes sobrevivem.

Factor de Forma (β) caracteriza as várias formas da curva da função de probabilidade de avaria bem como os vários padrões da função de risco. As Figuras 3.9, 3.10 e 3.11 evidenciam a influência que este parâmetro exerce, respectivamente, na densidade de probabilidade, na fiabilidade e na função de risco.

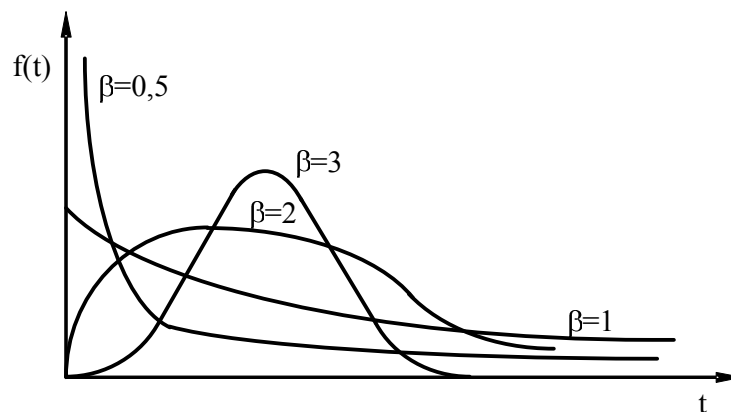


Figura 3.9: Influência do factor de forma na densidade de probabilidade.

Como facilmente se pode constatar, observando a figura 3.9, a variação deste parâmetro possibilita adaptar a distribuição de Weibull à exponencial negativa, à normal logarítmica ou à normal, consoante sejam os valores de β , de tal forma que:

$\beta < 1$ a distribuição apresenta uma função de risco decrescente característica da fase de rodagem;

$\beta = 1$ a distribuição converte-se na distribuição exponencial negativa com função de risco constante e vida média η igual a $1/\lambda$;

$1 < \beta < 3.5$ a distribuição apresenta uma função de risco crescente característica da fase de obsolescência, normalmente devido a fenómenos de fadiga;

$\beta \geq 3.5$ a distribuição aproxima-se da normal, nesta situação ocorrem, normalmente, fenómenos de desgaste.

De maneira a se poderem identificar essas formas, mediante um conjunto de dados que se pretendam ajustar à distribuição de Weibull, é indispensável estimar o valor desses parâmetros. Os procedimentos a seguir nesse propósito, serão apresentados na Secção 3.10.2 – Cálculos dos parâmetros das distribuições.

Como se pode depreender da equação (3.54) o factor de forma também influencia a fiabilidade, tal como o que é evidenciado na Figura 3.10.

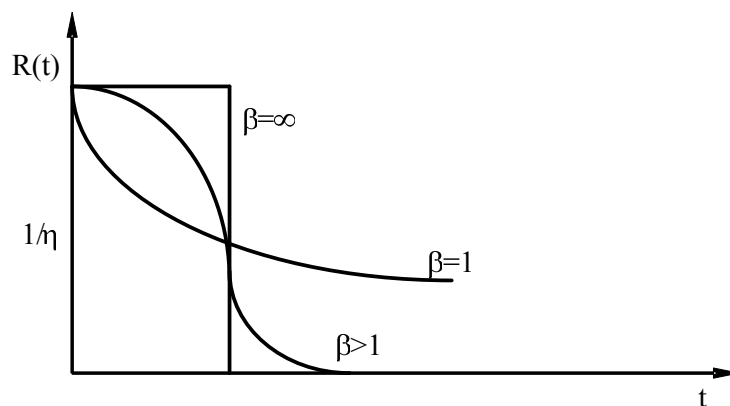


Figura 3.10: Influência do factor de forma sobre a fiabilidade.

Tal como a função densidade de probabilidade e a função fiabilidade são influenciadas pelo parâmetro β , a função de risco é igualmente sujeita à sua influência, tal como evidenciado na Figura 3.11

O tempo médio entre falhas, $MTTF$, e a respectiva variância são dadas pelas seguintes expressões:

$$MTTF = \eta \Gamma \left(\frac{\beta + 1}{\beta} \right), \quad (3.56)$$

$$\sigma^2 = \eta^2 \left[\Gamma \left(\frac{\beta + 2}{\beta} \right) - \left(\Gamma \left(\frac{\beta + 1}{\beta} \right) \right)^2 \right], \quad (3.57)$$

com Γ representado a função Gama.

Em alternativa à expressão apresentada pela equação (3.56) pode ser utilizada a seguinte:

$$MTTF = A\eta + \gamma, \quad (3.58)$$

e para o desvio padrão:

$$\sigma = B\eta, \quad (3.59)$$

sendo A e B valores de Euler, os quais são obtidos em função de β , tal como se apresentam no Anexo D.4.

O modelo de Weibull, contrariamente ao modelo exponencial que será apenas utilizado na predição da fiabilidade caso, pela aplicação do teste de Laplace, as ocorrências sejam consideradas IID, abrange os casos em que a taxa de falhas é variável no tempo, pois trata-se de uma expressão a três parâmetros que possui a relevante particularidade de não possuir uma única forma característica, o que permite, com uma só função densidade de probabilidade, a representação das 3 zonas da curva de sobrevivência ou mortalidade. É devido a esta volubilidade que o caracteriza que na prática, em estudos fiabilísticos, é dos modelos mais utilizados, uma vez que por modificação dos seus parâmetros, nomeadamente o de forma, pode ser adaptada a diversas distribuições do tempo entre avarias, sendo as mais importantes a exponencial negativa quando $\beta = 1$, a distribuição normal quando $\beta > 3.5$ e a *lognormal* quando $\beta < 1$. Conforme sejam estes valores podem-se aferir algumas características do equipamento: se está sujeito a desgaste, o valor de β terá um valor superior a 1, se não está, β será igual a 1, e se β for inferior a 1, provavelmente, encontrar-se-á em fase de rodagem (fase I da Figura 3.2).

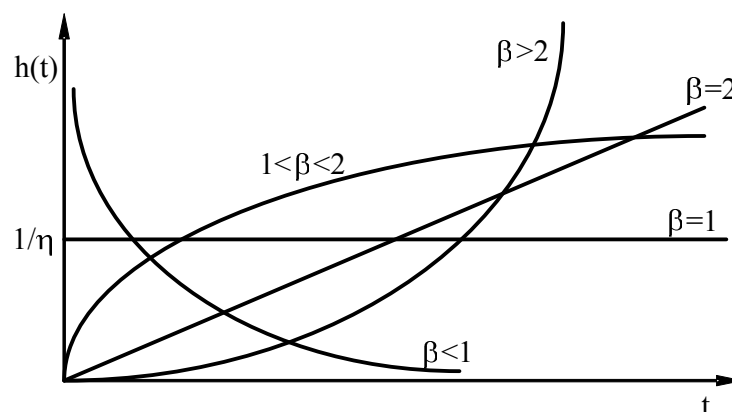


Figura 3.11: Influência do factor de forma sobre a função de risco.

Os tubos eléctricos e os componentes electrónicos, por exemplo, são dois géneros de componentes em que se verificou avariarem de acordo com esta distribuição. A distribuição de Weibull é frequentemente utilizada quando, previamente à substituição preventiva de componentes, se pretende verificar se a função de risco é crescente o que se verifica sempre que o parâmetro de forma (β) é superior a 1.

Existirá evidência estatística de $\beta > 1$ sempre que, pela metodologia dos testes de hipóteses, seja possível rejeitar a hipótese nula.

Teste de hipóteses à função de risco crescente

Formulam-se as hipóteses subjacentes ao teste do seguinte modo:

- $H_0 : \beta = 1$ (Hipótese nula);
- $H_1 : \beta > 1$ (Hipótese alternativa).

H_0 será rejeitado sempre que se verifique a seguinte condição:

$$LI = \frac{\beta}{F_\beta} > 1, \quad (3.60)$$

em que β assume o valor estimado (por exemplo pelo método da máxima verosimilhança cuja apresentação é efectuada em “Métodos analíticos”, na Secção 3.10.2) e F_β – cujo valor depende da dimensão da amostra e do grau de confiança que se queira considerar – é obtido por leitura directa no gráfico de Weibull (Anexo B – Figura B.2). Ressalva-se que, dado o teste ser do tipo unilateral à direita, para um grau de confiança de por exemplo 95%, o valor de F_β deve ser lido na recta dos 90%.

Considere-se, como forma de explicitar o teste em questão, um exemplo concreto relativo aos dados do componente cavilha, para o qual se obteve uma estimativa para β de 2,545 (ver em “Métodos analíticos”, na Secção 3.10.2).

Ante 8 avarias registadas, para um grau de confiança de 95% e para o valor de β estimado, por consulta ao ábaco que consta no Anexo B, obtemos um F_β de 1.5, resultando o consentâneo LI em 1.69 (expressão (3.60)). Assim, ao nível de confiança considerado, há evidência estatística no sentido de aceitar que a função de risco é crescente, sendo plausível nestas circunstâncias determinar a periodicidade óptima de substituição preventiva, conforme o método que a seguir se apresenta.

Periodicidade de substituição preventiva

Tal como o nome nos indica, a substituição preventiva de componentes, visa actuar antecipadamente à avaria com o intuito de evitar as consequências que daí poderão advir.

Segundo Leitão [8], só será vantajoso proceder à substituição de componentes antes de avariarem se forem verificados os seguintes pressupostos:

- custo total envolvido na substituição preventiva menor que o custo total envolvido na substituição devido a avaria;
- componentes com função de risco crescente;
- intervalo entre substituições suficientemente curto de modo a evitar o efeito do tempo no valor do dinheiro despendido;
- os tempos aos quais os componentes vão avariar não são conhecidos mas podem ser descritos por uma distribuição de probabilidade.

A substituição temporal (dependente da idade) é viável nas situações em que a idade dos componentes é conhecida, quando avariarem, ou então quando atingem a idade – ou tempo óptimo de substituição preventiva – ou seja, aquela periodicidade que minimiza os custos de manutenção. Esta periodicidade denota-se por t_p^* , e corresponde ao valor de t_p que minimiza o custo total por unidade de tempo, $C(t_p)$, ou seja, o custo que resulta do valor mínimo da seguinte equação:

$$C(t_p) = \frac{C_F \times F(t_p) + C_p \times R(t_p)}{t_p \times R(t_p) + \int_0^{t_p} t f(t) dt}, \quad (3.61)$$

com: C_F = Custo da Falha; C_p = Custo de substituição Preventiva; e t_p = Tempo (“Idade”) da substituição Preventiva (tempo de calendário, tempo de operação, ciclos de operação). Para o cálculo do integral que figura no denominador da fracção são actualmente usados métodos numéricos eficientes, como é o caso da regra de Simpson, cuja descrição pode, por exemplo, ser encontrada em [3].

Segundo Assis [2, p. 131], o período t_p^* , correspondente ao menor custo global, é designado “período óptimo económico”, e encontra-se esquematicamente representado graficamente na Figura 3.12.

O comportamento de $C(t_p)$ depende da distribuição Estatística que caracteriza o comportamento do componente. Assumindo que se conhece $f(t)$ a solução óptima obtém-se derivando $C(t_p)$ em ordem a t_p .

Por exemplo, se o componente se comportar de acordo com a distribuição de Weibull (ver Secção 3.6), a equação anterior assume a seguinte forma:

$$C(t_p) = \frac{C_F \times \left(1 - e^{-\left(\frac{t_p}{\eta}\right)^\beta}\right) + C_p \times e^{-\left(\frac{t_p}{\eta}\right)^\beta}}{\int_0^{t_p} e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} dt}, \quad (3.62)$$

O tempo óptimo de substituição preventiva, t_p^* , pode ser obtido segundo dois processos alternativos: métodos iterativos ou métodos gráficos. Vejamos de seguida a forma de obtenção por via gráfica:

$$t_p^* = \mu + z\sigma, \quad (3.63)$$

onde μ é a vida média do componente, caracterizada pelo *MTTF* (equação (3.58)), σ é o desvio padrão (equação (3.59)), e z é conseguido através de uma consulta ao ábaco periodicidade óptima de substituição preventiva, necessitando-se antecipadamente dos valores de K e V , aos quais correspondem as seguintes expressões:

- Razão dos Custos: $K = \frac{C_F}{C_p}$;
- Razão entre: $V = \frac{\mu}{\sigma}$.

A eficiência da política de substituição preventiva obtém-se resolvendo a seguinte expressão matemática:

$$\rho(t_p^*) = \frac{C(t_p^*)}{\frac{C_F}{\mu}}, \quad (3.64)$$

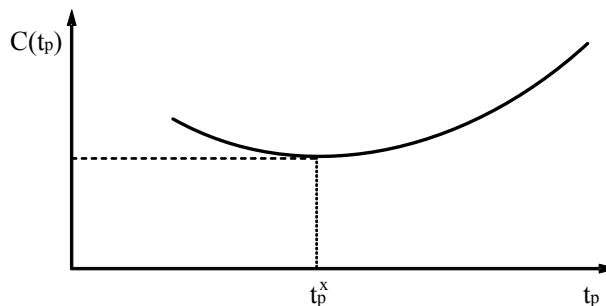


Figura 3.12: Periodicidade óptima.

onde $C(t_p^*)$ é o custo da política óptima (mínimo valor t_p), e $\frac{C_F}{\mu}$ o custo por unidade de tempo da substituição por avaria.

3.7 Noção de manutibilidade

De acordo com as normas portuguesas o conceito manutibilidade reveste-se do seguinte significado:

Aptidão de um bem nas condições de uso especificadas para ser mantido ou restaurado de tal modo que possa realizar as funções que lhe são exigidas quando a manutenção é realizada em condições definidas utilizando procedimentos e recursos prescritos.

Segundo Assis [2, p. 120], o termo *manutibilidade* traduz a capacidade de um sistema ser mantido em boas condições operacionais, enquanto que a manutenção constitui um conjunto de acções empreendidas com o objectivo de repor o sistema falhado novamente nas condições operacionais. De acordo com o mesmo autor [2, p. 121], do ponto de vista matemático, a manutibilidade define-se como a probabilidade de recuperar o sistema e repô-lo nas condições normais de serviço no intervalo de tempo TTR (*Time to Repair* – §3.7.2).

Trata-se, portanto, de um conceito relacionado com a totalidade do tempo utilizado para eliminar a avaria detectada de forma a restituir ao sistema as condições nas quais possa, novamente e de forma conveniente, realizar as funções que lhe são destinadas.

Pelo exposto, a manutibilidade, ao expressar a probabilidade da duração de uma reparação correcta e a probabilidade de ser restaurado num certo período de tempo, depende da aptidão do serviço de manutenção: da sua capacidade de resposta, da segurança do diagnóstico e do tempo de aprovisionamento das peças de reserva no local onde é efectuada a intervenção. Todavia, não será apenas função do serviço de manutenção, pois dependerá, também, da própria concepção do material devido à maior ou menor facilidade de acesso ao órgão avariado. Uma manutibilidade eficiente traduzir-se-á no aumento da vida útil e disponibilidade dos equipamentos, na melhoria quantitativa e qualitativa da produção, redução dos custos de manutenção e também na melhoria das condições de segurança das instalações e das pessoas.

3.7.1 Distribuições estatísticas que caracterizam a manutibilidade

Viu-se anteriormente que a manutibilidade é um conceito de natureza probabilística, podendo por conseguinte, ser caracterizada através de distribuições de probabilidade: "... a exponencial negativa é adequada para equipamentos cujas operações não sejam repetitivas; a Normal ou de Gauss para equipamentos cujas operações são repetitivas; a lognormal no caso de equipamentos razoavelmente complexos e cujas operações sejam elementares, e a Weibull" ([2])

3.7.2 Indicadores de avaliação e medida da manutibilidade

Para Assis [2, p. 120], a avaliação e medida da manutibilidade, pode ser expressa em função de:

- Frequência de Manutenção: probabilidade de um sistema não necessitar de manutenção mais que X vezes num certo período, quando é operado em condições preestabelecidas;
- Tempo de Manutenção: probabilidade de um sistema ser recuperado dentro de um certo período, quando a manutenção é operada em condições preestabelecidas;
- Custo de Manutenção: probabilidade de que o custo da manutenção de um sistema não exceda y Euros num certo período, quando é operado e mantido em condições pré-estabelecidas.

Por sua vez, O'Connor [10], considera que a manutibilidade pode ser avaliada pela média dos tempos de reparação, vulgarmente designado MTTR (*mean time to repair*). Segundo o mesmo autor [10, p. 341], o MTTR agrega várias actividades usualmente divididas em 3 grupos:

- i. Tempo de preparação: tempo para seleccionar a equipe, ferramentas e equipamento de teste e tempo de deslocação;
- ii. De manutenção activa: execução do trabalho propriamente dito;
- iii. Tempo Logístico: teste e entrega do equipamento e elaboração de eventuais relatórios.

Uma estimativa para o MTTR pode ser obtida directamente a partir do valor médio dos TTR_i da amostra, o qual é caracterizado matematicamente pelo seguinte estimador:

$$MTTR = \frac{\sum TTR_i}{N^\circ \text{ de avarias}}, \quad (3.65)$$

sendo TTR_i o tempo total despendido na reparação da avaria i , que segundo a generalidade dos autores, é obtido pela soma do período de tempo em fila de espera da avaria i com o período de tempo referente à intervenção propriamente – TR (*time to repair*) – dita da avaria i , ou seja:

$$TTR_i = TR_i + WT_i, \quad (3.66)$$

em que TR_i é o tempo de execução do trabalho da avaria i , e WT_i é o tempo em fila de espera da avaria i (*Waiting Time*).

O tempo de espera dá indicação acerca do tempo que medeia desde a data de denúncia da avaria i e consequente solicitação de uma ordem de trabalho e a data à qual se verificou o início da respectiva reparação. É função do tempo para fornecimento da peça a substituir e da afectação, disponibilidade e deslocamento dos funcionários da manutenção incumbidos de realizar a tarefa. Fornece portanto, indicações sobre o atendimento do serviço de manutenção.

O tempo de intervenção propriamente dita corresponde ao tempo a partir do qual pelo menos um funcionário da manutenção interveio até ao momento em que se restituiu o equipamento nas suas condições operacionais – é função da formação e experiência dos funcionários da manutenção para detectar e diagnosticar a avaria, tempo de acesso e substituição à peça ou subsistema avariado, tempo de montagem, tempo de entrega, tempo de arranque e controlo do equipamento e ainda o tempo para elaboração de eventuais relatórios. A motivação dos funcionários de manutenção para a elevada produtividade, pode por isso, ter uma influência preponderante na manutibilidade.

“O indicador MTTR exprime o tempo médio necessário para reparar uma avaria e dá indicação sobre a produtividade da manutenção; é, primordialmente, uma medida de manutibilidade do equipamento, isto é, da sua aptidão para ser restaurado para uma condição de bom funcionamento”, [4].

A análise dos indicadores de manutenção envolvidos no conceito de manutibilidade, tal como TTR, WT e consentâneo MTTR, proporciona informação relevante para a planificação da manutenção, designadamente, informação acerca da afectação de recursos,

durações previsíveis dos trabalhos, bem como das imobilizações esperadas para os equipamentos. Com tal informação será possível identificar eventuais desvios e empreender acções de correcção quando os resultados não são os desejados.

Facilmente se depreende que para melhorar a *performance* da manutenção será necessário diminuir o MTTR, o que se consegue através da redução dos tempos das parcelas que constituem o TTR, ou seja, pela diminuição do tempo em fila de espera e do tempo de intervenção propriamente dita.

3.8 Noção de disponibilidade

A *disponibilidade* é uma característica dos sistemas reparáveis e não tem em ponderação se estes falharam e se foram reparados em seguida, tem apenas em conta o estado em que se encontram num determinado instante, isto é, se estão em condições para ser usados ou, se pelo contrário, se consideram inaptos para fornecer o serviço solicitado.

A *função disponibilidade*, denotada por $D(t)$, é definida como a probabilidade de um sistema se encontrar operacional no instante t , sabendo que no instante $t = 0$ se encontrava operacional, ou seja, corresponde ao tempo durante o qual se encontra disponível para funcionamento quando for requisitado.

Na manutenção a *disponibilidade* de um equipamento representa-se por:

$$\text{Disponibilidade} = \frac{T_{\text{UP}}}{T_{\text{UP}} + T_{\text{DOWN}}}, \quad (3.67)$$

em que T_{UP} (*up-time*) é o período de tempo em que o equipamento está em condições de ser utilizado, e T_{DOWN} (*down-time*) o período de tempo em que o equipamento não está em condições de ser utilizado.

Se utilizarmos como variável métrica o tempo e se nos referirmos ao tempo entre avarias consecutivas, a expressão anterior poderá vir expressa por:

$$D_i = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}, \quad (3.68)$$

em que MTBF (*Mean Time Between Failures* – equação (3.25)) representa o tempo médio entre avarias ou tempo médio de bom funcionamento e, MTTR (*Mean Time To Repair* – equação (3.65)) representa o tempo médio de reparação ou média dos tempos técnicos de reparação de uma avaria. Repare-se que as grandezas que figuram nas duas equações anteriores expressam unidades de tempo. Assim, as fórmulas indicadas nem sempre poderão ser

aplicadas de forma directa, podendo em alguns casos ser necessário introduzir as devidas adaptações de acordo com a natureza dos equipamentos em análise. Veja-se, por exemplo, o caso de uma frota de veículos de transporte onde, como se sabe, o mais normal é usar-se como indicador do “momento” da ocorrência a kilometragem e não o tempo ao qual a mesma tenha sucedido. Nessa situação deparámo-nos, inclusive, com uma incoerência nas unidades das grandezas que figuram nas expressões. Por conseguinte, para obtermos, por exemplo, uma estimativa para o MTBF da equação (3.68), deveremos converter de alguma forma os valores da Kilometragem para unidades de tempo. Uma possível conversão será multiplicarmos o valor da kilometragem da ocorrência pela razão entre o tempo de uso do veículo e a sua kilometragem actual.

Poder-se-á dizer que a *disponibilidade* é uma composição dos dois atributos anteriormente referidos: *fiabilidade* e *manutibilidade*. Um sistema pode falhar frequentemente e ter baixa fiabilidade, mas se for restaurado com celeridade, poderá ter uma alta disponibilidade. Obviamente, um sistema estará tão mais disponível quanto maior for a fiabilidade e menor a manutibilidade, o que se verifica quando o sistema falha pouco e nas poucas vezes que isso acontece é reparado com celeridade.

Analisando as expressões anteriores facilmente se conclui que para diminuir a indisponibilidade terá que se proceder de forma a aumentar o MTBF e/ou diminuir o MTTR, pelo que, muitas das técnicas usadas para a melhoria da fiabilidade e da manutibilidade também irão melhorar a disponibilidade.

Segundo O'Connor [10], a disponibilidade depende de: do número de falhas (fiabilidade), da rapidez da manutenção (manutibilidade), dos procedimentos definidos pela manutenção (manutenção) e da qualidade dos meios empregues (logística).

O Aumento do MTBF consegue-se com [11, pp. 165]:

- Escolha de equipamentos de elevada fiabilidade, o que garantirá períodos longos de funcionamento sem avarias;
- Estudo e análise sistemática de avarias com o objectivo de introduzir melhorias na fiabilidade através de melhoramentos nos equipamentos;
- Execução do trabalho de manutenção com elevada qualidade técnica de forma a evitar a repetição de avarias;
- Implementação de planos de manutenção preventiva convenientemente elaborados

A Diminuição do MTTR consegue-se com [11, pp. 166]:

- Escolha de equipamentos com elevada manutibilidade o que tornará as intervenções mais rápidas devido à maior facilidade de acesso ao órgão avariado;
- Utilização de métodos de diagnóstico de avarias e de execução devidamente estudados;
- Elevada motivação conduzindo a altos níveis de produtividade;
- Disponibilidade adequada de peças de reserva de forma a evitar tempos de espera;
- Disponibilidade ajustada de meios humanos e logísticos para as intervenções.

Poder-se-á dizer, em jeito de conclusão, que a indisponibilidade dos equipamentos contraria a melhoria da eficácia operacional pelo que um valor tão baixo quanto possível é, no contexto da manutenção, um dos principais objectivos a alcançar independentemente das metodologias de manutenção a aplicar.

3.9 Ferramentas para análise de modos de avarias

3.9.1 Análise de Pareto

O Diagrama de Pareto é uma representação gráfica que ajuda a identificar e seleccionar os aspectos ou problemas prioritários a tratar. Também conhecido como lei das prioridades 20-80, que possibilita interpretar que “80% dos problemas que ocorrem em qualquer actividade são ocasionados por 20% das causas que intervêm em provoca-los”. Portanto, os diagramas de Pareto permitem a hierarquização dos dados obtidos acerca de um problema, partindo do mais importante para o menos importante. Ordenam-se as causas por ordem decrescente de importância e seguidamente traça-se a curva dos efeitos acumulados. É pois uma ferramenta de análise a utilizar na selecção do problema, concentrando a atenção do gestor nos elementos que provocam a maioria dos problemas, em vez de ser extensível a todos eles. Tendo como base a caracterização dos componentes principais do equipamento e a codificação das avarias típicas, quando ocorreram e qual foi a duração da reparação, é possível identificar quais as principais fragilidades desse equipamento, e deste modo definir prioridade nas acções por forma a diminuir custos e a indisponibilidade.

3.9.2 Diagrama de Ishikawa

Também denominado diagrama causa-efeito ou, devido à sua configuração, de espinha de peixe, é uma representação gráfica das relações lógicas existentes entre as causas que produzem um efeito bem definido. Serve para visualizar, numa só figura, todas as causas associadas a uma avaria e quais as suas possíveis relações. Ajuda a classificar as causas dispersas e a organizar as relações mutuas. É uma ferramenta de análise aplicável com o intuito de determinar as causas.

