

Metodologia para Melhoria das Políticas de Manutenção

Luis Manuel Araújo Soares

Dissertação de Mestrado

Orientador na FEUP: Prof. Dr. Armando Leitão



Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

2019-07-10

Aos meus Pais, Irmã e Amigos

Resumo

A indústria automóvel apresenta-se como um grande pilar da economia mundial. Os pneus não são um caso excecional, sendo um tipo de indústria cada vez mais exigente e competitiva. A melhoria contínua é um fator-chave neste tipo de indústria, pois apenas assim se consegue garantir uma elevada qualidade do produto com um menor custo de produção. O incremento simultâneo da capacidade produtiva e do grau de exigência, implicam um grande esforço por parte das empresas, quer a nível organizacional, quer a nível tecnológico. Este incremento eleva o nível de dificuldade de controlo de todos os equipamentos e rastreabilidade dos seus órgãos resultando, muitas vezes, num descumprimento por parte das empresas da função da manutenção. “Outra falha no carácter humano é que toda a gente quer construir e ninguém quer fazer manutenção.” (Kurt Vonnegut). E é nesta lógica que se contextualiza a presente dissertação realizada na Continental Mabor – Indústria de Pneus S.A.

Neste contexto, com o presente trabalho, é pretendido o desenvolvimento de uma metodologia para melhoria das políticas de manutenção. Para o efeito, inicializou-se com o desenvolvimento de uma metodologia que permita a recolha de dados. Assim, através de um registo histórico de dados, estuda-se o comportamento da fiabilidade dos equipamentos cujo conhecimento relativo às falhas e ao seu atendimento deve ser compreendido. A análise de fiabilidade efetuada permite identificar os equipamentos críticos com o intuito de identificar oportunidades de melhoria e de estabelecer metodologias de manutenção coerentes. Assim, de forma fundamentada, através de metodologias apropriadas, poder-se-ão definir as políticas de manutenção adequadas a cada equipamento e aos componentes neles inseridos.

Methodology for Improving Maintenance Policies

Abstract

The automotive industry presents itself as a major pillar of the world economy. Tyres are not an exceptional case, being an increasingly demanding and competitive type of industry. Continuous improvement is a key factor in this type of industry, as this is the only way to guarantee a high-quality product with a low production cost. The simultaneous increase of production capacity and the degree of demand implies a great deal of effort by companies, both at the organizational level and at the technological level. This increase raises the level of difficulty to control all equipment and traceability of its organs, which often leads to a neglect by companies of the maintenance function. "Another flaw in the human character is that everybody wants to build, and nobody wants to do maintenance." (Kurt Vonnegut). And it is in this logic that the present dissertation is contextualized in Continental Mabor - Indústria de Pneus S.A.

In this context, with the present work, it is intended to develop a methodology to improve maintenance policies. To this end, a methodology was developed to allow data collection. Thus, through a historical data record, we study the behaviour of the reliability of the equipment whose knowledge related to failures and their care should be understood. The reliability analysis carried out allows the identification of critical equipment to identify opportunities for improvement and for the establishment of coherent maintenance methodologies. Thus, in a reasoned manner, through appropriate methodologies, it will be possible to define the appropriate maintenance policies for each equipment and the components inserted in them.

Agradecimentos

Em primeiro lugar, quero deixar o meu sincero agradecimento à empresa Continental Mabor S.A. pela oportunidade. Aos colaboradores do DE5 e DE6 por todo o apoio prestado, em particular ao Eng.º José Conde, orientador da empresa, que se demonstrou sempre prestável ao longo de todo o estágio.

Ao meu orientador da FEUP, Professor Doutor Armando Leitão pela sua disponibilidade e acompanhamento.

À minha família, pelo apoio incondicional ao longo do meu percurso escolar e por todo o carinho que me dão.

Aos meus amigos que sempre me motivaram ao longo da minha passagem pela FEUP.

Índice de Conteúdos

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	ENQUADRAMENTO DO PROJETO E MOTIVAÇÃO	1
1.2	CONTINENTAL MABOR	2
1.3	OBJETIVOS DO PROJETO	3
1.4	MÉTODO SEGUIDO NO PROJETO	4
1.5	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	5
2	CONCEITOS TEÓRICOS	6
2.1	INTRODUÇÃO	6
2.2	SISTEMAS REPARÁVEIS VS SISTEMAS NÃO REPARÁVEIS	6
2.3	CÁLCULO DA FIABILIDADE	7
2.4	FIABILIDADE DE EQUIPAMENTOS.....	7
2.4.1	<i>Taxa de avarias decrescente</i>	9
2.4.2	<i>Taxa de avarias constante</i>	9
2.4.3	<i>Taxa de avarias crescente</i>	11
2.5	FIABILIDADE DE COMPONENTES.....	13
2.5.1	<i>Função de risco</i>	14
2.5.2	<i>Substituição preventiva de componentes</i>	15
2.6	TESTE DE LAPLACE	17
2.6.1	<i>Teste à função risco crescente</i>	17
2.6.2	<i>Aspetos a considerar aquando da aplicação do Teste de Laplace</i>	18
2.7	ANÁLISE DE PARETO	18
3	MELHORIA DAS POLÍTICAS DE MANUTENÇÃO	19
3.1	MANUTENÇÃO	19
3.1.1	<i>Custos</i>	20
3.1.2	<i>Tempo de reparação</i>	22
3.1.3	<i>Disponibilidade</i>	22
3.2	REGISTO HISTÓRICO	23
3.3	REPARAR OU SUBSTITUIR	24
3.3.1	<i>Modelos de custos de sistemas reparáveis</i>	25
4	PROPOSTA DE METODOLOGIA E ANÁLISE DE RESULTADOS	29
4.1	INTRODUÇÃO	29
4.2	ESTUDO DE FIABILIDADE	29
4.2.1	<i>Métrica temporal</i>	30
4.2.2	<i>Recolha de Dados</i>	30
4.3	METODOLOGIA.....	31
4.4	ANÁLISE DE RESULTADOS.....	33
4.4.1	<i>GE_DE5</i>	33
4.4.2	<i>GE_SAP</i>	38
5	CONCLUSÕES E PERSPETIVAS DE TRABALHO FUTURO	45
	REFERÊNCIAS	47
	ANEXO A: FUNCIONALIDADES	49
	ANEXO B: RESULTADOS - CILINDROS	54
	ANEXO C: MÉTODO DA MÁXIMA VEROSIMILHANÇA	55
	ANEXO D: TESTE DE LAPLACE.....	57
	ANEXO E: DETERMINAÇÃO DO VALOR DE F_B.....	61
	ANEXO F: FORMULÁRIOS DE REGISTO	62

Índice de Figuras

Figura 1 - Resumo do objetivo do projeto. Adaptado de (M. Modarres <i>et al</i> , 2017, pag 10)	3
Figura 2 - Cronograma de tarefas realizadas	4
Figura 3 - Curva da banheira. Adaptado de (Leitão <i>et al</i> 2018).....	8
Figura 4 - Influência do fator de forma sobre a fiabilidade. (Paulo 1999, pág.42)	12
Figura 5 - Influência do fator de forma na função densidade de probabilidade. (Paulo 1999, pág.41)	12
Figura 6 - MTTF de um componente em função da fiabilidade. (Kumar <i>et al</i> . 2000, pág 76)	13
Figura 7 - Função de risco e taxa de avarias. (Lopes e Leitão 2003, pág. 38)	15
Figura 8 - Substituição de componente com função de risco decrescente. (Kumar <i>et al</i> . 2000, pág 207).....	16
Figura 9 - Substituição de componente com função de risco constante. (Kumar <i>et al</i> . 2000, pág. 207).....	16
Figura 10 - Substituição de componente com função de risco crescente. (Kumar <i>et al</i> . 2000, pág. 207)	16
Figura 11 - Custo total por unidade de tempo. (Paulo 1999, pág. 52).....	17
Figura 12 - Informação incorreta com dados sobrepostos. (Paulo 1999, pág. 26)	18
Figura 13 - Evolução dos custos com aumento da manutenção preventiva. (Peito 2014, pág.19)	21
Figura 14 - Iceberg dos custos. (Peito 2014, pág.18)	21
Figura 15 – Disponibilidade. (Rausand e Hoyland 2004, pág. 368)	23
Figura 16 - Vários tipos de reparações. Adaptado de (Kumar <i>et al</i> . 2000, pág. 212)	25
Figura 17 - Diferentes processos estocásticos tendo em conta os diferentes tipos de reparações. (Rausand e Hoyland 2004, pág.240)	26
Figura 18 - Metodologia adotada para determinação dos custos de manutenção.	27
Figura 19 - Etiqueta para identificação dos cilindros hidráulicos.	31
Figura 20 - Chapa para identificação das válvulas.	31
Figura 21 - Metodologia seguida para análise de fiabilidade: a) sistemas reparáveis b) sistemas não reparáveis	32
Figura 22 - Menu inicial GE_DE5	33
Figura 23 - Resultados do teste à taxa de avarias constante	33
Figura 24 - Variação da fiabilidade com o tempo.	34
Figura 25 - Probabilidade de ocorrerem X avarias num período t definido.	34
Figura 26 - MTBF's dos diferentes tipos de cilindros.	35
Figura 27 - Componente com função de risco crescente.....	36
Figura 28 - Resultados obtidos para a substituição preventiva.	36
Figura 29 - Variação da fiabilidade com o tempo de um componente com função de risco crescente	37

Figura 30 - Componente com tempos entre avarias IID.....	37
Figura 31 - Resultados de componente com função de risco não crescente.....	38
Figura 32 - Variação da fiabilidade com o tempo de um componente com função de risco não crescente	38
Figura 33 - Menu inicial GE_SAP	39
Figura 34 - Resultados do teste à taxa de avarias decrescente.	39
Figura 35 - Variação da fiabilidade com o tempo no sistema em análise	40
Figura 36 - Registo cronológico de avarias sistema em análise	40
Figura 37 – Registo de avarias nos diferentes equipamentos do sistema em causa	41
Figura 38 - MTTR dos diferentes equipamentos no sistema em análise.....	41
Figura 39 - Resultados teste à taxa de avarias constante.....	42
Figura 40 - Variação da fiabilidade com o tempo para o sistema 820P-FFI-BAL-BAL04	42
Figura 41 - Probabilidade de ocorrerem X avarias num período t definido para o sistema 820P-FFI-BAL-BAL04.....	43
Figura 42 - MTTR dos vários sistemas.	44
Figura 43 - Registo de operações	50
Figura 44 - Adicionar registo de reparação	50
Figura 45 - Pesquisa histórico através do número de série.....	50
Figura 46 - Pesquisar por Prensa	51
Figura 47 - Teste de Laplace	51
Figura 48 - Adicionar novo equipamento para análise.....	51
Figura 49 - Análise de Pareto - Cilindros mais críticos.....	52
Figura 50 - Análise de Pareto - Prensas mais críticas.....	52
Figura 51 - Histórico de falhas por tipo de órgão.....	52
Figura 52 - Análise de Pareto - Componentes mais críticos.....	53
Figura 53 . MTTF's.....	53
Figura 54 - Formulário para definir custos de falha e de substituição preventiva.....	53
Figura 55 - Tabela com resultados obtidos para Cilindros Hidráulicos	54
Figura 56 - Teste unilateral à direita. (Guimarães e Cabral 2007, pág. 338)	58
Figura 57 - Teste bilateral. (Guimarães e Cabral 2007, pág. 339)	59
Figura 58 - Gráfico para obtenção do valor de F_{β}	61
Figura 59 - Tabela para registo manual substituição VP - M.P.....	62
Figura 60 - Tabela para registo manual de substituição de VP - Turnos.....	63
Figura 61 - Tabela para registo manual das reparações de VP na oficina do DE5.	64

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Funções de risco para as diferentes distribuições	14
--	----

1 Introdução

1.1 Enquadramento do projeto e motivação

No quadro de uma economia cada vez mais global, em que todos os fatores contam para a competitividade das empresas, a manutenção destaca-se naturalmente como um fator essencial. Após um longo período em que foi considerada o “mal necessário” da função produtiva, reconhece-se, hoje, na manutenção uma das áreas mais importantes e atuantes da atividade industrial através do seu contributo para o bom desempenho produtivo, a segurança, a qualidade do produto, a imagem da empresa, a rentabilidade económica do processo produtivo e a preservação dos investimentos. Este reconhecimento é adicionalmente reforçado pelas crescentes exigências das normas da qualidade relativamente à manutenção dos equipamentos produtivos.

Os objetivos da manutenção industrial têm de estar cada vez mais em sintonia com os objetivos globais das empresas, dado que, a manutenção afeta a produtividade, tanto por via da sua influência no volume de produção, como na qualidade do produto, como no custo de produção. Associada a cada uma das políticas de manutenção está todo um conjunto de custos, sendo em muitos casos, precisamente esses custos que inibem as empresas de implementar ações de manutenção. Como tal, o desafio das empresas está em encontrar o ponto de equilíbrio entre o benefício e o custo por forma a maximizar o contributo positivo da manutenção para a sua rentabilidade geral. Conceitos de produção como *Just-in-Time* e Qualidade Total não se coadunam com uma manutenção insuficiente ou, por vezes, inexistente. Essas técnicas de produção impõem o recurso a técnicas de manutenção mais evoluídas, que permitam obter dos equipamentos a disponibilidade necessária para responder aos novos desafios da produção. O importante é que as empresas encarem a manutenção como uma ferramenta essencial para conseguirem um aumento da sua produtividade e da sua eficiência. Deste modo, as empresas conseguirão uma maior disponibilidade dos seus equipamentos, permitindo-lhes assim um aumento de produção com maior qualidade e menores custos, inclusive os de manutenção.

Assim sendo, a previsibilidade constitui cada vez mais um fator de competitividade que permite diferenciar uma empresa dos seus concorrentes para além da qualidade e dos preços dos seus produtos. É preciso ser-se capaz de cumprir aquilo que se promete, o que requer, além da utilização de uma adequada ferramenta de planeamento, uma “certeza” razoável de se poder dispor dos equipamentos sempre que deles houver necessidade. Por outras palavras, torna-se fundamental eliminar (ou diminuir) as causas da aleatoriedade que ocasionam a falha dos equipamentos e minimizar os seus efeitos, aumentando assim drasticamente a sua fiabilidade e disponibilidade. Esta deve ser a preocupação crescente dos responsáveis da manutenção das empresas: gerir os recursos (pessoas, equipamentos, materiais e dinheiro) de forma eficaz e, também, da forma mais eficiente possível.

Tendo em conta os fatores descritos surge a necessidade do projeto desenvolvido no Departamento de Engenharia 5 (DE5) na Continental Mabor, em Lousado. Devido à atual política da empresa de constante crescimento, que resulta num aumento exponencial, não só ao

nível da área da fábrica, como, também, num aumento do número de itens. Se a este facto aliarmos a elevada complexidade de alguns destes itens, é facilmente constatável a urgente necessidade da criação de metodologias que permitam um melhor acompanhamento/conhecimento da sua utilização. Dada as grandes dimensões da empresa, essa gestão torna-se ainda mais difícil. Assim, perante estas situações, sentiu-se a necessidade de desenvolver uma ferramenta de apoio à decisão e que permitam obter uma melhoria nas políticas de manutenção. Esta ferramenta, por seu lado, deverá ser de fácil utilização, flexível, capaz de nos fornecer indicadores de gestão adequados, possibilitar a rastreabilidade dos diversos itens, fornecer o seu histórico e ainda, ser capaz de nos ajudar a compreender o comportamento do item (componente, órgão, equipamento ou sistema) em análise. Órgão representa um dispositivo de complexidade média composto por vários componentes. Estes órgãos têm ainda a particularidade de serem rotáveis. Um rotável é um órgão que pode ser aplicado indistintamente, numa série de sistemas ou máquinas em substituição de outros idênticos. São mantidos num estado operacional um conjunto de órgãos prontos a serem utilizados para substituir qualquer um dos órgãos que avarie ou que esteja com necessidade de revisão. É uma política destinada a reduzir ao mínimo as necessidades de imobilização das máquinas para manutenção.

1.2 Continental Mabor

A Continental Mabor faz parte da Continental AG, que foi fundada em Hannover (Alemanha) em outubro de 1871. Na sua origem fabricava artefactos de borracha flexível e pneus maciços para carruagens e bicicletas. O Grupo Continental, apesar do não ser do conhecimento geral, é especialista na produção de sistemas de travagem, controlos dinâmicos para viaturas, tecnologias de transmissão de potência, sistemas eletrónicos e sensores. A Continental conta com 220 130 Colaboradores em cinco Divisões: Chassis e Segurança, "*Powertrain*", Interior, Pneus e *ContiTech*. Trabalha em 56 países e em cerca de 427 locais diferentes (Continental, s. d.b).

A Continental Mabor nasceu em dezembro de 1989, como empresa ligada à indústria de pneus. O seu nome provém da união de duas empresas de renome na manufatura da borracha, a Mabor, a nível nacional, e a Continental AG., de dimensão mundial. Em julho de 1990, iniciou-se o grande programa de reestruturação que transformou as antigas instalações da Mabor na mais moderna das, então, 21 unidades da Continental. A produção da Empresa é, atualmente, muito variada quer em medidas, quer em tipos, quer em marcas. A Continental Mabor inclui, no seu portfólio, pneus destinados a SUV's (*Sport Utility Vehicles*), pneus de alta performance, pneus *ContiSeal* e pneus *ContiSilent*. A sua gama de fabrico inclui pneus de jante 14" até 22" e produz atualmente uma média diária superior a 50000 pneus. Mais de 98% da sua produção destina-se à exportação. O designado "mercado de substituição" absorve cerca de 60% da produção anual da Continental Mabor. A parte restante é distribuída pelas linhas de montagem, dos mais prestigiados construtores da indústria automóvel (Continental s.d.a).

Integrado na direção de engenharia, o DE5 tem como principal responsabilidade o desenvolvimento de atividades de projeto de instalações industriais e/ou equipamentos nas suas variadas vertentes, nomeadamente especificações, planeamento, otimização e controlo de custos, assim como dar suporte de manutenção aos equipamentos. Os equipamentos pelos quais o DE5 é responsável são as prensas de vulcanização. A vulcanização consiste na cura da borracha, permitindo que a borracha adquira as propriedades mecânicas necessárias para que o pneu consiga desempenhar as suas funções. Para além de otimizar as suas propriedades mecânicas, os pneus também ganham a sua forma final, sendo conformados num molde que lhe confere o desenho no piso.

1.3 Objetivos do projeto

Com o desenvolvimento deste projeto se pretende efetuar um estudo sobre o desempenho dos equipamentos e respetivos componentes com o intuito de prevenir ou reduzir a probabilidade ou frequência de falhas. No prosseguimento deste intento, aplica-se uma metodologia de análise de avarias que evidencie alguns aspetos passados e seja passível de propiciar uma estimacão adequada acerca do comportamento dos mesmos. Esta metodologia passa por um ajustamento de modelos teóricos ao conjunto de dados obtidos no registo histórico. Uma vez que, o registo histórico ou era inexistente ou de fiabilidade questionável houve necessidade de planear e implementar uma nova metodologia para recolha de dados. O grande objetivo passa assim pela implementação de uma metodologia para suportar as decisões que resultem numa melhoria na política atual da manutenção. A Figura 1 representa um resumo dos objetivos pretendidos:

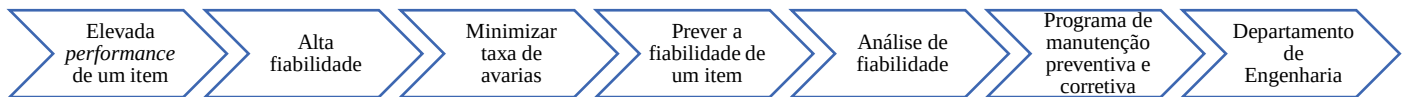


Figura 1 - Resumo do objetivo do projeto. Adaptado de (M. Modarres *et al*, 2017, pag 10)

Adicionalmente, pretende-se também avaliar as diferentes medidas de eficiência do sistema, tais como: disponibilidade e custo total de manutenção, que são segundo a literatura da área da gestão da manutenção as duas medidas mais relevantes. A disponibilidade é uma medida relevante, porque nos dá uma ideia da relação entre a fiabilidade e a manutenibilidade das máquinas e porque afeta diretamente os custos de manutenção. Assim, quando se referirem os custos totais de manutenção é conveniente associá-los a um nível de disponibilidade do sistema. Se assim não for, a redução dos custos totais de manutenção seria conseguida através da redução da disponibilidade do sistema.