3.9.3 Outras Ferramentas

Neste ponto podem-se mencionar técnicas como FTA, FMEA e FMECA – sobre as quais se discorre no capítulo 2 – as redes de actividades baseadas nas técnicas PERT e CPM e os gráficos de Gantt. As redes de actividades são usadas para efectuar o planeamento das operações e dar indicação acerca da duração total das reparações. Os gráficos de Gantt são igualmente usados para efectuar o planeamento das operações ao longo do tempo e servem essencialmente para detectar desvios entre o planeado e o efectivamente executado. Quer as redes de actividades quer os gráficos de Gantt são técnicas bastante difundidas sobre as quais se podem obter esclarecimentos adicionais em qualquer livro de investigação operacional.

3.10 Metodologia estatística para modelação de dados

Os n tempos de ocorrências de avarias inscritas no registo histórico representam-se cronologicamente por t_1, t_2, \dots, t_n onde $t_i \leq t_{i+1}$. Assume-se que cada um destes tempos representa um elemento independente de uma mesma população, podendo esta ser caracterizada pelas funções de Fiabilidade, Distribuição de Avarias, de Risco e Densidade de Probabilidade, conforme explanado na Secção 3.3. Com o intuito de inferir acerca do comportamento futuro dos equipamentos e seus componentes é usual efectuar-se um processo de estimação de avarias que consistirá, essencialmente, no ajustamento de modelos teóricos ao conjunto de dados obtidos no registo histórico. Requer-se, portanto, identificar qual será o modelo teórico que melhor represente esses dados, sendo possível para o efeito, basear-nos em dois métodos alternativos: são os testes paramétricos e os testes não paramétricos. Os primeiros, tal como é referido por Guimarães [7, p. 369], “... incidem explicitamente

sobre um parâmetro de uma ou mais populações e presume-se que a população a partir da qual a amostra é obtida possui uma distribuição particular” sendo válidos apenas nestas condições; contrariamente, nos métodos não paramétricos não será necessário essa especificação, nem tão pouco a obtenção dos respectivos parâmetros, podendo-se determinar directamente a partir dos dados, as funções empíricas da fiabilidade, de risco e densidade de probabilidade. Apresenta-se seguidamente a metodologia de estimação segundo uma abordagem paramétrica uma vez que “. . . os métodos não paramétricos são, por regra, menos potentes quando prevalecem as condições nas quais os paramétricos são válidos.” [7, p. 370]. De uma forma genérica, a metodologia de estimação paramétrica, pode ser descrita nas seguintes três etapas: em primeiro lugar procede-se à identificação das distribuições passíveis de representar os dados, estimam-se de seguida os valores dos parâmetros daquelas distribuições e finalmente efectua-se um teste de qualidade ao ajuste. É sobre cada uma destas três etapas que se discorre em seguida, ilustrando-as com um exemplo concreto referente aos dados históricos do componente *cavilha*.

3.10.1 Identificação de uma distribuição estatística passível de representar os dados

Para escolher uma distribuição que se afigure como a mais indicada para representar os dados, é necessário ter em consideração a caracterização da informação em apreço, isto é, é necessário averiguar se nos deparamos com amostras cuja informação seja completa, ou se pelo contrário, a informação é censurada ou suspensa, o que acontece quando o conhecimento possível de extrair sobre a variável a estudar (ttf) é parcial (como é o caso dos componentes continuarem em funcionamento para além do período que define o tempo actual). Detalhes acerca da caracterização da informação pode ser vista em [6, pp. 284–286].

Vejamos primeiramente como escolher a distribuição que se afigure como mais adequada para representar os dados no caso de a informação ser completa e de seguida no caso de a informação ser censurada.

Perante dados cujas observações sejam completas, são diversos os meios através dos quais será possível antever qual a distribuição que presumivelmente melhor os caracteriza, senão vejamos:

- com os conhecimentos obtidos pela análise de tendência, processo descrito na

Secção 3.5, saber-se-á se há indícios estatísticos que evidenciem processos com taxa de avarias crescente, decrescente ou constante, o que permitirá eleger aquela distribuição que teoricamente melhor modele aqueles fenómenos (ver Secção 3.6);

- pelo conhecimento do comportamento da função de risco (ver *Função de risco* – Secção 3.3.2) também será fácil desvendar qual a distribuição mais adequada para modelar determinados dados;
- sob o ponto de vista da estatística descritiva, através das medidas de localização e de assimetria, será igualmente possível aferir algumas características que permitirão auxiliar neste desígnio: se a média e a mediana forem iguais a distribuição é simétrica, o que fundamenta que os dados poderão ser descritos por uma distribuição Normal ou uma distribuição de Weibull com $\beta > 3.5$; se a média e o desvio padrão forem iguais, então, a melhor escolha recairá sobre a distribuição exponencial;
- Após a estimação da função $F(t_i)$ pelo processo descrito em *Métodos gráficos*, na Secção 3.10.2, representando num gráfico de probabilidade (Anexo B (Figura B.1)) os pontos $(t_i, F(t_i))$, se estes surgirem como uma recta, poder-se-á depreender que existe aderência entre os dados e a distribuição assumida.

Perante dados incompletos ou censurados excluem-se as técnicas de estatística descritiva dado que não conhecemos a longitude das observações. A forma de saber qual a distribuição a usar na caracterização das avarias, assenta na elaboração de gráficos de probabilidade previamente adaptados à situação em que a informação é censurada. Nestas circunstâncias, um dos seguintes métodos pode ser sugerido: o estimador do limite do produto, o de Kaplan-Meier do estimador do limite do produto e o de ajustamento de ordem. Um esclarecimento acerca dos dois primeiros pode ser obtido em Ascher and Feingold [1, pp. 88, 91–92]. O último será, na Secção 3.10.2, contemplado com uma descrição pormenorizada, em virtude de amostra recolhida incluir simultaneamente tempos completos e tempos suspensos, sendo por isso necessário efectuar ajustamentos à ordem de ocorrências de avarias, tendo em conta os tempos suspensos que ocorreram antes da avaria i . A construção gráfica conseguida pela aplicação deste método pode servir também para estimar os parâmetros da distribuição assumida conforme se descreve na secção que se segue. Justifica-se a escolha deste método em detrimento dos dois primeiros mencionados devido à necessidade de efectuar ajustamentos à ordem de ocorrências das avarias.

3.10.2 Cálculo dos parâmetros das distribuições previamente seleccionadas

Uma vez identificada a distribuição que presumivelmente melhor represente os dados de avaria, passar-se-á a estimar os respectivos parâmetros. Os procedimentos para o fazer são essencialmente três: ou se recorre a um software com essa funcionalidade, ou por leitura directa em gráficos de probabilidade elaborados nesse propósito (ver Subsecção *Métodos gráficos*), ou ainda por recurso a métodos analíticos (ver Subsecção *Métodos analíticos*). Os softwares divulgados têm o inconveniente de não permitir o tratamento de informação censurada e o recurso a métodos analíticos é indicada como uma abordagem mais correcta que a representação dos dados em gráficos de probabilidade uma vez que, além de serem métodos mais actualizados, por serem menos subjectivos, conferem maior precisão.

Vejamos então como estimar os parâmetros de uma dada distribuição, como por exemplo, a de Weibull. Descreve-se primeiro a forma de obtenção por via gráfica e de seguida por via analítica. A construção gráfica que se apresenta, além de servir para estimar os parâmetros da distribuição assumida tem, também, a particularidade de permitir avaliar a aderência entre os dados e a distribuição em questão, como anteriormente referido na Secção 3.10.1.

Métodos gráficos

A obtenção dos parâmetros por via gráfica é usualmente efectuada após a representação das avarias em ábacos de escalas logarítmicas designados por papel de Weibull. Conforme se pode visualizar no exemplar apresentado no Anexo B (Figura B.1), nas ordenadas pode observar-se uma escala para representar a função distribuição de avarias, $F(t)$, em percentagem e por abcissa uma escala de tempos. Atendendo à caracterização da informação relativa aos componentes presentes nos equipamentos em apreço, verifica-se que uns falharam antes do limite da data estabelecida para o terminus da recolha dos dados, proporcionando observações completas; porém, outros houveram, que continuando em funcionamento para além desse período, proporcionam informação censurada ou suspensa. Nestas circunstâncias um dos métodos que melhor se adequa para a obtenção da percentagem acumulada de avarias, $F(i)$, é o de ajustamento de ordem que segundo O'Connor [10, p. 71], desenrola-se sequencialmente nos seguintes cinco passos:

1. listar os números de ordem (i) dos itens falhados.
2. Dispor os itens falhados por ordem crescente do seu tempo de sobrevivência (ttf).
3. Para cada item falhado, listar o número de itens que tenham sobrevivido até ao período de tempo que decorreu desde a falha anterior.
4. Para cada item falhado, calcular o número de ordem médio, i_{t_i} , usando a fórmula

$$i_{t_i} = i_{t_{i-1}} + N_{t_i}, \quad (3.69)$$

onde

$$N_{t_i} = \frac{(N + 1) - i_{t_i}}{1 + (n - \text{n}^\circ \text{ de itens precedentes})}, \quad (3.70)$$

sendo N_{t_i} o incremento, e n o *Número Total em Risco* (dimensão da amostra).

5. Para cada item falhado calcular $F(i)$ usando a fórmula de Bénard:

$$F(i) = \frac{i_{t_i} - 0.3}{N + 0.4}, \quad (3.71)$$

sendo i_{t_i} o número de ordem médio (sequencial para amostras com dados completos; obtenção pelo processo descrito no ponto 4 para amostras com dados suspensos), e N a dimensão da amostra.

Considere-se, como exemplo de aplicação da metodologia descrita, o caso concreto relativo aos dados do componente *cavilha*, para o qual, ao longo do tempo, foram registadas 7 ocorrências distribuídas por 6 equipamentos cujos códigos e respectivos tempos actuais (T_0) são apresentados na Tabela 3.3.

A partir da informação apresentada, obtêm-se os ttf's referentes aos componentes falhados e os tempos suspensos referentes aos componentes inseridos nos equipamentos em questão e que continuam em funcionamento para além do período que define o tempo actual, os quais se apresentam na Tabela 3.4.

Combinam-se os ttf's e os tempos suspensos – identificam-se com F quando se trata de um componente que falhou e com S quando se trata de sobreviventes – e conforme se descreve no ponto 2 da metodologia dispõem-se ordenados por ordem crescente do tempo de sobrevivência – Tabela 3.5. Tal como se expõe nos pontos 3 e 4 da metodologia, para cada item falhado, determina-se o número de itens com tempos suspensos que existem antes

Máquina	Hora de Ocorrência		T. Actual (T_0)
13006	9.369,17	10.734,17	21.415,37
01001	10.640,28		19.908,33
01002	10.878,75		19.984,87
13004	11.348,00		20.893,70
13005	11.848,02		21.058,05
10003	19.817,78		21.474,05

Tabela 3.3: Tempos de ocorrência das avarias do componente *cavilha*.

Máquina	tff	t.susp.
13006	1.365,00	1.656,27
13006	9.369,17	9.106,12
1001	10.640,28	9.210,03
1002	10.878,75	9.268,05
13004	11.348,00	9.545,70
13005	11.848,02	10.681,20
10003	19.817,78	

Tabela 3.4: tff's e tempos suspensos do componente *cavilha*.

Nº ordem falha	Item	t_i
1	F	1.365,00
–	S	1.656,27
–	S	9.106,12
–	S	9.210,03
–	S	9.268,05
2	F	9.369,17
–	S	9.545,70
3	F	10.640,28
–	S	10.681,20
4	F	10.878,75
5	F	11.348,00
6	F	11.848,02
7	F	19.817,78

F – Falha; S – Sobrevivente.

Tabela 3.5: ttf's e tempos suspensos ordenados do componente *cavilha*.

N. de ordem da Falha	ttf's	N. Sobrev.	N_{t_i}	i_{t_i}
1	1.365,00	0	1,00	1,00
2	9.369,17	4	1,44	2,44
3	10.640,28	5	1,65	4,10
4	10.878,75	6	1,98	6,08
5	11.348,00	6	1,98	8,06
6	11.848,02	6	1,98	10,04
7	19.817,78	6	1,98	12,02

Tabela 3.6: ttf's e correspondente ordem média de avaria do componente *cavilha*.

da avaria i e calcula-se o número de ordem médio, i_{t_i} , cujos resultados se resumem na Tabela 3.6.

Por fim, de acordo com o ponto 5 da metodologia, para cada i_{t_i} , determina-se o valor da função $F(t_i)$, por recurso à utilização da fórmula de Bénard, cujos valores se disponibilizam na última coluna da Tabela 3.7.

Nº de ordem da Falha	tff's	Nº Sobrev.	N_{t_i}	i_{t_i}	$F(i)$
1	1.365,00	0	1,00	1,00	0,052
2	9.369,17	4	1,44	2,44	0,160
3	10.640,28	5	1,65	4,10	0,283
4	10.878,75	6	1,98	6,08	0,431
5	11.348,00	6	1,98	8,06	0,579
6	11.848,02	6	1,98	10,04	0,727
7	19.817,78	6	1,98	12,02	0,875

Tabela 3.7: tff's e correspondente $F(i)$ do componente *cavilha*.

Tal como referido, para além de ser possível estimar aos parâmetros da distribuição, perante os pontos ($tff, F(i)$) previamente marcados no gráfico de Weibull como forma de representar a tendência dos dados, se sobre eles for possível ajustar uma linha recta poderemos deduzir que os dados em questão aderem à distribuição assumida. A recta traçada deverá passar pelo último ponto marcado e de tal modo que os pontos de um e de outro lado sejam, tanto quanto possível, em igual número.

A partir do gráfico construído, segundo O'Connor [10, p. 75], é possível obter os parâmetros da distribuição assumida da seguinte forma:

$\hat{\beta}$ - valor obtido por leitura directa na recta correspondente ao parâmetro de forma (adimensional).

$\hat{\eta}$ - valor obtido por leitura directa na escala dos tempos segundo uma perpendicular desde o ponto de intersecção da recta de tendência com a recta do estimador (63.2%). Neste caso unidades de tempo. Linha que intersecta o estimador quando $F(t) = 63.2$.

$\hat{\mu}$ - (média), o papel de Chatwell inclui também uma escala que permite estimar a média de $\hat{\mu}$ cujo valor é obtido por leitura directa na escala dos tempos segundo uma perpendicular desde o ponto de intersecção da recta de tendência com uma recta paralela

à escala dos tempos passando no ponto 52%. Este valor é obtido por leitura directa na recta P_μ – unidades de tempo.

$\hat{\gamma}$ - nesta situação, o valor deste parâmetro é igual a zero – Unidades de tempo.

Métodos analíticos

De entre os vários métodos analíticos referidos na literatura que versa sobre esta temática, destaca-se o da máxima verosimilhança, pelo qual recai a nossa preferência, em virtude de serem dos melhores estimadores que se podem obter, pois em geral são consistentes, tendem a ser não enviesados e eficientes à medida que a dimensão da amostra cresce. É este método que se descreve em seguida.

Suponha-se uma população com uma função densidade de probabilidade $F(x, \vec{\theta})$, em que $\vec{\theta} = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k)$ são parâmetros desconhecidos. Obtenha-se uma amostra aleatória x_1, x_2, \dots desta população.

As estimativas de máxima verosimilhança, $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k$ são os valores de $\vec{\theta}$ que maximizam a probabilidade de ocorrer uma amostra idêntica à que se observou, isto é, que maximizam:

$$L = f(x_1, \vec{\theta}) \times f(x_2, \vec{\theta}) \times \dots \times f(x_n, \vec{\theta}) = \prod_{i=1}^N f(x_i, \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k). \quad (3.72)$$

Admitindo que L é diferenciável, as estimativas ou os estimadores MV são obtidos resolvendo as equações:

$$\frac{\partial L}{\partial \theta_i} = 0, \quad (i = 1, 2, \dots, k). \quad (3.73)$$

Se utilizarmos a distribuição de Weibull na caracterização das ocorrências, – ver equações 3.52 e 3.54 –, é possível encontrar para L o seguinte valor:

$$L = \left(\frac{\beta}{\eta^\beta}\right)^r \left(\prod_{i=1}^r t_i\right)^{\beta-1} e \left[-\left(\frac{1}{\eta}\right)^\beta \sum_{i=1}^r t_i^\beta \right] e \left[-\left(\frac{1}{\eta}\right)^\beta \sum_{j=1}^k t_j^\beta \right]. \quad (3.74)$$

Expressão à qual foram previamente aplicados logaritmos, devendo ser derivada em ordem a β e η .

Conseguem-se assim as expressões para dados de avarias sem tempos suspensos e dados de avarias com tempos suspensos, através das quais, por processos iterativos, é possível estimar o valor do factor de forma β e da vida característica η .

- Dados de avarias sem tempos suspensos:

$$\frac{\sum_{i=1}^r t_i^\beta \ln t_i}{\sum_{i=1}^r t_i^\beta} - \frac{1}{\beta} = \frac{1}{r} \times \sum_{i=1}^r \ln t_i, \quad (3.75)$$

e

$$\eta = \left(\sum_{i=1}^r \frac{t_i^\beta}{r} \right)^{\frac{1}{\beta}}. \quad (3.76)$$

- Dados de avarias com tempos suspensos:

$$\frac{\sum_{i=1}^r t_i^\beta \ln t_i + \sum_{j=1}^k c_j t_j^\beta \ln t_j}{\sum_{i=1}^r t_i^\beta + \sum_{j=1}^k c_j t_j^\beta} - \frac{1}{\beta} = \frac{1}{r} \times \sum_{i=1}^r \ln t_i, \quad (3.77)$$

e

$$\eta = \left(\sum_{i=1}^r \frac{t_i^\beta}{r} + \sum_{j=1}^k \frac{c_j t_j^\beta}{r} \right)^{\frac{1}{\beta}}, \quad (3.78)$$

sendo r o número de avarias ordenadas a t_i , k o número de tempos suspensos diferentes ordenados a t_j , e c_j os itens suspensos a cada t_j .

Aplicando o método descrito aos dados pertencentes ao componente cavilha com o intuito de obter os parâmetros da distribuição de Weibull, obtiveram-se, para o exemplo que vem sendo descrito, os seguintes valores:

$$\eta = 13968.957 = 582 \text{ dias};$$

$$\beta = 2.545;$$

$$\gamma = 0.$$

3.10.3 Teste de qualidade de ajuste

Após a identificação da distribuição teórica que presumivelmente melhor represente os dados e o cálculo dos respectivos parâmetros, será necessário, como última etapa do processo

de estimação paramétrica, efectuar um teste à qualidade do ajuste com o intuito de avaliar a adesão ou proximidade entre os dados considerados e a distribuição teórica em causa.

O teste de qualidade ao ajuste é uma particularidade da metodologia dos testes de hipóteses, a cuja utilização se recorre sempre que se pretenda inferir se uma dada população se ajusta a uma variável aleatória particular ou não. Na hipótese nula é especificado que a população segue uma determinada distribuição de probabilidade, em confronto com a hipótese alternativa, onde se especifica que a população não segue tal distribuição de probabilidade.

Na literatura que versa sobre esta temática encontram-se como testes mais comuns Teste do Qui-Quadrado (Q) e o Teste de Kolmogorov-Smirnov (K-S). Todavia, para [7, p. 377], o segundo possui duas vantagens consideráveis sobre o primeiro: em primeiro lugar, a estatística do teste é rigorosa sempre que se conheçam a forma e os parâmetros da sua função densidade de probabilidade, ou seja, o risco α está definido rigorosamente; em segundo lugar, o teste K-S, na maioria das situações, é mais potente que o do Qui-Quadrado, requerendo no entanto, distribuições contínuas e completamente especificadas. Apresentando estas vantagens e também por ser um teste genérico, pois pode ser usado para avaliar o ajuste a várias distribuições, o teste a aplicar será o Kolmogorov-Smirnov (K-S).

Teste de Kolmogorov-Smirnov (K-S)

Para uma variável X , o teste K-S, tem por base a análise da proximidade ou do ajuste entre a função de distribuição populacional, $F_0(x)$, que é especificada em H_0 e a função de distribuição empírica ou da amostra, $S(x)$. A estatística do teste, que se denota por D e se designa estatística de K-S, corresponde ao supremo da diferença, em valor absoluto, entre $S(x)$ e $F_0(x)$, quando são considerados todos os valores possíveis de X . Em notação simbólica virá,

$$ET = D = \sup |S(x) - F_0(x)|. \quad (3.79)$$

Fazendo uma analogia para o caso concreto de um conjunto de tempos de avaria que se pretendam ajustar, por exemplo, à distribuição de Weibull, o método inerente ao teste em questão, inclui as 3 etapas que se descrevem em seguida:

1. Formulação das hipóteses:

- H_0 : a população da qual provêm os dados segue a distribuição de Weibull;
 - H_1 : a população da qual provêm os dados não segue a distribuição de Weibull.
2. Proceda-se à determinação do valor da ET, calculando-se, para o efeito, o supremo da diferença em valor absoluto entre a função distribuição da amostra $F(t_i)$ e a função distribuição populacional $F(t)$ (equação (3.3) com $R(t)$ obtido pela equação (3.54)), quando são considerados todos os ttf's. Em notação simbólica virá,

$$ET = D = \sup |F(t_i) - F(t)|. \quad (3.80)$$

Seguidamente, assinala-se o maior valor absoluto dessas diferenças, que se compara com um valor crítico obtido de uma tabela de valores da cauda direita da distribuição da estatística D , também designada tabela de K-S, a qual se apresenta através do Anexo D.5 (Tabelas D.6 e D.7).

O valor crítico obtido dessa tabela resulta da conjugação da dimensão da amostra com o nível de significância que se queira considerar. Este valor, segundo O'Connor [10, p. 59], deverá ser corrigido em função do valor de forma (β) da distribuição de Weibull. A rectificação será feita por via da multiplicação do valor crítico obtido da tabela K-S, por um coeficiente de correcção que será função dos valores de β , tal como se segue:

- Se $\beta > 3$ – valor crítico $\times 0.7$;
- Se $1.5 < \beta < 3$ – valor crítico $\times 0.75$;
- Se $\beta < 1.5$ – valor crítico $\times 0.8$.

3. Proceda-se finalmente à tomada de decisão relativa ao propósito do teste, de acordo com o seguinte critério: se supremo da $|F(t_i) - F(t)| >$ valor crítico (corrigido), a hipótese nula, ao nível de significância considerado, deve ser rejeitada.

Com a finalidade de concluir acerca da aderência dos dados de avaria do componente *cavilha* à distribuição de Weibull, retoma-se o já encetado processo de estimação paramétrica, sumariando-se para o efeito, na Tabela 3.8, os resultados dos cálculos efectuados conforme o método que se acaba de descrever.

Em função da dimensão da amostra (7 avarias) e para um nível de significância de 5%, o valor crítico da tabela K-S equivale a 0,48342 que virá convertido em 0,362565 em

virtude do parâmetro de forma da distribuição de Weibull, conforme o resultado obtido pela aplicação do método da máxima verosimilhança, estar compreendido entre $1.5 < \beta < 3$.

Uma vez que o supremo entre $|F(t_i) - F(t)| = 0,245$ sendo menor que o valor crítico corrigido, não há evidências estatísticas, ao nível de significância considerado, no sentido de rejeitar a hipótese nula.

No que concerne ao processo de estimação paramétrica que vem sendo efectuado, em jeito de conclusão, pode-se proferir que é defensável recorrer à equação (3.54), para prever o comportamento fiabilístico do componente objecto de análise. Desta forma, substituindo na referida equação os parâmetros da distribuição de Weibull, previamente estimados pelo método da máxima verosimilhança, aquela equação virá convertida em:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{582.03}\right)^{2.545}} \quad (3.81)$$

A previsão dos valores futuros da fiabilidade do componente cavilha, obtida pelo processo de estimação descrito, será mostrada no Capítulo 4.

3.11 Fiabilidade de sistemas

Abordou-se, até ao momento, a forma como estimar a fiabilidade de componentes simples. Todavia, na prática, estes estão integrados em sistemas mais complexos. Entende-se por sistema um conjunto de elementos discretos, como por exemplo, componentes, órgãos ou ainda equipamentos, inter conectados ou em interacção, cuja missão é a de realizar uma

Nº de ordem da Falha	ttf's	Nº Sobrev.	N_{t_i}	i_{t_i}	$F(i)$	$F(t)$	$ F(t_i) - F(t) $
1	1.365,00	0	1,00	1,00	0,052	0,003	0,050
2	9.369,17	4	1,44	2,44	0,160	0,304	0,144
3	10.640,28	5	1,65	4,10	0,283	0,394	0,110
4	10.878,75	6	1,98	6,08	0,431	0,411	0,020
5	11.348,00	6	1,98	8,06	0,579	0,445	0,134
6	11.848,02	6	1,98	10,04	0,727	0,482	0,245
7	19.817,78	6	1,98	12,02	0,875	0,912	0,038

Tabela 3.8: Resultados obtidos pela aplicação do teste K-S.

ou mais funções, em condições prescritas. Tais elementos podem funcionar em *série*, em *paralelo* ou de forma combinada em *série-paralelo*.

3.11.1 Sistema série

Num sistema série, os seus elementos inter-relacionam-se de tal modo, que o sistema só funcionará se todos os elementos que o constituem estiverem operacionais, falhando logo que o primeiro elemento falhe.

A Figura 3.13 mostra o diagrama lógico de um sistema série.

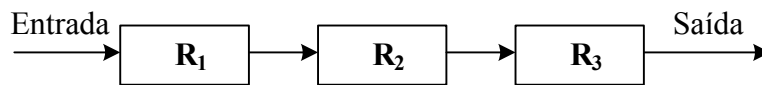


Figura 3.13: Sistema série.

A fiabilidade do sistema para uma missão de duração t é igual ao produto das probabilidades dos diversos elementos supostos independentes entre si. A fiabilidade do sistema será dada por:

$$R = R_1 \times R_2 \times R_3 \times \cdots R_n, \quad (3.82)$$

ou seja,

$$R_S = \prod_{i=1}^n R_i, \quad (3.83)$$

em que R_S representa a fiabilidade do sistema, e R_i a fiabilidade do item i .

Se a fiabilidade de cada elemento segue uma distribuição exponencial (taxa de avarias constante) então o sistema série seguirá a mesma distribuição sendo a fiabilidade, a taxa de avarias e o tempo médio até à falha dados pelas seguintes expressões:

$$R_S = e^{-t \sum_{i=1}^n \lambda_i}, \quad (3.84)$$

$$\lambda_S = \sum_{i=1}^n \lambda_i, \quad (3.85)$$

$$MTTF = \frac{1}{\lambda_S} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \lambda_i}. \quad (3.86)$$

Facilmente se conclui, pela análise às expressões anteriores, que a fiabilidade de um sistema série é menor que a fiabilidade de qualquer dos seus componentes. Por conseguinte,

para se obter uma fiabilidade elevada para o sistema é necessário que o número de itens em série e o valor das respectivas taxas de falha seja o menor possível.

3.11.2 Sistemas paralelos ou redundantes

Um sistema paralelo ou redundante é constituído por dois ou mais elementos em paralelo e os seus elementos inter-relacionam-se de tal modo, que o sistema só falha quando todos os seus elementos falharem, pelo que, ao contrário de um sistema série, a falha de um componente não implica na falha do sistema, bastará apenas um elemento operacional para que o sistema se mantenha em funcionamento. A fiabilidade do sistema paralelo é maior que a fiabilidade de qualquer dos seus elementos.

A Figura 3.14 mostra o diagrama lógico de um sistema paralelo ou redundante.

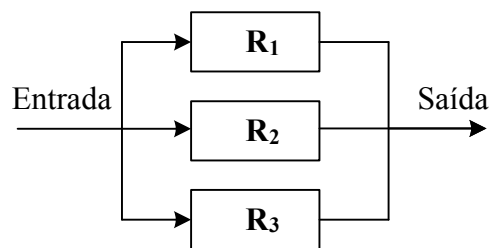


Figura 3.14: Sistema paralelo ou redundante.

Podem-se distinguir as seguintes três classes de sistemas redundantes:

- Redundância activa total;
- Redundância activa parcial;
- Redundância sequencial ou *stand-by*.

Redundância activa total

Esta redundância é caracterizada pela colocação em paralelo dos componentes que, assegurando as mesmas funções trabalham simultaneamente, se disponíveis e, o sistema só falhará se todos os itens falharem – ver Figura 3.14.

Deste modo, a fiabilidade do sistema R_S é igual à probabilidade do componente 1 ou do componente 2 ou n sobreviverem. Assim a probabilidade de avaria do sistema é dada

por:

$$(R_1 + R_2 + R_3) = R_1 + R_2 + R_3 - R_1 \cdot R_2 \cdot R_3, \quad (3.87)$$

o que pode ser igualmente descrito como

$$R_S = 1 - (1 - R_1)(1 - R_2)(1 - R_3), \quad (3.88)$$

pelo que a expressão geral para a fiabilidade do sistema será dada por:

$$R_S = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i) = 1 - \prod_{i=1}^n F_i, \quad (3.89)$$

A expressão geral da fiabilidade de um sistema composto por n elementos iguais com taxas de avarias constantes e iguais a λ , será:

$$R_S = 1 - (1 - R_i)^n = 1 - (1 - e^{-\lambda t})^n. \quad (3.90)$$

Redundância activa parcial

Esta redundância é caracterizada por todos os n elementos funcionarem simultaneamente, se disponíveis, de tal modo que, o sistema apenas necessita de k itens ($1 < k < n$) para funcionar. Note-se que: se $k = 1$ trata-se de uma redundância activa total; e se $k = n$ trata-se de um sistema série.

Considerando os itens independentes e com fiabilidades iguais verifica-se uma situação em que a distribuição Binomial se aplica, pelo que:

$$\frac{R_k}{n}(t) = \sum_{i=k}^n C_i^n [R(t)]^i [1 - R(t)]^{n-i}. \quad (3.91)$$

No caso de elementos com taxa de avarias constante temos:

$$\frac{R_k}{n}(t) = \sum_{i=k}^n C_i^n e^{-i\lambda t} (1 - e^{-\lambda t})^{n-i}, \quad (3.92)$$

Redundância sequencial ou em *stand-by*

Neste tipo de redundância, os itens encontram-se ligados em paralelo. O componente alternativo encontra-se numa situação de *stand-by* ligado em paralelo com o que normalmente trabalha, e só começa a operar no caso do componente principal avariar, evitando deste modo as consequências da falha.

A Figura 3.15 mostra o exemplo de um sistema redundante sequencial, constituído pelo componente principal R_1 , o componente R_2 (elemento redundante) e pelo sistema “sensor-comutador” S, em que: R_1 e R_2 têm taxa de avarias constante e igual a λ ; o comutador não falha; enquanto um item se encontrar em *stand-by*, não falha.

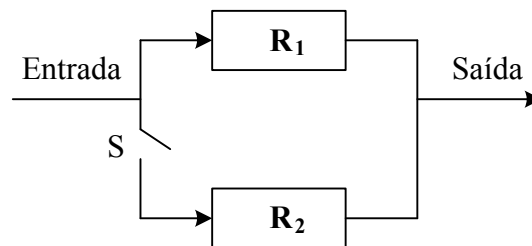


Figura 3.15: Redundância passiva ou *stand-by*.

A expressão para a fiabilidade do sistema pode-se obter a partir da distribuição de Poisson

$$R_S = e^{-\lambda t}(1 + \lambda t), \quad (3.93)$$

a fórmula geral da fiabilidade para n itens é dada por:

$$R_S(t) = \sum_{i=0}^{n-1} \frac{(\lambda t)^i}{i!} e^{-\lambda t}, \quad (3.94)$$

e o tempo médio até à falha é dado por:

$$MTTF = \frac{n}{\lambda}. \quad (3.95)$$

3.11.3 Outros sistemas

Combinação de sistemas série e paralelo

Neste caso, para se obter a fiabilidade do sistema, deve-se dividir o sistema em subsistemas mais simples, cuja fiabilidade seja fácil de calcular e, em seguida, combinam-se os resultados obtidos.

Sistemas complexos

Um sistema complexo é um sistema que não é redutível a combinações série-paralelo. Para grandes sistemas complexos, como por exemplo, uma central nuclear, utilizam-se outro tipo

de métodos, que não faz sentido descrever em virtude se não se enquadrarem no âmbito deste trabalho.

Capítulo 4

Análise de resultados

Neste capítulo apresentam-se um conjunto de indicadores obtidos na óptica da tendência das avarias, da fiabilidade, da manutibilidade e da disponibilidade, cujos resultados preconizam a missão principal do estudo delineado no âmbito desta dissertação. Os indicadores obtidos fundamentam-se pelas metodologias expressas nos algoritmos 4.1 e 4.2 e nas técnicas e métodos estatísticos que lhe são subjacentes, cuja descrição é previamente efectuada no Capítulo 3. A partir das conclusões tecidas e de aspectos aí identificados expõem-se, no capítulo seguinte, orientações e sugestões de forma a contribuir para uma eficiente utilização do conhecimento aqui reunido e explorado.

4.1 Apresentação do registo histórico

O registo histórico da manutenção da Faurécia, Sistemas de Escape, S.A., Bragança, encontra-se num arquivo em formato Excel, organizado cronologicamente e contém toda a informação sobre a sua manutenção. Os respectivos campos de informação, de acordo com a terminologia da empresa, são: data de ocorrência, código do equipamento, turno, linha de produção, tipo de manutenção (MP, MM e MC), anomalia verificada, descrição do trabalho, hora de início e hora final de intervenção, tempo de reacção, tempo de reparação e ainda indicação sobre se a anomalia verificada teve, ou não influência na paragem da produção.

Os dados inscritos no histórico, no seu conjunto, foram recolhidos cronologicamente ao longo de um período representativo compreendido entre 10 de Novembro de 2001 e 23 de Abril de 2004. A informação relativa a esses dados encontra-se compilada num formato

Excel. As 3021 intervenções efectuadas apresentam-se, na Tabela 4.1, agrupadas segundo o tipo de intervenção: manutenção de melhoria, preventiva e correctiva, com e sem influência na produção.

Tipo de intervenção		Nº de intervenções	
Melhoria	com influência na produção	95	25%
	sem influência na produção	286	75%
	total	381	13%
Manutenção Preventiva	com influência na produção	0	0%
	sem influência na produção	771	100%
	total	771	26%
Manutenção Correctiva	com influência na produção	1575	84%
	sem influência na produção	294	16%
	total	1869	62%
Todas	com influência na produção	1670	55%
	sem influência na produção	1351	45%
	total	3021	100%

Tabela 4.1: Distribuição dos tipos de intervenção.

Verifica-se, pela análise da tabela, que 55% das intervenções efectuadas tiveram influência na área produtiva, o que poderá significar perda de produção e incumprimento de prazos de entrega. Constitui-se portanto, um imperativo estabelecer Metodologias de Manutenção adequadas, com o intuito de diminuir, tanto quanto possível, o tempo improdutivo devido à existência de avarias. É notória a predominância de manutenção de carácter Correctivo, representando 62% das operações, sendo a manutenção do tipo Preventivo representada com 26% das intervenções, o que lhe confere o 2º lugar em termos de ocorrências e finalmente a Manutenção de Projecto (designada na terminologia da empresa por manutenção de Melhoria) a representar 13% dos assentos.

4.2 Metodologia utilizada na análise exploratória dos dados

Com a informação disponibilizada no histórico, pretende-se efectuar um estudo sobre o desempenho dos equipamentos e respectivos componentes. No prosseguimento deste intento, aplica-se uma metodologia de análise de ocorrências que evidencie alguns aspectos passados e seja passível de propiciar uma estimação adequada acerca do comportamento dos mesmos. A alusiva metodologia é baseada nos modelos e técnicas estatísticas referidos no terceiro capítulo, e como a seguir se apresenta, estruturada em 3 fases:

- Numa primeira abordagem, com a finalidade de identificar os equipamentos críticos, que deverão ser alvo de vigilância mais atenta, procede-se a uma análise genérica, isto é, quantificam-se as ocorrências passadas no que concerne ao número de intervenções correctivas e apuram-se os indicadores de performance da manutenção referidos nas Secções 3.7 e 3.8. A quantificação das ocorrências passadas e os indicadores de performance da manutenção – obtidos de forma determinística através de operações executadas com o Excel – podem ser visualizados respectivamente nos Anexos D.1 e D.2.
- Seguidamente, com o intuito de conhecer quais os factores que mais influem nas principais debilidades dos mesmos, elaboram-se 2 gráficos de Pareto: um respeitante aos diversos tipos de anomalias tipificadas verificados e outro relativo aos componentes que falharam. Em ambos, tal como exposto em §3.9.1, cada barra será proporcional à frequência de um factor numa dada escala, permitindo desta forma seleccionar os aspectos prioritários a tratar. Será este o ponto de partida para uma análise diferenciada por modo de avaria, objectivando identificar repetitividades e diagnosticar a causa, ou causas potenciais que lhe deram origem.

Na construção dos mencionados gráficos procedeu-se da seguinte forma:

- i. Com a conexão *Tipos de Anomalia/Código* apresentada na Tabela D.3, do Anexo D.3, é estabelecida uma reciprocidade de tal forma que o código caracterize univocamente o conteúdo da avaria.
- ii. Adopta-se um procedimento análogo para identificar os componentes que mais falharam, atribuindo-lhes de igual forma um código que os identifique, tal como

ilustrado na Tabela D.4 do mesmo anexo.

- Por último, em função das debilidades identificadas através do procedimento descrito, efectua-se uma análise fiabilística diferenciada para reparáveis e não reparáveis, para fundamentadamente, se desencadearem as acções necessárias de forma a diminuir as ocorrências e evitar, se possível, a sua repetição. Na prossecução da alusiva análise desenvolveram-se Macros em Excel, que possibilitam a determinação dos indicadores pertinentes à mesma e a devida utilização de forma dinâmica, sempre que os dados do histórico sejam alterados.

As Macros em questão executam os procedimentos e os Algoritmos 4.1 e 4.2, respectivamente para sistemas reparáveis e para sistemas não reparáveis.

4.3 Análise de eventos por equipamento

4.3.1 Quantificação de ocorrências

No que concerne ao número de intervenções de carácter correctivo, ilustra-se no gráfico da Figura 4.1 (elaborado em concordância com a tabela apresentada no Anexo D.1) a quantificação dos registos efectuados.

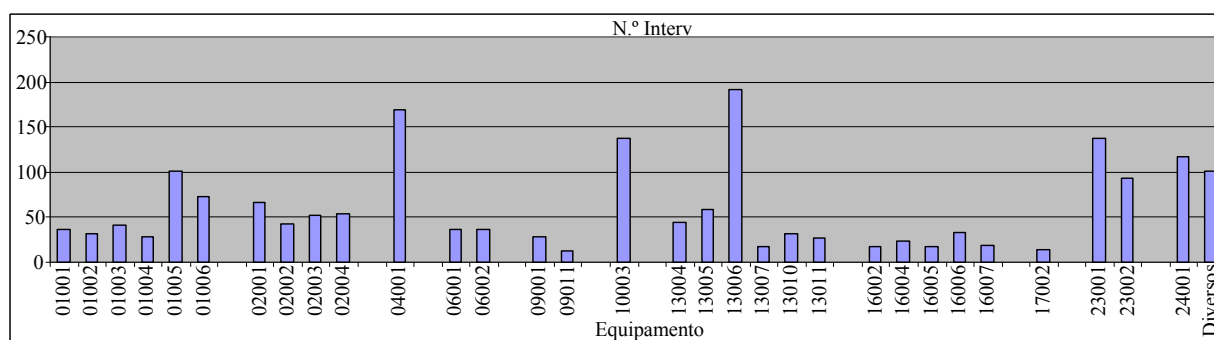


Figura 4.1: Intervenções de carácter correctivo.

De acordo com a tabela exposta no citado anexo e correspondente gráfico, podemos afirmar que os equipamentos mais significativos em termos de ocorrências são, por ordem decrescente: 13006, 4001, 10003, 23001 e 24001, sendo portanto os menos fiáveis. Estes

Algoritmo 4.1: Análise fiabilística de sistemas reparáveis.

```
1 efectuar análise de tendência de avaria através da aplicação do teste de Laplace;
2 se  $\lambda$  for constante então
3   calcular taxa de avarias ( $\lambda$ ) e correspondente MTBF:
4     estimar, e apresentar graficamente, a fiabilidade do equipamento através do
       modelo exponencial negativo;
5   estimar distribuição que melhor descreva a forma das avarias:
6     calcular parâmetros da distribuição; /* método máxima verosimilhança */
7     efectuar teste à qualidade do ajuste; /* Kolgomorov-Smirnov */
8 senão
9   se  $\lambda$  for decrescente então
10    aplicar modelo de Crow:
11      calcular taxa de avarias ( $\lambda$ ), correspondente MTBF e factor de
        crescimento da fiabilidade;
12      estimar, e apresentar graficamente a fiabilidade do equipamento através
        do modelo exponencial negativo;
13   senão /*  $\lambda$  crescente */
14     averiguar a existência de causas possíveis e assinaláveis para fiabilidade
        decrescente;
15     se existirem causas então
16       proceder à identificação e eliminação;
17     senão
18       fase III da curva da banheira, aplicação de técnicas para validar a decisão
19       small; /* Estudo sobre a viabilidade económica da sua
        substituição */
20     fim
21   fim
22 fim
```

Algoritmo 4.2: Análise fiabilística de sistemas não reparáveis.

```
1 efectuar análise de tendência de avaria através da aplicação do teste de Laplace;
2 se as avarias forem IID então
3   | indagar qual a distribuição que melhor descreva os dados;
4   | calcular parâmetros da distribuição assumida;      /* máxima verosimilhança */
5   | efectuar teste à qualidade do ajuste;              /* Kolgomorov-Smirnov */
6   | se a qualidade ao ajuste for boa então
7   |   | estimar, e apresentar graficamente, a fiabilidade do equipamento através do
8   |   | modelo previamente assumido;
9   |   | fim
10  | teste de hipóteses à função de risco crescente;
11  | se a função de risco for crescente então
12  |   | calcular a idade óptima de substituição preventiva;
13  |   | fim
14  | senão                                          /* as avarias não são IID */
15  |   | provavelmente os dados dependerão da ordem cronológica das avarias, ou então,
16  |   | serão oriundos de mais que uma população, devendo essa tendência ser analisada
17  |   | com o propósito de encontrar as possíveis causas;
18  |   | se essas causas existirem então proceder à eliminação;
19  |   | fim
20  | fim
```

cinco equipamentos representam apenas 16% do universo em análise e são responsáveis por 39.7% das avarias. (Lei de Pareto 20-80).

No grupo das *cortadoras*, salienta-se como mais crítica em termos de ocorrências a Serra de Fita, verificando-se que as TDLV'S (assim designadas por cortarem tubo TDLV) apresentam uma média de 34.5 avarias, manifestando entre elas um comportamento relativamente homogêneo, pelo que nada de relevante há a mencionar.

No grupo das *curvadoras* de tubo o valor médio de ocorrências é de 53.75, sendo a mais significativa a identificada com o código 2001 por apresentar 67 intervenções, revelando-se, de acordo com este critério, a mais crítica do grupo.

O grupo das *lixadoras* é constituído por 2 equipamentos e constata-se que a identificada com o código 9001 ultrapassa o dobro das intervenções do equipamento identificado com o código 9011.

Os equipamentos do *grupo 13*, em virtude de serem exemplares únicos são considerados internamente “especiais” e por não serem equivalentes não faz sentido qualquer análise comparativa. Salienta-se, no entanto, que devido às funções que desempenha, o 13006-Dobradora Horizontal requer especial atenção das equipas de manutenção.

O equipamento mais crítico no grupo das *calibradoras* é o identificado com o código 16006 por apresentar 33 ocorrências enquanto que o correspondente valor médio do grupo é aproximadamente 22.

Relativamente às duas *rotativas* em análise, a identificada com o código 23001 apresenta um número de intervenções significativamente maior (cerca de 32%) que a equivalente identificada com o código 23002.

4.3.2 Indicadores de performance da manutenção

Para cada um dos equipamentos que efectivamente sofreram avarias, não considerando portanto as manutenções preventivas, apresentam-se na tabela exposta no Anexo D.2, um conjunto de indicadores de manutenção – TR, WT, TTR, MWT, MTTR, MTBF e Disponibilidade – relativamente aos quais se tecem as observações descritas nos pontos que se seguem.

Tempo médio de espera

Os valores apresentados permitem-nos concluir que uma percentagem significativa dos equipamentos apresenta um tempo de espera (TW) superior ao tempo activo de reparação (TR). Esta morosidade no atendimento às solicitações poderá ser justificada numa ineficiente gestão de peças de reserva, na dificuldade em diagnosticar avarias e ainda na falta de pessoal a quem afectar o serviço. Este indicador fornece, portanto, indicações sobre as condições de atendimento do serviço de manutenção.

No gráfico da Figura 4.2 é apresentado o tempo médio de espera para cada um dos equipamentos que constituem o conjunto de activos físicos da empresa. De acordo com essa figura, os equipamentos que apresentam maiores tempos médios de espera são: 6001, 9011, 2003, 1006 e 16007.

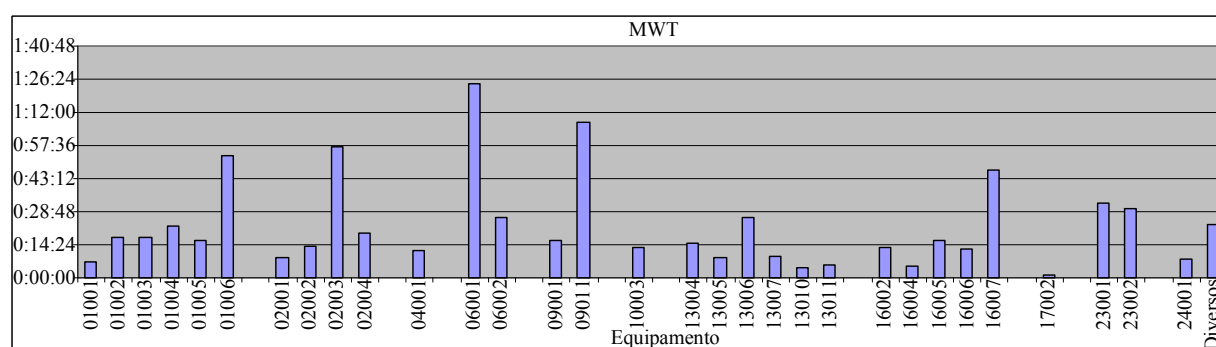


Figura 4.2: Tempo médio de espera (MWT).

Tempo médio de reparação

Analisando a Figura 4.3 poderemos dizer que os equipamentos mais significativos em termos de MTTR são, por ordem decrescente: 16005, 17002, 1006, 6001, 2003 e 9011. A conveniente organização da Manutenção, visando a diminuição dos tempos gastos em fila de espera e nos tempos de intervenção activa, repercutir-se-á no aumento da disponibilidade dos equipamentos o que contribuirá para o acréscimo do seu desempenho. A organização do serviço da manutenção é portanto um vector importante para obter maior produtividade por via da manutenção.

Tempo médio entre avarias

O gráfico da Figura 4.4 indica-nos os MTBF obtidos do conjunto de dados. Os equipamentos críticos em função do MTBF são os identificados com os códigos 13006, 4001, 10003 e 23001 sendo os representados com os códigos 16005, 13007, 16002 e 9011 os que evidenciam melhores resultados.

Análise global

Como é do conjunto dos indicadores que se devem tirar conclusões e não de cada um em particular, em forma de síntese, os indicadores de performance da manutenção calculados para cada uma das famílias de equipamentos, sugerem a análise que se segue.

O equipamento mais crítico do grupo das *cortadoras* é o identificado com o código 1006, quer em termos do elevado tempo de reparação quer pelo baixo MTBF.

No grupo das *curvadoras* a que apresenta maior tempo de reparação é a 2003 representando 39.4% do tempo total de reparação desta família. Tal pode ser justificado pelo elevado tempo de espera no atendimento às solicitações. A que apresenta menor MTBF é a curvadora 2001.

Para o grupo das *máquinas de introdução* a 6001 representa cerca de 65% do tempo de reparação enquanto que a equivalente representa apenas 35%. Todavia os MTBF's não estão muito dispersos.

No que concerne às *lixadoras*, o MTBF da 9001 é sensivelmente metade do apresentado pela 9011; no que diz respeito ao tempo total de reparação, verificamos que o tempo de espera da 9011 é praticamente o dobro da 9001, o que vai originar neste equipamento

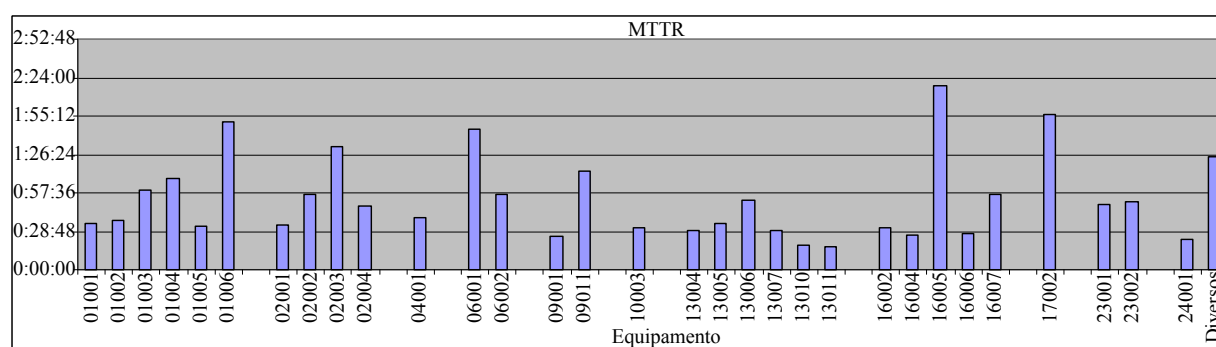


Figura 4.3: Tempo médio de reparação (MTTR).

um MTTR significativamente superior, embora o número de intervenções sejam menos de metade da 9001.

Relativamente às *calibradoras* destaca-se a 16005 pelo elevado tempo de reparação e a 16004 pelo baixo MTBF, sendo a 16007 a que apresenta WT mais significativo.

Sobre as *rotativas* podemos conferir que o MTBF da 23001 é menor que na equivalente; confrontando os MTTR's verificamos que são muito próximos, ainda que o TTR da 23001 represente cerca de 60% do tempo de reparação deste grupo constituído pelas duas máquinas citadas.

4.4 Análise de sistemas reparáveis

4.4.1 Um exemplo de fiabilidade crescente: 13005 – Ems

Sempre que o valor da ET obtido pela aplicação do teste de Laplace seja francamente negativo ($ET < -1.65$ para um nível de significância de 5%), o teste revela-se formalmente conclusivo – dado que a hipótese alternativa é reforçada pelo teste – permitindo considerar, neste caso, a taxa de avarias decrescente, o que significa que os tempos entre ocorrências são, em média, sistematicamente maiores.