A metodologia aplicada e que se revela frequentemente eficaz foi optar por uma implementação de área piloto: constitui-se a informação para uma área particular da empresa, implementa-se o sistema de gestão nessa área e, depois, expanda-se, já enriquecido com a experiência adquirida (daí a necessidade de grande flexibilidade da ferramenta, não se limitando aos itens mais em foco no DE5). Assim sendo, no futuro, e com a possível criação de uma oficina que centre todas as reparações internas efetuadas na Continental Mabor, é esperado que com a implementação da ferramenta se consiga atingir:

- Menores custos diretos – devido à maior produtividade do trabalho planeado e ao menor custo de evitar avarias face a prevê-las;
- Menor imobilizado em “*spare parts*” (peças de reserva) – num ambiente planeado, procura ter-se só aquilo de que se vai necessitar e encomendar só quando é necessário.
- Economia de energia – resultante do melhor rendimento dos equipamentos;
- Enriquecimento da empresa – o *know-how* da empresa, adquirido ao longo de anos e disperso, fica, finalmente, organizado e pronto a proporcionar benefícios;
- Intangíveis – quebras na produção, diminuição da qualidade, incumprimento dos prazos de entrega, agressões ao ambiente e outros acidentes podem traduzir-se na perda de um contrato, de um cliente, de um negócio ou até mesmo na extinção da própria empresa;

- Comparação e identificação das melhores soluções - comparar diferentes itens de diferentes fornecedores e/ou com diferentes materiais, ou até mesmo, comparação de diferentes reparações, por exemplo, interna e externa, visando identificar as melhores e mais adequadas soluções.

Uma boa gestão da manutenção cria um conjunto de expectativas que podem, e devem ser utilizadas em dois sentidos: primeiro, para convencer o nível superior de gestão da empresa a investir na manutenção; segundo, para ajudar a estabelecer metas e objetivos práticos em resultado do esforço na manutenção.

1.4 Método seguido no projeto

A metodologia seguida no projeto e respetivo cronograma (Figura 2):

- Recolha bibliográfica: Recolha bibliográfica com toda a informação que iria ser necessária para o desenvolvimento da ferramenta. Grande parte desta informação esteve relacionada com a linguagem de programação utilizada (Visual Basic).
- Implementar sistema de recolha de dados: Escolha de quais os órgãos críticos a identificar e devida identificação bem como criação de documentos para preenchimento, pelas devidas pessoas, dos dados previamente definidos a recolher.
- Recolha de dados: obtenção de factos/informações que permitem “alimentar” a ferramenta desenvolvida.
- Tratamento da informação: Migração de toda a documentação existente em papel para base de dados informática.
- Planeamento da arquitetura da ferramenta: elaboração de um esboço do sistema, de forma gráfica ou algorítmica, diferenciando a análise de sistemas reparáveis e não reparáveis, descrevendo as variáveis e as interações lógica que constituem o sistema. É recomendado que o modelo se inicie de uma forma simplificada e somente depois vá crescendo até alcançar a dimensão e complexidade desejada.
- Desenvolvimento da ferramenta: Desenvolvimento da ferramenta em Microsoft Excel® de acordo com todos os requisitos previamente estabelecidos. No final obteve-se duas ferramentas semelhantes, mas distintas. A primeira com um foco maior nos órgãos e introdução manual dos dados, já a segunda otimizada para processar dados importados diretamente do SAP.
- Teste da ferramenta: confirmação de que a ferramenta funciona sem erros e que os resultados por ela fornecidos possuem crédito e são representativos do funcionamento real.
- Documentação: elaboração de documentação da ferramenta. Esta é sempre necessária, porque serve de guia para o utilizador da ferramenta.

TAREFA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Recolha bibliográfica																		
Avaliação do estado atual																		
Definição do problema/objeto																		
Determinar requisitos necessários																		
Implementar sistema de recolha de dados																		
Recolha de dados																		
Tratamento da informação																		
Planeamento da arquitetura da ferramenta																		
Desenvolvimento da ferramenta																		
Teste da ferramenta																		

Figura 2 - Cronograma de tarefas realizadas

1.5 Estrutura da dissertação

Esta dissertação encontra-se dividida em cinco capítulos:

Capítulo 1 – Introdução. Apresentação do enquadramento, objetivos e metodologia do projeto bem como a empresa onde decorreram os trabalhos.

Capítulo 2 - Conceitos teóricos. Enunciam-se os conceitos básicos da fiabilidade, 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 3 - Melhoria das políticas de manutenção – Apresentação dos diferentes indicadores que se pretende melhorar.

Capítulo 4 Proposta de metodologia e análise de resultados – Apresentação de metodologia adotada e interpretação dos resultados obtidos segundo as metodologias descritas no segundo capítulo.

Capítulo 5 - Conclusões e perspetivas de trabalhos futuros. Apresentação as conclusões do projeto, dando uma perspetiva do trabalho futuro a realizar.

2 Conceitos teóricos

2.1 Introdução

Os rápidos avanços tecnológicos, o desenvolvimento de produtos altamente sofisticados, a intensa concorrência global e as crescentes expectativas dos clientes colocaram novas pressões sobre os fabricantes para produzir produtos de alta qualidade. Os clientes esperam que os produtos adquiridos sejam fiáveis e seguros. A fiabilidade é definida de muitas maneiras diferentes, mas a definição mais amplamente aceite indica que é a probabilidade de que um determinado item execute uma função requerida, sem falhas, sob as condições especificadas por um determinado período. Esta definição de fiabilidade é partilhada por vários autores tais como Pinto (1999), Assis (1997) ou O'Connor e Kleyner (2011). A fiabilidade constitui, pois, juntamente com a qualidade, um critério a ter em conta quando comparamos várias alternativas de decisão entre si. Segundo Condra (1993), podemos mesmo definir a fiabilidade como sendo qualidade ao longo do tempo.

Os métodos matemáticos aplicados ao estudo de fiabilidade recorrem a ferramentas de tratamento estatístico dos dados disponíveis pelo que existe uma relação profunda entre a fiabilidade e a estatística, ou seja, não é possível empreender qualquer estudo de fiabilidade sem um suporte estatístico prévio. Isto vem do facto de o conhecimento ou, melhor, a previsão de avaria durante um determinado intervalo de tempo só poder ser encarada em termos de probabilidade. Assim sendo, parte-se de um conjunto de dados referentes a acontecimentos já ocorridos para se preverem os acontecimentos que virão a ocorrer e os momentos mais prováveis para a sua ocorrência.

2.2 Sistemas Reparáveis vs Sistemas Não Reparáveis

Antes de se iniciar um estudo de fiabilidade sobre um qualquer histórico de avarias, torna-se imprescindível conhecer não somente alguns dos modelos e indicadores de fiabilidade, bem como, ter presente alguns dos seus conceitos base. Um desses conceitos base está relacionado com a distinção entre sistemas reparáveis e sistemas não reparáveis. Um sistema reparável é um sistema que, depois de não conseguir realizar uma ou mais das suas funções de forma satisfatória, pode ser recuperado para um desempenho plenamente satisfatório por qualquer método, além da substituição de todo o sistema (Ascher e Feingold 1984). 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 somente uma interrupção. No entanto, por motivos económicos, pode ser justificável não o reparar. A designação de sistemas não reparáveis está normalmente associada a sistemas ou componentes que, por razões económicas ou tecnológicas, têm um período de vida que termina quando ocorre a sua primeira e única avaria.

Por vezes a distinção entre equipamento e componente pode não ser muito clara. Por exemplo, no caso de um míssil, este é reparável enquanto se encontra guardado em armazém, mas passa à condição de não reparável quando se encontra na plataforma de lançamento.

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 efetuar distintamente, consoante se trate de um ou de outro.

2.3 Cálculo da Fiabilidade

A fiabilidade é definida como a probabilidade de um item desempenhar adequadamente as funções para as quais é requerido durante um período especificado em condições normais de funcionamento (O'Connor e Kleyner 2011). Da definição de fiabilidade podem ser destacados dois aspetos importantes. O primeiro está relacionado com o tempo, aqui o tempo é usado num sentido genérico e pode ter unidades como quilómetros, número de habitantes, horas de voo, número de ciclos, etc., dependendo do perfil operacional e da utilização do sistema, durante o qual um item é solicitado ou está em funcionamento (T_f). O segundo está relacionado com as condições ambientais e operacionais a que estes estão sujeitos durante o seu funcionamento. A função de fiabilidade $R(t)$, também conhecida como função de sobrevivência, é assim determinada a partir da probabilidade de um item sobreviver sem falhas durante um predeterminado tempo t :

$$R(t) = P(T_f \geq t), \quad t > 0 \quad (2.1)$$

Teremos então,

$$R(t) = \int_t^{\infty} f(t) dt \quad (2.2)$$

Onde:

$f(t)$, é a função densidade de probabilidade de falha

A função densidade de probabilidade de falha pode ser representada de diversas formas consoante as leis estatísticas que regem o comportamento dos equipamentos ou dos componentes. Sendo as suas formas de representação utilizadas descritas com detalhe mais adiante.

A função distribuição de probabilidade de avaria é uma medida de fiabilidade que é definida como a probabilidade de que um item falhe antes ou até ao instante de tempo t , ou seja, é igual à probabilidade de a variável aleatória tempo até a falha (*TTF - Time To Failure*) ser menor ou igual a um valor específico t . Sendo as situações de falha e sobrevivência mutuamente exclusivas, as duas probabilidades são efetivamente complementares:

$$F(t) + R(t) = 1 \quad (2.3)$$

Das expressões (2.2) e (2.3) deduzimos:

$$F(t) = 1 - R(t) = 1 - \int_t^{\infty} f(t) dt = \int_0^t f(t) dt \quad (2.4)$$

Atendendo aos conceitos de equipamento e componente 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 ou de outro, são os assuntos dos próximos pontos.

2.4 Fiabilidade de equipamentos

Como visto anteriormente, um equipamento caracteriza-se pelo facto de a ocorrência de uma avaria não implicar o “fim de vida” do item. A frequência à qual as avarias ocorrem designa-se

por taxa de avarias, $\lambda(t)$, e define-se como a derivada em ordem ao tempo do número esperado de avarias no instante t (Ascher e Feingold 1984):

$$\lambda(t) = \frac{dE[N(t)]}{dt} \quad (2.5)$$

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. Segundo Leitão (1999), as avarias em sistemas reparáveis podem ocorrer de três formas distintas:

- Tendência linear ou aleatória, isto é, independentes e identicamente distribuídas (IID);
- Tendência tipo logarítmica, isto é, o número de ocorrências diminui por unidade de tempo;
- Tendência tipo exponencial, isto é, o número de ocorrências aumenta por unidade de tempo.

Estas três formas da taxa de avarias caracterizam a “curva da banheira”, a forma desta curva pode ser ligeiramente diferente em função da natureza do item. A curva em forma de banheira embora apresente a mesma configuração para equipamentos e componentes, 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 dizer que, em termos gerais, se fazem duas interpretações distintas como se de duas curvas distintas se tratasse.

Como pode ser observado na Figura 3, na curva da banheira, podem-se identificar três fases: a fase de arranque (1), a fase de vida útil (2) e a fase de desgaste (3)

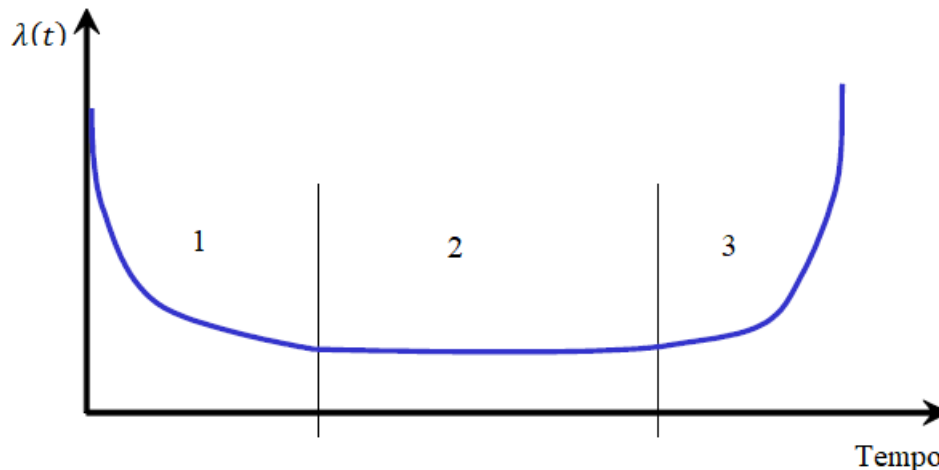


Figura 3 - Curva da banheira. Adaptado de (Leitão *et al* 2018)

A fase de arranque exibe uma taxa de avarias elevada, mas decrescente, caracterizado por falhas precoces atribuíveis a defeitos de projeto, fabrico ou construção. A fiabilidade crescente é o resultado que se obtém de contínuas melhorias introduzidas no sistema, em resultado da análise do seu desempenho operacional. A fase de vida útil exibe uma taxa de avarias, aproximadamente, constante, caracterizada por falhas aleatórias considerando-se, portanto, que não há uma razão específica para o seu aparecimento. A terceira fase, chamada fase de desgaste, exibe uma taxa crescente de avarias, caracterizada principalmente por reparações imperfeitas e a fenómenos de deterioração. Todavia, será indispensável averiguar a presença de causas possíveis e assinaláveis que eventualmente induzam este comportamento. A inexistência deste tipo de causas pode indiciar que o equipamento, provavelmente, estará próximo do seu limite de uso. A partir desse ponto, deve-se questionar sobre a necessidade de proceder a uma revisão geral, com o único objetivo de melhorar o seu funcionamento ou, no limite, estudar a viabilidade

económica da sua substituição. Se for economicamente viável, poderá evitar-se temporariamente a fase de obsolescência pela aplicação de manutenções do tipo preventiva, uma vez que, a deteção precoce de falhas e a substituição preventiva de componentes, poderá prolongar por algum tempo a fase operacional do equipamento.

A fiabilidade de equipamentos pode ser então determinada através da probabilidade de o equipamento desempenhar adequadamente as funções durante um determinado período especificado em condições normais de funcionamento. A determinação da fiabilidade, pode, contudo, também ser feita através da taxa de avarias, do tempo médio de operação entre falhas (MTBF- *Mean Time Between Failures*), calculado através do inverso da estimativa da taxa de avarias, ou da disponibilidade do mesmo, indicadores estes que são apresentados mais adiante. Porém, usa-se preferencialmente o indicador MTBF, devido à sua maior facilidade de interpretação.

2.4.1 Taxa de avarias decrescente

Como visto anteriormente, corresponde à fase da vida dos sistemas em que, normalmente, se verifica uma diminuição progressiva do número de avarias à medida que o tempo decorre. Corresponde assim, a uma fiabilidade crescente pelo que o pressuposto IID não é verdadeiro, ou seja, as avarias não ocorrem segundo um processo de Poisson homogéneo. Alguns autores referem-se a este período como sendo representativo duma fase da vida dos equipamentos, na qual, as avarias são influenciadas por diversos fenómenos de rodagem que caracterizam esta fase inicial de funcionamento. Outros, no entanto, consideram que este decréscimo de taxa de falhas de um sistema reparável, se deve fundamentalmente, a uma progressiva melhoria e aperfeiçoamento das reparações. Os modelos de fiabilidade mais conhecidos para a modelação desta fase de vida dos equipamentos são o modelo de Duane e o modelo de Crow. O modelo de Crow é uma reformulação do modelo de Duane de modo a permitir testes estatísticos e a definição de intervalos de confiança (A. F. Leitão 1999). Assim, e aliado à sua fácil manipulação matemática optou-se por usar o modelo de Crow. Informação adicional acerca do modelo de Duane pode ser vista, por exemplo, em (O'Connor e Kleyner 2011) ou (M. Modarres *et al.* 2017)

Modelo de Crow

Crow definiu os estimadores de máxima verosimilhança dos parâmetros γ e β ($0 < \beta < 1$) e propôs métodos para realizar testes de hipóteses e construir intervalos de confiança para os parâmetros. Estes estimadores podem, contudo, ser determinados de duas maneiras, uma em que o teste é limitado pelo tempo e outra em que o teste é limitado pelo número de avarias. Após a obtenção de ambos os parâmetros, a da taxa de avarias é obtida através da expressão (2.6):

$$\lambda(t) = \gamma\beta t^{\beta-1} \quad (2.6)$$

Como se pode constatar através da análise da Figura 1, com o decorrer do tempo, a taxa de avarias irá estabilizar e manter-se constante por um período relativamente longo, pelo que é plausível, com o valor da taxa de avarias estimado, prever a fiabilidade do sistema através da distribuição exponencial negativa. Assim, a fiabilidade pode ser expressa através da equação (2.7):

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (2.7)$$

2.4.2 Taxa de avarias constante

Corresponde ao período designado de vida útil, neste período o pressuposto IID é verdadeiro, logo as avarias ocorrem segundo um processo de Poisson homogéneo, sendo, obviamente, o intervalo de tempo entre as avarias, do ponto de vista do sistema reparável e não

necessariamente dos componentes nele instalado (A. F. Leitão 1999), descrito pela distribuição exponencial negativa. Para equipamentos em condições de taxa de avarias constante, a taxa de avarias pode ser estimada através da expressão (2.8):

$$\lambda(t) = \frac{N^{\circ} \text{ de avarias}}{\text{Tempo de Funcionamento}} \quad (2.8)$$

Distribuição exponencial negativa

A distribuição exponencial negativa é uma distribuição contínua, historicamente, é conhecida com sendo a primeira distribuição usada para modelar o tempo até falha. Atualmente, ainda é a mais amplamente usada em problemas de fiabilidade. Isso pode ser atribuído principalmente à sua simplicidade e ao facto de descrever a situação em que a taxa de avarias é constante, uma situação que é geralmente realista. A distribuição exponencial negativa é totalmente definida por um único parâmetro que governa a escala da distribuição. A função de densidade de probabilidade desta distribuição é dada pela expressão (2.9):

$$f(t) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda t} & \lambda, t > 0 \\ 0 & t \leq 0 \end{cases} \quad (2.9)$$

O que implica que a função distribuição de probabilidade seja dada por:

$$F(t) = P(T < t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (2.10)$$

A probabilidade de não ocorrerem falhas antes do tempo t é obtida pela interligação das equações (2.3) e (2.10):

$$R(t) = 1 - \int_0^t f(t)dt = e^{-\lambda t} \quad (2.11)$$

Uma das propriedades exclusivas da distribuição exponencial negativa é que é a única distribuição contínua que não possui “memória”. Ou seja, a probabilidade condicional depende apenas da duração restante e é independente da idade atual do item. Esta propriedade é explorada em grande parte na teoria da fiabilidade. Considere a lei da probabilidade condicional e assuma que um item sobreviveu após operar por um tempo t . A probabilidade de o item falhar em algum momento entre t e $[t+\Delta t]$ é:

$$P(t \leq T + \Delta t | T > t) = \frac{e^{-\lambda t} - e^{-\lambda(t+\Delta t)}}{e^{-\lambda t}} = 1 - e^{-\lambda \Delta t} \quad (2.12)$$

que é independente de t . Por outras palavras, o item que funcionou até o tempo t não tem “memória” do seu passado. Nesta situação, a fiabilidade do sistema pode ser quantificada pelo MTBF, cuja estimativa é dada pela expressão (2.13):

$$MTBF = \frac{1}{\lambda} \quad (2.13)$$

Distribuição de Poisson

Se o número médio de ocorrências num determinado intervalo de tempo ou numa região específica for constante, então a variável X que representa o número de ocorrências desses eventos segue uma distribuição de Poisson. Por exemplo, X pode representar o número de falhas numa fábrica por ano ou o número de comboios que chegam a uma determinada estação por hora. Uma variável X que segue uma distribuição de Poisson deve, segundo Modarres (1993), possuir as seguintes propriedades:

- O número de ocorrências num qualquer intervalo de tempo ou de espaço é independente do número de ocorrências em qualquer outro intervalo;
- A probabilidade de ocorrer um acontecimento num intervalo de tempo ou de espaço muito pequeno é proporcional à dimensão do intervalo;

- A probabilidade de ocorrer mais do que um acontecimento num intervalo de tempo muito pequeno é desprezável.

Em suma, a distribuição de Poisson é uma distribuição discreta cuja função de probabilidade vem definida pela expressão (2.14):

$$P(X) = \frac{\lambda t^X e^{-\lambda t}}{X!} \quad (2.14)$$

Onde:

X , é o número de falhas

λ , é a intensidade de ocorrência de eventos de Poisson por unidade de tempo ou por unidade de região

t , é o tempo total ou região de interesse

2.4.3 Taxa de avarias crescente

Na terceira e última fase do ciclo de vida dos equipamentos verifica-se um desempenho que reflete 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 terceira fase da curva da banheira e designa-se zona de falhas por desgaste, deve-se essencialmente a fenómenos de deterioração e reparações imperfeitas. Para equipamentos na situação de taxa de avarias crescente não é usual prever o comportamento fiabilístico do equipamento através da taxa de avarias. Nesta fase o interesse do ponto de vista teórico é superior ao prático, ainda assim, usou-se a distribuição de Weibull para a modelação desta fase, obtendo-se assim, uma estimativa do MTBF.

Distribuição de Weibull

A distribuição Weibull é indiscutivelmente a distribuição estatística mais popular usada pelos engenheiros em estudos de fiabilidade (Rausand e Hoyland 2004). Uma das muitas vantagens desta distribuição é a sua flexibilidade, a fácil interpretação dos parâmetros de distribuição e a sua relação com a taxa de avarias e o conceito de curva de banheira. Estas características devem-se ao facto da distribuição de Weibull ser uma distribuição com três parâmetros, pelo que é possível representar todos os tipos de função de risco.

A sua função de densidade de probabilidade é dada pela expressão (2.15):

$$f(t) = \begin{cases} \frac{\beta}{\eta^\beta} t^{(\beta-1)} e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta}, & t > 0 \\ 0, & t \leq 0 \end{cases} \quad (2.15)$$

Onde:

β , é o fator de forma

η , é a vida característica

γ , é a vida garantida

Estes três parâmetros representam:

- 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;
- Fator de Forma (β) - caracteriza as várias formas da curva da função de probabilidade de avaria bem como os vários padrões da função de risco:
 - Se $\beta < 1$ a distribuição apresenta uma função de risco decrescente característica da fase de arranque;
 - Se $\beta \approx 1$ a distribuição converte-se na distribuição exponencial negativa com função de risco constante;
 - Se $\beta > 1$ indica uma função de risco crescente e geralmente está associado à fase de desgaste.

A Figura 4 e a Figura 5 evidenciam a influencia deste parâmetro respectivamente na fiabilidade e na função densidade de probabilidade.

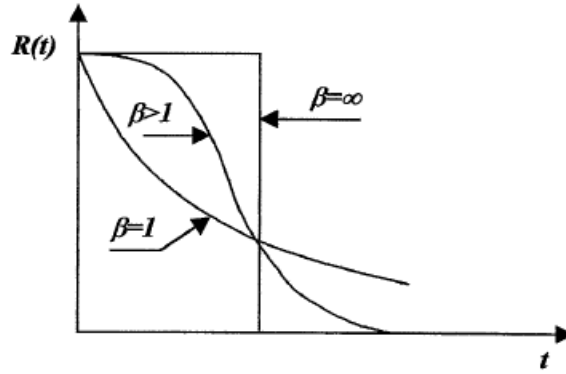


Figura 4 - Influência do fator de forma sobre a fiabilidade. (Paulo 1999, pág.42)

A escolha apropriada do fator de forma para a distribuição de Weibull, permite representar uma larga faixa de distribuições, tais como, a exponencial negativa ($\beta=1$), a normal ($\beta>3.5$), entre outras;

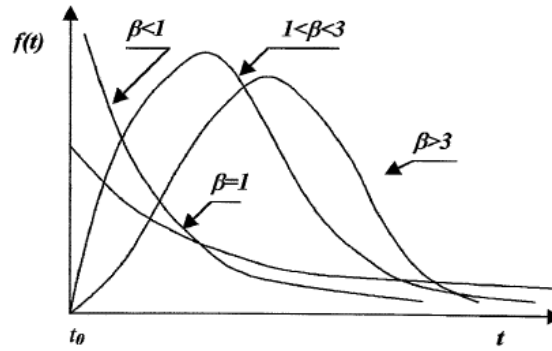


Figura 5 - Influência do fator de forma na função densidade de probabilidade. (Paulo 1999, pág.41)

- Vida garantida (γ) - também referida como parâmetro de localização, define a localização inicial do gráfico função de densidade de probabilidade ao longo do eixo X do sistema de coordenadas. Sob a hipótese de Weibull de 3 parâmetros, nenhuma falha pode ocorrer antes do tempo γ , portanto, também é referida como vida útil mínima. Geralmente, é lhe atribuído o valor de zero.

Pela aplicação da equação (2.4) é então possível obter a sua função de distribuição de probabilidade:

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (2.16)$$

Já pela aplicação da equação (2.3) resulta:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (2.17)$$

O valor esperado e a variância são determinados respetivamente pela equação (2.18) e (2.19):

$$Média = \eta \Gamma\left(\frac{\beta + 1}{\beta}\right) \quad (2.18)$$

$$Variância = \eta^2 \left[\Gamma\left(\frac{\beta + 2}{\beta}\right) - \left(\Gamma\left(\frac{\beta + 1}{\beta}\right) \right)^2 \right] \quad (2.19)$$

De forma a ser possível ajustar à distribuição de Weibull um conjunto de dados é indispensável estimar o valor dos seus parâmetros. De entre os vários métodos analíticos referidos na literatura, optou-se, tal como para o modelo de Crow, pelo método da máxima verosimilhança, uma vez que, é um método de estimativa que produz estimadores imparciais de variância mínima. Informação adicional acerca do método da máxima verosimilhança pode ser vista no Anexo C.

2.5 Fiabilidade de componentes

A fiabilidade de um componente é caracterizada pela probabilidade de funcionamento, para além de um dado período, onde apenas uma única avaria pode ocorrer. A fiabilidade de um componente pode ser expressa pela sua função densidade de probabilidade de avaria, pela sua função de risco, ou ainda, pelo seu tempo médio até avariar (*MTTF - Mean Time to Failure*). Assim sendo, 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 decorre desde a entrada em serviço dos componentes até à sua falha. O MTTF representa o valor esperado do tempo até que ocorra a avaria do componente. Matematicamente, o MTTF pode ser definido pela equação (2.20):

$$MTTF = \int_0^{\infty} t f(t) dt = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (2.20)$$

Assim, o MTTF pode ser considerado como a área sob a curva representada pela função de fiabilidade, $R(t)$, entre zero e infinito (Figura 6).

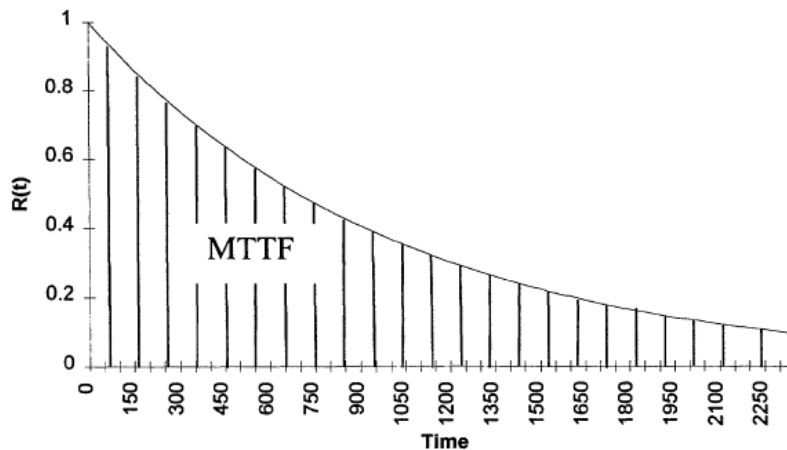


Figura 6 - MTTF de um componente em função da fiabilidade. (Kumar *et al.* 2000, pág 76)

A probabilidade instantânea da primeira e única avaria é denominada função de risco.

2.5.1 Função de risco

A fiabilidade de um componente pode ser caracterizada pela função de risco $h(t)$. A função de risco é a probabilidade condicionada do equipamento avariar no intervalo $[t, t+\Delta t]$, sabendo que não se observaram avarias até t (Mann *et al.* 1974). Matematicamente este conceito pode ser representado pela equação (2.21):

$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (2.21)$$

Pela aplicação da equação (2.3) podemos obter:

$$h(t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)} \quad (2.22)$$

Sendo que da equação (2.4) resulta:

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} \quad (2.23)$$

Do desenvolvimento da equação (2.22) com a equação (2.23) resulta:

$$\int h(t)dt = \int \frac{dF(t)}{1 - F(t)} \quad (2.24)$$

Como a função de risco acumulada, $H(t)$, pode ser obtida pela resolução do integral (2.21):

$$H(t) = \int_{-\infty}^t h(t)dt \quad (2.25)$$

Da equação (2.24) e (2.25) resulta:

$$H(t) = \ln(1 - F(t)) = \ln R(t) \quad (2.26)$$

É assim possível obter uma equação que relacione a fiabilidade com a função de risco:

$$R(t) = e^{-\int h(t)dt} \quad (2.27)$$

Na tabela 1 é possível observar as diferentes funções de risco para as diferentes distribuições utilizadas:

Tabela 1 - Funções de risco para as diferentes distribuições

Distribuição	Função de risco, $h(t)$
Exponencial Negativa	λ
Weibull	$\frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1}$

Pode-se considerar que um equipamento é composto por vários componentes que são substituídos quando avariaram. A falha de um componente provoca a falha do sistema. O número esperado de falhas do sistema é assim dependente da frequência das avarias dos componentes que o compõem, que depende, por sua vez, da função de risco de cada componente. A função de risco de um componente pode ser decrescente (componente 2), constante (componentes 3 e n), ou crescente (componentes 1 e 4). A Figura 7 ilustra a ocorrência de avarias originadas pela falha de diferentes componentes pertencentes a um sistema. Quando um componente avaria ele é substituído por outro componente idêntico, com a mesma função de risco. Se um componente

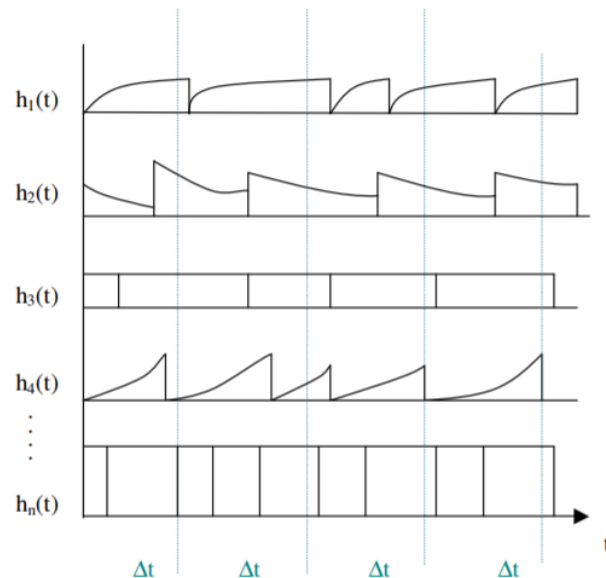


Figura 7 - Função de risco e taxa de avarias. (Lopes e Leitão 2003, pág. 38)

com função de risco crescente for substituído antes de ocorrer a avaria, a taxa de avarias do sistema diminuí. Os componentes mecânicos são exemplos típicos de componentes com função de risco crescente sendo o aumento da função de risco provocado pelo desgaste do equipamento ocorrido ao longo do tempo. A taxa de avarias dos sistemas não depende da forma da função de risco dos seus componentes, mas sim do seu valor num determinado instante (Lopes e Leitão 2003). 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.

2.5.2 Substituição preventiva de componentes

A substituição preventiva de componentes visa atuar em antecipação à avaria, de forma a minimizar as suas possíveis consequências com resultados desastrosos em termos de custos de perda de produção, entre outros. Como visto anteriormente, a função de risco pode ser decrescente (raro), constante ou crescente. Se um componente tem uma função de risco decrescente, então a sua fiabilidade está a melhorar à medida que o tempo avança e, portanto, a sua substituição preventiva é desvantajosa, logo não recomendável.

Ou seja, quando a função de risco está a diminuir, qualquer substituição aumentará a probabilidade de falha, como mostrado na Figura 8.

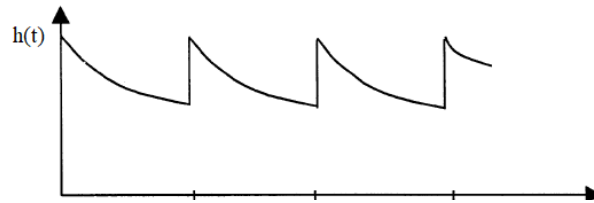


Figura 8 - Substituição de componente com função de risco decrescente.
(Kumar *et al.* 2000, pág 207)

Se um componente tiver uma função de risco constante (Figura 9), o tempo até a falha terá uma distribuição exponencial negativa. Por outras palavras, a probabilidade de avaria durante o próximo incremento de tempo permanecerá inalterada ao longo da vida útil do componente, indicando que ele é "tão bom como novo", independentemente de quanto tempo ele tenha operado. Neste caso, a substituição preventiva é irrelevante, uma vez que, a sua substituição não fará diferença na probabilidade de avaria.

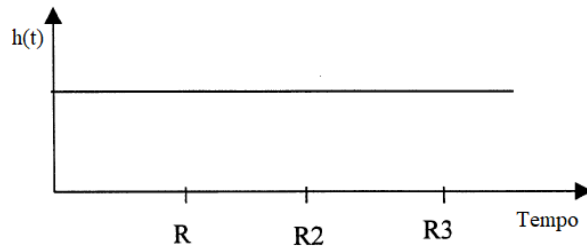


Figura 9 - Substituição de componente com função de risco constante.
(Kumar *et al.* 2000, pág. 207)

Se um componente tiver função de risco crescente (Figura 10), a substituição preventiva a qualquer momento irá, em teoria, melhorar a fiabilidade do sistema, uma vez que, o novo componente apresenta um valor inferior para a função de risco.

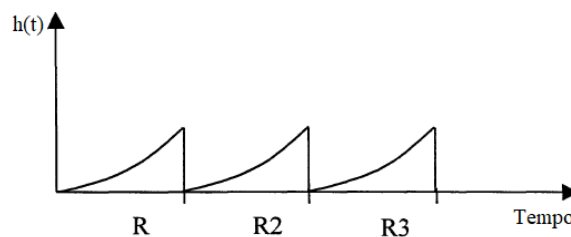


Figura 10 - Substituição de componente com função de risco crescente. (Kumar *et al.* 2000, pág. 207)

Assim, segundo Leitão (1999), apenas será vantajoso proceder à substituição preventiva de componentes 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.
- Os tempos aos quais os componentes vão avariar não são conhecidos, mas podem ser descritos por uma distribuição de probabilidade.

Periodicidade da substituição preventiva

O objetivo das revisões periódicas é substituir componentes com função de risco crescente antes que ocorra a avaria, provocando assim uma diminuição na taxa de avarias e uma melhoria na fiabilidade dos sistemas. Pelo que, a melhor política de substituição preventiva é feita com a periodicidade que minimiza o custo total por unidade de tempo. Esta periodicidade denota-se por t_p^* e resulta do valor mínimo da equação (2.28):

$$C(t_p) = \frac{C_F F(t_p) + C_P R(t_p)}{t_p R(t_p) + \int_0^{t_p} t f(t) dt} \quad (2.28)$$

Uma vez que o integral do denominador não tem uma solução analítica, utiliza-se o método de Simpson para se obter uma solução. O desenvolvimento característico da função $C(t_p)$ está representado na Figura 11.

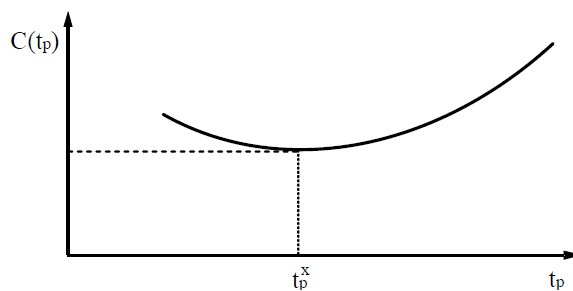


Figura 11 - Custo total por unidade de tempo. (Paulo 1999, pág. 52)

2.6 Teste de Laplace

Antes de se aplicar qualquer distribuição estatística a um conjunto de dados, retirados do histórico de avarias, deve ser analisada qual a tendência dos dados sob o ponto de vista do processo estocástico (ordem cronológica das avarias) (A. F. Leitão 1999). A análise de tendência é um processo de inferência estatística baseado na metodologia do teste de hipóteses. O objetivo fundamental deste teste é o de verificar se dados amostrais são ou não compatíveis com determinadas populações. Para facilitar a compreensão da metodologia utilizada no teste de hipóteses, o procedimento básico nela envolvido será decomposto em quatro fases, designadamente:

- Definição das hipóteses
- Identificação da estatística de teste e caracterização da sua distribuição
- Definição da regra de decisão, com especificação do nível de significância do teste.
- Cálculo da estatística de teste e tomada de decisão

Uma vez mais, este procedimento deve ser efetuado distintamente, consoante se trate de equipamentos ou de componentes. Perante equipamentos, a análise efetuada tem como objetivo indagar qual a tendência que a frequência de avarias apresenta, isto é, se há indícios estatísticos de taxa de avarias decrescente, constante ou crescente. Quando a análise incidir sobre um componente, o teste tem como objetivo indagar se os tempos de avaria são IID, constituindo um processo de Poisson homogêneo e tendo, portanto, uma taxa de avarias constante. A descrição do teste de Laplace pode ser vista no Anexo D.

2.6.1 Teste à função risco crescente

A distribuição de Weibull é igualmente utilizada quando, previamente à substituição preventiva de componentes, como visto anteriormente, e após se verificar que os tempos entre avarias são

IID, se pretende verificar se a função de risco é crescente. Caso não o seja, a substituição preventiva não se revela viável em virtude de não proporcionar proveitos, quer em termos económicos quer operacionais. Para que exista evidência estatística de uma função de risco crescente, torna-se necessário formular as seguintes hipóteses:

- $H_0: \beta = 1;$
- $H_1: \beta > 1.$

A hipótese nula será rejeitada, existindo assim evidências estatísticas de uma função de risco crescente, sempre que se verifique a condição (2.29):

$$LI = \frac{\beta}{F_\beta} > 1 \quad (2.29)$$

O valor de F_β é obtido graficamente (Anexo E) em função de um determinado grau de confiança e da dimensão da amostra. 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 reta dos 90%.

2.6.2 Aspetos a considerar aquando da aplicação do Teste de Laplace

Sempre que o teste de Laplace seja aplicado a um conjunto de dados de um determinado item é indispensável proceder à atualização dos tempos de ocorrências das avarias (t_i), e do tempo total do teste (t_0) a fim de evitar os inconvenientes da informação sobreposta. Tomemos como exemplo o caso da Figura 12:

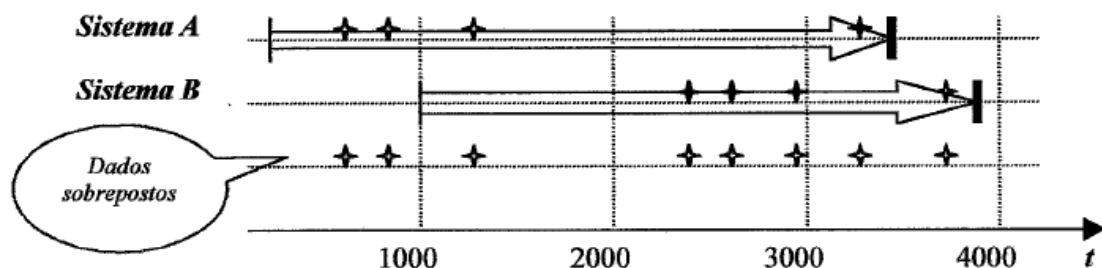


Figura 12 - Informação incorreta com dados sobrepostos. (Paulo 1999, pág. 26)

Facilmente concluímos que a informação agrupada por sobreposição dos tempos de avaria, conduz a um registo completamente diferente daquele que está associado a cada um dos sistemas, para o mesmo intervalo de tempo, levando obviamente, no caso de análise da tendência, a conclusões erradas.