Para o período em análise, o equipamento em consideração apresenta um tempo actual de 19945.05h, a que corresponde cerca de 3.5 anos de utilização. Durante esse período foi sujeito a 57 intervenções assim distribuídas: 8 relativas às falhas de alguns dos *componentes* que constituem o equipamento e 49 alusivas aos diversos tipos de *anomalias* denunciadas.

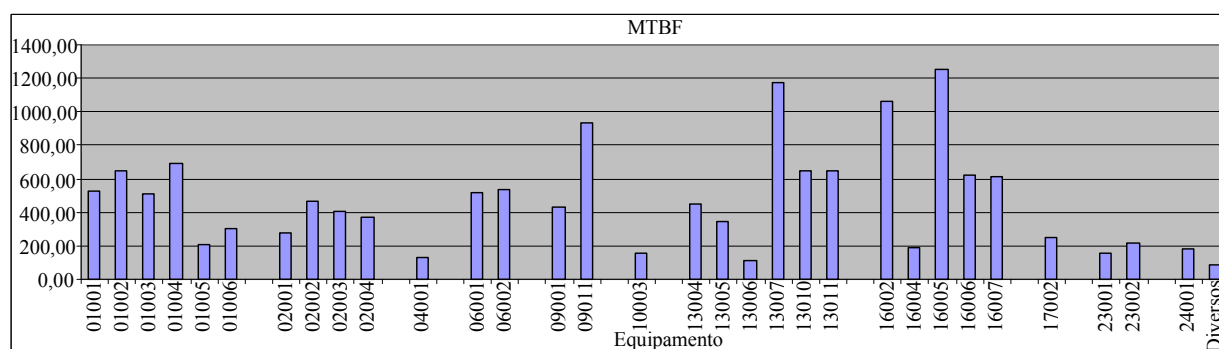


Figura 4.4: Tempo médio entre avarias (MTBF).

O tempo de reparação devido às falhas dos diversos componentes e restantes anomalias é respectivamente 7.75h e 25.6h que perfaz 33.35h.

Análise por tipo de anomalia

O gráfico de Pareto, mostrado na Figura 4.5, indica o género de anomalias tipificadas registadas e a respectiva frequência.

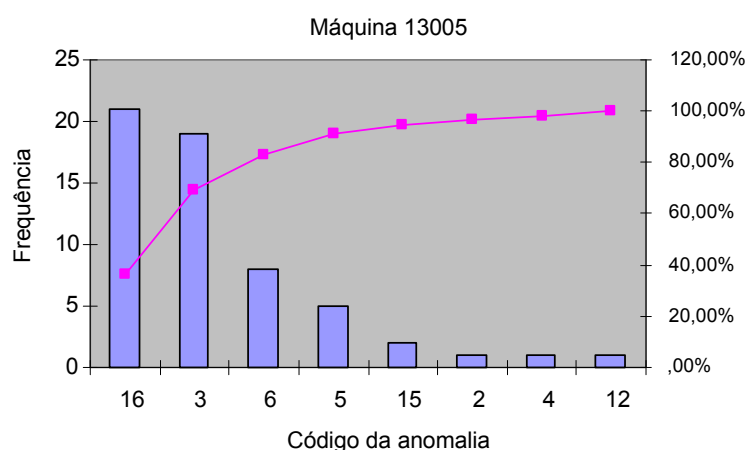


Figura 4.5: Gráfico de Pareto do equipamento “13005” – análise por anomalia tipificada.

A análise de Pareto, relativa aos diferentes *tipos de anomalias tipificadas*, destaca como aspectos prioritários a investigar as anomalias designadas “outras”, à qual corresponde 36% do total de anomalias, e Def. Molde/ Suporte/ Matriz, à qual corresponde 33% das anomalias.

Em menor escala surgem as anomalias denominadas “funcionamento incorrecto” e “paragem de máquina” a representar respectivamente 14% e 8% dos assentos; os restantes 9% distribuem-se pelas anomalias com os códigos 15, 2, 4 e 12.

Análise de avarias devido aos componentes do equipamento

O gráfico de Pareto evidenciado na Figura 4.6 indica, relativamente ao equipamento em observação, o tipo de componentes que provocaram avaria e a respectiva frequência.

O maior número de avarias provocadas pelos componentes presentes neste equipamento são ocasionadas, por ordem decrescente, pelos “parafusos” e “tubos” (códigos 14 e 30) sendo portanto os menos fiáveis. Estes dois componentes, no seu conjunto, são responsáveis por

70% das avarias verificadas devido aos componentes, pelo que será apropriado proceder a um estudo fiabilístico a fim de prever o momento das ocorrências e assim se poderem evitar as consequências que as mesmas possam eventualmente provocar. Os indicadores inerentes ao estudo fiabilístico podem ser vistos na Secção 4.5, quando abordarmos a “análise fiabilística dos componentes”.

Procedendo à determinação do tempo de reparação devido às avarias provocadas pelos componentes identificados, obtemos a informação constante na Tabela 4.2.

Componente	TTR	Cod.	Nº Ocorr.	MTTR
parafuso	3.50	14	5	0.70 = 42 min
punção	2.75	16	1	2.75 = 2h35 min
tubo	0.92	30	2	0.46 = 27 min
cavilha	0.50	4	1	0.50 = 30 min
sensor	0.08	21	1	0.08 = 5 min

Tabela 4.2: Tempo de Reparação das avarias registadas para a máq. 13005 – Ems.

Elaborando um gráfico para o MTTR obtemos a informação que consta na Figura 4.7.

Examinando os dados que figuram na tabela e em concordância com o gráfico da Figura 4.7 podemos conferir que:

- o componente designado “parafuso” e identificado com o código 14 é o principal causador de intervenções, não lhe correspondendo, no entanto, o maior tempo médio de reparação; pelo contrário, podemos verificar que o tempo relativo à única substituição verificada no componente denominado “punção” e identificado com o código 1 foi de 2h35min o que se traduz num valor expressivo para uma só reparação.
- os maiores tempos de reparação, por ordem decrescente, decorrem da substituição dos componentes parafusos e punções, devendo-se portanto diminuir esses tempos sempre que seja indispensável intervir. A conveniente organização da manutenção visando a diminuição do tempo gasto nestas reparações traduzir-se-á, de forma indiscutível, na melhoria da manutibilidade e consequentemente no aumento da disponibilidade do equipamento, uma vez que são estes componentes que mais a condicionam. Urge então proceder a um estudo fiabilístico adequado para averiguar se a função de risco

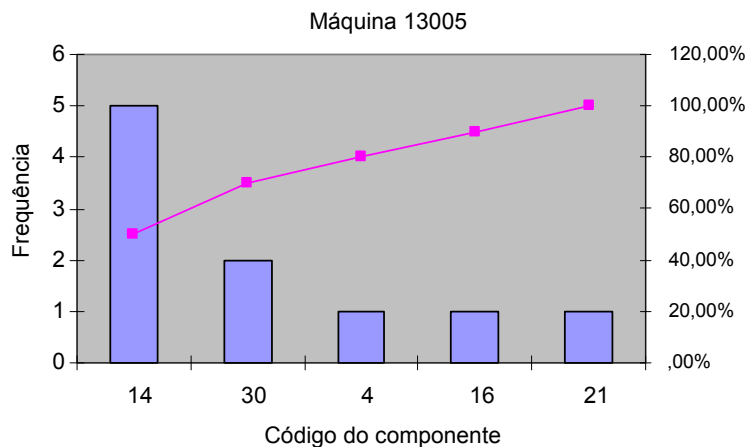


Figura 4.6: Gráfico de Pareto do equipamento "13005" – análise por componente que desencadeia a avaria.

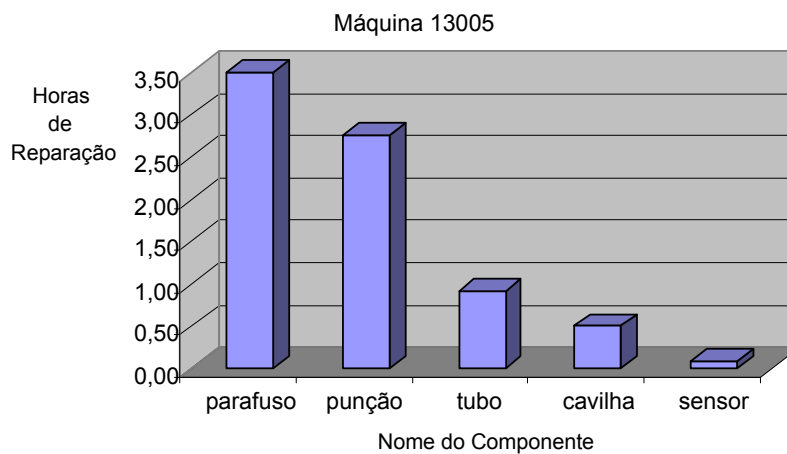


Figura 4.7: Tempo de reparação das avarias desencadeadas pelos componentes do equipamento "13005".

dos componentes é crescente (ver função de risco na Secção 3.3.2). Caso tal se verifique, com o conhecimento da periodicidade óptima de substituição preventiva, será possível proceder à substituição antes de o componente falhar com o intuito de evitar ou diminuir estas ocorrências e assim se poderem extinguir as debilidades reconhecidas.

Análise fiabilística ao equipamento

Perante os dados históricos pertencentes ao equipamento supra citado, as macros implementadas de acordo com as técnicas apresentadas no Capítulo 3 e esquematizadas no Algoritmo 4.1 produzem os resultados expressos na Figura 4.8. (No Anexo A mostram-se os resultados obtidos com a aplicação desenvolvida para a totalidade dos equipamentos presentes na empresa).

Máquina	NºEvent	ET	V. Prova Tst Laplace	λ	MTBF	Fiabilidade	Pareto
13005	57	-2,189	2,9% λ Decrescente		405,8	$\alpha=0,14$	

Figura 4.8: Alguns indicadores fiabilísticos referentes ao equipamento 13005 – EMS.

Como o valor de $ET < -1.65$ (-2.189) há evidência estatística, a um nível de significância de 5%, de taxa de avarias decrescente (com valor de Prova do teste 2.93%) o que é sinónimo de que a probabilidade de avaria vai diminuindo à medida que o tempo passa. Confirmada esta tendência procede-se à aplicação do modelo de Crow para estimar o valor da taxa de avarias (λ), tendo-se estimado um valor para o factor de crescimento da fiabilidade de 14%. Com a taxa de avarias assim determinada, obteve-se o gráfico da Figura 4.9 que demonstra a evolução da taxa de avarias ao longo de um horizonte temporal de 800 dias.

Através do gráfico podemos inferir que:

- no horizonte temporal de 200 dias a taxa de falhas é reduzida em 3%;
- a taxa de avarias a partir de 600 dias tende para um valor aproximadamente constante (6%), pelo que se não se verificarem avarias durante esse período, a probabilidade de se observarem é notavelmente reduzida;

4.4.2 Um exemplo de fiabilidade constante

Sempre que a um nível de significância de 5%, a $-1.96 < ET < 1.96$, a não rejeição de H_0 não é sustentada estatisticamente – o teste revela-se inconclusivo – pelo que admitimos que a taxa de avarias é constante. Nesta situação é viável prever o comportamento fiabilístico do equipamento pelo modelo exponencial negativo, dado que se espera que as avarias, num espaço amostral contínuo sejam aleatórias, constituindo portanto, um processo de Poisson homogéneo.

A título de exemplo, em função do número de intervenções e também por ser considerado um equipamento crítico por ser decisivo para o ciclo produtivo, o equipamento seleccionado para descrever os resultados obtidos de acordo com a metodologia descrita na Secção 4.2 (Algoritmo 4.1), será a 13006 -Dobradora Horizontal. Os resultados apresentados foram conseguidos com base no registo cronológico das avarias e respectivas reparações relativas ao período representativo em análise. Esta informação é apresentada no Anexo D.8. O equipamento em causa produz vários tipos de silenciadores cilíndricos para automóvel. Esta procede ao ensablamento mecânico dos fundos de cabeça ao corpo barrilete, mediante o processo de dobramento rotativo de perfil enrolado.

Para o período em análise, o equipamento em causa apresenta um tempo actual de 21160.87h a que corresponde cerca de 3 anos e meio de utilização. Durante esse período foi sujeito a 192 intervenções assim distribuídas: 69 relativas às falhas de alguns dos *componentes* que constituem o equipamento e 126 alusivas aos diversos *tipos de anomalias* denunciadas. O tempo de reparação é de 48.4h e 117.74h respectivamente para componentes e restantes anomalias, o que perfaz 166.14h.

Análise por tipo de anomalia

O gráfico de Pareto evidenciado na seguinte Figura 4.10 indica o género de anomalias registadas e a respectiva frequência.

A análise de Pareto, relativa aos diferentes *tipos de anomalias tipificadas*, destaca como aspectos prioritários a investigar as anomalias designadas *Outras* à qual lhe sucede a anomalia tipificada denominada “Funcionamento Incorrecto” e seguidamente “Deficiência Molde/suporte/Matriz”. Estes 3 tipos de anomalias, no seu conjunto, são responsáveis por 80% das anomalias verificadas neste equipamento.

A análise é pouco expressiva uma vez que à maior parte das anomalias registadas não

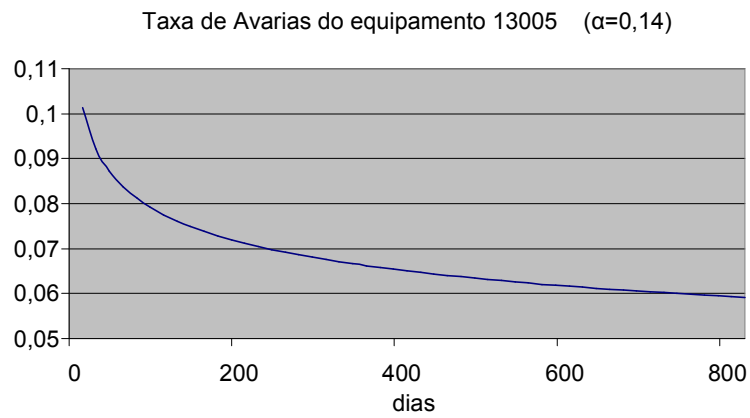


Figura 4.9: Taxa de avarias do equipamento “13005”.

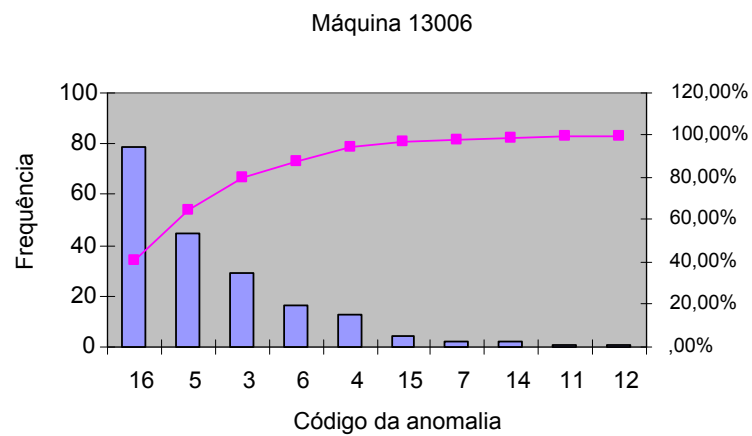


Figura 4.10: Gráfico de Pareto do equipamento “13006” – análise por anomalia tipificada.

lhe foi atribuído código, por parte de quem registava a informação, razão pela qual aparece em primeiro lugar a barra “outros” que engloba a panóplia de todas aquelas ocorrências cujo aparecimento é disperso. Devido a certas imprecisões verificadas nas descrições efectuadas no campo *Anomalia*, do registo histórico, os resultados assim conseguidos não são convenientemente elucidativos, razão pela qual esta técnica de identificação dos principais problemas, não surte o efeito desejado. No Capítulo 5 delineiam-se, para trabalhos futuros, algumas linhas de orientação no sentido de colmatar esta lacuna.

Análise de avarias devido aos componentes do equipamento

O gráfico de Pareto ilustrado na Figura 4.11 indica, relativamente ao equipamento em observação, o tipo de componentes que provocaram avaria e a respectiva frequência.

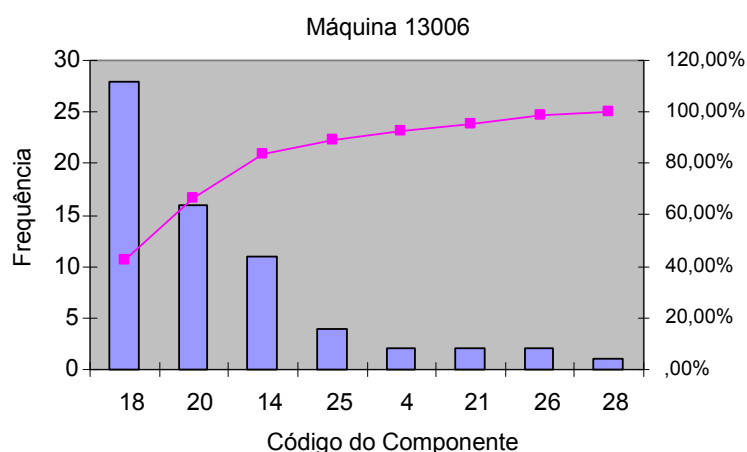


Figura 4.11: Gráfico de Pareto do equipamento “13006” – análise por componente que desencadeia a avaria.

O gráfico em questão sugere a seguinte análise: o maior número de avarias provocadas pelos componentes presentes neste equipamento, por ordem decrescente, são ocasionadas pelos rolamentos, rótulas e parafusos, (códigos 18, 20 e 14) sendo portanto os menos fiáveis. Estes 3 componentes, no seu conjunto, são responsáveis por 86% das falhas devido aos componentes, pelo que será apropriado proceder a um estudo fiabilístico (apresentado na Secção 4.5) que contribua de forma válida para a tomada de decisões no sentido de eliminar previamente a necessidade de conserto. Desta forma podem-se evitar as consequências que as mesmas possam eventualmente provocar.

Procedendo à determinação do tempo de reparação devido às avarias provocadas pelos componentes identificados, obtemos a informação constante na Tabela 4.3.

componente	TTR	cod	N. Ocorr	MTTR
rótula	14.85	20	16	0.93=56min
rolamento	12.35	18	28	0.44=26min
parafuso	9.92	14	11	0.90=54min
cavilha	6.58	4	2	3.29=3h17min
veio	3.40	25	4	0.85=51min
filtro	0.67	26	2	0.33=20min
sensor	0.38	21	2	0.19=11min
roda	0.25	28	1	0.25=15min

Tabela 4.3: Tempo de reparação das avarias desencadeadas pelos componentes do equipamento 13006 – Dobradora Horizontal.

Examinando os dados que figuram na tabela, é manifestamente notório que o componente designado “rolamento” e identificado com o código 18 é o principal causador de intervenções, não lhe correspondendo, no entanto, o maior tempo de reparação. A cada intervenção correspondeu em média 26 minutos, pelo que, numa análise ligeira, este componente não é o que mais interfere na indisponibilidade do equipamento. Pelo contrário, verificamos que o tempo relativo às 2 substituições do componente denominado “cavilha” e identificado com o código 4 perfaz 6.58h correspondendo, em média, a cada uma delas 3h17min considerando-se, portanto, o componente mais crítico neste equipamento.

O tempo médio de reparação originado pelo componente “rótula” revela-se de igual modo significativo pois corresponde-lhe, em média, cerca de 56min por cada intervenção o que lhe confere a segunda posição em termos de tempos médios de reparação.

As falhas dos componentes “parafusos” e “veios” também configuram pontos fracos pois ocupam respectivamente o 3º e 4º lugar em termos de MTTR.

Em jeito de conclusão poder-se-á proferir que:

- Dever-se-ão minimizar, por ordem de importância, as avarias provocadas pelos componentes rolamentos, rótulas e parafusos, procedendo a uma gestão cuidada no que concerne aos tempos de revisão e substituição de prevenção, bem como a uma ade-

quada gestão de peças de reserva, uma vez que a incidência destes componentes sobre as avarias é elevada.

- Dever-se-á reduzir o tempo de reparação das avarias provocadas pelas cavilhas, rótulas, parafusos e veios sempre que seja indispensável intervir, uma vez que são aqueles cujo MTTR é maior. A logística e preparação do trabalho devem estar convenientemente organizados uma vez que, de acordo com a Tabela de Indicadores de Manutenção disponibilizada no Anexo D.2, o tempo médio em fila de espera (MWT) para este equipamento é superior ao tempo de intervenção activa (TR) necessário para efectuar a reparação propriamente dita.

O gráfico que ilustra o TTR (tempo total de reparação) por tipo de componente para o equipamento objecto de análise é apresentado pelo gráfico da Figura 4.12.

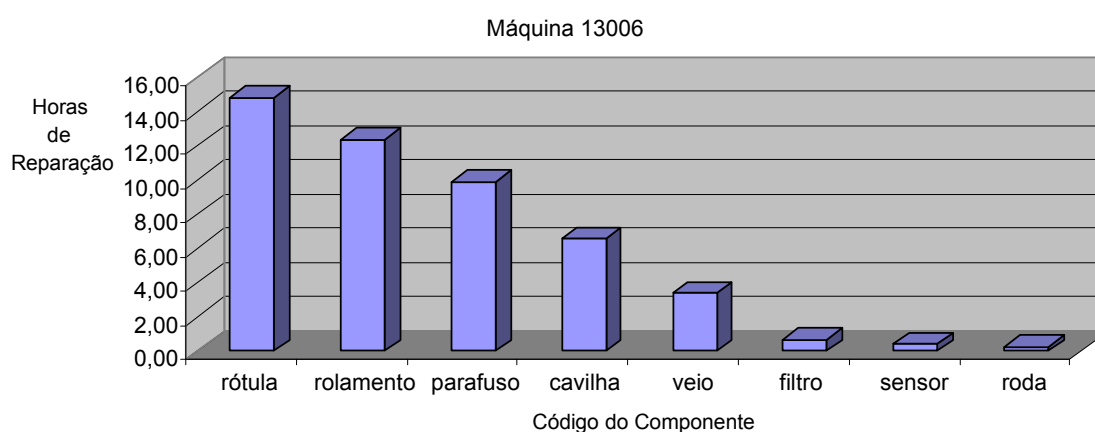


Figura 4.12: Tempo de reparação das avarias desencadeadas pelos componentes do equipamento “13006”.

De acordo com os dados apresentados, em jeito de conclusão, poder-se-á tecer que os maiores tempos de reparação, por ordem decrescente, decorrem da substituição dos componentes rótula, rolamento, parafuso e cavilha. A conveniente organização da manutenção, visando a diminuição do tempo gasto nestas reparações, traduzir-se-á de forma indiscutível na melhoria da manutibilidade e consequentemente no aumento da disponibilidade do equipamento, uma vez que são estes que mais a condicionam.

Urge então averiguar se a função de risco é crescente (ver *Função de risco* – Secção 3.3.2) para, fundamentadamente, se decidir (ou não) pela substituição preventiva destes

componentes com o intuito de evitar ou diminuir as respectivas ocorrências e assim se extinguirem as debilidades reconhecidas.

Análise fiabilística

Para o equipamento supra citado as macros desenvolvidas produzem os resultados expressos na Figura 4.13.

Máquina	NºEvent	ET	V. Prova	Tst Laplace	λ	MTBF	Fiabilidade	Pareto
13006	194	-1,953	5,1%	λ Constante	0,009168	109,1		

Figura 4.13: Alguns indicadores fiabilísticos obtidos para o equipamento 13006.

Relativamente à análise de tendência efectuada através da aplicação do teste de Laplace, concluímos que há tendência de avarias linear pois o valor obtido para a $ET (= -1.953)$ não permite rejeitar H_0 , a um nível de significância de 5%, o que possibilita considerar a taxa de avarias constante. O valor de Prova do Teste é de 5.1%.

O comportamento fiabilístico do equipamento, para um horizonte temporal de 20 dias, pode ser estudado pelo gráfico ilustrado na Figura 4.14 o qual foi obtido através da aplicação da equação analítica da fiabilidade pelo modelo exponencial negativo (expressão (3.46))

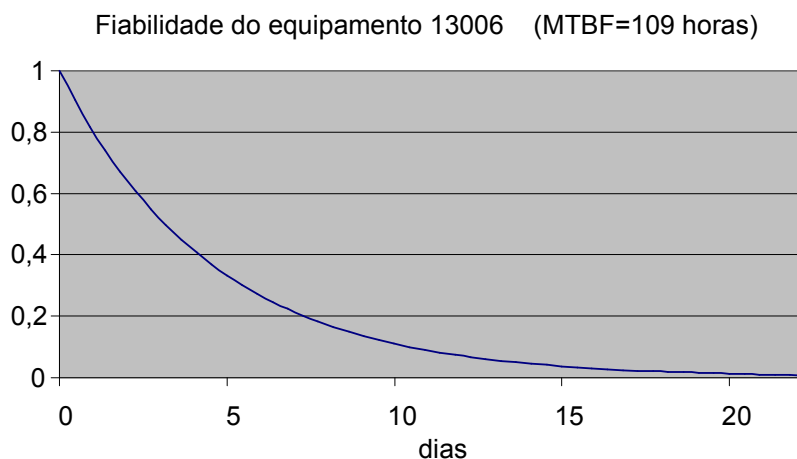


Figura 4.14: Fiabilidade do equipamento “13006”.

Através do gráfico ilustrado na Figura 4.14 poderemos inferir muitas propriedades, senão vejamos:

- A Probabilidade de funcionar ao fim de 5 dias de trabalho é aproximadamente 38%.
- A Probabilidade de Avaria após 20 dias de trabalho é quase 100%.
- Verificada a hipótese de taxa de avarias constante – os acontecimentos num espaço amostral contínuo esperam-se aleatórios – então a probabilidade de K avarias pode ser calculada pelo modelo de Poisson (equação (3.41)). Para $t = MTBF$:
 - $P(\text{zero avarias}) = 0.3681$;
 - $P(\text{uma avaria}) = 0.36$;
 - $P(\text{duas avarias}) = 0.1838$.
- Pela equação (3.49) obtém-se uma estimativa para λ : $\hat{\lambda} = 0.009168$.
- Pela equação (3.50) obtém-se um MTBF de 109.1 horas (4.5 dias) ou seja, uma ou mais avarias quase todas as semanas.

4.4.3 Um exemplo de fiabilidade decrescente

Sempre que o valor da ET obtido pela aplicação do teste de Laplace seja francamente positivo – $ET > 1.96$ a um nível de significância de 5% – rejeitamos H_0 e o teste revela-se formalmente conclusivo, permitindo considerar, nesta situação, a taxa de avarias crescente. Um equipamento que se enquadra neste contexto é a curvadora 2002 cujos resultados inerentes aos cálculos produzidos pelas macros implementadas são apresentados na Figura 4.15.

Máquina	NºEvent	ET	V. Prova	Tst Laplace	λ	MTBF	Fiabilidade	Pareto
2002	41	2,137	3,3%	λ Crescente				

Figura 4.15: Alguns indicadores fiabilísticos obtidos para o equipamento 2002.

Como se pode verificar, apresenta-se um valor de $ET=2.137$ pelo que, ao nível de significância de 5%, há evidência estatística de taxa de avarias crescente – com valor de Prova do teste igual a 3.3% – ou seja, os tempos entre avarias, à medida que o tempo passa, tendem a ser sucessivamente mais pequenos o que caracteriza a fase III da curva “em forma de banheira”. Nestas circunstâncias, dever-se-á averiguar a qualidade das últimas intervenções,

diminuir o intervalo de tempo entre manutenções preventivas e principalmente indagar a existência de causas possíveis e assinaláveis que provoquem tal crescimento, pois no caso de se concluir pela presença dessas causas dever-se-ão empreender as devidas acções correctivas para as eliminar¹. Caso se conclua pela inexistência dessas causas, provavelmente o equipamento estará próximo do fim do ciclo de vida – e como é característico desta fase, reflectirá o processo normal e inevitável do envelhecimento – todavia, dever-se-á fundamentar esta hipótese com técnicas e métodos específicos como o diagrama causa-efeito (ver Secção 3.9.2) e elaborar um estudo acerca da viabilidade da substituição do equipamento com o desígnio de não incorrer no risco de rejeitar o equipamento, quando, de facto, ainda está em boas condições (erro do tipo I).

Análise por tipo de anomalia

O gráfico de Pareto ilustrado na Figura 4.16 indica o tipo de anomalias codificadas registadas para o equipamento 2002 e a sua frequência.

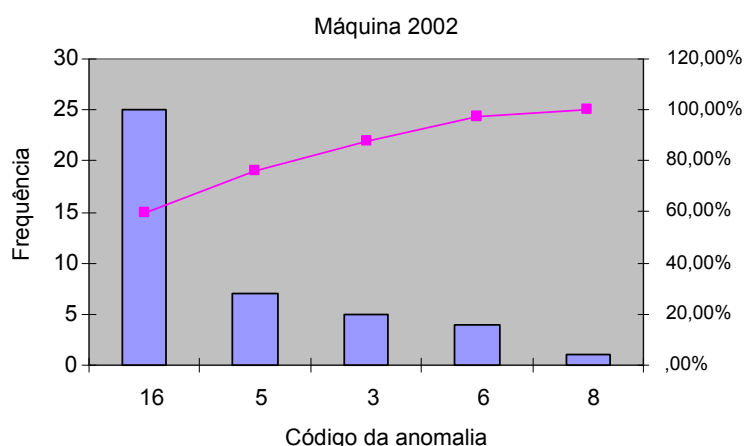


Figura 4.16: Gráfico de Pareto do equipamento “2002” – análise por anomalia tipificada.

A análise de Pareto, relativa aos diferentes *tipos de anomalias tipificadas*, evidencia como aspecto prioritário a tratar a anomalia designada “Outras” à qual lhe sucede a

¹Uma possível justificação para o aumento da taxa de avarias, será o facto de que muitas das ocorrências registadas no início do período em observação, provavelmente derivariam do uso inadequado dos equipamentos dada a inexperiência dos operários naquela data. A fábrica instalou-se na região naquela altura e os operários sendo locais, não possuíam experiência de trabalho na Indústria em virtude da ausência desta tradição laboral na região.

anomalia tipificada denominada “Funcionamento Incorrecto”. Tal como anteriormente mencionado, na descrição efectuada ao equipamento 13006 -Dobradora Horizontal, a análise revela-se pouco expressiva.

Análise por tipo de Componente

O gráfico de Pareto representado na Figura 4.17 indica o tipo de componentes que provocaram avarias no equipamento 2002 bem como a respectiva frequência de aparecimento.

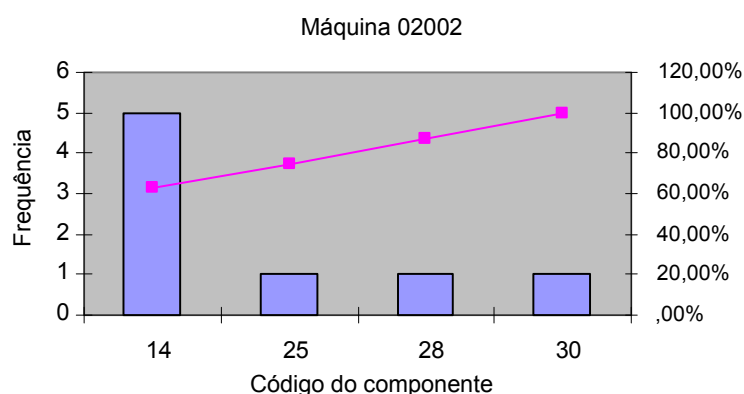


Figura 4.17: Gráfico de Pareto do equipamento “2002” – análise por componente que desencadeia a avaria.

Do número de avarias provocadas pelos componentes presentes neste equipamento destacam-se as provocadas pelos parafusos sendo, portanto, o componente menos fiável. Tal como expresso nas análises anteriores, dever-se-á efectuar um estudo fiabilístico adequado (ver Secção 4.5) a fim de prever os momentos das ocorrências para proceder em conformidade com o descrito em *Função de risco*, da Secção 3.3.2.

A informação relativa à frequência e tipo de componentes que mais falharam, assim como o correspondente tempo de reparação, é caracterizada na Tabela 4.4.

Em conformidade com os dados da tabela e correspondente gráfico (Figura 4.18) poder-se-á, em jeito de conclusão, afirmar o seguinte:

- O maior número de avarias decorrem da substituição do componente “parafuso” ao qual corresponde também o maior tempo de reparação, sendo portanto, de entre os componentes que desencadeiam avarias neste equipamento, simultaneamente o menos fiável e aquele que mais condiciona a disponibilidade do equipamento. A conveniente organização

componente	TTR	cod	N. Ocorr	MTTR
parafuso	1.03	14	5	0.21
roda	0.17	28	1	0.17
tubo	0.17	30	1	0.17
veio	0.08	25	1	0.08

Tabela 4.4: Tempo de reparação das avarias desencadeadas pelos componentes do equipamento 2002.

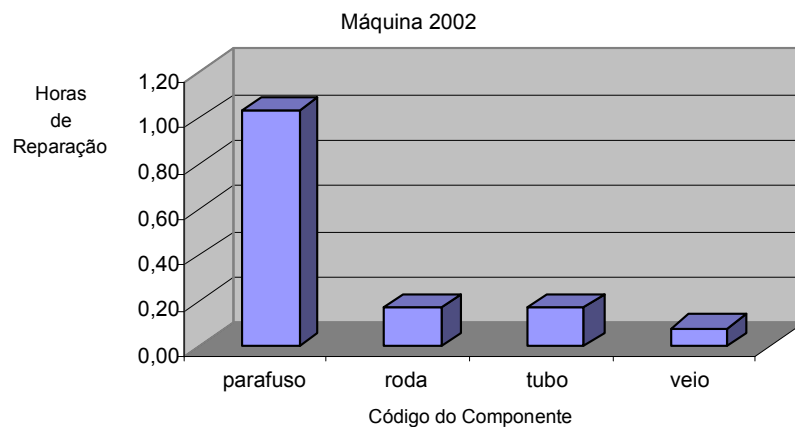


Figura 4.18: Tempo de reparação das avarias desencadeadas pelos componentes do equipamento “2002”.

da manutenção visando a diminuição do tempo gasto nestas reparações, traduzir-se-á, de forma indiscutível, na melhoria da manutibilidade e conseqüentemente no aumento da disponibilidade do equipamento.

Análise fiabilística

Uma vez constatada a evidência estatística de taxa de avarias crescente, não é usual, nestas circunstâncias, efectuar a predição da fiabilidade através de um modelo estatístico.

4.4.4 Indicadores fiabilísticos obtidos para os restantes equipamentos reparáveis

A análise de tendência das avarias (teste de Laplace), a estimativa da taxa de avarias e do MTBF, são informações que podem proporcionar contribuições válidas para a tomada de decisões uma vez que através das mesmas será possível estimar o comportamento fiabilístico de equipamentos reparáveis. As tabelas apresentadas no Anexo A evidenciam tais informações que por sua vez foram obtidas segundo o disposto na metodologia explícita através do Algoritmo 4.1 (§4.2). Os resultados apresentados no citado anexo são devolvidos pelas macros implementadas de acordo com as técnicas que lhe são subjacentes. A partir destes resultados, para cada um dos equipamentos, será possível tecer considerações similares às anteriormente efectuadas para os equipamentos analisados (2002, 13005 e 13006), no sentido de identificar as principais debilidades que lhe são reconhecidas. Conhecendo tais debilidades poder-se-ão delinear, de forma fundamentada, as práticas convenientes no intuito de prever e de se evitarem ou diminuir as ocorrências indesejadas.

Ao avaliar os resultados apresentados, verifica-se que a taxa de avarias é decrescente para a maioria dos equipamentos. Como anteriormente referido aquando da análise do equipamento 2002 (§4.4.3), tal poderá ser justificado, devido ao uso inadequado dos equipamentos por parte dos operadores.

4.5 Análise fiabilística dos componentes instalados em vários sistemas

A fiabilidade de um equipamento é, obviamente, influenciada pelos itens ou componentes que o constituem. Neste contexto, a fim de se poder melhorar a fiabilidade e portanto o desempenho dos equipamentos onde estão inseridos, é necessário definir os principais elementos que os constituem e identificar os respectivos modos de falha.

O resultado do teste de Laplace, a estimativa do MTTF e os valores dos parâmetros da distribuição teórica elegida para representar os dados, são indicadores adequados para aferir o comportamento fiabilístico dos componentes previamente identificados. Na Figura 4.19 mostram-se tais indicadores, ressaltando-se que os parâmetros da distribuição de Weibull, apenas serão evidenciados quando o pressuposto IID é verdadeiro. Seguindo a metodologia expressa no Algoritmo 4.2 (ver Secção 4.2) as macros implementadas segundo os métodos descritos devolveram os resultados mostrados na Figura 4.19. Os resultados












	NºEvent	ET	V. Prova	Tst Lapl.	λ	MTTF	Fiabilid	η (dias)	β
bigorna	4	0,630	52,9%	IID	0,000253	3953,8		234,30	1,471
cavilha	7	0,748	45,5%	IID	0,000112	8956,0		582	2,545
correia	6	-2,797	0,5%	NIID		24814,0	$\alpha=0,58$		
eléctrodo	52	4,260	0,0%	NIID					
filtro	19	-1,619	10,5%	IID	0,000124	8085,2		369,50	0,779
guia	14	1,631	10,3%	IID	0,000153	6536,4		419,40	1,289
parafuso	64	3,675	0,0%	NIID					
punção	6	-1,502	13,3%	IID	0,000126	7961,7		427,30	1,018
roda	47	3,614	0,0%	NIID					
rolamento	39	3,207	0,1%	NIID					
rótula	16	0,068	94,6%	IID	0,000943	1060,4		53,40	0,872
sensor	27	1,318	18,7%	IID	0,000097	10257,8		478,9	0,879
serra	13	0,685	49,3%	IID	0,000915	1092,4		62,40	0,882
tubo	47	1,950	5,1%	IID	0,000128	7804,6		328,40	0,772
veio	17	0,449	65,3%	IID	0,000126	7961,7		482,10	0,875

Figura 4.19: Alguns indicadores fiabilísticos obtidos para diversos componentes.

assim conseguidos sugerem os seguintes comentários:

- os valores da ET apresentados permitem-nos concluir que a percentagem mais elevada dos componentes (66.66%) apresentam tempos entre ocorrências IID.

- relativamente ao número de falhas, em consonância com a tabela, podemos afirmar que os componentes mais significativos são, por ordem decrescente: parafuso, eléctrodo, roda, tubo e rolamento sendo portanto os menos fiáveis; ao contrário destes, os componentes bigorna, punção, correia e cavilha são aqueles para os quais se registaram menos ocorrências, apresentando portanto uma fiabilidade superior.
- o componente correia de acordo com o valor da ET apresenta taxa de falhas decrescente, tendência para fiabilidade crescente. Os componentes eléctrodo, parafuso, rola e rolamento apresentam valores de ET que indiciam uma taxa de falhas crescente.

4.5.1 Estudo de um componente com tempos entre avarias não IID (tendência para fiabilidade decrescente)

Quando o teste de Laplace é formalmente conclusivo – sempre que o valor de ET seja significativamente positivo – rejeita-se H_0 e conclui-se que os últimos tempos entre ocorrências não são IID, ou seja, há indícios de dados dependentes da ordem cronológica das ocorrências e/ou oriundos de mais que uma população.

Consideremos, por exemplo, na Tabela 4.5 o histórico das ocorrências do componente *rolamento* instalado em 7 equipamentos.

No caso concreto deste componente objecto de análise, os resultados relativos ao Teste de Laplace, tal com demonstrado na Figura 4.20 – onde é possível visualizar também os cálculos intermédios relativos ao mesmo teste – evidenciam um valor de $ET=3.207$, pelo que há evidência estatística de ocorrências NIID. O valor de Prova do teste é de 0.1%

Considerando os dados da tabela, podemos conferir que as 39 falhas do componente rolamento são distribuídas por 7 equipamentos da seguinte forma: 27 ocorrências no equip. 13006, 4 ocorrências no equip. 13004, 3 ocorrências no equip. 4001 e 1 única ocorrência nos equipamentos 24001, 1005, 1006 e Diversos. Convém averiguar no contexto operacional a existência de causas que indiquem se estaremos na presença de dados dependentes da ordem cronológica das ocorrências ou oriundos de mais que uma população o que, aparentemente, está de acordo com os factos na medida em que se constata que na descrição das anomalias apenas se faz referência à falha do componente rolamento sem contudo se mencionar qual o tipo de rolamento em questão.

Não se prossegue para o cálculo dos parâmetros de Weibull, ou de qualquer outra

Maquina	H. Ocorr	T. Actual	TTR	Anomalia	H. Ocorr Corrigida
1005	13.077.62	20.773.02	0.25	Rolamento faz um barulho estranho	88.194.20
1006	20.411.00	21.446.57	4.00	Rolamento partido do braço nº5	132.194.50
4001	10.213.18	20.938.03	0.17	Mudar rolamento	71.007.60
4001	16.759.80	20.938.03	0.17	Rolamento mal posicionado	110.287.30
4001	20.782.53	20.938.03	0.25	Rolamento solto	134.414.18
13004	7.899.33	20.893.70	0.92	Rolamento desfeito	55.295.33
13004	7.977.00	20.893.70	0.35	Trocar Rolamento	55.839.00
13004	12.161.68	20.893.70	0.17	Rolamento desapertado	82.698.60
13004	12.990.35	20.893.70	0.17	Rolamento inferior não roda	87.670.60
13006	2.459.75	21.415.37	0.25	Caixa rolamento do braço partida	17.218.25
13006	3.984.50	21.415.37	0.75	Rolamento gripado	27.891.50
13006	4.951.50	21.415.37	0.58	Rolamento danificado	34.660.50
13006	8.192.33	21.415.37	0.42	Partiu-se o rolamento	57.346.33
13006	8.794.00	21.415.37	0.35	O rolamento esquerdo está a fazer muito barulho	61.558.00
13006	8.962.75	21.415.37	0.33	Rolamento gripado do braço esquerdo	62.739.25
13006	9.154.83	21.415.37	0.27	Trocar Rolamento	64.083.83
13006	9.323.50	21.415.37	0.37	Rolamento gripado	65.264.50
13006	9.499.75	21.415.37	0.77	Rolamento gripado	66.498.25
13006	9.688.50	21.415.37	0.27	Substituir rolamento braço direito	67.819.50
13006	13.023.02	21.415.37	0.25	Rolamento partido	87.866.60
13006	13.259.52	21.415.37	0.50	Rolamento partido (braço esquerdo)	89.285.60
13006	13.697.52	21.415.37	0.25	Rolamento partido	91.913.60
13006	13.746.35	21.415.37	0.50	Rolamento partido	92.206.60
13006	14.598.52	21.415.37	0.08	Substituição do rolamento	97.319.60
13006	14.944.35	21.415.37	0.50	Mudar rolamento	99.394.60
13006	14.947.25	21.415.37	1.00	Substituir rolamento e parafusos do molde	99.412.00
13006	15.059.83	21.415.37	0.33	Rolamento partido	100.087.50
13006	16.399.87	21.415.37	0.25	Rolamento partido	108.127.70
13006	16.555.37	21.415.37	0.33	Rolamento partido	109.060.70
13006	16.910.52	21.415.37	0.50	Rolamento partido	111.191.60
13006	17.268.85	21.415.37	0.25	Substituir rolamento do braço esquerdo	113.341.60
13006	19.090.53	21.415.37	0.50	Rolamentos partidos	124.271.70
13006	19.305.70	21.415.37	0.33	Rolamento partido	125.562.70
13006	19.316.62	21.415.37	0.50	Rolamento partido	125.628.20
13006	19.458.05	21.415.37	0.33	Mudar 2 rolamentos	126.476.80
13006	20.297.78	21.415.37	0.50	Substituir rolamento direito	131.515.20
13006	20.646.50	21.415.37	1.08	Rolamento partido	133.607.50
24001	17.048.22	21.500.87	0.50	Verificar guias, rolamentos e parafuso	112.017.80
Diversos	4.983.00	9.728.50	6.00	proteger rolamentos	34.881.00

Tabela 4.5: Histórico das ocorrências desencadeadas pelo componente rolamento

distribuição teórica que se considere adequada, uma vez que o pressuposto IID não é verificado e nestas circunstâncias, tal como referido por Leitão [8], é errado ajustar os dados a qualquer distribuição teórica.

4.5.2 Estudo de um componente com tempos entre avarias não IID (tendência para fiabilidade crescente)

Efectuando o teste de Laplace para sistemas não reparáveis – Algoritmo 4.2 –, as macros implementadas segundo a metodologia descrita na Secção 3.5.2 devolvem os resultados disponibilizados na Figura 4.19. Em conformidade com os valores tabelados nessa figura, constata-se que o único componente que se enquadra neste contexto é o designado “correia” ao qual corresponde um valor da ET igual a -2.797 pelo que, a um nível de significância de 5%, devemos rejeitar H_0 (valor de prova dos teste igual a 0.5%) ou seja, não há evidências estatísticas de ocorrências Independentes e Identicamente Distribuídas.

Consideremos na Tabela 4.6 o histórico das ocorrências do referido componente instalado nos seguintes 3 equipamentos: 1006, 4001 e 9011.

Maquina	H. Ocorr. Absoluta	T. Actual	TTR	Anomalia
1006	581	21.447	4.50	Falta de sincronismo nas correias
1006	632	21.447	0.75	Falta de sincronismo nas correias
1006	916	21.447	3.75	Falta de sincronismo nas correias
1006	2.692	21.447	0.33	Esticar correias
4001	4.764	20.938	0.50	Correia partida
9011	11.707	20.102	1.35	Partiu correia

Tabela 4.6: Histórico das ocorrências desencadeadas pelo componente correia.

Previamente à aplicação do teste de Laplace, de forma a evitar os inconvenientes da informação sobreposta, procedemos à actualização da hora de ocorrência e do Tempo Total do Teste, T_0 , (ver Secção 3.5.3) o que nos proporciona os tempos apresentados na Tabela 4.7, que podem ser comprovados pelo desenvolvimento que se mostra na Tabela 4.8.

Ao clicar sobre a célula respeitante à ET de cada componente, abre-se uma janela onde se podem visualizar os cálculos intermédios do teste Laplace – Figura 4.21.

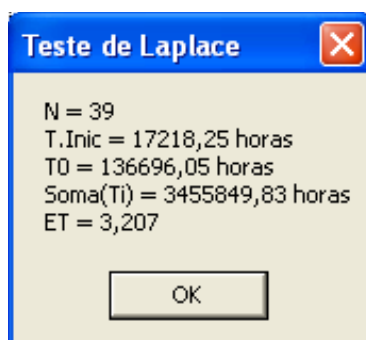


Figura 4.20: Resultados intermédios do teste de Laplace aplicado aos dados do componente *rolamento*.

Componente	Tempo de ocorrência das avarias						
correia	0	1	2	3	4	5	T_0
	1.743	1.896	2.748	8.076	14.292	35.121	62.486

Tabela 4.7: Horas de ocorrência corrigidas devido à informação sobreposta e tempo total do teste.

Maquina	H. Ocorr	T. Actual	Nº T. Act \geq	Σ T. Act inf	H. Ocorr Corrig
1006	581.00	21.446.57	3	0.00	1.743.00
1006	632.00	21.446.57	3	0.00	1.896.00
1006	916.00	21.446.57	3	0.00	2.748.00
1006	2.692.00	21.446.57	3	0.00	8.076.00
4001	4.764.00	20.938.03	3	0.00	14.292.00
9011	11.707.03	20.101.53	3	0.00	35.121.10

Tabela 4.8: Cálculos intermédios para obtenção das horas de ocorrência corrigidas

Uma vez que os tempos entre ocorrências não são IID não se prossegue com os cálculos dos parâmetros do modelo de Weibull pelos motivos previamente enunciados.

4.5.3 Estudo de um componente com tempos entre avarias IID e função de risco crescente

Consideremos, por exemplo, o componente *cavilha*. Quando o teste de Laplace é formalmente inconclusivo ($-1.96 < ET < 1.96$ para um nível de significância de 5%) não se pode rejeitar H_0 e conclui-se que há evidência estatística no sentido de aceitar que os últimos tempos entre ocorrências são IID, ou seja, são provenientes de um processo de Poisson homogéneo. Relativamente aos dados históricos do componente objecto de análise, as macros implementadas, com base nas teorias expostas, disponibilizam os resultados mostrados na tabela da Figura 4.22.

Com o intuito de demonstrar como se chegou a estes resultados considere-se o histórico do referido componente, que se encontra resumido na Tabela 4.9, onde é possível visualizar, a hora das ocorrências, o código e tempo actual dos equipamentos onde desencadeou avarias, o tempo dispendido nas reparações e finalmente a descrição da anomalia.

Máquina	H. Ocorr	T. Actual	TTR	Anomalia
1001	10.640	19.908	0.08	Soldar cavilha de suporte do pulsão de corte
1002	10.879	19.985	0.25	Fazer cavilha de suporte do molde C1164
10003	19.818	21.474	0.25	Cavilha solta
13004	11.348	20.894	0.17	Tirar as cavilhas na parte inferior da máquina
13005	11.848	21.058	0.50	Verificar cavilhas de fixação dos punções
13006	9.369	21.415	6.33	Mudar cavilha
13006	10.734	21.415	0.25	Subst cavilha do extractor esq. do molde 2733

Tabela 4.9: Histórico de avarias desencadeadas pelo componente *cavilha*

Podemos conferir pela tabela que as 7 falhas do componente cavilha, provocaram avarias em 6 equipamentos, assim distribuídas: 2 ocorrências no equipamento 13006 e uma única nos equipamentos 1001, 1002, 1003 13004 e 13005.

Procedendo à devida actualização dos tempos das ocorrências de forma a evitar os inconvenientes da informação sobreposta, conforme descrito na Secção 3.5.3, obtemos os

valores apresentados na Tabela 4.10 bem como o tempo total do teste (T_0).

Componente	Tempo de ocorrência das avarias							
cavilha	0	1	2	3	4	5	6	T_0
	56.215	63.842	64.405	65.273	68.088	71.088	118.907	124.734

Tabela 4.10: Horas de ocorrência corrigidas devido à informação sobreposta e tempo total do teste.

Perante os dados assim conseguidos, as macros implementadas produzem os resultados inerentes ao Teste de Laplace mostrados na Figura 4.23.²

Uma vez que $ET1 = .0748$, o pressuposto de tempos entre ocorrências IID é verificado, pelo que é viável prosseguir-se para o cálculo dos parâmetros do modelo de Weibull (ver métodos analíticos na Secção 3.10.2) mostrando-se na Tabela 4.11 os ttf's e os tempos suspensos correspondentes, com base nos quais se concretiza a pretensão referida.

ttf	r	t.susp.	k
1.365.00	7	1.656.27	6
9.369.17		9.106.12	
10.640.28		9.210.03	
10.878.75		9.268.05	
11.348.00		9.545.70	
11.848.02		10.681.20	
19.817.78			

Tabela 4.11: ttf's e tempos suspensos do componente cavilha.

Perante estes dados, pela aplicação do método da máxima verosimilhança, obtiveram-se as seguintes estimativas para os parâmetros da distribuição de Weibull:

$$\begin{aligned}\beta &= 2.545, \\ \eta &= 13968.957h \quad (582.03 \text{ dias}), \\ \gamma &= 0\end{aligned}$$

² $T_0=19908+19985+21474+20894+21058+21415=124.734$.