2.7 Análise de Pareto

O Diagrama de Pareto é uma representação gráfica que ajuda a identificar e seleccionar os aspetos ou problemas prioritários a tratar. Os diagramas de Pareto permitem a hierarquização dos dados obtidos acerca de um problema, partindo do mais importante para o menos importante. É, pois, uma ferramenta de análise a utilizar na seleção 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 ações por forma a diminuir custos e a indisponibilidade.

3 Melhoria das políticas de manutenção

3.1 Manutenção

A manutenção pode ser definida como o conjunto de todas as ações técnicas e administrativas, incluindo ações de supervisão, destinadas a reter um item ou restaurá-lo num estado no qual ele possa executar uma função requerida (BS4778) . Por outras palavras, todas as ações, que mantêm o sistema em funcionamento e garantem que ele seja mantido num padrão aceitável, no qual ele é capaz de operar nos níveis requeridos de forma eficiente e eficaz. Segundo (Kumar *et al.* 2000) os objetivos da manutenção são:

- Reduzir as consequências das avarias;
- Aumentar a disponibilidade dos equipamentos;
- Certificar-se de que o sistema esteja apto e seguro para utilização;
- Assegurar-se de que a condição do sistema atenda a todos os requisitos previamente estabelecidos;
- Prolongar a vida útil dos equipamentos;
- Melhorar as condições de segurança das instalações e das pessoas;
- Melhorar qualitativamente e quantitativamente a produção;
- Reduzir os custos globais de manutenção;
- Manter os sistemas em um estado de funcionamento de acordo com seu projeto e restaurá-los para um estado similar quando necessário.

A atividade 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. De facto, a evolução das técnicas de produção, tendendo para uma maior automatização das máquinas e equipamentos, faz com que a manutenção tenha cada vez mais relevo. Uma paragem imprevista de um equipamento pode ter consequências económicas graves para as empresas. Em suma, pode considerar-se que a manutenção é uma atividade geradora de mais valias na medida em que pode interferir de forma significativa na produtividade e consequentemente na geração de riqueza para a empresa.

Para se conseguir retirar o melhor aproveitamento económico de um equipamento, torna-se indispensável otimizar os custos de manutenção. Tal só será possível, realizando a modelação do comportamento operacional dos equipamentos, isto é, conhecendo a sua fiabilidade. Porém, sendo esse conhecimento imprescindível, é insuficiente senão existir uma análise económica e financeira das consequências de uma determinada política de manutenção. O objetivo dos modelos de melhoria de manutenção é determinar as tarefas de manutenção ideais que minimizam o tempo de inatividade, proporcionando o uso mais eficiente dos equipamentos, a fim de garantir os resultados desejados com o menor custo possível, considerando todas as possíveis restrições. Os modelos podem ser quantitativos ou baseados em procedimentos, como a manutenção centrada na fiabilidade, manutenção relacionada à idade ou manutenção produtiva total, etc. Informações adicionais acerca dos vários tipos de

manutenção podem ser vistos, por exemplo, em (Rausand e Hoyland 2004) ou (Kumar *et al.* 2000). A aplicação generalizada de manutenção preventiva levou a modelos matemáticos extensos na literatura que tratam da questão de como a manutenção preventiva deve ser programada. Modelos matemáticos podem ser determinísticos ou estocásticos. Os critérios usados com mais frequência para desenvolver metodologias para melhoria das políticas de manutenção são:

- Minimizar: custos de manutenção, tempo de inatividade e tempo de reparação;
- Maximizar: receita, lucro, tempo entre falhas e disponibilidade;
- Alcançar: nível exigido de fiabilidade e segurança.

Segundo Pinto (1999) o aumento do MTBF consegue-se com:

- Escolha e utilização de equipamentos de elevada fiabilidade, o que garantirá períodos longos de funcionamento sem avarias;
- Estudo e análise sistemática de avarias com o objetivo de introduzir melhorias na fiabilidade através de modificações nos equipamentos;
- Execução do trabalho de manutenção com elevada qualidade técnica. Assim se evitarão avarias e consequentes paragens de produção;
- Implementação de planos de manutenção preventiva convenientemente elaborados.

Segundo o mesmo autor a diminuição do MTTR consegue-se com:

- Escolha e utilização de equipamentos com elevada manutenibilidade, o que reduzirá o tempo de inatividade;
- Disponibilidade adequada de peças de reserva;
- Utilização de métodos de diagnóstico de avarias e de execução devidamente estudados;
- Disponibilidade ajustada de meios humanos e logísticos para as intervenções;
- Elevada motivação do pessoal conduzindo a elevados níveis de produtividade.

3.1.1 Custos

O constante crescimento da competitividade obriga a que se concebam e produzam equipamentos com níveis de desempenho crescentes. Obviamente, quanto maior for a fiabilidade desejada maiores serão os custos resultantes. A forma de conseguir os necessários compromissos depende da aplicação em causa e dos requisitos de fiabilidade apropriados. Assim, por exemplo, num carro de competição, os requisitos de fiabilidade são naturalmente secundários face aos requisitos de desempenho. Por outro lado, no caso de um avião comercial os requisitos de fiabilidade são naturalmente predominantes sobre quaisquer outros. Em situações intermédias, os requisitos de fiabilidade colocam-se mais em termos económicos. Assim, no caso de um equipamento de produção, interessa encontrar o melhor compromisso entre o custo de obtenção de uma fiabilidade elevada e o custo resultante das falhas. Isto é, custos de fiabilidade versus custo de não-fiabilidade.

No que diz respeito à evolução dos custos de manutenção, Monchy (2003) verificou a existência de um nível ótimo de manutenção preventiva para um custo mínimo de avaria (Figura 13). Para o efeito, considerou que os custos de perda de produção ou indiretos, associados à avaria, evoluíam de forma inversa aos custos de manutenção.

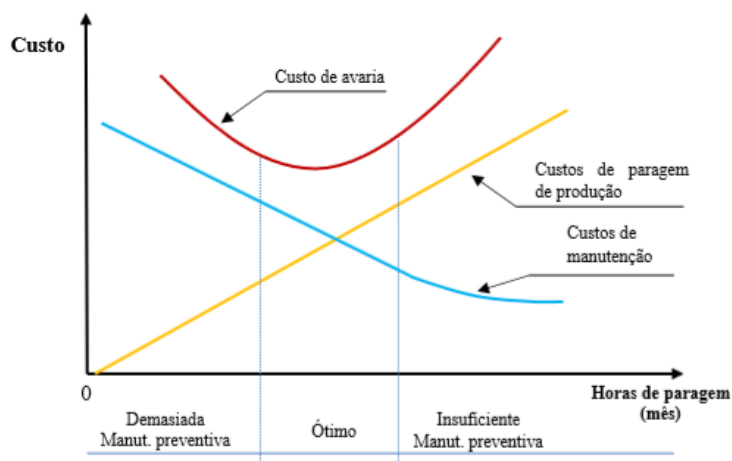


Figura 13 - Evolução dos custos com aumento da manutenção preventiva. (Peito 2014, pág.19)

Segundo Cabral (2004), os custos de manutenção podem ser diferenciados em custos contabilísticos (os custos diretos) e custos indiretos. Porém, segundo este autor, os custos contabilísticos são apenas os custos visíveis gerados pela função manutenção e correspondem à parte emersa do iceberg (Figura 14). A parte imersa por seu lado, representa todos os outros custos decorrentes da indisponibilidade dos equipamentos (custos indiretos) e, segundo este, esta é quatro vezes maior que a dos referidos custos contabilísticos. Assim sendo, segundo Pinto (1999), é frequente ouvir-se no interior das empresas industriais que os custos de manutenção são excessivos. No entanto esta afirmação na maioria das vezes toma apenas como referência os custos diretos de manutenção, não sendo assim considerados nesta avaliação os custos indiretos de manutenção e a influência que sobre eles é exercida pela política de manutenção estabelecida.



Figura 14 - Iceberg dos custos. (Peito 2014, pág.18)

3.1.2 Tempo de reparação

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 manutenibilidade do equipamento, isto é, da sua aptidão para ser restaurado para uma condição de bom funcionamento. O MTTR agrega todo o tempo necessário para diagnosticar a avaria e reunir os recursos logísticos, o tempo de execução do trabalho propriamente dito e ainda teste e entrega do equipamento. Assim sendo este indicador pode ser obtido através da expressão 3.1:

$$MTTR = \frac{\sum TR_i}{N^{\circ} \text{ Avarias}} \quad (3.1)$$

Onde:

TR_i , é o tempo de reparação da avaria i

Este tempo de reparação pode ainda ser dividido em tempo de espera e tempo efetivo de reparação. 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, pela diminuição do tempo em fila de espera e do tempo de intervenção propriamente dita.

3.1.3 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. Considere-se um equipamento que começou a trabalhar quando $t=0$. Quando o equipamento avaria, uma reparação é necessária para restaurar a funcionalidade do equipamento. O estado do equipamento num instante t é dado pela variável:

$$X(t) = \begin{cases} 1 & \text{operacional no instante } t \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (3.2)$$

A função disponibilidade, denotada por $D(t)$, é assim definida como a probabilidade de um item se encontrar operacional num instante t , sabendo que no instante $t=0$ se encontrava operacional:

$$D(t) = P(X(t) = 1) \quad (3.3)$$

Ou seja, traduz a proporção de tempo em que o sistema se encontra em condições para ser usado e assim poder realizar as suas funções específicas.

$$\text{Disponibilidade} = \frac{T_{UP}}{T_{UP} + T_{DOWN}} \quad (3.4)$$

Onde:

T_{UP} , é o período em que o equipamento está em condições de ser utilizado

T_{DOWN} , é o período em que o equipamento não está em condições de ser utilizado

Já a disponibilidade estacionária pode ser obtida pela equação 3.5:

$$D_e = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (3.5)$$

Como facilmente se observa através da Figura 15 a equação (3.5) tem pouca aplicabilidade. Em primeiro lugar porque implica que se assuma que as taxas de avarias e de reparações sejam constantes (sistema em estado estacionário), e em segundo lugar, o MTBF e do MTTR teriam de estar nas mesmas unidades de medida, o que na realidade, muitas vezes não acontece.

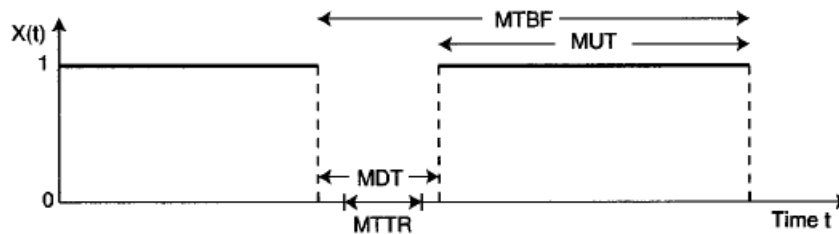


Figura 15 – Disponibilidade. (Rausand e Hoyland 2004, pág. 368)

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 objetivos a alcançar independentemente das metodologias de manutenção a aplicar. Generalizando, pode-se dizer que a disponibilidade é função da maior ou menor frequência de avarias e da maior ou menor rapidez com que as ações de manutenção são realizadas (O'Connor e Kleyner 2011). Estas ações de manutenção por sua vez dependem dos meios disponíveis e da manutenibilidade dos sistemas. Em suma, o aumento da disponibilidade dos sistemas, ao mais reduzido custo possível, é, pois, uma das grandes e mais importantes metas a atingir por todos os gestores, independentemente dos modelos de manutenção aplicados.

3.2 Registo histórico

O registo histórico é um dos mais importantes documentos para a manutenção, pois a sua análise e estudo é fundamental para a evolução e melhoria do desempenho da sua atividade. O registo histórico permite que sejam aí registadas todas as ocorrências por equipamento e pelos respetivos componentes. Com base nos conhecimentos que o histórico de um equipamento permite obter acerca do seu comportamento ao longo do tempo, pode a engenharia, através do seu estudo, desenvolver soluções que introduzam melhorias da sua fiabilidade que venham a reduzir os seus custos de manutenção e aumentar a sua disponibilidade para a produção.

Para que os indicadores apurados possam proporcionar algumas contribuições válidas para a tomada de decisões, será imprescindível dispor de informação suficientemente abrangente e colecionada de forma homogénea e criteriosa. Só por esta via será possível tecer considerações consistentes e precisas acerca dos eventos ocorridos nos equipamentos, bem como elaborar previsões válidas. Segundo Pinto (1999), este importante instrumento de gestão de manutenção permite ainda:

- A comparação de custos de manutenção do mesmo tipo de equipamento de fabricantes diferentes com vista a opções futuras;
- A análise da evolução dos custos de manutenção para fundamentar opções a reparar ou substituir;
- Avaliar o consumo de peças de reserva para efeito de cálculo dos parâmetros necessários à gestão de stocks;
- A obtenção de dados para análise de avarias tendo em vista o estudo e introdução de modificações que reduzam a manutenção;

- Calcular índices de manutenção nomeadamente o MTBF e o MTTR tendo em vista o ajustamento dos intervalos de tempo da manutenção preventiva, bem como efetuar análises de fiabilidade dos equipamentos.

Generalizando, segundo Assis (2004), podemos acrescentar as seguintes notas práticas a ter em conta ao recolher e tratar tempos entre falhas:

- Uma falha ou a sua correção pode causar danos noutros componentes de um sistema, o que invalida muitas vezes o pressuposto de que os tempos entre falhas sucessivas são independentes;
- As reparações não repõem um sistema no estado de “novo”, antes introduzem muitas vezes defeitos que vão provocar falhas noutros componentes;
- As peças substituídas não são sempre exatamente iguais podendo comportar-se, na perspetiva da falha, melhor ou pior;
- Algumas falhas de um sistema podem ser causadas por parte dos seus componentes os quais, individualmente, operam dentro das especificações, mas cujas tolerâncias combinadas provocam a falha daquele;
- Algumas falhas reportadas como tal não são verdadeiras falhas, antes resultando de oportunidades em que o pessoal da manutenção aproveita para substituir componentes “suspeitos”;
- Os sistemas que sofrem muitas intervenções de manutenção preventiva, apresentam frequentemente taxas de falha mais elevadas imediatamente a seguir, devido à “perturbação” de ajustamentos de componentes, os quais, de outro modo, não falhariam tão cedo;
- A perceção da falha por parte de um operador ou de um técnico de manutenção é muitas vezes subjetiva e influenciada pela experiência e/ou consequências (por exemplo, garantias), podendo não classificar o evento como tal noutras circunstâncias;
- A experiência do pessoal da manutenção influencia a qualidade de um diagnóstico, tendo por vezes, como consequência, a substituição precipitada de uma peça que poderia funcionar bem ainda durante algum tempo;
- Por último, os registos podem ter sido alvo de erros involuntários ou “intencionais”.

Assim, antes de passarmos ao tratamento estatístico dos dados devemos criar condições de confiança nos mesmos. De outra forma: “*garbage in, garbage out*”. Com base no registo histórico 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 constitui os objetivos deste trabalho.

3.3 Reparar ou Substituir

Antes de um equipamento entrar em serviço, na verdade, quando ainda está na fase de projeto, é necessário considerar que partes do sistema serão reparadas ou descartadas. A maioria dos sistemas complexos são de algum modo reparável, mas existem algumas exceções. A parte do sistema, que entrou num estado de falha, geralmente, pode ser removida e substituída por uma parte similar, que esteja funcional. A parte removida pode então ser reparada ou descartada. Uma reparação pode restaurar o sistema para um estado “como-novo”, mas é muito mais provável que ele seja restaurado para uma condição, que é apenas marginalmente melhor que “igual a velho”. Uma exceção pode ocorrer quando a peça de substituição é mais recente do que a removida, ou possui um design melhorado (em termos de fiabilidade). Substituir um pneu gasto num carro tornará essa parte do veículo mais fiável, mas não a fiabilidade do carro como um todo. Simplesmente trocar um pneu gasto, mesmo por um novo, provavelmente não irá restaurar o sistema para uma condição “como-novo”. Embora a maioria dos sistemas complexos seja geralmente reparável, é provável que eles atinjam um estágio nas suas vidas quando se torna pouco económico tentar repará-los. Por exemplo, um carro que atingiu uma parede a alta velocidade, pode, tecnicamente, ser reparável, mas, ainda que recente e sem registo de qualquer

avaria, o custo da reparação muito provavelmente será maior do que o custo de substituição. Concluimos assim, que os fatores mais importantes a ter em conta nesta decisão são evidentemente a idade do item e os custos envolvidos. A idade manifesta-se de várias maneiras: desgaste, corrosão e obsolescência. A eficácia da reparação desempenha um papel importante na decisão se um equipamento é reparável ou descartável. Uma reparação é classificada como perfeita quando o valor da função de risco após a conclusão da reparação é igual ao de um item novo. Se o valor da função de risco após a conclusão da reparação for o mesmo que o valor imediatamente anterior à falha, a reparação é designada de reparação mínima. Se o valor da função de risco após a conclusão da reparação estiver entre a reparação perfeita e a reparação mínima, então ela é designada de reparação imperfeita.

A Figura 16 ilustra os três níveis de eficácia de reparação usando a função de risco.

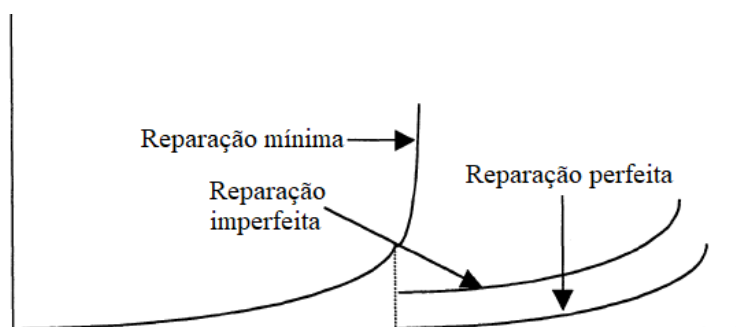


Figura 16 - Vários tipos de reparações. Adaptado de (Kumar *et al.* 2000, pág. 212)

A decisão de reparar ou substituir um item deve ser tomada tendo em conta (Kumar *et al.* 2000):

- A idade do item e como ele se compara à vida esperada ou ao MTBF. Se a idade estiver dentro da expectativa de vida então a tendência será optar pela reparação, se a expectativa de vida se estiver a esgotar ou se já foi excedida, a tendência será optar pela substituição;
- Disponibilidade de peças de reposição. Em áreas de mudança tecnológica muito rápida, a reparação é claramente inviável se não for possível obter peças sobressalentes. Este facto pode determinar a substituição, mesmo quando a avaliação da condição indicar reparação;
- A tendência no custo de manutenção. A análise do custo do ciclo de vida é útil para demonstrar os benefícios de custo dentro de um período aceitável no qual a substituição pode oferecer. Além do custo de manutenção, a substituição pode ser justificada com base em outras economias de custo, por exemplo, o custo do consumo energético a partir do uso de um sistema moderno de alta eficiência;
- Restrições financeiras que podem ter um grande impacto nas decisões de manutenção relacionadas com a reparação ou substituição. Embora o departamento de engenharia possa sugerir que a substituição de um item ou de um sistema seja preferível, a restrição financeira pode exigir que uma reparação seja realizada. É por esse motivo que as decisões de substituição devem ser priorizadas como essenciais, necessárias ou aconselháveis.

A racionalidade económica deverá presidir a todos os processos de decisão da manutenção. Esta preocupação vem-se manifestando de uma forma progressiva ao longo dos últimos anos. Assim sendo, o principal motivo para decidir substituir um item em vez de repará-lo é o custo.

3.3.1 Modelos de custos de sistemas reparáveis

O custo do ciclo de vida de um equipamento contempla várias etapas tais como, a aquisição, instalação, operação, manutenção, reparação e alienação. O foco principal centra-se na modelagem do custo de manutenção e reparação, que é um dos principais elementos do custo do ciclo de vida do sistema reparável. Os modelos de custos de sistemas reparáveis dependem

fortemente do processo estocástico assumido para modelar as falhas do sistema. Portanto, é extremamente importante que o processo estocástico assumido caracterize com precisão as falhas do sistema.

A Figura 17 mostra os vários processos estocásticos utilizados:

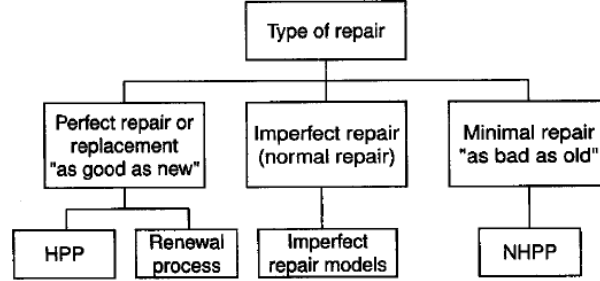


Figura 17 - Diferentes processos estocásticos tendo em conta os diferentes tipos de reparações. (Rausand e Hoyland 2004, pág.240)

Como afirmado anteriormente, no caso de sistemas reparáveis, um equipamento pode ser reparado ou ajustado em vez de substituído quando ocorrer uma avaria. O tempo esperado até que ocorra uma nova falha após uma reparação é diferente do tempo esperado para a primeira falha de um equipamento. A abordagem de processo de reparação perfeita não tem isso em conta e o tempo para a primeira falha é assumido como válido para cada falha subsequente do equipamento. Assim, o tempo entre falhas são assumidas como sendo independentes e identicamente distribuídas. É assumido que após cada falha o sistema é reparado e restaurado para uma condição tão boa quanto nova, ou seja, restaurado para uma condição equivalente à original. Através da equação (2.5) é possível obter o número esperado de avarias:

$$E[N(t)] = \lambda t \quad (3.6)$$

Sempre que exista uma tendência no tempo entre falhas, a condição de falhas independentes e identicamente distribuídas não é válida e é preciso contar com um PPNH. Sob tais circunstâncias, a abordagem do processo de reparação mínima pode ser utilizada. O PPNH permite modelar as tendências no número de falhas a serem encontradas num intervalo em relação à idade total do sistema através da função intensidade. Sob a condição de reparação mínima, a reparação ou substituição de uma peça defeituosa não envolve modificação significativa da fiabilidade do sistema. Como a maioria das reparações envolve a substituição de apenas uma pequena fração das partes constituintes do sistema, é plausível supor que a fiabilidade do sistema após uma reparação é essencialmente a mesma de antes da falha (Ascher e Feingold 1984). O sistema continuará a deteriorar-se ao longo do tempo. Para modelar este processo, uma função de intensidade, $\rho(t)$, pode ser definida como a taxa de variação do número esperado de avarias em relação ao tempo da seguinte forma:

$$\rho(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta} \right)^{\beta-1} \quad (3.7)$$

O número esperado de avarias pode então ser obtido:

$$E[N(t)] = \int_0^t \rho(t) dt = \int_0^t \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta} \right)^{\beta-1} dt = \left(\frac{t}{\eta} \right)^{\beta} \quad (3.8)$$

Assim sendo, a Figura 18 mostra o procedimento para estimar o custo de manutenção e reparação baseado na seleção adequada do modelo que descreve corretamente o tempo até a falha de um determinado equipamento. Na ausência de envelhecimento do sistema ou crescimento da fiabilidade, o processo de reparação perfeita pode ser usado para estimar os custos de manutenção e reparação. Mas sempre que o envelhecimento do sistema ou o crescimento da fiabilidade seja observado com o tempo, o processo de reparação mínima deve ser utilizado para estimar os custos de manutenção e reparação.

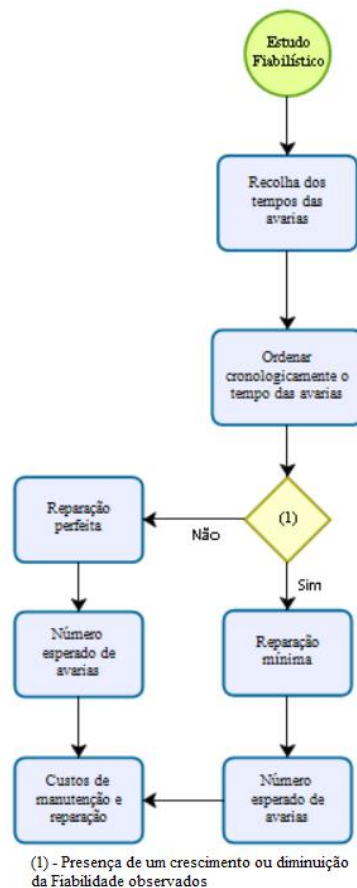


Figura 18 - Metodologia adotada para determinação dos custos de manutenção.

Os custos de manutenção corretiva são estimados com base no número esperado de avarias em um determinado intervalo de tempo. Como a nossa análise centra-se nos órgãos, esta é a única política de manutenção interveniente. O valor final do custo de manutenção e reparação, resulta assim, apenas da multiplicação do número esperado de avarias pelo valor de cada avaria (reparação mais custos de substituição).

Uma política de decisão introduzida por Barlow e Hunter (1960), solicita a substituição planeada de um sistema após um número pré-especificado de horas de funcionamento, independentemente do número de falhas ocorridas. Assume-se que após cada falha do sistema é apenas minimamente reparado. É objetivo é assim minimizar a quantidade:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{E[C(I)]}{t} = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{C_1 E[N_1(t)] + C_2 E[N_2(t)]}{t} \quad (3.9)$$

Onde:

C_2 , é o custo da substituição planeada de um equipamento
 C_1 , é o custo da reparação mínima
 $C(I)$, é o custo total de substituição mais reparação
 N_1 , é o número total de reparações mínimas
 N_2 , é o número total de substituições

De onde o intervalo de substituição ótimo (I^*) pode ser obtido:

$$I^* = \left(\frac{C_2}{\lambda(\beta - 1)C_1} \right)^{\frac{1}{\beta}} \quad (3.10)$$

No entanto, se o tempo não for uma variável de decisão apropriada, outro tipo de variável de decisão indicando a necessidade de substituição poderá ser usada. Ou seja, se o tempo de acumulado de operação do equipamento não estiver disponível, ou quando for muito difícil convencer a gerência a substituir a unidade atualmente em operação (ou totalmente operável) apenas porque é hora de substituí-la, uma política de substituição um pouco mais convincente deverá ser usada. Por exemplo, uma outra política, que não é baseada na variável decisão 'tempo', a utilizar para reger a decisão de substituição ou reparação equipamentos é o número de reparações mínimas, ou seja, os equipamentos não são substituídos até alcançarem um número previamente determinado de reparações mínimas. A otimização desta política é definida através do número ótimo de reparações mínimas m_1^* . Park (1979) definiu o número ótimo de reparações mínimas para o custo limite $\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{E[C(m_1)]}{t}$ discutido por (Barlow e Hunter 1960), quando o função de intensidade, $\rho(t)$, tem a forma:

$$\rho(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta} \right)^{\beta-1}, \beta > 1 \quad (3.11)$$

Como sendo:

$$m_1^* = \left\lceil \frac{\left[\frac{C_2}{C_1} - 1 \right]}{\beta - 1} \right\rceil + 1 \quad (3.12)$$

4 Proposta de metodologia e análise de resultados

4.1 Introdução

Como referido anteriormente, este projeto desenvolveu-se no DE5, departamento responsável por ações de manutenção e projeto na área da vulcanização. Atualmente, em Lousado, já se pode contabilizar mais de duas centenas de prensas. Estas prensas devido à sua elevada complexidade são constituídas por diversos órgãos dos quais se destacam as válvulas proporcionais e os cilindros hidráulicos. Se a esta informação juntarmos que consoante a tipologia da prensa o facto de esta poder conter duas, quatro ou mesmo seis válvulas proporcionais e oito cilindros hidráulicos realizando ciclos de aproximadamente 10 minutos durante praticamente os 365 dias do ano e, uma vez que, não existem itens com fiabilidade 100%, estamos a lidar com dezenas de órgãos avariados por mês. Além disso, a análise de fiabilidade previamente existente não contabilizava a possibilidade de existência de tendências no surgimento de avarias, uma vez que, era assumido que a taxa de avarias era sempre constante.

Surgiu assim a necessidade de desenvolver uma ferramenta que para além de permitir uma análise de fiabilidade, tendo em conta a existência de tendências no surgimento de avarias, com todos os benefícios anteriormente descritos, permita obter uma maior rastreabilidade dos órgãos e do histórico tanto dos órgãos como o das prensas. Para permitir tais funcionalidades a ferramenta tem de permitir, de uma forma muito intuitiva, adicionar entradas e saídas dos órgãos como também permitir um registo das reparações destes com a devida causa do problema devidamente identificada. Devido à elevada especificidade do problema, desenvolveu-se uma aplicação em Excel com auxílio de programação em Visual Basic, apesar de não ser a aplicação mais estável, muitas das vezes sem alteração do código algumas partes da ferramenta deixam de ficar 100% funcionais, é uma aplicação que nos permite elevada flexibilidade, podendo otimizar a ferramenta consoante todas as particularidades deste projeto.

Já numa fase posterior do projeto, desenvolveu-se uma ferramenta semelhante, mas independente, que é “alimentada” por dados exportados diretamente do SAP. Esta ferramenta está limitada à análise de fiabilidade e centra a sua análise em sistemas e equipamentos.

4.2 Estudo de fiabilidade

Um estudo de fiabilidade eficaz seria impossível sem a recolha, armazenamento, análise, e uso de informações obtidas através da experiência com todos os tipos de componentes, sistemas, máquinas e órgãos. Há assim a necessidade de definir os seguintes parâmetros:

- Que informação recolher;
- Como gravar a informação;
- Como analisar e resumir as informações para condensar grandes quantidades de dados em tabelas, gráficos ou diagramas simples que são facilmente entendidos e usados por todo o pessoal envolvido;
- Como arquivar ou armazenar os dados para fácil recuperação;
- Como usar o conhecimento acumulado contido nos arquivos;
- Quem deve recolher cada tipo de informação.

Infelizmente, não existe um método ou sistema padrão para acumular e registar estes dados. Os princípios básicos são geralmente aplicados pela maioria das empresas e organizações, mas geralmente cada um projeta o seu próprio sistema. O rápido desenvolvimento dos computadores levou a maioria das empresas e organizações a projetar sistemas computadorizados nos quais os dados previamente gravados em formulários de papel, são transferidos para o banco de dados informatizado.

O património mais importante que se adquire com um sistema informatizado de gestão da manutenção é a informação de manutenção que se acumula no sistema e não propriamente o software. Se se aceitar a premissa anterior, a característica mais importante que o software deve possuir é a capacidade para conter a informação de manutenção devidamente estruturada e em formato tecnicamente reconhecível: mais importante do que as habilidades da ferramenta informática é a sua capacidade de acumular informação.

Assim sendo, a primeira tarefa a efetuar terá sempre de ser a de formular uma metodologia para a recolha de dados caso o registo histórico seja inexistente. Na Continental, apesar de já haver algum registo acerca dos cilindros hidráulicos, através da análise da base de dados e também com a comparação do registo de reparação destes detetou-se algumas incongruências. Sugeriu-se então também um método alternativo para recolha destes dados de modo a tentar evitar a premissa de “*garbage in, garbage out*”.

4.2.1 Métrica temporal

O primeiro passo para estabelecer uma metodologia para a criação de um registo histórico passa por definir a métrica temporal. A vida de muitos itens pode ser medida em mais do que uma escala, é por isso importante ter atenção à métrica temporal associada ao seu tempo de funcionamento. Nesse sentido, a escolha do tipo de escala mais adequado para a análise do tempo de funcionamento deverá ter atenção os principais fatores que levam à sua degradação. Por exemplo, os tempos de vida de muitos componentes de aeronaves poderão ser medidos em termos de distância percorrida, se o fator que mais contribui para a sua deterioração é o seu desgaste, uma vez que, estes estão diretamente correlacionados. Neste caso, poderão coexistir outros fatores, como por exemplo, as condições ambientais do meio envolvente e o tipo de utilização. Por outro lado, outros componentes poderão ser medidos em termos de tempo de calendário, se se verificar que o seu principal fator de degradação seja a sua corrosão e, esta manifesta-se de uma maneira geral com o passar do tempo. A vida útil de uma lâmpada é tipicamente medida em termos do número de horas de uso, mas o número de ciclos *on-off* também pode afetar o tempo de vida. Para testes de tempo de vida útil de equipamentos como máquinas de lavar, a métrica temporal usada seria o número de ciclos de funcionamento, mas, geralmente, estes dados não estão disponíveis no dia-a-dia sendo normalmente usados o tempo em serviço.

Em suma, na ferramenta que incide a sua análise em órgãos, optou-se por uma métrica temporal baseada em tempo de calendário, uma vez que, os tempos de funcionamento dos órgãos não estão disponíveis, sendo o registo de data de entrada e data de avaria obtidos com bastante mais facilidade. Regra geral quando se encontram nas prensas, estes órgãos, estão em funcionamento, uma vez que, trata-se de laboração contínua, ou seja, o tempo de funcionamento e o tempo que o órgão se encontra na prensa não são muito distintos, representando assim uma boa aproximação à realidade. Já na ferramenta que permite uma análise direta de dados exportados do SAP, a métrica temporal usada foram horas de funcionamento, pois, é esta a unidade de registo no SAP e visto tratar-se apenas de equipamentos complexos ou sistemas, a taxa de avarias é muito maior, permitindo assim o uso de uma escala menor.

4.2.2 Recolha de Dados

A escolha dos órgãos a codificar requer uma análise cuidadosa, definindo-se *à priori* quais os objetivos que se pretende alcançar com a classificação e posteriori codificação. Nesta fase de seleção é aconselhável escolher aqueles que são suficientemente complexos/dispêndiosos/críticos que se justifica o desenvolvimento de um sistema de registo que permita o seu acompanhamento. Na sua essência, codificar órgãos significará que a cada órgão é atribuído um só código que permanecerá com ele durante o tempo que permanecer na fábrica. O acompanhamento deste tipo de elementos é extremamente complicado visto não

terem uma posição fixa e de serem aplicados em equipamentos diversos. Se qualquer alteração não for anotada o registo perde de imediato a sua validade. Após a definição do sistema de codificação e da atribuição de códigos aos diferentes órgãos, o código para além de ser registado (em formato clássico e posteriormente em suporte digital) deve também ser gravado no órgão para que a identificação seja direta. Desta forma retira-se qualquer dúvida que possa surgir na localização e identificação destes e simplifica a organização e o controlo da manutenção. É também uma forma de remover a possibilidade de ocorrerem erros na identificação (porque a cada órgão está associado um só código). Existem vários métodos de gravar ou afixar os códigos diretamente nos órgãos. Os métodos utilizados foram:

- Fixação de etiquetas – etiquetas em papel autocolante plastificado: têm como desvantagem o facto de se degradarem com facilidade, existe assim a necessidade da criação de tabelas de conversão para não se perderem parte do registo de um órgão (na ferramenta desenvolvida já foi acautelada esta opção). As etiquetas usadas encontram-se representadas na Figura 19.



Figura 19 - Etiqueta para identificação dos cilindros hidráulicos.

- Fixação de placas metálicas – placas que contém o código num formato visível a uma distância considerável. Esta técnica é mais dispendiosa. As chapas usadas encontram-se representadas na Figura 20, bem como o desenho utilizado para pedido de trabalho.

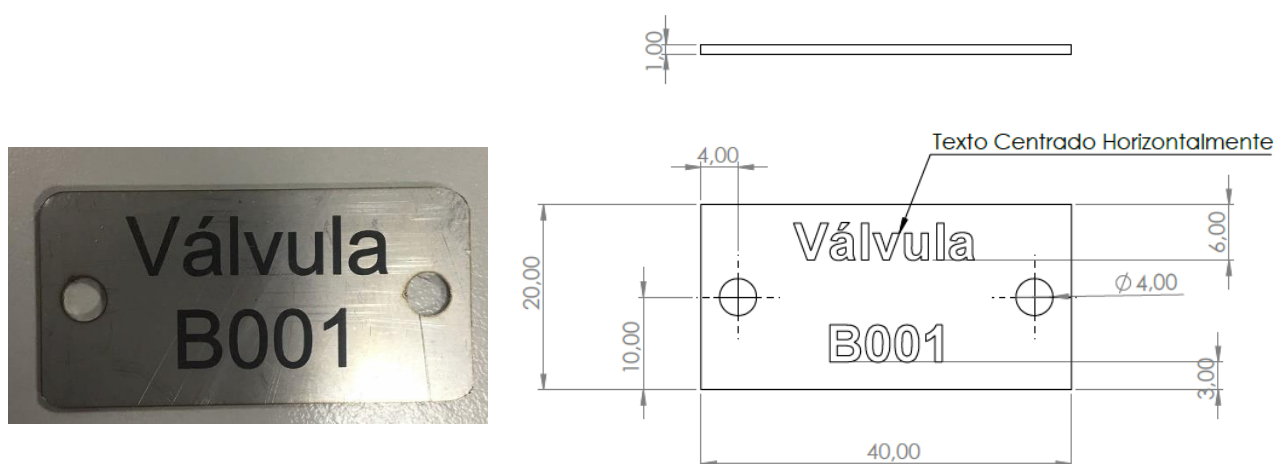


Figura 20 - Chapa para identificação das válvulas.

Após a definição de quais os órgãos a codificar e de como os codificar, há a necessidade de criar mecanismos para se proceder à recolha dos dados. Foram assim criados diversos documentos para recolha dos dados dos diferentes órgãos para serem distribuídos pelas duas equipas de manutenção preventiva e pelos turnos (equipas de manutenção corretiva), uma vez que, estas são as equipas responsáveis pela substituição destes órgãos. Exemplos destes documentos criados podem ser vistos no Anexo F.

4.3 Metodologia

Apresenta-se agora a metodologia adotada que permitirá efetuar uma análise de fiabilidade, diferenciada para sistemas reparáveis e para sistemas não reparáveis, para fundamentadamente, se desencadearem as ações necessárias de forma a diminuir as ocorrências e evitar, se possível, a sua repetição. Com a informação disponibilizada no histórico, pretende-se efetuar um estudo

sobre o desempenho dos equipamentos e respetivos componentes. No prosseguimento deste intento, aplica-se uma metodologia de análise de ocorrências que evidencie alguns aspetos 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 segundo capítulo. Na Figura 21 é possível observar a metodologia adotada para a análise de fiabilidade de equipamentos e componentes respetivamente.