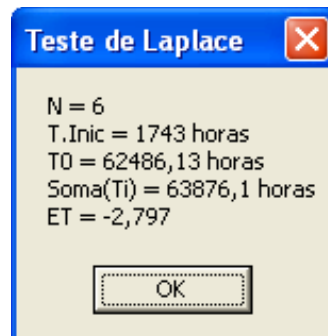


Figura 4.21: Resultados intermédios do teste de Laplace aplicado aos dados do componente *correia*.


	NºEvent	ET	V. Prova	Tst Lapl.	λ	MTTF	Fiabilid	η (dias)	β
cavilha	7	0,748	45,5%	IID	0,000112	8956,0		582	2,545

Figura 4.22: Alguns indicadores Fiabilísticos obtidos para o componente *cavilha*.

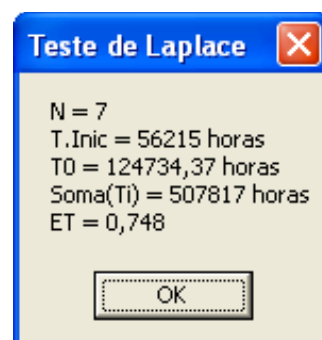


Figura 4.23: Resultados intermédios do teste de Laplace aplicado aos dados do componente *cavilha*.

e perante os valores assim conseguidos podemos obter as seguintes estimativas (expressões (3.58) e (3.59)):

$$\begin{aligned} MTTF &= A\eta + \gamma = 0.8872 \times 13968.957 + 0 = 12393.25h \quad (516.38 \text{ dias}), \\ \sigma &= B\eta = 0.380 \times 13968.957 = 5308.2h \quad (221.28 \text{ dias}). \end{aligned}$$

A dispersão parece algo elevada o que poderá indiciar operações de manutenção mal efectuadas.

Uma vez conhecidas as estimativas dos parâmetros da distribuição de Weibull, a equação (3.54) converte-se na seguinte expressão:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{582.03}\right)^{2.545}}, \quad (4.1)$$

a partir da qual, dado o resultado do teste K-S previamente mostrado na Secção 3.10.3 ser favorável, é viável prosseguir para a estimação da fiabilidade, obtendo-se o gráfico da Figura 4.24:

- A Probabilidade de funcionar ao fim de 500 dias de trabalho é aproximadamente 50%
- A Probabilidade de falha ao fim de 1000 dias de trabalho é praticamente 100%

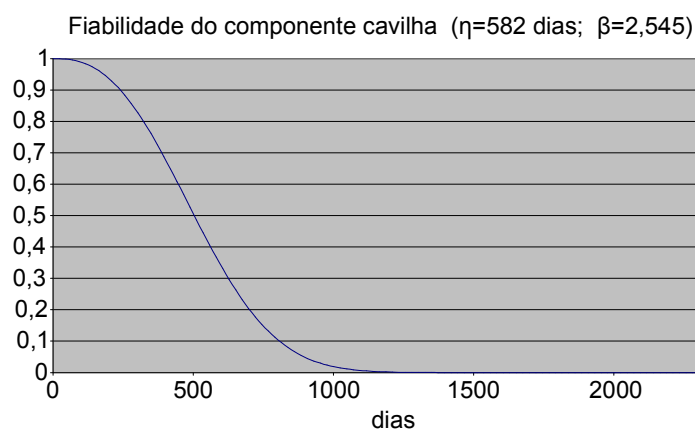


Figura 4.24: Fiabilidade do componente *cavilha*.

Para avaliar a eventual necessidade de substituição preventiva deste componente, nos equipamentos onde está inserido, é indispensável verificar se a função de risco é crescente,

pois caso não o seja, a dita substituição não se revela viável em virtude de não proporcionar benefícios acrescidos.

Procedendo em conformidade o teste de hipóteses conduz ao seguinte resultado:

$LI = \frac{2.545}{1.5} = 1.69 > 1$, expressão (3.60) pelo que a um nível de significância de 5%, há evidência estatística de função de risco crescente, havendo então fundamento para se proceder ao cálculo da periodicidade de substituição preventiva³.

4.5.4 Estudo de um componente com tempos entre avarias IID e função de risco decrescente

Consideremos, por exemplo, o componente *rótula*.

Quando o teste de Laplace se revela inconclusivo – a não rejeição de H_0 não é sustentada estatisticamente – admite-se que os tempos entre ocorrências são provenientes de um processo de Poisson homogéneo, podendo então considerar-se as ocorrências IID.

Relativamente a este componente os cálculos efectuados pelas macros implementadas produzem os resultados mostrados na Figura 4.25.


	NºEvent	ET	V. Prova	Tst Lapl.	λ	MTTF	Fiabilid	η (dias)	β
rótula	16	0,068	94,6%	IID	0,000943	1060,4		53,40	0,872

Figura 4.25: Alguns indicadores fiabilísticos obtidos para o componente *rótula*.

Consideremos o tempo ao qual se registaram ocorrências relativas a este componente que originou avarias somente no equipamento 13006 motivo pelo qual a hora de ocorrência terá que coincidir com a hora de ocorrência corrigida. Não há desta forma necessidade de proceder à actualização dos dados por forma a evitar os inconvenientes da informação sobreposta, em concordância com as Tabelas 4.12 e 4.13.

Valores através dos quais as macros implementadas produzem os resultados inerentes ao Teste de Laplace – ver Figura 4.26.

³Não há possibilidade de prosseguir com este intento uma vez que não foi possível apurar a informação necessária à aplicação do método. A inexistência deste tipo de informação justifica-se pelo facto de alguns dos equipamentos existentes serem provenientes de outras fábricas do grupo, não existindo desta forma os registos contabilísticos correspondentes

Maquina	H. Ocorr	T. Actual	TTR	Anomalia	H. Ocorr Corrig
13006	2.296.00	21.415.37	6.00	Rótula do braço danificada	2.296.00
13006	2.325.17	21.415.37	0.83	Substituir rótula do braço	2.325.17
13006	4.249.33	21.415.37	0.42	Rótula partida	4.249.33
13006	4.498.33	21.415.37	0.42	Rótula partida	4.498.33
13006	4.622.67	21.415.37	1.83	Rótula direita partida	4.622.67
13006	9.328.00	21.415.37	0.52	Rótula partida	9.328.00
13006	9.696.08	21.415.37	0.67	Mudar rótula de fazer aplastado	9.696.08
13006	11.046.10	21.415.37	0.33	Problemas com braço/rótula	11.046.10
13006	11.829.02	21.415.37	0.33	Substituir rótula	11.829.02
13006	13.422.68	21.415.37	0.50	Rótula partida	13.422.68
13006	15.007.08	21.415.37	0.58	Rótula partida	15.007.08
13006	15.011.27	21.415.37	0.50	Rótula partida	15.011.27
13006	16.075.85	21.415.37	0.50	Rótula partida	16.075.85
13006	16.615.68	21.415.37	0.50	Rótula partida	16.615.68
13006	17.710.03	21.415.37	0.50	Rótula partida	17.710.03
13006	19.262.08	21.415.37	0.42	Rótula partida	19.262.08

Tabela 4.12: Histórico de avarias desencadeadas pelo componente *rótula*.

0	1	2	3	4	5	6	7
2.296	2.325	4.249	4.498	4.623	9.328	9.696	11.046
8	9	10	11	12	13	14	15
13.423	15.007	15.011	16.076	16.616	17.710	19.262	21.415

Tabela 4.13: Tempo de ocorrência das avarias do componente *rótula*.

Uma vez verificado o requisito IID, calculam-se os parâmetros da distribuição de Weibull (através do método da máxima verosimilhança conforme descrito na Secção 3.10.2) aos quais correspondem os valores de 0.872 e 53.04, respectivamente para β e para η .

Procedendo à aplicação do teste K-S, obtiveram-se os resultados evidenciados na Tabela 4.14.

ttf	r	t. susp.	k	Nº sobrev	N_{t_i}	i_{t_i}	r_{t_i}	$F(t)$	$ F(t_i) - F(t) $
4.18	16	2.153.28	1	0	1.00	1.00	0.040	0.007	0.033
29.17				0	1.00	2.00	0.098	0.036	0.061
124.33				0	1.00	3.00	0.155	0.123	0.033
249.00				0	1.00	4.00	0.213	0.213	0.000
368.08				0	1.00	5.00	0.270	0.286	0.016
539.83				0	1.00	6.00	0.328	0.375	0.048
782.92				0	1.00	7.00	0.385	0.478	0.093
1.064.58				0	1.00	8.00	0.443	0.573	0.130
1.094.35				0	1.00	9.00	0.500	0.582	0.082
1.350.02				0	1.00	10.00	0.557	0.649	0.091
1.552.05				0	1.00	11.00	0.615	0.693	0.078
1.584.40				0	1.00	12.00	0.672	0.700	0.027
1.593.67				0	1.00	13.00	0.730	0.702	0.028
1.924.17				0	1.00	14.00	0.787	0.759	0.028
2.296.00				1	1.33	15.33	0.864	0.810	0.054
4.705.33				1	1.33	16.67	0.941	0.955	0.015

Tabela 4.14: Resultados obtidos pela aplicação do teste K-S.

Uma vez conhecidas as estimativas dos parâmetros da distribuição de Weibull, a equação (3.54) converte-se na seguinte expressão:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{53.04}\right)^{0.872}}, \tag{4.2}$$

a partir da qual é viável, dado o resultado do teste K-S ser favorável, prosseguir para a estimação da fiabilidade, obtendo-se o gráfico da Figura 4.27.

Através do gráfico ilustrado na Figura 4.27 poderemos inferir muitas propriedades, senão vejamos:

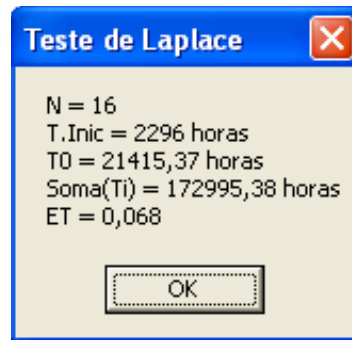


Figura 4.26: Resultados intermédios do teste de Laplace aplicado aos dados do componente *rótula*.

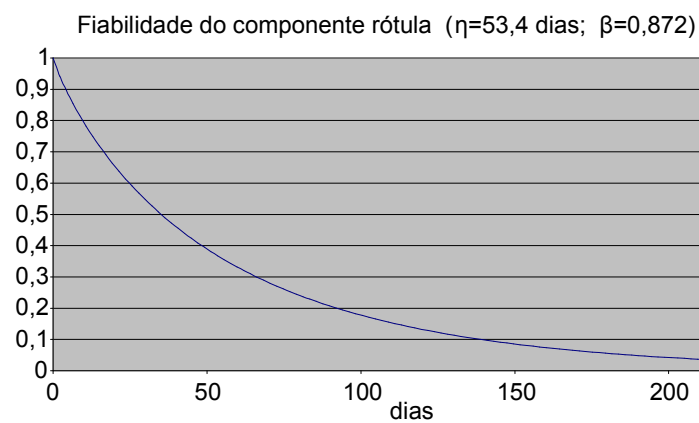


Figura 4.27: Fiabilidade do componente *rótula*.

- A Probabilidade de funcionar ao fim de 50 dias é de apenas 40%
- A Probabilidade de falha ao fim de 200 dias de trabalho é praticamente 100%

Uma vez que o parâmetro de forma da distribuição é inferior a 1 ($\beta = 0.872$) não faz sentido efectuar teste de hipóteses à função de risco crescente uma vez que a substituição de prevenção não se repercutirá em ganhos adicionais.

Capítulo 5

Conclusões finais e perspectivas de trabalho futuro

Os processos de decisão que visam, em gestão da manutenção, definir as práticas convenientes no sentido de assegurar a eficácia e o controlo adequado dos activos físicos da produção, dependem imensamente da informação na qual os decisores se baseiam. Muita dessa informação pode ser retirada do registo histórico de avarias e reparação, a qual depois de transformada eficiente e eficazmente em indicadores fiabilísticos, de manutibilidade e disponibilidade, proporciona conhecimento accionável que ao ser devidamente utilizado, pode contribuir para um acréscimo do desempenho dos serviços do sector da manutenção. Tal melhoria repercutir-se-á nos resultados do processo produtivo e consequentemente na geração de riqueza para a empresa. No decorrer dos trabalhos conducentes à presente dissertação, ao analisar a informação disponibilizada, debate-mo-nos com uma contrariedade que nos dificultou em demasia o seu progresso. A informação recolhida no registo histórico apresenta vários tipos de incongruências pois para além de não se encontrar estruturada da melhor forma, depará-mo-nos, não raras as vezes, com situações de falta de dados, informação ambígua, incompleta, inconsistente, ou até mesmo incorrecta. A título de exemplo, no Anexo C, enumeramos algumas dessas situações. De acordo com os exemplos citados, podemos depreender que a informação através da qual emitimos apreciações não é integralmente fidedigna exortando que os resultados mostrados poderão não representar a realidade de forma inteiramente fiel. Para que os resultados obtidos possam proporcionar algumas contribuições válidas para a tomada de decisões, será imprescindível dispor de informação suficientemente abrangente e colecionada de forma homogénea e criteriosa. Seria necessário e oportuno que, além da coerência e rigor indispensável à inserção da

informação, se fizesse também menção aos órgãos e subsistemas afectados – pois se as anomalias registadas não são específicas de um determinado órgão dificultar-se-á o diagnóstico e comprometer-se-á o posterior conserto – quais os sintomas verificados, e se possível quais as causas que provocam as paralisações ou o imperfeito funcionamento dos equipamentos. Só por esta via será possível tecer considerações consistentes e precisas acerca dos eventos ocorridos nos equipamentos bem como elaborar previsões válidas. Em virtude dos dados não terem sido registados com tal disciplina, as conclusões possíveis de extrair não serão tão enriquecedoras como desejável. Urge portanto, conceber um adequado sistema de informação – a norma AFNOR-X60-502 proporciona as directrizes pelas quais se deve proceder à recolha, tratamento e análise de dados de fiabilidade ao longo do tempo – para que futuramente, o estudo delineado reflecta de forma verosímil quais as debilidades existentes, uma vez que através de tal conhecimento será possível definir as práticas convenientes a empreender com o intuito de reduzir ou eliminar as ocorrências indesejadas. Uma de tais práticas a sugerir consiste em proceder à definição de políticas de substituição preventiva de componentes sendo imprescindível, portanto, dispor de informação fiável.

O departamento de gestão da qualidade da Faurécia, Sistemas de Escape, S.A., usa como ferramenta de monitorização o *controlo estatístico do processo* (CEP), método cuja essência é a de proporcionar esclarecimentos relativos à estabilidade do processo produtivo baseados em informações sobre a qualidade dos produtos finais; contudo, é igualmente possível, a partir de tais informações, inferir sobre as condições operativas da “máquina produtora” diagnosticando, inclusive, possíveis tendências de desajuste. Assim, seria pertinente articular o conhecimento que daí advém, no sentido de identificar algum tipo de desvios relativos ao normal comportamento dos equipamentos, a fim de se corrigirem eventuais desconformidades detectadas.

Por fim, não faria sentido deixar de fora um aspecto sem dúvida crucial em todos os domínios da gestão industrial que são os custos inerentes às diferentes actividades diariamente empreendidas pelas organizações. No contexto deste trabalho, num serviço de manutenção aprimorado, será relevante sintonizar decisões que considerem conhecimento sobre os custos provenientes das actividades de manutenção, não só dos derivados da necessidade de manter as características técnicas e da disponibilidade dos sistemas dentro dos parâmetros aceitáveis, como também, em função da eficiência em termos da relação custo benefício, a fim de os serviços prestados se constituírem como um diferencial competitivo para a empresa. Neste sentido, poder-se-á escrever que a melhoria da rentabilidade do

sector da manutenção não pode prescindir de uma gestão cuidada das peças sobressalentes de cada equipamento. Hoje é bem compreendida nas empresas a importância dos “stocks” como elemento absorvedor da parte do seu capital, em proporção que não se deverá deixar ao sabor de improvisos a sua gestão. Para se minimizarem os custos por operação e se poder efectuar um planeamento rigoroso, requerem-se, também, informações acerca dos parâmetros de reaprovisionamento - ponto de encomenda e quantidade a encomendar - a adoptar para cada peça sobressalente e demais acessórios destinados à manutenção, bem como qual o stock de segurança a estabelecer para se evitarem, tanto quanto possível, tempos de espera quando é indispensável intervir. Por não ter sido possível obter qualquer tipo de informação desta natureza, aquando do levantamento da informação, seria oportuno que doravante, se reunissem condições para proceder à recolha deste tipo de dados, com o intuito de, posteriormente, se proceder ao apuramento de indicadores relacionados com os custos da manutenção, devendo-se, neste âmbito, proceder à sua definição, identificação, classificação e respectiva análise.

Anexo A

Indicadores fiabilísticos obtidos com a aplicação desenvolvida

CORTADORAS

Máquina	NºEvent	ET	V. Prova	Tst Laplace	λ	MTBF	Fiabilidade	Pareto
1001	37	-1,942	5,2%	λ Constante	0,001903	525,4		
1002	30	-0,561	57,5%	λ Constante	0,001531	653,1		
1003	40	-3,066	0,2%	λ Decrescente		763,9	$\alpha=0,33$	
1004	29	-1,585	11,3%	Tst Inconclus	0,001441	694,1		
1005	100	-3,648	0,0%	λ Decrescente		275,8	$\alpha=0,26$	
1006	73	-3,825	0,0%	λ Decrescente		466,8	$\alpha=0,37$	
1007	1	?						

CURVADORAS DE TUBO

Máquina	NºEvent	ET	V. Prova	Tst Laplace	λ	MTBF	Fiabilidade	Pareto
2001	70	-1,955	5,1%	λ Constante	0,003910	255,7		
2002	41	2,137	3,3%	λ Crescente				
2003	51	1,289	19,7%	λ Constante	0,002469	405,1		
2004	54	0,128	89,8%	λ Constante	0,002700	370,3		

AGRAFADORAS

Máquina	NºEvent	ET	V. Prova	Tst Laplace	λ	MTBF	Fiabilidade	Pareto
4001	173	-3,568	0,0%	λ Decrescente		141,8	$\alpha=0,16$	
4002	3	?						

MÁQUINAS DE INTRODUÇÃO

Máquina	NºEvent	ET	V. Prova	Tst Laplace	λ	MTBF	Fiabilidade	Pareto
6001	37	-2,122	3,4%	λ Decrescente		739,4	$\alpha=0,3$	
6002	36	-2,278	2,3%	λ Decrescente		609,9	$\alpha=0,11$	
6003	1	?						

LIXADORAS

Máquina	NºEvent	ET	V. Prova	Tst Laplace	λ	MTBF	Fiabilidade	Pareto
9001	28	0,271	78,6%	Tst Inconclus	0,002332	428,8		
9011	12	1,683	9,2%	Tst Inconclus	0,001066	938,2		
9012	0	?						

PRENSAS

Máquina	NºEvent	ET	V. Prova	Tst Laplace	λ	MTBF	Fiabilidade	Pareto
10001	0	?						
10002	0	?						
10003	141	0,671	50,3%	λ Constante	0,006609	151,3		

MÁQUINAS DO GRUPO 13

Máquina	NºEvent	ET	V. Prova	Tst Laplace	λ	MTBF	Fiabilidade	Pareto
13001	2	?						
13002	3	?						
13003	1	?						
13004	43	-1,657	9,8%	λ Constante	0,002226	449,2		
13005	57	-2,189	2,9%	λ Decrescente		405,8	$\alpha=0,14$	
13006	194	-1,953	5,1%	λ Constante	0,009168	109,1		
13007	18	-1,483	13,8%	Tst Inconclus	0,000849	1178,5		
13010	32	-3,989	0,0%	λ Decrescente		892,0	$\alpha=0,34$	
13011	26	-3,618	0,0%	λ Decrescente		1446,4	$\alpha=0,55$	
13012	7	-1,957	5,0%	Tst Inconclus	0,000448	2232,0		

Figura A.1: Indicadores fiabilísticos obtidos com a aplicação desenvolvida.

FILTROS

Máquina	NºEvent	ET	V. Prova	Tst Laplace	λ	MTBF	Fiabilidade	Pareto
15001	3	?						
15002	0	?						
15003	0	?						
15004	0	?						
15005	3	?						
15006	3	?						

CALIBRADORAS

Máquina	NºEvent	ET	V. Prova	Tst Laplace	λ	MTBF	Fiabilidade	Pareto
16001	8	0,545	58,6%	Tst Inconclus	0,000455	2199,9		
16002	16	-0,465	64,2%	Tst Inconclus	0,000941	1063,0		
16003	4	-1,336	18,2%	Tst Inconclus	0,000285	3512,8		
16004	24	0,244	80,7%	Tst Inconclus	0,005992	166,9		
16005	16	-3,448	0,1%	λ Decrescente		1919,7	$\alpha=0,35$	
16006	33	-0,874	38,2%	λ Constante	0,001614	619,8		
16007	18	1,195	23,2%	Tst Inconclus	0,001625	615,4		

GRAVADORAS

Máquina	NºEvent	ET	V. Prova	Tst Laplace	λ	MTBF	Fiabilidade	Pareto
17001	3	?						
17002	17	1,763	7,8%	Tst Inconclus	0,004113	243,1		

ROTATIVAS

Máquina	NºEvent	ET	V. Prova	Tst Laplace	λ	MTBF	Fiabilidade	Pareto
23001	138	0,787	43,2%	λ Constante	0,006515	153,5		
23002	94	1,123	26,1%	λ Constante	0,004585	218,1		

POSTO DE SOLDADURA

Máquina	NºEvent	ET	V. Prova	Tst Laplace	λ	MTBF	Fiabilidade	Pareto
24001	120	-1,815	7,0%	λ Constante	0,005737	174,3		

GRUPO DE SOLDADURA

Máquina	NºEvent	ET	V. Prova	Tst Laplace	λ	MTBF	Fiabilidade	Pareto
25001	2	?						
25002	1	?						
25003	0	?						
25004	0	?						
25005	1	?						
25006	0	?						
25007	6	0,558	57,7%	Tst Inconclus	0,001320	757,6		
25008	1	?						
25010	1	?						
25011	0	?						
25012	1	?						

02001/2/3/4	NºEvent	ET	V. Prova	Tst Laplace	λ	MTBF	Fiabilidade	Pareto
1234	42	4,842	0,0%	λ Crescente				

Diversos	NºEvent	ET	V. Prova	Tst Laplace	λ	MTBF	Fiabilidade	Pareto
0	110	-3,945	0,0%	λ Decrescente		106,9	$\alpha=0,17$	

Para teste	NºEvent	ET	V. Prova	Tst Laplace	λ	MTBF	Fiabilidade	Pareto
Ex. 1	7	1,197	23,1%	Tst Inconclus	0,017073	58,6		
Ex. 2	7	-2,004	4,5%	λ Decrescente		83,8	$\alpha=0,3$	
Ex. 3	7	2,004	4,5%	λ Crescente				

Figura A.2: Indicadores fiabilísticos obtidos com a aplicação desenvolvida (continuação).