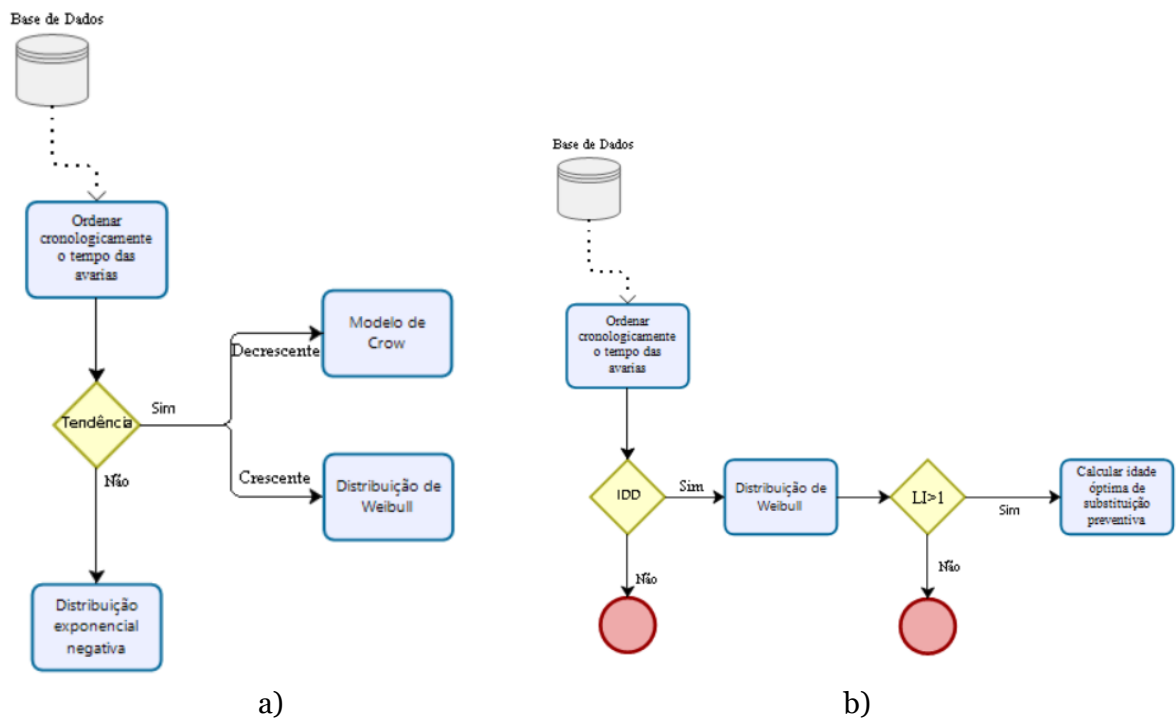


Figura 21 - Metodologia seguida para análise de fiabilidade: a) sistemas reparáveis b) sistemas não reparáveis

4.4 Análise de Resultados

4.4.1 GE_DE5

Como visto anteriormente, esta primeira ferramenta desenvolvida foi desenvolvida com o intuito de uma análise mais centrada nos órgãos. Como é uma ferramenta que no futuro poderá ser usada por outras áreas ou numa oficina de reparações central, existiu a necessidade de desenvolver uma ferramenta flexível, que permita adicionar outros equipamentos/órgãos para análise, bem como o registo da sua entrada/início e/ou saída/paragem de funcionamento e das suas reparações. Um resumo das funcionalidades é possível ser visto no Anexo A. O menu inicial encontra-se representado na Figura 22:



Figura 22 - Menu inicial GE_DE5

Exemplo de fiabilidade constante: Cilindro Hidráulico 80345893

Como referido no capítulo 2, para um teste bilateral, a um nível de significância de 5%, se a ET se encontrar no intervalo entre $[-1.96, 1.96]$, não existem evidências estatísticas que suportem a rejeição da hipótese nula, o teste revela-se inconclusivo, pelo que se admite que a taxa de avarias seja constante. Nesta situação é viável prever o comportamento fiabilístico do equipamento pela distribuição exponencial negativa, dado que se espera que as avarias, num espaço amostral contínuo sejam IID, constituindo, portanto, um processo de Poisson homogéneo. Como se pode observar na Figura 23, para o período em análise, o tipo de órgão em causa apresenta um tempo de funcionamento de 17972 dias. Durante esse período há o registo de 26 avarias, resultando

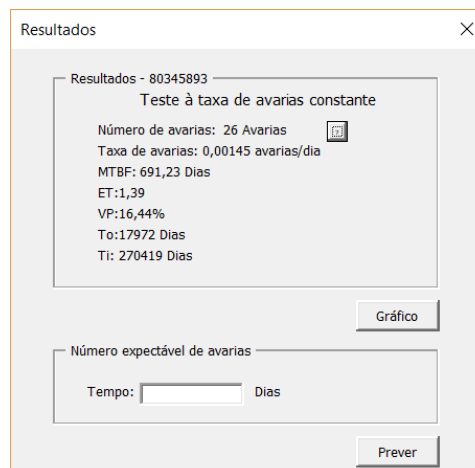


Figura 23 - Resultados do teste à taxa de avarias constante

assim num MTBF de aproximadamente 691 dias. Nesta situação, através da aplicação da distribuição exponencial negativa e da leitura do gráfico ilustrado da Figura 24, poderemos inferir que:

- A probabilidade de funcionar ao fim de 250 dias de trabalho é aproximadamente 70%.
- A probabilidade de avaria após 2000 dias de trabalho é praticamente 100%.

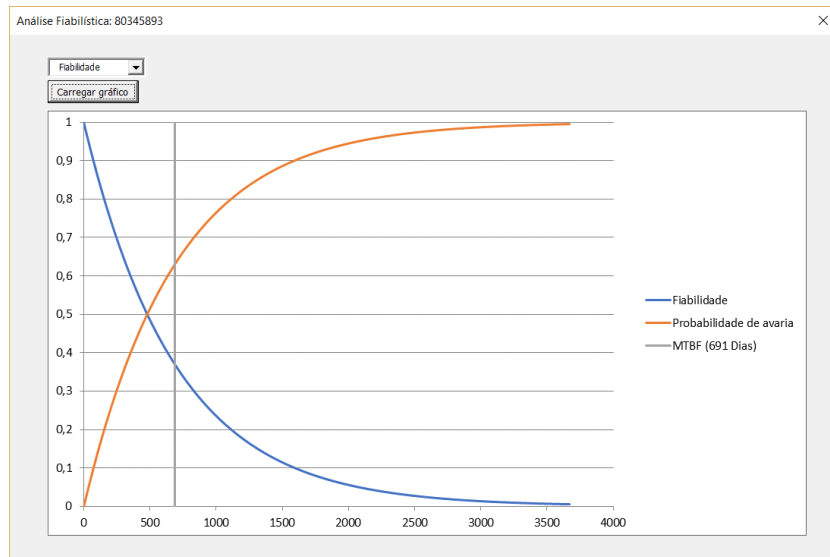


Figura 24 - Variação da fiabilidade com o tempo.

Assim sendo, uma vez que, a taxa de avarias é constante, os acontecimentos num espaço amostral contínuo esperam-se aleatórios, ou seja, a probabilidade de X avarias para um determinado período pode ser calculada pela distribuição de Poisson (Figura 25). Por exemplo para $t=400$ dias:

- $P(\text{zero avarias}) = 56\%$;
- $P(\text{uma avaria}) = 32\%$;
- $P(\text{duas avarias}) = 9\%$.

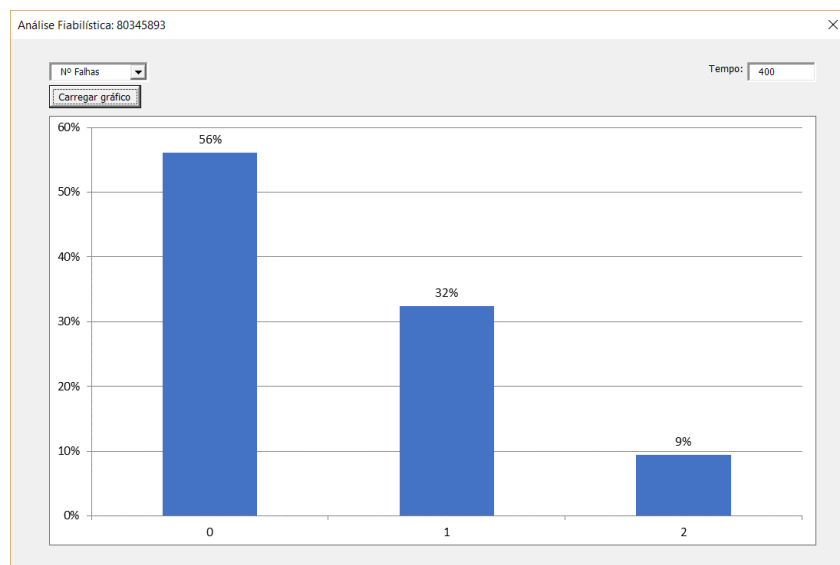


Figura 25 - Probabilidade de ocorrerem X avarias num período t definido.

Como é possível observar no Anexo B todos os testes de Laplace possíveis de realizar para cilindros hidráulicos deram como resultado taxa de avarias constante e, uma vez que, para as válvulas proporcionais não se conseguiram obter um número de dados significativos para retirar conclusões. Resta para esta ferramenta, na vertente de sistemas reparáveis, apresentar alguns indicadores de manutenção utilizados. Recordando a especificidade dos órgãos facilmente se conclui que indicadores como o MTTR ou a disponibilidade não fazem sentido de analisar para este tipo de itens.

Assim sendo, optou-se por criar um formulário que permite ao utilizador seleccionar o órgão que pretende analisar e qual a análise pretende fazer. Por exemplo o utilizador pode obter os diferentes MTBF's para um tipo de órgão (Figura 26), ou as máquinas/números de série mais problemáticos (Anexo A).

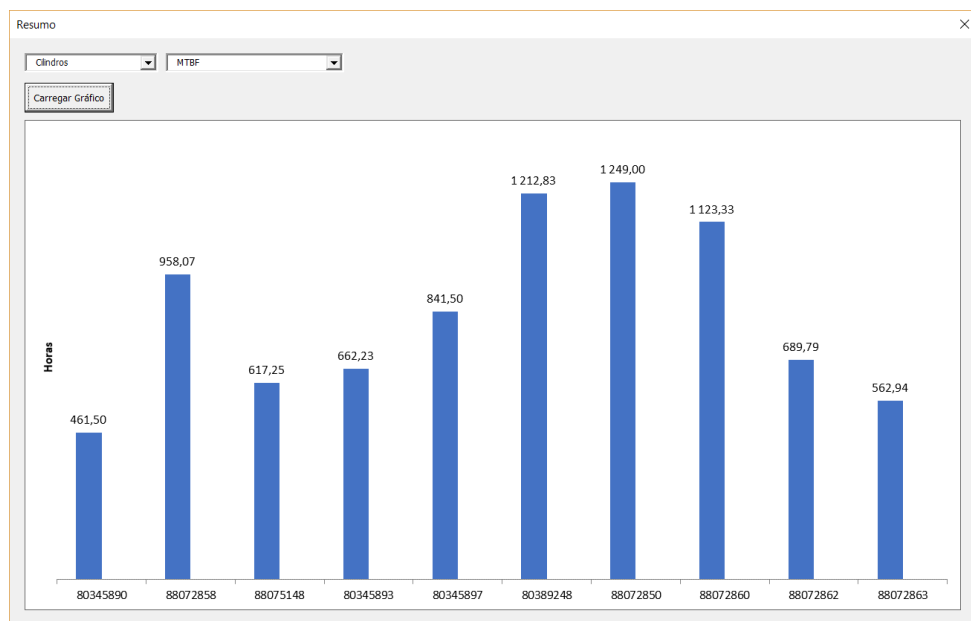


Figura 26 - MTBF's dos diferentes tipos de cilindros.

Sistemas não reparáveis:

Sistema não reparável com tempos entre avarias IID e função de risco crescente

Quando a ET se encontra no intervalo entre $[-1.96, 1.96]$, para um nível de significância de 5%, não existem evidências estatísticas que suportem a rejeição da hipótese nula, ou seja, o teste revela-se inconclusivo, pelo que se admite que as avarias são IID, logo são provenientes de um processo de Poisson homogêneo.

Para avaliar a eventual necessidade de substituição preventiva deste componente (Figura 27) 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.

Nº Registo Avarias	ET	V.Prova	Resultado	MTTF
68	0,53	59,33%	IID. Função risco crescente	694,924

Figura 27 - Componente com função de risco crescente.

Como é possível observar na Figura 28 o valor de $LI > 1$. Assim, após se verificar que a função de risco é de facto crescente, há a necessidade de definir um custo para o custo de falha e de substituição preventiva de modo a obter-se o tempo ótimo de substituição preventiva – ou seja, aquela periodicidade que minimiza os custos de manutenção.

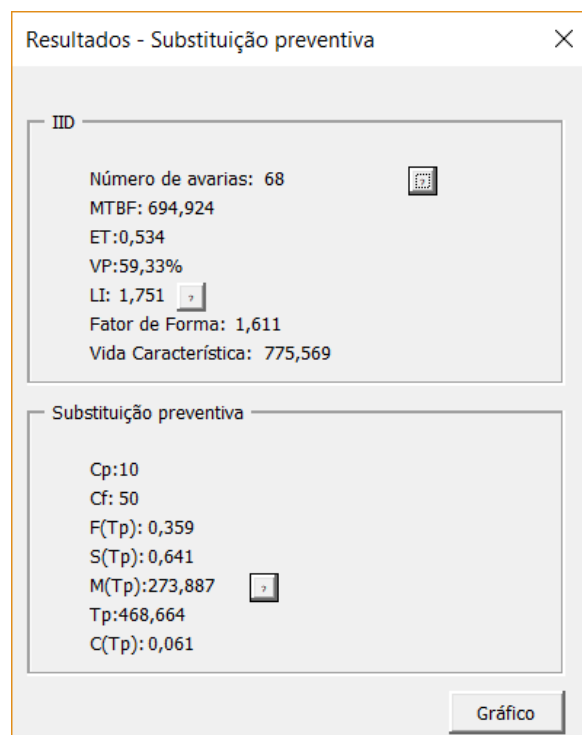


Figura 28 - Resultados obtidos para a substituição preventiva.

Uma vez conhecidas as estimativas dos parâmetros da distribuição de Weibull, é viável prosseguir para a estimação da fiabilidade, obtendo-se o gráfico da Figura 29:

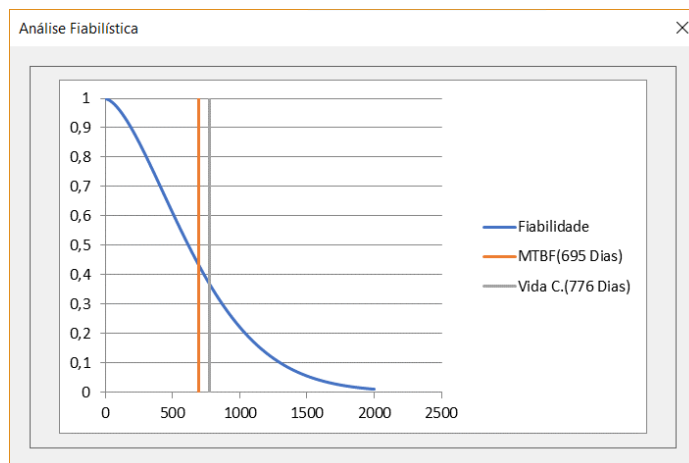


Figura 29 - Variação da fiabilidade com o tempo de um componente com função de risco crescente

Pela análise deste gráfico é possível inferir as seguintes propriedades:

- A Probabilidade de funcionar ao fim de 500 dias de trabalho é aproximadamente 60%.
- A Probabilidade de falha ao fim de 1800 dias de trabalho é praticamente 100%.

Sistema não reparável com tempos entre avarias IID e função de risco não crescente

Pela observação da Figura 30 verifica-se o pressuposto IID ($ET=0.81$) pelo que é viável prosseguir-se para o cálculo dos parâmetros do modelo de Weibull.

Nº Registo Avarias	ET	V.Prova	Resultado	MTTF
21	0,81	41,94%	IID. Não existem evidências estatísticas de uma função de risco crescente	2467,73

Figura 30 - Componente com tempos entre avarias IID.

Após efetuar teste de hipóteses à função de risco crescente, constata-se que não existem evidências estatísticas de esta ser crescente, como é possível observar na Figura 31. Conclui-se assim que a substituição preventiva não se repercutirá em ganhos adicionais.

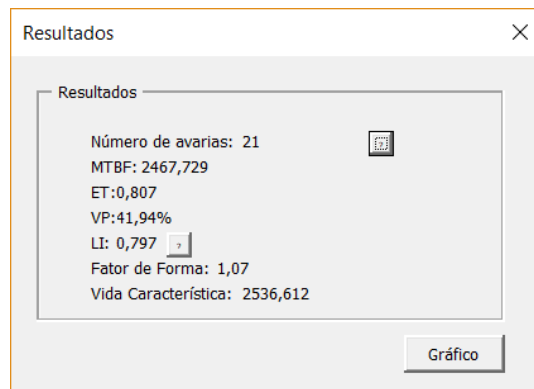


Figura 31 - Resultados de componente com função de risco não crescente

Uma vez conhecidas as estimativas dos parâmetros da distribuição de Weibull, a estimativa da fiabilidade pode ser observada através do gráfico da Figura 32:

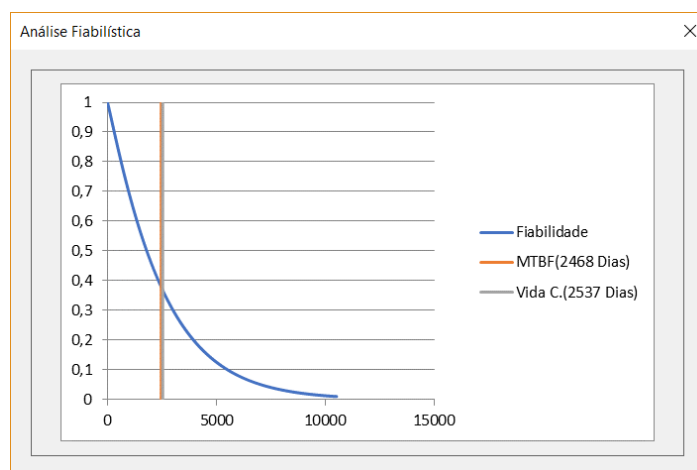


Figura 32 - Variação da fiabilidade com o tempo de um componente com função de risco não crescente

A partir desse gráfico podemos inferir as seguintes propriedades:

- A probabilidade de funcionar ao fim de 2500 dias de trabalho é de aproximadamente 40%.
- A probabilidade de falha ao fim de 8000 dias de trabalho é praticamente 100%.

4.4.2 GE_SAP

Apresenta-se agora a ferramenta desenvolvida para fazer uma análise fiabilística de dados provenientes do SAP. Dada a especificidade dos equipamentos aqui tratados, indicadores como

MTTR e a disponibilidade já serão analisados. Para inicializar a análise fiabilística nesta ferramenta, basta apenas fazer *Reset*, caso alguma análise já tenha sido feita, e importar a base de dados das avarias, proveniente do SAP, para o período pretendido. Na Figura 33 é possível observar o menu inicial:



Figura 33 - Menu inicial GE_SAP

Um exemplo de fiabilidade crescente: 820P-FFI-TUM-LU22

Sempre que o valor da ET obtido pela aplicação do teste de Laplace seja francamente negativo, -2.61 neste caso, para um nível de significância de 5%, o teste revela-se formalmente conclusivo. Dado que a hipótese alternativa é validada pelo teste, conclui-se que a taxa de avarias é 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 atual de funcionamento 7935h. Durante esse período foi sujeito a 34 intervenções. Confirmada esta tendência procede-se à aplicação do modelo de Crow para estimar o valor da taxa de avarias, tendo-se estimado um valor para o fator de crescimento da fiabilidade de 45%. Os restantes resultados podem ser observados na Figura 34:

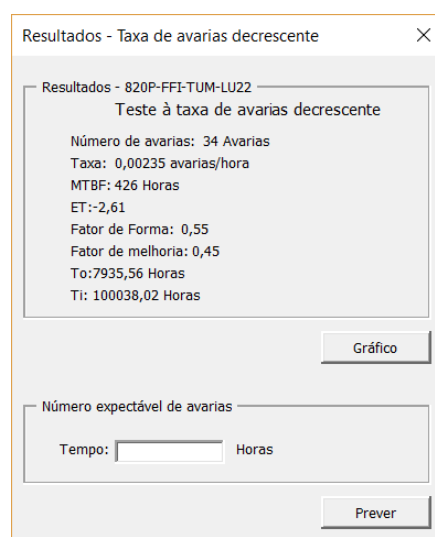


Figura 34 - Resultados do teste à taxa de avarias decrescente.

Como referido no capítulo 2, no caso de a taxa de avarias ser decrescente a fiabilidade pode ser apresentada graficamente pela distribuição exponencial negativa. Assim, a fiabilidade do sistema 820P-FFI-TUM-LU22 é representada pelo gráfico da Figura 35:

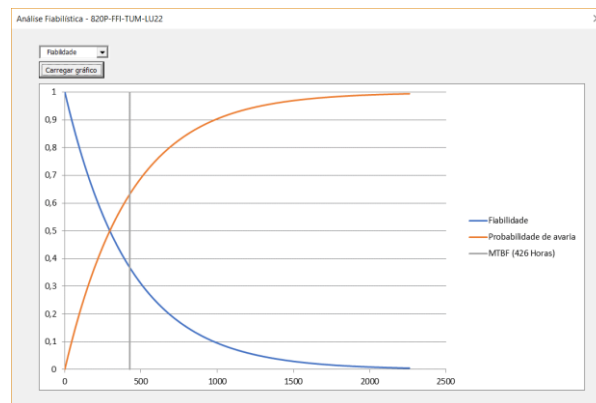


Figura 35 - Variação da fiabilidade com o tempo no sistema em análise

A partir desse gráfico podemos inferir as seguintes propriedades:

- A probabilidade de funcionar ao fim de 250 horas de trabalho é de aproximadamente 60%.
- A probabilidade de falha ao fim de 1500 horas de trabalho é praticamente 100%.

Outra funcionalidade desta ferramenta é a de permitir uma rápida observação da listagem de avarias, ordenadas cronologicamente, como se pode observar na Figura 36.

Sistema: 820P-FFI-TUM-LU22			Resumo
Data de Avaria	Equipamento	Tempo de Reparação	
06/01/2018	PLC / Visualização	10,2 Minutos	
06/01/2018	PLC / Visualização	10,2 Minutos	
06/01/2018	Sistema medição TG	19,8 Minutos	
07/01/2018	Sistema medição TU	19,8 Minutos	
07/01/2018	Sistema medição TU	19,8 Minutos	
07/01/2018	Sistema medição TU	15 Minutos	
07/01/2018	Sistema medição TU	19,8 Minutos	
07/01/2018	Sistema medição TU	30 Minutos	
29/01/2018	Sistema medição TG	19,8 Minutos	
04/02/2018	Sistema medição TG	10,2 Minutos	
04/02/2018	Sistema medição TG	19,8 Minutos	
26/02/2018	Controlo electrónico/eléctrico	10,2 Minutos	
27/02/2018	PLC / Visualização	10,2 Minutos	
07/03/2018	Sistema medição TG	10,2 Minutos	
10/03/2018	Sistema medição TG	19,8 Minutos	
14/03/2018	Sistema medição TG	19,2 Minutos	
23/03/2018	Sistema medição TG	22,8 Minutos	
17/04/2018	PLC / Visualização	19,8 Minutos	
03/05/2018	Sistema medição TU	7,8 Minutos	
11/05/2018	Controlo electrónico/eléctrico	18,6 Minutos	
10/06/2018	Sistema medição TG	0 Minutos	
18/06/2018	Controlo electrónico/eléctrico	18,6 Minutos	
21/06/2018	PLC / Visualização	13,8 Minutos	
28/06/2018	Sistema medição TG	16,8 Minutos	
05/07/2018	Sistema medição TG	19,8 Minutos	
06/07/2018	Controlo electrónico/eléctrico	18,6 Minutos	
21/07/2018	Sistema medição TG	58,2 Minutos	
28/07/2018	Sistema medição TG	16,2 Minutos	
30/09/2018	Sistema medição TG	0 Minutos	
06/11/2018	PLC / Visualização	10,2 Minutos	
09/11/2018	Elementos comuns	19,8 Minutos	
09/11/2018	Sistema medição TG	21 Minutos	
22/11/2018	Sistema medição TG	10,2 Minutos	
23/11/2018	Sistema medição TG	10,2 Minutos	

Figura 36 - Registo cronológico de avarias sistema em análise

Após observação da listagem das avarias num sistema especificado, apenas carregando no botão “Resumo”, é nos fornecido os equipamentos que mais influenciaram a ocorrência de avarias no sistema especificado. Também os valores do número total de avarias, MTBF e MTTR para o sistema em análise nos serão fornecidos como se observa na Figura 37:

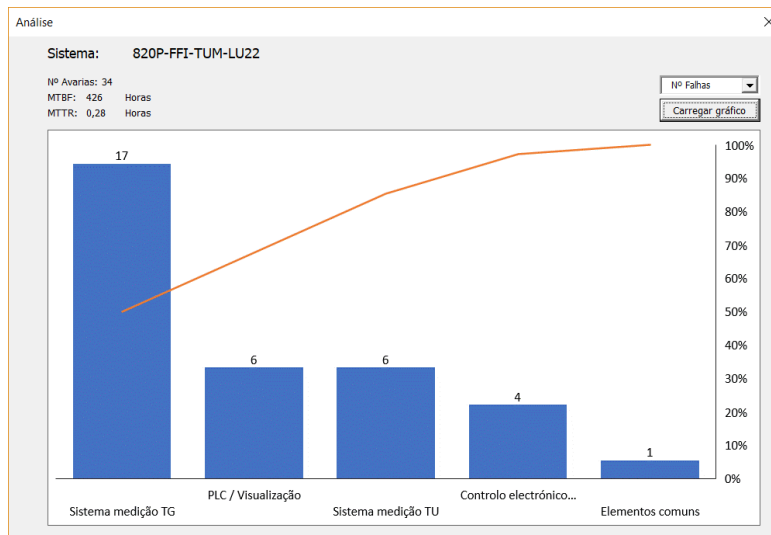


Figura 37 – Registo de avarias nos diferentes equipamentos do sistema em causa

A análise de Pareto, relativa às causas de avaria no sistema em análise, destaca como equipamento com maior número de avarias o “Sistema medição TG”, ao qual correspondem 50% das avarias. Em sentido contrário, os “Elementos comuns” representam apenas 3% das avarias. Na Figura 38 é possível observar o MTTR para cada tipo de equipamento:

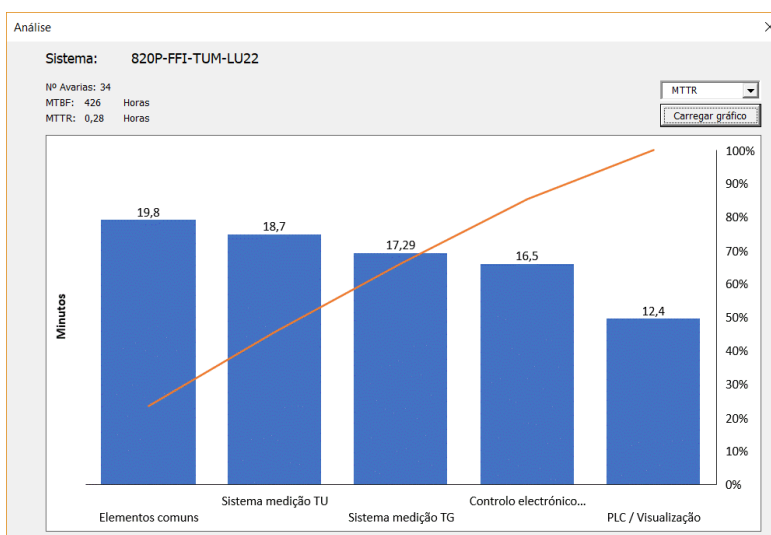


Figura 38 - MTTR dos diferentes equipamentos no sistema em análise.

Como é possível observar da análise das Figuras 37 e 38 os “Elementos comuns” apesar de serem o equipamento com o menor número de avarias é o que apresenta um maior MTTR. Ainda assim, conclui-se que o “Sistema medição TG” é aquele que mais condiciona a disponibilidade do sistema.

Todas estas funcionalidades também são permitidas no caso de pretendemos que a análise seja feita do ponto de vista dos equipamentos. Nesse caso, a análise será feita por tipo de equipamento independentemente do sistema em que esteja incluído.

Um exemplo de fiabilidade constante: 820P-FFI-BAL-BAL04

Num teste bilateral, a um nível de significância de 5%, se a ET se encontrar no intervalo entre $[-1.96, 1.96]$, não existem evidências estatísticas que suportem a rejeição da hipótese nula, o teste revela-se inconclusivo, pelo que se admite que a taxa de avarias seja constante. Nesta situação é viável prever o comportamento fiabilístico do equipamento pela distribuição exponencial negativa, dado que se espera que as avarias, num espaço amostral contínuo sejam IID, constituindo, portanto, um processo de Poisson homogéneo. Como se pode observar na Figura 39, para o período em análise, o sistema em análise apresenta um tempo de funcionamento de 7935 horas. Durante esse período há o registo de 37 avarias, resultando assim

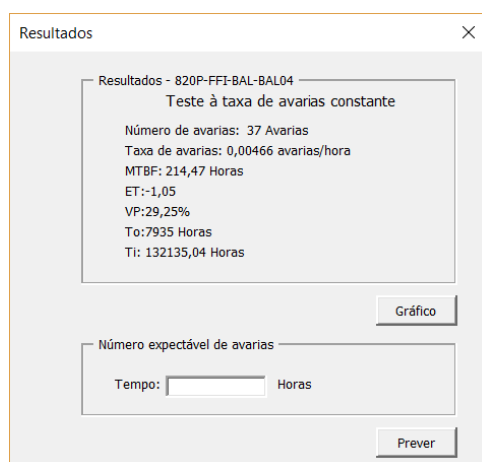


Figura 39 - Resultados teste à taxa de avarias constante.

num MTBF de aproximadamente 214 horas. Nesta situação, através da aplicação da distribuição exponencial negativa e da leitura do gráfico ilustrado na Figura 40, poderemos inferir que:

- A probabilidade de funcionar ao fim de 100 horas de trabalho é aproximadamente 60%.
- A probabilidade de avaria após 800 horas de trabalho é praticamente 100%.

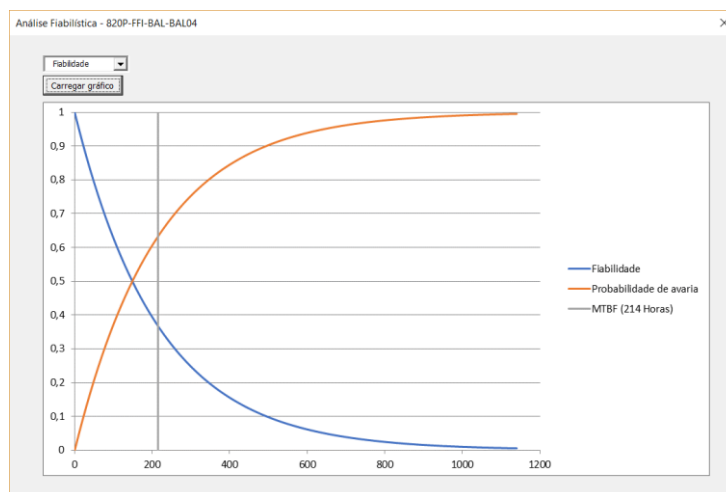


Figura 40 - Variação da fiabilidade com o tempo para o sistema 820P-FFI-BAL-BAL04

Assim sendo, uma vez que, a taxa de avarias é constante, os acontecimentos num espaço amostral contínuo esperam-se aleatórios, ou seja, a probabilidade de X avarias para um determinado período pode ser calculada pela distribuição de Poisson (Figura 41). Por exemplo para $t=100$ horas:

- $P(\text{zero avarias}) = 63\%$;
- $P(\text{uma avaria}) = 29\%$;
- $P(\text{duas avarias}) = 7\%$.

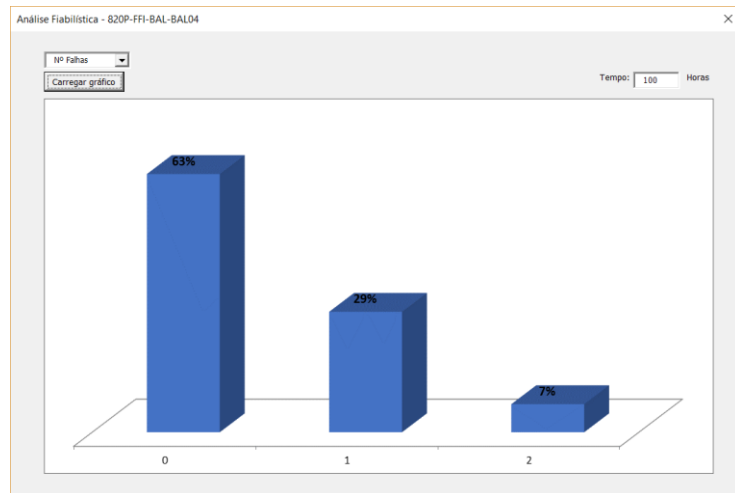


Figura 41 - Probabilidade de ocorrerem X avarias num período t definido para o sistema 820P-FFI-BAL-BAL04

Indicadores de *performance* de manutenção

Ao contrário da ferramenta anterior dá-se a possibilidade ao utilizador, após escolher se pretende uma análise na ótica dos sistemas ou equipamentos, de obter indicadores de *performance* como o MTTR e a disponibilidade. Já o MTBF e os equipamentos/sistemas também são possíveis de obter, mas, esses indicadores já são comuns às duas ferramentas. Na Figura 42 é possível observar, por exemplo o MTTR de todos os sistemas presentes na base de dados. Do gráfico da Figura 42 é possível inferir que o MTTR mais preocupante é o do sistema 820P-SEL-LAS-LAS01 com um tempo médio de reparação de 18.42 horas.

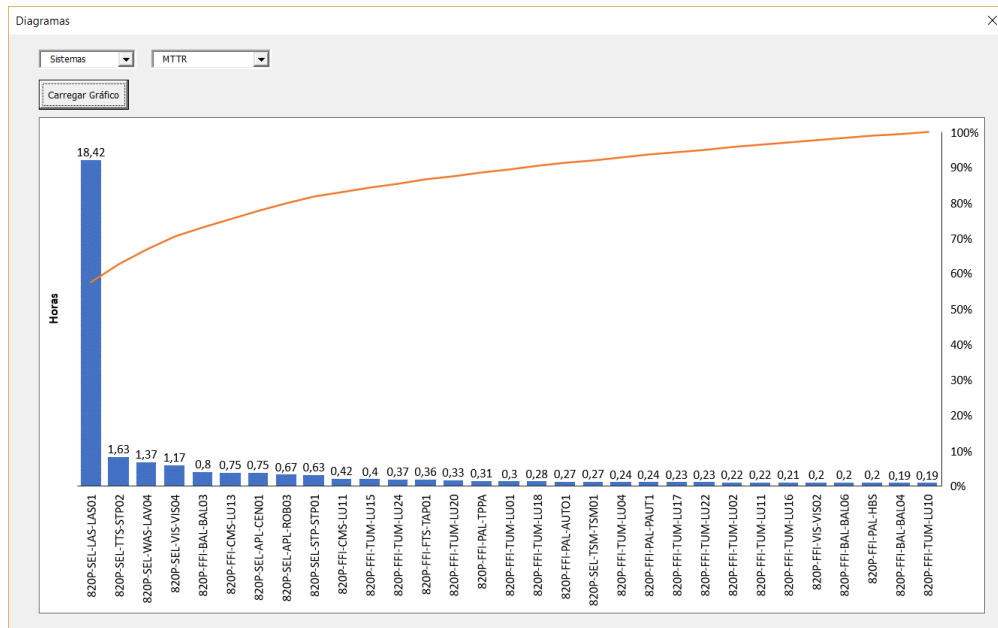


Figura 42 - MTTR dos vários sistemas.

5 Conclusões e perspectivas de trabalho futuro

Os processos que se destinam a definir as melhores políticas de manutenção no sentido de assegurar uma maior eficiência e um controlo adequado de equipamentos e componentes, dependem, como visto anteriormente, significativamente da informação recolhida do histórico de avarias e reparações. Esta informação, depois de transformada em indicadores de fiabilidade, permite obter um retrato da realidade de uma forma intuitiva, ou seja, se este conhecimento obtido for devidamente utilizado, pode contribuir para um acréscimo do desempenho do departamento da manutenção. Tal melhoria irá se refletir nos resultados do processo produtivo e consequentemente na geração de riqueza para a empresa. Uma vez que, o registo histórico ou era inexistente ou a informação recolhida apresentava vários tipos de incongruências, frequentemente, com situações de falta de dados, incompleta ou até mesmo incorreta. A informação através da qual iríamos emitir apreciações não seria integralmente fidedigna exortando que os resultados mostrados poderiam não representar a realidade de forma inteiramente fiel. Para que os resultados obtidos possam proporcionar algumas contribuições válidas para a tomada de decisões, é imprescindível dispor de informação suficientemente abrangente e colecionada de forma homogênea e criteriosa. Só por esta via será possível tecer considerações consistentes e precisas acerca dos eventos ocorridos bem como elaborar previsões válidas. Surgiu, portanto, a necessidade de conceber uma metodologia para se proceder à recolha, tratamento e análise de dados de fiabilidade ao longo do tempo – para que futuramente, o estudo delineado reflita de forma verosímil quais as debilidades existentes, uma vez que através de tal conhecimento será possível definir as políticas convenientes a empreender com o intuito de reduzir as avarias indesejadas. Uma de tais práticas a sugerir consiste em proceder à reparação ou substituição de um órgão sendo imprescindível, portanto, dispor de informação fiável. Ainda assim, foi desde já possível obter algumas conclusões, mas só com o passar do tempo se perceberá quais os reais benefícios da implementação desta metodologia.

Para finalizar, não faria sentido deixar de fora um aspeto sem dúvida crucial em todos os domínios da gestão industrial que são os custos inerentes às diferentes atividades diariamente empreendidas. No contexto deste trabalho, num serviço de manutenção aprimorado, será relevante sintonizar decisões que considerem conhecimento sobre os custos provenientes das atividades de manutenção, não só dos derivados da necessidade de manter as características técnicas e da disponibilidade dos sistemas dentro dos parâmetros aceitáveis, como também, de apoio à decisão de reparação vs substituição. 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, bem como do número ótimo de órgãos. 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 efetuar um planeamento rigoroso, requerem-se, também, informações acerca dos parâmetros de reaprovisionamento - ponto de encomenda e quantidade a encomendar – a adotar 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. Assim sendo, um

trabalho futuro a realizar teria o intuito de se proceder ao apuramento de indicadores relacionados com os custos da manutenção, devendo-se, neste âmbito, proceder à sua definição, identificação, classificação e respetiva análise.

Referências

- Ascher, H., e H. Feingold. 1984. *Repairable systems reliability: modeling, inference, misconceptions and their causes*. Marcel Dekker.
- Assis, Rui. 1997. *Manutenção centrada na fiabilidade*. Lisboa: LIDEL-Edições Técnicas, Lda.
- . 2004. *Apoio à decisão em gestão de manutenção : fiabilidade e manutenibilidade*. Editado por Cop LIDEL-Edições Técnicas. Lisboa.
- Barlow, Richard, e Larry Hunter. 1960. «Optimum Preventive Maintenance Policies». *Operations Research* 8 (1): 90–100. <https://doi.org/10.1287/opre.8.1.90>.
- «British Standards Institution . Quality Vocabulary. BS4778». 1991. London.
- Cabral, J S. 2004. *Organização e gestão da manutenção: dos conceitos à prática...* 4ª ed. LIDEL. <https://books.google.pt/books?id=j-N0PgAACAAJ>.
- Condra, L.W. 1993. *Reliability Improvement with Design of Experiments*. Second. New York: Marcel Dekker, Inc.
- Continental. sem data. «Intranet - Continental - A Continental Mabor». Acedido 14 de Junho de 2019a. <http://continimaboronline/gca/?id=38>.
- . sem data. «Intranet - Continental - O Grupo Continental». Acedido 14 de Junho de 2019b. <http://continimaboronline/gca/?id=405>.
- Guimarães, Rui Campos., e José A. Sarsfield. Cabral. 2007. *Estatística*. McGraw-Hill, Interamericana de España.
- Kumar, U. Dinesh, John Crocker, J. Knezevic, e M. El-Haram. 2000. *Reliability, Maintenance and Logistic Support*. Boston, MA: Springer US. <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-4655-9>.
- Leitão, A.F. 1999. *Curso de Mestrado em Engenharia Industrial, Universidade do Minho. Sebenta de apoio*.
- Leitão, Armando, Bernardo Lobo, e Luis Guimarães. 2018. «Asset Management».
- Lopes, Isabel, e Armando Leitão. 2003. «Determinação do número óptimo de equipamentos de reserva e período óptimo de revisão para um conjunto de equipamentos». *Investigação Operacional* 23: 35–48.
- Mann, N R, R E Schafer, e N D Singpurwalla. 1974. *Methods for statistical analysis of reliability and life data*. Wiley Series in Probability and Statistics - Applied Probability and Statistics Section. Wiley. <https://books.google.pt/books?id=yfdTAAAAMAAJ>.
- Modarres, M. (Mohammad). 1993. *What every engineer should know about reliability and risk analysis*.

- Modarres, Mohammad., Mark P. Kaminskiy, e Vasiliy. Krivtsov. 2017. *Reliability engineering and risk analysis : a practical guide*. Third.
- Monchy, F. 2003. *La fonction maintenance*. Collection Technologies. Paris: Masson. <https://books.google.pt/books?id=s9hNvwEACAAJ>.
- O'Connor, Patrick D.T., e Andre Kleyner. 2011. *Practical Reliability Engineering: Fifth Edition*. *Practical Reliability Engineering: Fifth Edition*. <https://doi.org/10.1002/9781119961260>.
- Park, Kyung S. 1979. «Optimal Number of Minimal Repairs before Replacement». *IEEE Transactions on Reliability* R-28 (2): 137–40. <https://doi.org/10.1109/TR.1979.5220523>.
- Paulo, António Júlio Marques. 1999. «Aplicação Informática de Técnicas Quantitativas e Fiabilísticas a Históricos de Avarias de Equipamentos Industriais». Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Peito, Francisco José Basílio Pimentel Pires. 2014. «A Simulação como Ferramenta de Apoio à Decisão em Sistemas de Manutenção». Universidade do Minho.
- Pinto, Carlos Varela. 1999. *Organização e gestão da manutenção*. 1ª ed. Lisboa: Monitor.
- Rausand, Marvin, e A Hoyland. 2004. *System Reliability Theory: Models, Statistical Methods, and Applications (2nd Edition)*. John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1109/WESCON.1996.554026>.