Anexo B

Papel de Weibull e limites de confiança do parâmetro de forma

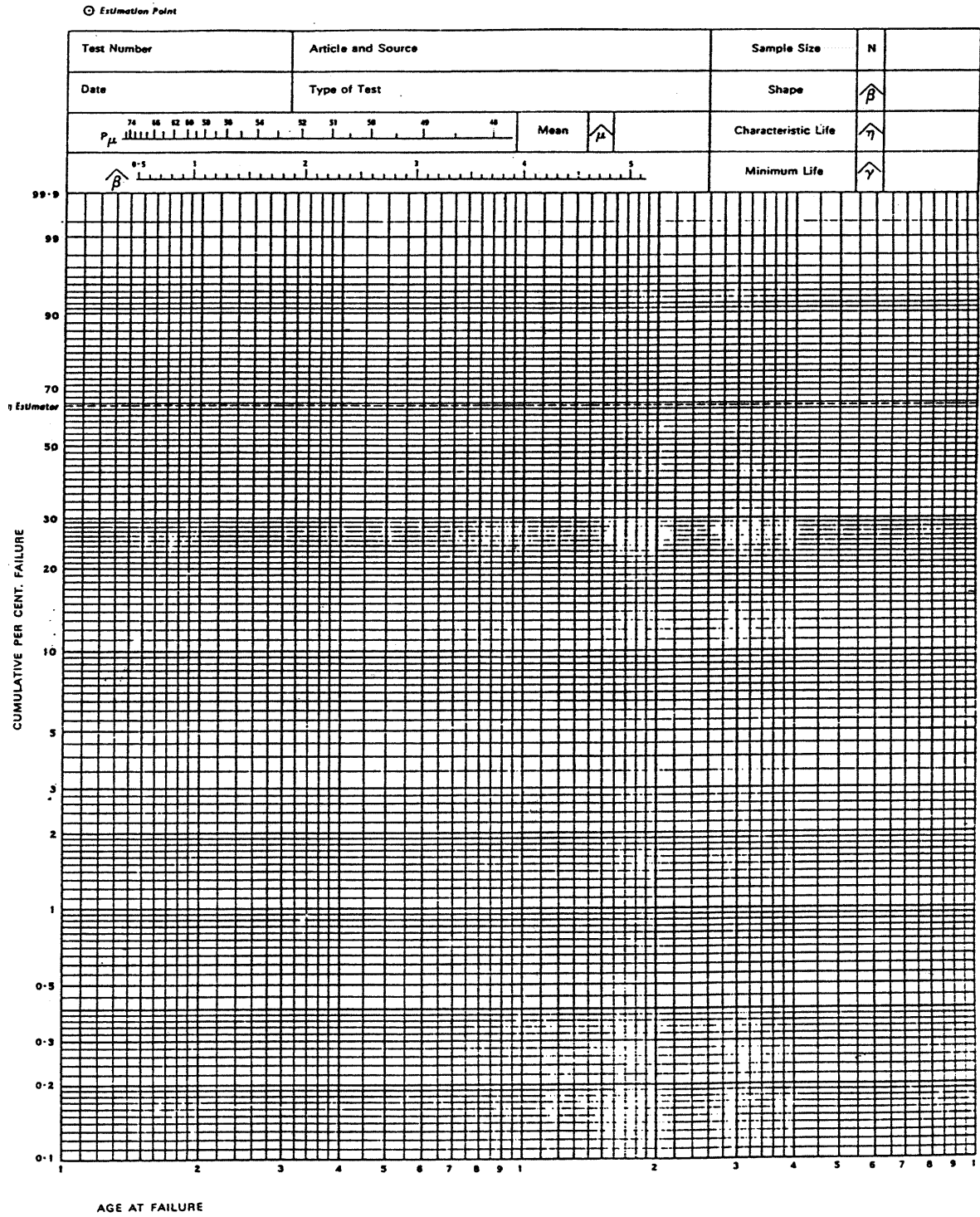
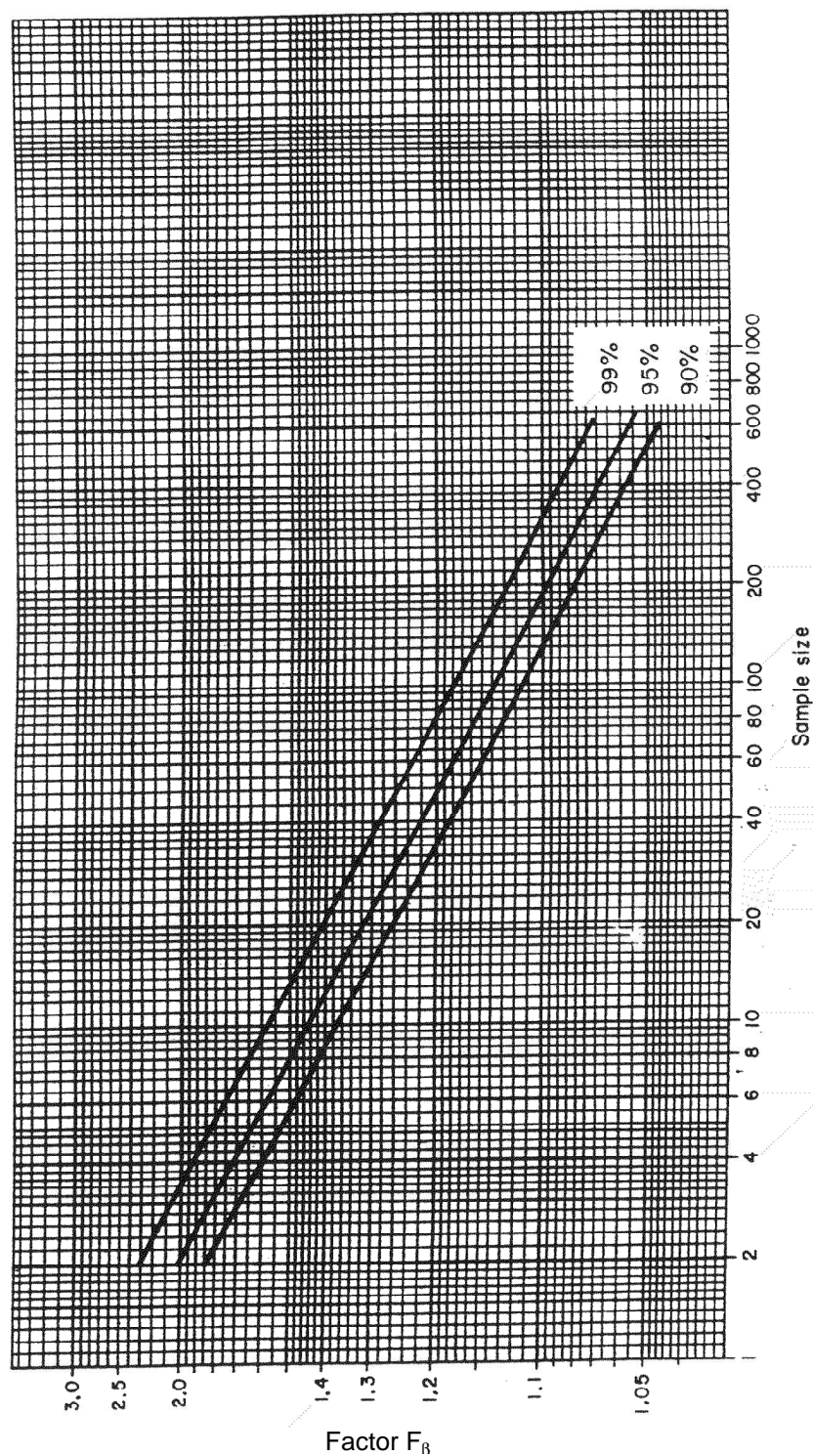


Figura B.1: Papel de Weibull.

Figura B.2: Limites de confiança do parâmetro de forma (β).

Anexo C

Deficiências do registo histórico

Exemplos de deficiências detectadas no registo histórico:

1. No campo *anomalia* por vezes é descrito, “deficiência de funcionamento” e noutras ocasiões “funcionamento incorrecto” o que presumivelmente terá o mesmo significado, todavia, um algoritmo computacional “interpretará” de forma diferente.
2. Constata-se também a seguinte inconsistência: no campo *anomalia* para descrever a avaria é inscrito “paragem de máquina”, o que também se reveste de ambiguidade uma vez que não é especificado o motivo da paragem. Causas de paragem são formas de rastrear problemas, contudo é necessário que estas sejam especificadas.
3. A descrição “molde danificado” é codificado como “molde/suporte/matriz” e em circunstâncias idênticas não lhe é atribuído código, o que evidencia a falta de coerência.
4. Por vezes inscreve-se “peça danificada” e “peça partida” sem contudo se especificar de que tipo de peças se trata.
5. No campo *anomalia* é inscrito “substituir rótula” o que parece ser uma acção a empreender e não uma descrição de uma observação. Idem para “lubrificar máquina” e “substituição de equipamento”.
6. “paragem de máquina” e “funcionamento irregular” são consequências das avarias porém são registadas no campo *anomalia*.
7. Muitos dos registos apresenta-se incompletos, sendo os campos não preenchidos os mais diversos.

8. O histórico denota ainda algumas descontinuidades no tempo.

Anexo D

Tabelas diversas

D.1 Quantificação de intervenções correctivas por equipamento

Equip.	Designação	N.º Interv	Equip.	Designação	N.º Interv
1001	Cort. TDLV	37	13004	Flangeadora	44
1002	Cort. TDLV	31	13005	EMS	58
1003	Cort. TDLV	41	13006	Dobradora H	192
1004	Cort. TDLV	29	13007	Escovilhão	18
1005	Cort. Serra de Fita	101	13010	Rebarbadora	31
1006	Cort. Laser	72	13011	Rebarbadora	27
2001	Curvadoras	67	16002	Calibradora	17
2002	Curvadoras	42	16004	Calibradora	23
2003	Curvadoras	52	16005	Sertisseuse	17
2004	Curvadoras	54	16006	Calibradora	33
4001	Agrafadoras	169	16007	Calibradora	19
6001	M. Introdução	37	17002	Gravadoras	15
6002	M. Introdução	37	23001	Rotativa	137
9001	Guilhotina	29	23002	Rotativa	94
9011	Lixadora	13	24001	Soldadura	117
10003	Prensa Ross	137	–	Diversos	101

Tabela D.1: Quantificação de intervenções correctivas por equipamento.

D.2 Indicadores de performance da manutenção

Equip.	Nome	Nº Interv	TR	TTR	MTTR	WT	MWT	MTBF	Disponib
1001	Cortadoras	37	17:31:00	21:44:00	0:35:15	4:13:00	0:06:50	524.86	99.89%
1002	Cortadoras	31	9:59:00	18:59:00	0:36:45	9:00:00	0:17:25	652.46	99.91%
1003	Cortadoras	41	28:56:00	41:07:00	1:00:10	12:11:00	0:17:50	513.19	99.80%
1004	Cortadoras	29	22:11:00	33:13:00	1:08:43	11:02:00	0:22:50	692.74	99.83%
1005	Cortadoras	101	27:51:00	55:00:00	0:32:40	27:09:00	0:16:08	204.31	99.73%
1006	Cortadoras	72	69:13:00	132:56:00	1:50:47	63:43:00	0:53:06	304.63	99.40%
2001	Curvadoras	67	28:15:00	37:57:00	0:33:59	9:42:00	0:08:41	279.37	99.80%
2002	Curvadoras	42	29:36:00	39:16:00	0:56:06	9:40:00	0:13:49	462.39	99.80%
2003	Curvadoras	52	30:27:00	79:43:00	1:31:59	49:16:00	0:56:51	403.61	99.62%
2004	Curvadoras	54	25:07:00	42:38:00	0:47:22	17:31:00	0:19:28	369.52	99.79%
4001	Agrafadoras	169	76:07:00	109:13:00	0:38:47	33:06:00	0:11:45	126.67	99.49%
6001	M. Introdução	37	13:22:00	65:20:00	1:45:57	51:58:00	1:24:16	516.38	99.66%
6002	M. Introdução	37	18:27:00	34:36:00	0:56:06	16:09:00	0:26:11	539.74	99.83%
9001	Lixadoras	29	4:17:00	12:03:00	0:24:56	7:46:00	0:16:04	428.41	99.90%
9011	Lixadoras	13	1:29:00	16:07:00	1:14:23	14:38:00	1:07:32	936.85	99.87%
10003	Prensas	137	41:44:00	72:22:00	0:31:42	30:38:00	0:13:25	157.95	99.67%
13004	Grupo 13	44	10:03:00	21:08:00	0:28:49	11:05:00	0:15:07	448.69	99.89%
13005	Grupo 14	58	25:03:00	33:35:00	0:34:44	8:32:00	0:08:50	349.33	99.83%
13006	Grupo 15	192	81:16:00	166:14:00	0:51:57	84:58:00	0:26:33	110.04	99.22%
13007	Grupo 16	18	5:58:00	8:48:00	0:29:20	2:50:00	0:09:27	1178.05	99.96%
13010	Grupo 17	31	7:00:00	9:16:00	0:17:56	2:16:00	0:04:23	649.32	99.95%
13011	Grupo 18	27	5:13:00	7:50:00	0:17:24	2:37:00	0:05:49	645.32	99.96%
16002	Calibradoras	17	5:12:00	8:57:00	0:31:35	3:45:00	0:13:14	1062.41	99.95%
16004	Calibradoras	23	8:15:00	10:06:00	0:26:21	1:51:00	0:04:50	194.25	99.06%
16005	Calibradoras	17	34:27:00	39:05:00	2:17:56	4:38:00	0:16:21	1248.98	99.63%
16006	Calibradoras	33	8:13:00	15:13:00	0:27:40	7:00:00	0:12:44	619.31	98.88%
16007	Calibradoras	19	2:59:00	17:56:00	0:56:38	14:57:00	0:47:13	614.65	97.63%
17002	Gravadoras	15	28:42:00	29:05:00	1:56:20	0:23:00	0:01:32	250.75	99.85%
23001	Rotativa	137	36:32:00	110:57:00	0:48:35	74:25:00	0:32:35	152.96	67.27%
23002	Rotativa	94	32:10:00	79:25:00	0:50:41	47:15:00	0:30:10	217.36	82.14%
24001	Soldadura	117	30:08:00	45:24:00	0:23:17	15:16:00	0:07:50	181.82	92.25%
	Diversos	101	102:46:00	141:58:00	1:24:20	39:12:00	0:23:17	90.67	99.89%

Tabela D.2: Indicadores de performance da manutenção.

D.3 Códigos de identificação usados no diagrama de Pareto

Tipos de Anomalia	COD
Deficiência corte	1
Peça executar	2
Deficiência molde / suporte / matriz	3
Deficiência lubrificação	4
Funcionamento incorrecto	5
Paragem de máquina	6
Deficiência sistema hidráulico	7
Deficiência soldadura	8
Deficiência sistema de arrefecimento	9
Deficiência sistema de gás	10
Deficiência sistema pneumático	11
Ligar máquina	12
Deficiência gravação	13
Deficiência sistema eléctrico	14
Peça partida	15
Outras	16

Tabela D.3: Códigos usados no diagrama de Pareto para identificar as anomalias verificadas.

Peça	COD	Peça	COD
Betoneira	1	Punção	16
Bigorna	2	Rodas laranjas	17
Caixa redutora do motor	3	Rolamento	18
Cavilha	4	Rolos	19
Correia	5	Rótula	20
Eléctrodo	6	Sensor	21
Esponjas	7	Tubo de ar comprimido	22
Filtro de óleo	8	Tubo hidráulico	23
Fita de corte	9	Válvula	24
Fita de mesa	10	Veio	25
Fusíveis	11	Filtro	26
Guias do carro	12	Guia	27
Módulo	13	Roda	28
Parafuso	14	Serra	29
Porca	15	Tubo	30

Tabela D.4: Códigos usados no diagrama de Pareto para identificar os componentes.

D.4 Valores de Euler

β	A	B	β	A	B	β	A	B
			1.50	0.9027	0.613	4.00	0.9064	0.254
			1.55	0.8994	0.593	4.10	0.9077	0.249
			1.60	0.8966	0.574	4.20	0.9089	0.244
			1.65	0.8942	0.556	4.30	0.9102	0.239
0.20	120	1901	1.70	0.8922	0.540	4.40	0.9114	0.235
0.25	24	199	1.75	0.8906	0.525	4.50	0.9126	0.230
0.30	92.605	50.080	1.80	0.8893	0.511	4.60	0.9137	0.226
0.35	50.291	19.980	1.85	0.8882	0.498	4.70	0.9149	0.222
0.40	33.234	10.440	1.90	0.8874	0.486	4.80	0.9160	0.218
0.45	24.786	6.460	1.95	0.8867	0.474	4.90	0.9171	0.214
0.50	20.000	4.470	2.00	0.8862	0.463	5.00	0.9182	0.210
0.55	17.024	3.350	2.10	0.8857	0.443	5.10	0.9192	0.207
0.60	15.046	2.650	2.20	0.8856	0.425	5.20	0.9202	0.203
0.65	13.663	2.180	2.30	0.8859	0.409	5.30	0.9213	0.200
0.70	12.638	1.850	2.40	0.8865	0.393	5.40	0.9222	0.197
0.75	11.906	1.610	2.50	0.8873	0.380	5.50	0.9232	0.194
0.80	11.330	1.430	2.60	0.8882	0.367	5.60	0.9241	0.191
0.85	10.880	1.290	2.70	0.8893	0.355	5.70	0.9251	0.186
0.90	10.522	1.770	2.80	0.8905	0.344	5.80	0.9260	0.185
0.95	10.234	1.080	2.90	0.8917	0.334	5.90	0.9269	0.183
1.00	10.000	1.000	3.00	0.8930	0.325	6.00	0.9277	0.180
1.05	0.9803	0.934	3.10	0.8943	0.316	6.10	0.9286	0.177
1.10	0.9649	0.878	3.20	0.8957	0.370	6.20	0.9294	0.175
1.15	0.9517	0.830	3.30	0.8970	0.299	6.30	0.9302	0.172
1.20	0.9407	0.787	3.40	0.8984	0.292	6.40	0.9310	0.170
1.25	0.9314	0.750	3.50	0.8997	0.285	6.50	0.9318	0.168
1.30	0.9236	0.716	3.60	0.9011	0.278	6.60	0.9325	0.166
1.35	0.9170	0.687	3.70	0.9025	0.272	6.70	0.9333	0.163
1.40	0.9114	0.660	3.80	0.9038	0.266	6.80	0.9340	0.161
1.45	0.9067	0.635	3.90	0.9051	0.260	6.90	0.9347	0.160

Tabela D.5: Valores de Euler.

D.5 Valores críticos de Kolmogorov-Smirnov (K-S)

Dimensão da amostra (n)	Nível de significância α				
	0.20	0.10	0.05	0.02	0.01
1	0.900	0.950	0.975	0.990	0.995
2	0.684	0.776	0.842	0.900	0.929
3	0.565	0.636	0.708	0.785	0.829
4	0.493	0.565	0.624	0.689	0.734
5	0.447	0.509	0.563	0.627	0.669
6	0.410	0.468	0.519	0.577	0.617
7	0.381	0.436	0.483	0.538	0.576
8	0.358	0.410	0.454	0.507	0.542
9	0.339	0.387	0.430	0.480	0.513
10	0.323	0.369	0.409	0.457	0.489
11	0.308	0.352	0.391	0.437	0.468
12	0.296	0.338	0.375	0.419	0.449
13	0.285	0.325	0.361	0.404	0.432
14	0.275	0.314	0.349	0.390	0.418
15	0.266	0.304	0.338	0.377	0.404
16	0.258	0.295	0.327	0.366	0.392
17	0.250	0.286	0.318	0.355	0.381
18	0.244	0.279	0.309	0.346	0.371
19	0.237	0.271	0.301	0.337	0.361
20	0.232	0.265	0.294	0.329	0.352
21	0.226	0.259	0.287	0.321	0.344
22	0.221	0.253	0.281	0.314	0.337
23	0.216	0.247	0.275	0.307	0.330
24	0.212	0.242	0.269	0.301	0.323
25	0.208	0.238	0.264	0.295	0.317
26	0.204	0.233	0.259	0.290	0.311
27	0.200	0.229	0.254	0.284	0.305
28	0.197	0.225	0.250	0.279	0.300
29	0.193	0.221	0.246	0.275	0.295
30	0.190	0.218	0.242	0.270	0.290
31	0.187	0.214	0.238	0.2666	0.285
32	0.184	0.211	0.234	0.262	0.281
33	0.182	0.208	0.231	0.258	0.277
34	0.179	0.205	0.227	0.254	0.273
35	0.177	0.202	0.224	0.251	0.269
36	0.174	0.199	0.221	0.247	0.265
37	0.172	0.196	0.218	0.244	0.262
38	0.170	0.194	0.215	0.241	0.258
39	0.168	0.191	0.213	0.238	0.255
40	0.165	0.189	0.210	0.235	0.252

Tabela D.6: Valores críticos de K-S (para $N \leq 40$).

Nível de significância α				
0.20	0.10	0.05	0.02	0.01
$\frac{1.07}{\sqrt{N}}$	$\frac{1.22}{\sqrt{N}}$	$\frac{1.36}{\sqrt{N}}$	$\frac{1.52}{\sqrt{N}}$	$\frac{1.63}{\sqrt{N}}$

Tabela D.7: Valores críticos de K-S (para $N > 40$).

D.6 Função de distribuição normal reduzida

$$F(x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma}} dx, \quad \text{para } \mu = 0, \sigma = 1 \text{ e } X = [0.0, 4.49].$$

U	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,0	0,500000	0,503989	0,507978	0,511967	0,515953	0,519939	0,523922	0,527903	0,531881	0,535856
0,1	0,539828	0,543795	0,547758	0,551717	0,555670	0,559618	0,563559	0,567495	0,571424	0,575345
0,2	0,579260	0,583166	0,587064	0,590954	0,594835	0,598706	0,602568	0,606420	0,610261	0,614092
0,3	0,617911	0,621719	0,625516	0,629300	0,633072	0,636831	0,640576	0,644309	0,648027	0,651732
0,4	0,655422	0,659097	0,662757	0,666402	0,670031	0,673645	0,677242	0,680822	0,684386	0,687933
0,5	0,691462	0,694974	0,698468	0,701944	0,705402	0,708840	0,712260	0,715661	0,719043	0,722405
0,6	0,725747	0,729069	0,732371	0,735653	0,738914	0,742154	0,745373	0,748571	0,751748	0,754903
0,7	0,758036	0,761148	0,764238	0,767305	0,770350	0,773373	0,776373	0,779350	0,782305	0,785236
0,8	0,788145	0,791030	0,793892	0,796731	0,799546	0,802338	0,805106	0,807850	0,810570	0,813267
0,9	0,815940	0,818589	0,821214	0,823814	0,826391	0,828944	0,831472	0,833977	0,836457	0,838913
1,0	0,841345	0,843752	0,846136	0,848495	0,850830	0,853141	0,855428	0,857690	0,859929	0,862143
1,1	0,864334	0,866500	0,868643	0,870762	0,872857	0,874928	0,876976	0,878999	0,881000	0,882977
1,2	0,884930	0,886860	0,888767	0,890651	0,892512	0,894350	0,896165	0,897958	0,899727	0,901475
1,3	0,903199	0,904902	0,906582	0,908241	0,909877	0,911492	0,913085	0,914656	0,916207	0,917736
1,4	0,919243	0,920730	0,922196	0,923641	0,925066	0,926471	0,927855	0,929219	0,930563	0,931888
1,5	0,933193	0,934478	0,935744	0,936992	0,938220	0,939429	0,940620	0,941792	0,942947	0,944083
1,6	0,945201	0,946301	0,947384	0,948449	0,949497	0,950529	0,951543	0,952540	0,953521	0,954486
1,7	0,955435	0,956367	0,957284	0,958185	0,959071	0,959941	0,960796	0,961636	0,962462	0,963273
1,8	0,964070	0,964852	0,965621	0,966375	0,967116	0,967843	0,968557	0,969258	0,969946	0,970621
1,9	0,971284	0,971933	0,972571	0,973197	0,973810	0,974412	0,975002	0,975581	0,976148	0,976705
2,0	0,977250	0,977784	0,978308	0,978822	0,979325	0,979818	0,980301	0,980774	0,981237	0,981691
2,1	0,982136	0,982571	0,982997	0,983414	0,983823	0,984222	0,984614	0,984997	0,985371	0,985738
2,2	0,986097	0,986447	0,986791	0,987126	0,987455	0,987776	0,988089	0,988396	0,988696	0,988989
2,3	0,989276	0,989556	0,989830	0,990097	0,990358	0,990613	0,990863	0,991106	0,991344	0,991576
2,4	0,991802	0,992024	0,992240	0,992451	0,992656	0,992857	0,993053	0,993244	0,993431	0,993613
2,5	0,993790	0,993963	0,994132	0,994297	0,994457	0,994614	0,994766	0,994915	0,995060	0,995201
2,6	0,995339	0,995473	0,995603	0,995731	0,995855	0,995975	0,996093	0,996207	0,996319	0,996427
2,7	0,996533	0,996636	0,996736	0,996833	0,996928	0,997020	0,997110	0,997197	0,997282	0,997365
2,8	0,997445	0,997523	0,997599	0,997673	0,997744	0,997814	0,997882	0,997948	0,998012	0,998074
2,9	0,998134	0,998193	0,998250	0,998305	0,998359	0,998411	0,998462	0,998511	0,998559	0,998605
3,0	0,998650	0,998694	0,998736	0,998777	0,998817	0,998856	0,998893	0,998930	0,998965	0,998999
3,1	0,999032	0,999064	0,999096	0,999126	0,999155	0,999184	0,999211	0,999238	0,999264	0,999289
3,2	0,999313	0,999336	0,999359	0,999381	0,999402	0,999423	0,999443	0,999462	0,999481	0,999499
3,3	0,999517	0,999533	0,999550	0,999566	0,999581	0,999596	0,999610	0,999624	0,999638	0,999650
3,4	0,999663	0,999675	0,999687	0,999698	0,999709	0,999720	0,999730	0,999740	0,999749	0,999758
3,5	0,999767	0,999776	0,999784	0,999792	0,999800	0,999807	0,999815	0,999821	0,999828	0,999835
3,6	0,999841	0,999847	0,999853	0,999858	0,999864	0,999869	0,999874	0,999879	0,999883	0,999888
3,7	0,999892	0,999896	0,999900	0,999904	0,999908	0,999912	0,999915	0,999918	0,999922	0,999925
3,8	0,999928	0,999930	0,999933	0,999936	0,999938	0,999941	0,999943	0,999946	0,999948	0,999950
3,9	0,999952	0,999954	0,999956	0,999958	0,999959	0,999961	0,999963	0,999964	0,999966	0,999967
4,0	0,999968	0,999970	0,999971	0,999972	0,999973	0,999974	0,999975	0,999976	0,999977	0,999978
4,1	0,999979	0,999980	0,999981	0,999982	0,999983	0,999983	0,999984	0,999985	0,999985	0,999986
4,2	0,999987	0,999987	0,999988	0,999988	0,999989	0,999989	0,999990	0,999990	0,999991	0,999991
4,3	0,999991	0,999992	0,999992	0,999993	0,999993	0,999993	0,999993	0,999994	0,999994	0,999994
4,4	0,999995	0,999995	0,999995	0,999995	0,999995	0,999996	0,999996	0,999996	0,999996	0,999996

Tabela D.8: Função de distribuição normal reduzida.

D.7 Registo histórico do equipamento 2002

Data	Hora da ocorrência	H. ocorr. absoluta	Tempo de reacção	Tempo de reparação	Anomalia
24-Jan-2002	17:30:00	1817,50	0:01:00	2,00	Funcionamento defeituoso
30-Jan-2002	8:30:00	1952,50	0:01:00	0,17	Suporte de cunha empenado
5-Fev-2002	7:00:00	2095,00	0:01:00	0,00	Protecção danificada
15-Abr-2002	10:07:00	3754,12	0:03:00	0,38	Peça partida
3-Mai-2002	9:32:00	4185,53	0:01:00	0,03	Máquina parada
16-Mai-2002	12:45:00	4500,75	0:01:00	0,25	Regua das cunhas partida
17-Mai-2002	14:10:00	4526,17	0:01:00	0,17	Executar suporte de TRS
27-Mai-2002	19:00:00	4771,00	0:01:00	0,08	Veio suporte de cunha partido
3-Jun-2002	10:20:00	4930,33	0:01:00	0,08	Suporte partido
27-Nov-2002	15:30:00	9183,50	0:01:00	0,35	Aperto dos parafusos da botoneira da dob2
28-Nov-2002	13:20:00	9205,33	0:01:00	0,18	Soldar peça
2-Dez-2002	10:55:00	9298,92	0:01:00	0,25	Cortar pontas da régua
2-Dez-2002	15:00:00	9303,00	0:01:00	0,27	Problemas no eixo A
5-Dez-2002	15:20:00	9375,33	0:01:00	0,18	Retirar parafuso da matriz 3414
6-Dez-2002	8:40:00	9392,67	0:01:00	0,18	Problemas com o disjuntor 53
16-Dez-2002	9:15:00	9633,25	0:01:00	0,18	rebarbar régua da Dob
10-Jan-2003	13:32:00	10237,53	0:08:00	0,17	Suporte do molde partido
15-Jan-2003	11:45:00	10355,75	0:04:00	0,08	Adaptar uma meia lua inferior para superior
5-Fev-2003	6:01:00	10854,02	0:08:00	0,15	Substituição da pinça que fixa a matriz
6-Fev-2003	22:17:00	10894,28	0:21:00	0,38	Pinça suporte Galet partida
24-Fev-2003	8:21:00	11312,35	0:09:00	0,17	Máquina depois de dobrar o tubo, desliga-se. Não entra em automático
6-Jun-2003	21:01:00	13773,02	0:09:00	0,17	Retirar parafuso partido do eixo A
23-Jun-2003	15:01:00	14175,02	2:29:00	2,50	Pinça, suporte de cunhas e base empenadas
17-Set-2003	15:45:00	16239,75	0:10:00	0,25	Avaria nos sistema de ar condicionado
22-Set-2003	16:01:00	16360,02	0:09:00	0,17	Retirar parafuso partido
20-Nov-2003	14:17:00	17774,28	0:08:00	0,17	Retirar parafuso partido
11-Dez-2003	14:45:00	18278,75	0:05:00	0,42	Comando não funciona
11-Dez-2003	19:31:00	18283,52	0:11:00	0,25	Para a meio do ciclo
7-Jan-2004	17:17:00	18929,28	0:08:00	0,17	Tem fuga de ar no interior
12-Jan-2004	15:03:00	19047,05	0:12:00	0,25	Tapete do eixo A está cortado e as peças entram para dentro da máquina
21-Jan-2004	15:07:00	19263,12	0:08:00	0,17	Máquina faz paragem de emerg. a meio do ciclo
18-Fev-2004	9:32:00	19929,53	0:13:00	0,25	Manga de suporte do mandril danificado
25-Fev-2004	9:03:00	20097,05	0:37:00	0,67	Problemas com a máquina
3-Mar-2004	9:30:00	20265,50	1:14:00	1,25	Máquina foi abaixo
4-Mar-2004	7:36:00	20287,60	0:24:00	0,42	Máquina parou. Tem problemas com o eixo W
12-Mar-2004	6:52:00	20478,87	0:03:00	0,08	Tapetes de protecção não estão a funcionar
16-Mar-2004	9:53:00	20577,88	0:07:00	0,17	Reparar roda da consola
17-Mar-2004	22:31:00	20614,52	0:04:00	0,08	Máquina pára a meio do ciclo
18-Mar-2004	13:10:00	20629,17	1:04:00	1,08	Máquina pára quando fecha
18-Mar-2004	14:50:00	20630,83	0:22:00	0,38	Verificar sistema de segurança do eixo A
24-Mar-2004	13:22:00	20773,37	0:18:00	0,33	Eixo V levanta quando está a fazer o ciclo e depois pára a máquina
25-Mar-2004	6:33:00	20790,55	0:17:00	0,33	Arranjar tapete do eixo A

Tabela D.9: Registo histórico do equipamento 2002.

D.8 Registo histórico do equipamento 13006 – dobradora horizontal

Data	Hora da ocorrência	H. ocorr. absoluta	Tempo de reacção	Tempo de reparação	Anomalia
20-Nov-2001	14:30:00	254,50	0:01:00	1,50	Roletes de descarga danificados
7-Dez-2001	8:45:00	656,75	0:05:00	0,58	Mesa danificada
15-Dez-2001	9:30:00	849,50	0:01:00	0,50	Aviso de falta de lubrificante
19-Dez-2001	6:00:00	942,00	0:01:00	0,75	Aviso de falta de lubrificante
19-Dez-2001	9:15:00	945,25	0:01:00	5,17	Falta de sincronismo na descida dos rolos
20-Dez-2001	6:45:00	966,75	0:01:00	0,78	Afinação do rolo de descida
2-Jan-2002	7:30:00	1279,50	0:05:00	8,00	Mesa não sobe
7-Jan-2002	11:30:00	1403,50	0:01:00	0,50	Aviso de falta de lubrificante
30-Jan-2002	5:15:00	1949,25	0:01:00	0,25	Peça danificada
30-Jan-2002	22:15:00	1966,25	0:01:00	0,25	Ruido estranho
1-Fev-2002	1:30:00	1993,50	0:05:00	0,25	Defeciência no agrafado
1-Fev-2002	12:00:00	2004,00	0:00	0,25	Aviso de filtro de óleo saturado
1-Fev-2002	14:45:00	2006,75	0:01:00	0,25	Fuga de ar comprimido
4-Fev-2002	21:00:00	2085,00	0:01:00	2,00	Molde danificado
6-Fev-2002	1:30:00	2113,50	0:05:00	1,42	Paragem de máquina
6-Fev-2002	10:35:00	2122,58	0:05:00	0,42	Botoneira de emergência danificado
9-Fev-2002	7:45:00	2191,75	0:01:00	0,50	Botoneira de emergência danificado
9-Fev-2002	22:00:00	2206,00	0:10:00	0,58	Fecho das copelas deficiente
9-Fev-2002	23:30:00	2207,50	0:10:00	0,50	Esponjas de amortecimento danificadas
11-Fev-2002	11:15:00	2243,25	0:05:00	1,33	Paragem de máquina
12-Fev-2002	1:00:00	2257,00	0:01:00	0,83	Fitas partidas
13-Fev-2002	16:00:00	2296,00	0:01:00	6,00	Rotula do braço danificada
13-Fev-2002	17:30:00	2297,50	0:01:00	2,75	Alteração da posição do quadro auxiliar
13-Fev-2002	23:10:00	2303,17	0:01:00	0,50	Mesa não sobe
14-Fev-2002	14:30:00	2318,50	0:01:00	0,50	Defeciencia molde
14-Fev-2002	21:10:00	2325,17	0:01:00	0,83	Substituir rotula do braço
19-Fev-2002	14:35:00	2438,58	0:01:00	0,13	Paragem de máquina
20-Fev-2002	11:45:00	2459,75	0:01:00	0,25	Caixa rolamento do braço partida
20-Fev-2002	12:40:00	2460,67	0:10:00	5,67	Braço com defeciencia na descida
20-Fev-2002	19:15:00	2467,25	0:10:00	0,50	Defeciencia molde
21-Fev-2002	21:30:00	2493,50	0:01:00	0,50	Defeciencia molde
23-Fev-2002	11:30:00	2531,50	0:01:00	0,25	Paragem de máquina
25-Fev-2002	11:20:00	2579,33	0:05:00	0,67	Braço com defeciencia na descida
26-Fev-2002	8:15:00	2600,25	0:05:00	0,67	Braço com defeciencia na descida
27-Fev-2002	0:40:00	2616,67	0:01:00	0,17	Defeciência de funcionamento
28-Fev-2002	22:15:00	2662,25	0:01:00	0,50	Falta de óleo de lubrificação
11-Mar-2002	9:00:00	2913,00	0:05:00	0,50	Paragem de máquina
14-Mar-2002	10:30:00	2986,50	0:01:00	0,17	Paragem de máquina

Tabela D.10: Registo histórico do equipamento 13006.

Data	Hora da ocorrência	H. ocorr. absoluta	Tempo de reacção	Tempo de reparação	Anomalia
18-Mar-2002	16:45:00	3088,75	0:01:00	0,50	Paragem de máquina
2-Abr-2002	6:15:00	3438,25	0:05:00	0,42	Sinalização de filtro de óleo saturado
9-Abr-2002	7:40:00	3607,67	0:01:00	1,33	Funcionamento incorrecto
10-Abr-2002	23:15:00	3647,25	0:01:00	0,08	Paragem de máquina
10-Abr-2002	23:30:00	3647,50	0:05:00	0,42	Paragem de máquina
12-Abr-2002	17:20:00	3689,33	0:01:00	0,92	Peça partida
25-Abr-2002	0:30:00	3984,50	0:01:00	0,75	Rolamento gripado
26-Abr-2002	19:30:00	4027,50	1:30:00	2,00	Molde danificado
27-Abr-2002	15:00:00	4047,00	0:01:00	0,67	Peça partida
29-Abr-2002	10:00:00	4090,00	4:15:00	5,00	Falta paineis de autocontrolo
3-Mai-2002	18:00:00	4194,00	2:00:00	2,42	Ausencia de suporte para colocar panela
6-Mai-2002	1:20:00	4249,33	0:01:00	0,42	Rotula partida
13-Mai-2002	7:00:00	4423,00	0:01:00	0,08	Deficiencia na rampa de saida das panelas
15-Mai-2002	1:40:00	4465,67	0:05:00	0,83	Porca partida
16-Mai-2002	10:20:00	4498,33	0:01:00	0,42	Rotula partida
20-Mai-2002	18:10:00	4602,17	0:01:00	1,33	Veio do rolo esquerdo partido
21-Mai-2002	14:40:00	4622,67	0:01:00	1,83	Rotula direita partida
23-Mai-2002	4:00:00	4660,00	0:01:00	0,17	Deficiencia de lubrificação
24-Mai-2002	15:45:00	4695,75	0:01:00	0,58	partiu o descarregador
4-Jun-2002	7:30:00	4951,50	0:05:00	0,58	Rolamento danificado
5-Jun-2002	3:15:00	4971,25	0:01:00	0,33	Descarregadores não actuam
5-Jun-2002	4:00:00	4972,00	0:01:00	0,25	Mudar posicionamento da regulação de velocidade
7-Jun-2002	6:27:00	5022,45	0:03:00	0,22	Paragem de máquina
8-Jun-2002	7:30:00	5047,50	0:01:00	0,25	Sistema de afinação dos moldes desapertados
8-Jun-2002	8:00:00	5048,00	0:05:00	0,25	Suporte rampa de descarga partida
1-Ago-2002	16:25:00	6352,42	0:05:00	0,75	Cilindro do descarregador direito avariado e bloqueio do suporte das panelas
2-Ago-2002	6:45:00	6366,75	0:15:00	1,25	Partiu extractor do molde esquerdo da máquina de fechar panelas
6-Ago-2002	19:10:00	6475,17	0:01:00	0,18	Extractor preso
14-Ago-2002	13:00:00	6661,00	0:05:00	0,42	Alterar extractores
23-Ago-2002	8:00:00	6872,00	0:15:00	0,83	Não arrancou
30-Ago-2002	7:00:00	7039,00	0:01:00	0,33	Molde partido
2-Out-2002	18:00:00	7842,00	0:01:00	0,10	Velocidade de rotação elevada
4-Out-2002	13:30:00	7885,50	0:01:00	0,25	Veio partido
7-Out-2002	21:00:00	7965,00	0:02:00	0,75	Não funciona
7-Out-2002	21:45:00	7965,75	0:01:00	0,25	Fazer rosca na bolacha, não dá aperto
12-Out-2002	0:31:00	8064,52	0:01:00	1,15	Parava fora da zona de paragem e ficava fora de fase
17-Out-2002	8:20:00	8192,33	0:05:00	0,42	Partiu-se o rolamento
4-Nov-2002	11:50:00	8627,83	0:01:00	0,03	Molde não faz rotação
5-Nov-2002	10:05:00	8650,08	0:01:00	0,50	Partiu o rolo direito de bolear
11-Nov-2002	10:00:00	8794,00	0:00	0,35	O rolamento esquerdo está a fazer muito barulho
13-Nov-2002	21:30:00	8853,50	0:01:00	1,00	Cabeças demasiado juntas e não se ajustava
14-Nov-2002	8:15:00	8864,25	0:02:00	0,75	Braço fez marca ao fazer o boleado

Tabela D.11: Registo histórico do equipamento 13006 (continuação).

Data	Hora da ocorrência	H. ocorr. absoluta	Tempo de reacção	Tempo de reparação	Anomalia
18-Nov-2002	10:45:00	8962,75	0:01:00	0,33	Rolamento gripado do braço esquerdo
18-Nov-2002	16:20:00	8968,33	0:01:00	0,33	Problemas com molde
19-Nov-2002	22:15:00	8998,25	0:01:00	0,10	alterar velocidade no quadro
21-Nov-2002	16:20:00	9040,33	0:01:00	0,17	Ruido cabeças
25-Nov-2002	17:30:00	9137,50	0:01:00	0,25	lubrificar
26-Nov-2002	10:50:00	9154,83	0:01:00	0,27	Trocar Rolamento
26-Nov-2002	20:40:00	9164,67	0:01:00	0,10	alterar velocidade no quadro
27-Nov-2002	7:50:00	9175,83	0:01:00	0,18	Botão não liga
29-Nov-2002	15:00:00	9231,00	0:01:00	0,18	descarregador desapertado
29-Nov-2002	18:10:00	9234,17	23:51:00	23,93	alterar velocidade no quadro
29-Nov-2002	18:15:00	9234,25	0:01:00	0,18	Lubrificar
2-Dez-2002	17:24:00	9305,40	0:01:00	0,10	alterar velocidade no quadro
3-Dez-2002	11:30:00	9323,50	0:02:00	0,37	Rolamento gripado
3-Dez-2002	16:00:00	9328,00	0:01:00	0,52	Rótula partida
5-Dez-2002	9:10:00	9369,17	5:20:00	6,33	Mudar cavilha
5-Dez-2002	14:10:00	9374,17	5:50:00	6,08	Fazer alteração ao parafuso do extrator esquerdo
9-Dez-2002	10:00:00	9466,00	0:00	0,85	Problemas no extrator
9-Dez-2002	10:45:00	9466,75	0:02:00	0,20	Sensor
10-Dez-2002	18:09:00	9498,15	0:01:00	0,10	Aumentar velocidade
10-Dez-2002	19:45:00	9499,75	0:01:00	0,77	Rolamento gripado
13-Dez-2002	18:20:00	9570,33	0:10:00	0,25	alterar velocidade no quadro
17-Dez-2002	1:00:00	9649,00	0:01:00	0,52	Parafusos cabeça molde partidos
17-Dez-2002	6:15:00	9654,25	0:10:00	0,50	Apertar descarregador
17-Dez-2002	10:00:00	9658,00	0:00	0,68	Problemas no extrator
18-Dez-2002	13:40:00	9685,67	0:01:00	0,18	Problemas com sensor Bloqueio de molde
18-Dez-2002	16:30:00	9688,50	0:00	0,27	Substituir rolamento braço direito
19-Dez-2002	0:05:00	9696,08	0:05:00	0,67	Mudar rótula de fazer aplastado
6-Jan-2003	17:37:00	10145,62	0:00:00	0,25	Carro pára
8-Jan-2003	9:02:00	10185,03	0:03:00	0,08	Alterar velocidade de rotação da máquina para troca de referencia
10-Jan-2003	6:30:00	10230,50	0:01:00	0,03	Alterar velocidade de rotação da máquina para troca de referencia
13-Jan-2003	6:11:00	10302,18	0:03:00	0,07	Máquina não liga
17-Jan-2003	16:01:00	10408,02	0:04:00	0,08	Velocidade da maquina
21-Jan-2003	16:41:00	10504,68	0:14:00	0,25	Boleador não desce
27-Jan-2003	6:41:00	10638,68	0:09:00	0,17	Parafuso de aperto do extractor
31-Jan-2003	6:10:00	10734,17	0:15:00	0,25	Substituir cavilha do extractor esquerdo do molde D2733
4-Fev-2003	6:30:00	10830,50	0:01:00	0,03	Alterar velocidade
10-Fev-2003	19:20:00	10987,33	0:00:00	0,50	Braços do aplastado e boleado desapertam com frequencia
11-Fev-2003	16:11:00	11008,18	0:09:00	0,17	Rectificar um parafuso partido num extractor
13-Fev-2003	6:06:00	11046,10	0:19:00	0,33	Problemas com braço/rotula
21-Fev-2003	6:31:00	11238,52	0:19:00	0,33	Fixar suporte das painelas

Tabela D.12: Registo histórico do equipamento 13006 (continuação).

Data	Hora da ocorrência	H. ocorr. absoluta	Tempo de reacção	Tempo de reparação	Anomalia
7-Mar-2003	6:01:00	11574,02	0:19:00	0,33	Veio partido
17-Mar-2003	21:01:00	11829,02	0:19:00	0,33	Substituir rotula
9-Abr-2003	19:01:00	12379,02	1:28:00	1,48	Veio partido
29-Abr-2003	20:01:00	12860,02	0:19:00	0,33	Substituir parafuso partido
6-Mai-2003	15:01:00	13023,02	0:14:00	0,25	Rolamento partido
7-Mai-2003	14:55:00	13046,92	1:35:00	1,75	
13-Mai-2003	6:26:00	13182,43	0:24:00	0,42	Braços do molde não baixam
16-Mai-2003	11:31:00	13259,52	0:29:00	0,50	Rolamento partido (braço esquerdo)
19-Mai-2003	1:10:00	13321,17	0:30:00	0,67	Extractor não funciona após mudança de referência
19-Mai-2003	5:30:00	13325,50	0:15:00	0,67	Máquina não trabalha
19-Mai-2003	18:47:00	13338,78	0:14:00	0,25	Máquina parou
20-Mai-2003	4:06:00	13348,10	0:08:00	0,40	Substituir parafusos partidos no molde 3352
20-Mai-2003	14:30:00	13358,50	0:30:00	1,00	
23-Mai-2003	6:41:00	13422,68	0:29:00	0,50	Rotula partida
2-Jun-2003	19:21:00	13675,35	0:19:00	0,33	Parafuso partido no molde
3-Jun-2003	17:31:00	13697,52	0:14:00	0,25	Rolamento partido
4-Jun-2003	9:00:00	13713,00	1:05:00	1,33	Mudar cabeçais novos, da ref redonda grande
5-Jun-2003	8:01:00	13736,02	0:19:00	0,33	Mudar cabeçais do molde
5-Jun-2003	18:21:00	13746,35	0:29:00	0,50	Rolamento partido
6-Jun-2003	10:01:00	13762,02	0:14:00	0,25	Parafusos do molde desapertados
12-Jun-2003	7:06:00	13903,10	0:05:00	0,08	Molde não desbloqueia
16-Jun-2003	21:11:00	14013,18	0:19:00	0,33	Parafuso partido no molde
27-Jun-2003	14:46:00	14270,77	2:29:00	2,50	Molde bloqueia
9-Jul-2003	17:36:00	14561,60	0:14:00	0,25	Máquina não entra em fase
11-Jul-2003	6:31:00	14598,52	0:04:00	0,08	Substituição do rolamento
15-Jul-2003	6:41:00	14694,68	0:59:00	1,00	Problemas com o molde esquerdo
15-Jul-2003	11:16:00	14699,27	0:19:00	0,33	Máquina não entra em fase
22-Jul-2003	11:01:00	14867,02	0:09:00	0,17	Para antes de acabar o ciclo
25-Jul-2003	13:48:00	14941,80	0:17:00	0,33	Nível de lubrificante baixo
25-Jul-2003	16:21:00	14944,35	0:25:00	0,50	Mudar rolamento
25-Jul-2003	19:15:00	14947,25	0:59:00	1,00	Substituir rolamento e parafusos do molde
28-Jul-2003	6:05:00	15006,08	0:25:00	0,50	Extractor não vai á posição inicial
28-Jul-2003	7:05:00	15007,08	0:30:00	0,58	Rotula partida
28-Jul-2003	11:16:00	15011,27	0:29:00	0,50	Rotula partida
30-Jul-2003	11:50:00	15059,83	0:19:00	0,33	Rolamento partido
9-Set-2003	16:30:00	16048,50	0:58:00	1,00	Retirar o molde para rectificar
10-Set-2003	19:51:00	16075,85	0:29:00	0,50	Rotula partida
12-Set-2003	12:00:00	16116,00	0:10:00	0,50	Fuga de oleo
24-Set-2003	7:52:00	16399,87	0:13:00	0,25	Rolamento partido
30-Set-2003	19:22:00	16555,37	0:18:00	0,33	Rolamento partido
3-Out-2003	7:41:00	16615,68	0:29:00	0,50	Rotula partida
15-Out-2003	14:31:00	16910,52	0:29:00	0,50	Rolamento partido
27-Out-2003	8:32:00	17192,53	0:08:00	0,17	Lubrificar maquina

Tabela D.13: Registo histórico do equipamento 13006 (continuação).

Data	Hora da ocorrência	H. ocorr. absoluta	Tempo de reacção	Tempo de reparação	Anomalia
30-Out-2003	12:51:00	17268,85	0:14:00	0,25	Substituir rolamento do braço esquerdo
4-Nov-2003	21:31:00	17397,52	0:29:00	0,50	Problemas com braço do lado direito
7-Nov-2003	16:42:00	17464,70	0:13:00	0,25	Reajuste da roda
12-Nov-2003	8:41:00	17576,68	0:14:00	0,25	Apertar molde
17-Nov-2003	10:00:00	17698,00	0:10:00	0,33	Rectificar molde
17-Nov-2003	22:02:00	17710,03	0:28:00	0,50	Rotula partida
19-Nov-2003	18:52:00	17754,87	0:03:00	0,08	Problemas com braço esquerdo
3-Dez-2003	9:00:00	18081,00	0:34:00	0,58	Montar molde trapezoidal esquerdo
8-Jan-2004	9:03:00	18945,05	0:12:00	0,25	Rolamento partido
8-Jan-2004	17:25:00	18953,42	5:32:00	5,58	Extractores não trabalham
14-Jan-2004	9:46:00	19089,77	0:09:00	0,17	Extractor não funciona
14-Jan-2004	10:32:00	19090,53	0:28:00	0,50	Rolamentos partidos
21-Jan-2004	14:05:00	19262,08	0:20:00	0,42	Rotula partida
23-Jan-2004	9:42:00	19305,70	0:18:00	0,33	Rolamento partido
23-Jan-2004	20:37:00	19316,62	0:28:00	0,50	Rolamento partido
27-Jan-2004	8:30:00	19400,50	0:10:00	0,33	
29-Jan-2004	18:03:00	19458,05	0:17:00	0,33	Mudar 2 rolamentos
4-Fev-2004	11:42:00	19595,70	0:17:00	0,33	Problema nos extractores
9-Fev-2004	9:20:00	19713,33	0:10:00	0,33	
20-Fev-2004	10:25:00	19978,42	0:10:00	0,25	Falta lubrificação
4-Mar-2004	17:47:00	20297,78	0:28:00	0,50	Substituir rolamento direito
9-Mar-2004	17:33:00	20417,55	0:02:00	0,08	Lubrificar máquina
17-Mar-2004	13:22:00	20605,37	0:28:00	0,50	Braço não desce
19-Mar-2004	5:40:00	20645,67	0:35:00	0,67	
19-Mar-2004	6:30:00	20646,50	1:04:00	1,08	Rolamento partido
24-Mar-2004	15:17:00	20775,28	0:03:00	0,08	Lubrificar máquina
6-Abr-2004	17:42:00	21089,70	1:13:00	1,25	Braço esquerdo não desce
7-Abr-2004	9:42:00	21105,70	0:18:00	0,33	Parafuso do extractor com folga
20-Abr-2004	7:22:00	21415,37	0:03:00	0,08	Lubrificar máquina

Tabela D.14: Registo histórico do equipamento 13006 (continuação).

Referências Bibliográficas

- [1] Harol Ascher and Harry Feingold. *Repairable Systems Reliability – Modeling, Inference, Misconceptions and their causes*. Marcel Dekker, Inc., New York, 1984.
- [2] Rui Assis. *Manutenção Centrada na Fiabilidade*. Lidel, 1997.
- [3] Bilal M. Ayyub and Richard H. McCuen. *Numerical Methods for Engineers*. Prentice-Hall, Inc, 1996.
- [4] José Saraiva Cabral. *Organização e Gestão da Manutenção*. Lidel, Lisboa, 1998.
- [5] Filipe Didelet. *Fiabilidade*. Sebenta de apoio, Instituto Politécnico de Setúbal, Escola Superior de Tecnologia, 2003.
http://lodi.est.ips.pt/jviegas/_private/folhas_fiabilidade.pdf.
- [6] Charles Ebeling and Lewis. *An Introduction to Reliability and Maintainability Engineering*. McGraw-Hill, New York, 1997.
- [7] R. C. Guimarães and J. A. S. Cabral. *Estatística*. McGraw-Hill, revised edition, 1999.
- [8] Armando L. F. Leitão. *Curso de mestrado em engenharia industrial*. Sebenta de apoio, 1999.
- [9] Jonh Moubray. *Reliability Centred Maintenance*. McGraw-Hill, New York, 1993.
- [10] Patrick D. T. O'Connor. *Practical Reliability Engineering*. John Wiley & Sons, third revised edition, 1995.
- [11] Carlos Varela Pinto. *Organização e Gestão da Manutenção*. MONITOR – Projectos e Edições, Lda, 1994.