ANEXO A: Funcionalidades

- Registo de operações (Entrada em Funcionamento/Avaria) de equipamentos.
- Registo de reparações.
- Pesquisa por Nº Série para obter histórico completo do equipamento (registo cronológico de avarias com localização e motivo da avaria bem como informação acerca do estado atual do equipamento).
- Pesquisa por Máquina para obter histórico completo (registo cronológico de avarias com indicação de qual equipamento avariou, motivo da avaria bem como informação acerca de quais os equipamentos atualmente presentes na máquina).
- Possibilidade de adicionar novos órgãos para análise.

Análise:

Sistemas reparáveis:

- Registo cronológico das avarias ocorridas por tipo de equipamento.
- Teste de Laplace (verificar se taxa de avarias é crescente, decrescente ou constante).
- Cálculo da taxa de avarias e do MTBF, tendo em conta se a taxa de avarias é crescente, decrescente ou constante.
- Análise gráfica da fiabilidade.
- Aplicação da distribuição de Poisson (caso taxa de avarias seja constante ou tida como constante).
- Análise de Pareto (identificando os sistemas/equipamentos/órgãos que avariaram com mais frequência).
- Determinação do número expectável de avarias para um determinado período.

Sistemas não reparáveis:

- Registo cronológico das avarias por componente.
- Teste Laplace (verificar se as avarias são ou não IID)
- Aplicação da distribuição de Weibull (caso as avarias sejam IID) e determinação da vida característica, fator de forma e média.
- Teste de hipóteses à função de risco crescente (caso as avarias sejam IID)
- Determinação da idade ótima de substituição preventiva (caso as avarias sejam IID e haja evidências estatísticas de função de risco crescente).
- Análise gráfica da fiabilidade.
- Análise de Pareto (verificar quais os componentes cuja frequência de avarias é maior).

Adicionar Operação - Cilindros

Data: 06/06/2019 Máquina: A04

Equipamento Entra Ex: C-094

Cilindro: 88072866 Nº Série: C-1893

Designação: CILINDRO DO MOLDE SEGMENTADO(COMPLETO)

Equipamento: SMO

Tipo de máquina: BOM

Equipamento Sai

Cilindro: 88072866 Nº Série: C-1050

Designação: CILINDRO DO MOLDE SEGMENTADO(COMPLETO)

Equipamento: SMO

Tipo de máquina: BOM

Adicionar Fechar

Figura 43 - Registo de operações

Adicionar Reparação

Data: 06/06/2019

Equipamento

Cilindro: 80086688 Nº Série: C-1893

Designação: CIL:HID;N85-F13-0301-A1

Equipamento: Carregador

Tipo de máquina: MHI S7

Material Substituído

☒ Haste ☐ Bronze ☐ KIT

Adicional

Estado dos Vedantes: Bons

Estado do Óleo: Mau

Comentários:

Reparação anterior: C-027

Adicionar Fechar

Figura 44 - Adicionar registo de reparação

Pesquisa por Nº Série - Cilindros

Nº Série: C-858 Código: 80345893

Designação: CIL:HID;S1-90/63X250 K

Equipamento: SMO

Máquina: KRUPP 52"

Máquina	Data de Entrada	Data de Avaria	Tempo de funcionamento	Problema
R15	10/11/2017	17/04/2018	158 Dias	Bronze
S23	18/04/2018	30/01/2019	287 Dias	KIT
S26	14/02/2019	-	(126 Dias)	

Figura 45 - Pesquisa histórico através do número de série

Pesquisa por máquina - Cilindros

Máquina: 109

Nº Série	Equipamento	Data de Entrada	Data de Avaria	Tempo de funcionamento	Problema
C-253	M. Central	17/06/2017	21/02/2018	249 Dias	Bronze
C-697	Coluna/SMO	31/05/2017	12/11/2018	530 Dias	Bronze
C-127	Abertura/Fecho	12/11/2018	-	Em funcionamento	
C-250	M. Central	21/02/2018	-	Em funcionamento	

Figura 46 - Pesquisar por Prensa

Adicionar Equipamento

Nome:

Nº modos falha: 3

Modos de falha

1:

2:

3:

Confirmar

Figura 48 - Adicionar novo equipamento para análise

Teste Laplace - Cilindros

Equipamento

Cilindro: 80345893 MTBF's

Designação: CIL:HID;S1-90/63X250 K

Equipamento: SMO

Tipo de máquina: KRUPP 52"

Teste

☒ Teste à taxa de avarias constante

☐ Teste à taxa de avarias crescente

☐ Teste à taxa de avarias decrescente

H0: Taxa de avarias constante

H1: Taxa de avarias não constante

Ok

Figura 47 - Teste de Laplace

Máquina	Número de Série	Data de Entrada	Data de Avaria	Tempo de funcionamento
Q35	C-685	27/11/2017	26/01/2018	60 Dias
S27	C-082	25/10/2017	20/02/2018	118 Dias
R15	C-858	10/11/2017	17/04/2018	158 Dias
O21	C-389	02/02/2018	26/04/2018	83 Dias
R30	C-684	14/09/2017	08/05/2018	236 Dias
S/reg	C-684	22/05/2018	25/06/2018	34 Dias
S27	C-685	20/02/2018	31/07/2018	161 Dias
R19	C-684	26/06/2018	03/09/2018	69 Dias
M02	C-685	16/09/2018	15/10/2018	29 Dias
S18	C-684	07/10/2018	26/10/2018	19 Dias
S25	C-731	07/07/2017	27/11/2018	508 Dias
T23	C-754	01/02/2018	05/12/2018	307 Dias
S/reg	C-801	01/12/2018	10/01/2019	40 Dias
T21	C-748	04/12/2018	29/01/2019	56 Dias
S23	C-858	18/04/2018	30/01/2019	287 Dias
S16	C-866	24/04/2017	06/02/2019	653 Dias
S17	C-521	23/05/2018	07/02/2019	260 Dias
S26	C-867	16/03/2018	13/02/2019	334 Dias
S27	C-380	01/08/2018	18/02/2019	201 Dias
R24	C-945	29/03/2018	26/03/2019	362 Dias
R30	C-944	09/05/2018	26/03/2019	321 Dias
R34	C-953	05/07/2018	27/03/2019	265 Dias
R33	C-952	26/05/2017	27/03/2019	670 Dias

Figura 51 - Histórico de falhas por tipo de órgão

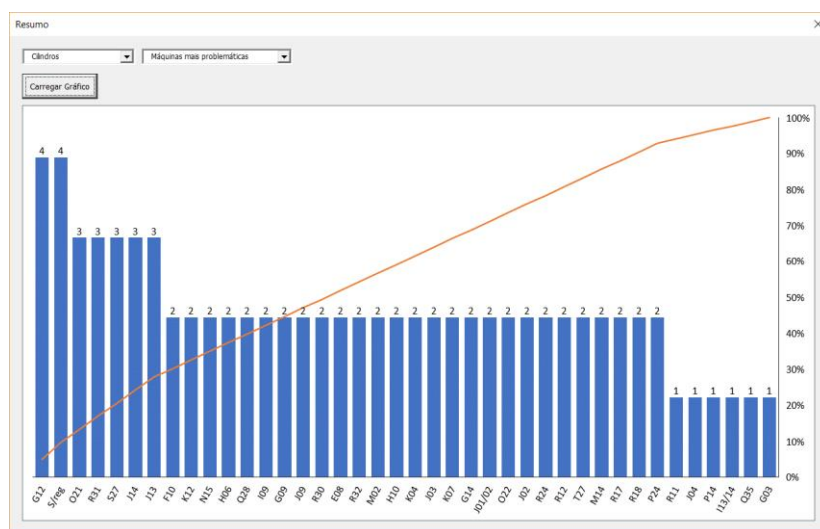


Figura 50 - Análise de Pareto - Prensas mais críticas

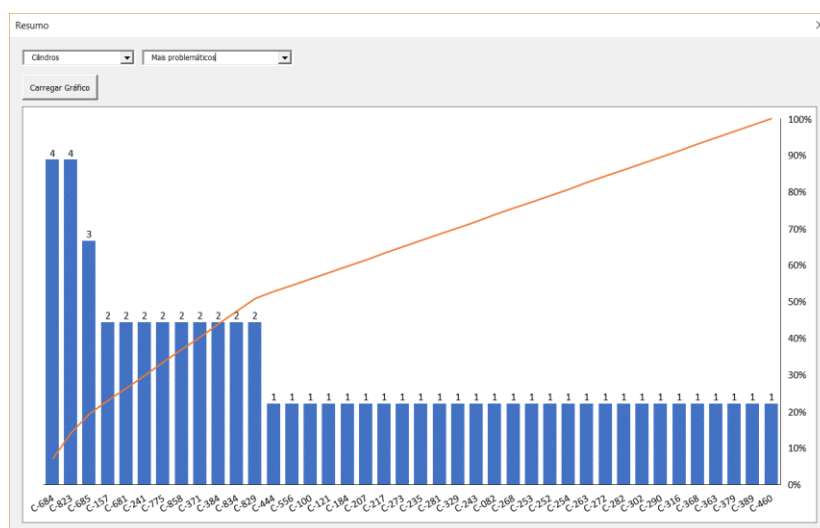


Figura 49 - Análise de Pareto - Cilindros mais críticos

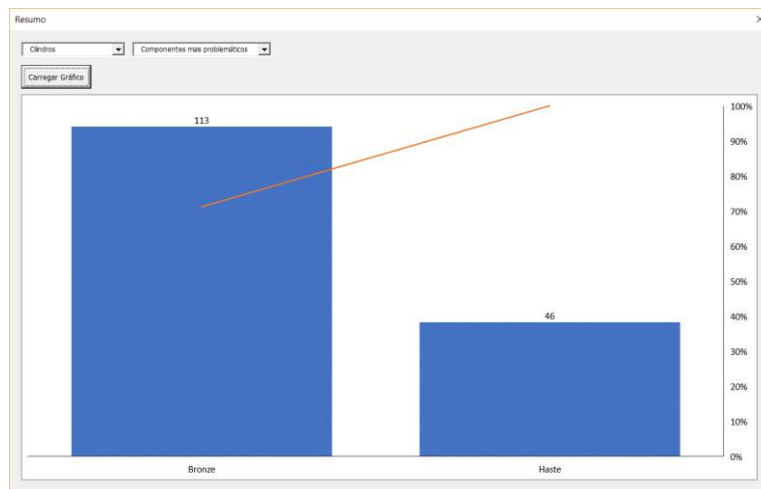


Figura 52 - Análise de Pareto - Componentes mais críticos

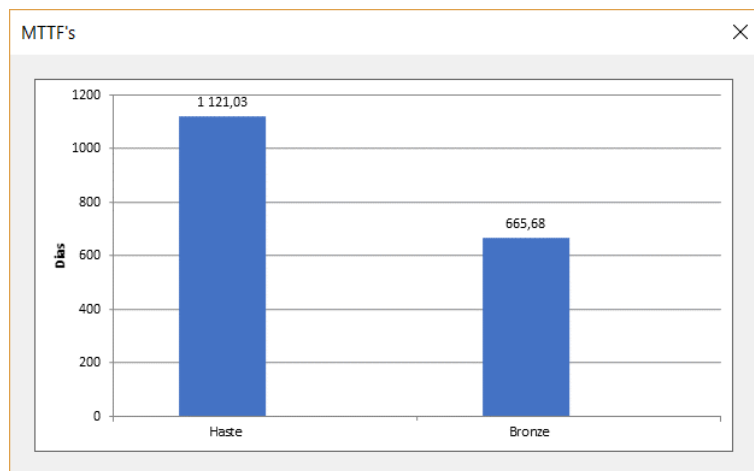


Figura 53 . MTTF's

A form titled 'Custos' for defining costs. It contains two input fields: 'Custos da Falha (CF) :' and 'Custo da Substituição Preventiva (CP) :'. A 'Confirmar' button is located at the bottom right.

Figura 54 - Formulário para definir custos de falha e de substituição preventiva

ANEXO B: Resultados - Cilindros

Código	Designação	Equipamento	Tipo de Máquina	Nº Registo Avarias	ET	V.Prova	Resultado	Taxa de avarias	MTBF
80345890	CL/HID/S1-32/18X626 K20168279	Anel inferior	KRUPP 52"	20	0,95	34,44%	Taxa de avarias constante	0,00217	461,5
88072858	CL/HID/N85-B21-8100-A	M. Central	MHI S5 e S7	27	-0,11	91,01%	Taxa de avarias constante	0,00104	958,074074
88075148	CL/HID/100/56X250ST	SMO	MHI 52"	8	0,62	53,44%	Taxa de avarias constante	0,00162	617,25
80086688	CL/HID/N85-F13-0301-A1	Carregador	MHI S7	2	Dados Insuficientes				
80345894	CL/INDRO HIDRAULICO A-300/280x48 K	Aperto	KRUPP 52"	0	Dados Insuficientes				
88072859	CL/HID/N85-B21-8100-E	Talão	MHI S5	0	Dados Insuficientes				
80345893	CL/HID/S1-90/63X250 K	SMO	KRUPP 52"	26	1,78	7,45%	Taxa de avarias constante	0,00151	662,230769
80345897	CL/HID/S1-50/28X565 K WMS	M. Central	KRUPP 52"	6	-0,99	32,39%	Taxa de avarias constante	0,00119	841,5
80345891	CL/HID/A-90/63X1408 K N9211588	Abertura/Fecho	KRUPP 52"	0	Dados Insuficientes				
80345896	CYL-HYDR/S1-40/28X200 K 9210197	Talão	KRUPP 52"	0	Dados Insuficientes				
80348913	MTR-HYDR-SZ SM1 4/50	Travão	KRUPP 52"	0	Dados Insuficientes				
80389248	CL/HID/N85-F13-0294-A1/1597	Abertura/Fecho	MHI BECKOFF 45" + MHI S7	6	1,65	9,97%	Taxa de avarias constante	0,00082	1212,83333
80571915	CL/HID/HORIUCHI F8-SB1CA-4081408530-AD	Anel inferior	MHI S7 Stocken	0	Dados Insuficientes				
80581063	CL/INDRO SMO C-44060 CGFA-1008140N-250	SMO	MHI 52" "Malhadaíras"	0	Dados Insuficientes				
80581439	CL/HID/K 20206870	Carregador	KRUPP 52"	0	Dados Insuficientes				
80590234	CL/HID/808 140N1325-40	Abertura/Fecho	MHI S7 Stocken	0	Dados Insuficientes				
80642010	CL/HID/CT140-FX8081365B-ACB-K	Abertura/Fecho	MHI 52" "Malhadaíras"	0	Dados Insuficientes				
80643018	CL/HID/S1-32 18X540	Anel inferior	KRUPP 45"	2	Dados Insuficientes				
80664825	CYL-HYDR/S1-80/45X200/80MM/200MM/220B	SMO	KRUPP 45"	0	Dados Insuficientes				
87082974	CL/HID/N85-B23-3801	Anel inferior	MHI S7	0	Dados Insuficientes				
88072850	CL/INDRO HIDRAULICO N85-F13-0282	SMO	MHI BECKOFF 45" + MHI S7	16	-1,03	30,39%	Taxa de avarias constante	0,0008	1249
88072860	CL/HID/N85-B23-3205-A1/1647	Abertura/Fecho	MHI S5	9	1,10	27,13%	Taxa de avarias constante	0,00089	1123,33333
88072861	CL/INDRO HIDRAULICO N85-B23-3206	Aperto	MHI S5 e S7	0	Dados Insuficientes				
88072862	CL/HID/N85-B23-3211-A1	Coluna/SMO	MHI S5	19	-0,06	95,26%	Taxa de avarias constante	0,00145	689,789474
88072863	CL/HID/N85-B24-0573-A1	Carregador	MHI S5	16	1,15	24,90%	Taxa de avarias constante	0,00178	562,9375
88074700	CL/INDRO DO MOLDE SEGMENTADO(COMPLET	SMO	BOM	0	Dados Insuficientes				
88074700	CL/HID/N85-B23-3802	Talão	MHI S7	0	Dados Insuficientes				
88075145	CL/HID/50/35 5X565ST	M. Central	MHI 52" BECKOFF	0	Dados Insuficientes				
88075147	CL/INDRO HIDRAULICO 40X22X540ST	Abertura/Fecho	MHI 52" BECKOFF	0	Dados Insuficientes				
88075163	CL/HID/330/250X25 C10-24765-A1	Aperto	MHI 52"	0	Dados Insuficientes				
88075279	CL/HID/50X35 5X450ST	M. Central	MHI 45" BECKOFF	3	Dados Insuficientes				
88075280	CL/INDRO HIDRAULICO 40X22X540ST	Anel inferior	MHI Beckoff	0	Dados Insuficientes				

Figura 55 - Tabela com resultados obtidos para Cilindros Hidráulicos

ANEXO C: Método da Máxima Verosimilhança

Suponha-se uma população com uma função densidade de probabilidade $f(x, \vec{\theta})$, onde $\vec{\theta} = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k)$ são parâmetros desconhecidos e se obteve uma amostra aleatória $X_1, X_2, \dots, X_n$ desta população. Deste modo, as estimativas de máxima verosimilhança, são os valores de $\vec{\theta}$ que maximizam a probabilidade de ocorrer uma amostra idêntica à que se observou, isto é, que maximizam:

$$L = f(x_1, \vec{\theta}) * f(x_2, \vec{\theta}) * \dots * f(x_n, \vec{\theta}) = \prod_{i=1}^n f(x_i, \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k)$$

Admitindo que L é diferenciável, as estimativas ou os estimadores de máxima verosimilhança são obtidos resolvendo a equação:

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

No caso da distribuição de Weibull e considerando as equações XX e XX, é possível encontrar para L o seguinte valor:

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

Esta expressão à qual foram previamente aplicados logaritmos, deve ser derivada em ordem a β e η . Obtém-se desta forma as seguintes expressões através das quais é possível calcular por processos iterativos o valor do fator de forma (β) e da vida característica (η):

- Dados de avarias sem tempos suspensos:

$$\frac{\sum_{i=1}^r t_i^\beta \ln t_i}{\sum_{i=1}^r t_i^\beta} - \frac{1}{\beta} = \frac{1}{r} \sum_{i=1}^r \ln t_i$$

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

- Dados de avarias com tempos suspensos:

$$\frac{\sum_{i=1}^r t_i^\beta \ln t_i + \sum_{j=1}^k C_j T_j^\beta \ln T_j}{\sum_{i=1}^r t_i^\beta + \sum_{j=1}^k C_j T_j^\beta} - \frac{1}{\beta} = \frac{1}{r} \sum_{i=1}^r \ln t_i$$

$$\eta = \left(\sum_{i=1}^r \frac{t_i^\beta}{r} + \sum_{j=1}^k \frac{C_j T_j^\beta}{r}\right)^{\frac{1}{\beta}}$$

No modelo de Crow os estimadores de máxima verosimilhança dos parâmetros γ e β podem ser determinados de duas maneiras, uma em que o teste é limitado pelo tempo e outra em que o teste é limitado pelo número de avarias:

- Teste limitado por tempo (t_0)

$$\hat{\beta} = \frac{N}{\sum_{i=1}^N \ln \left(\frac{T_0}{t_i} \right)}$$

$$\hat{\gamma} = \frac{N}{T_0^\beta}$$

Onde:

N , é o número de avarias
 T_0 , é o tempo total
 t_i , é o tempo decorrido até à falha i

- Teste limitado por avaria (t_n)

$$\hat{\beta} = \frac{N}{\sum_{i=1}^{N-1} \ln \left(\frac{T_n}{t_i} \right)}$$

$$\hat{\gamma} = \frac{N}{T_n^\beta}$$

Onde:

t_n , é o tempo percorrido até à falha n

ANEXO D: Teste de Laplace

O primeiro passo na realização do teste de Laplace passa por definir a hipótese que se pretende verificar. Esta hipótese é designada por hipótese alternativa ou H_1 . Uma vez especificada a hipótese que se pretende verificar, define-se a hipótese complementar de H_1 que se designa por hipótese nula ou H_0 . Quando a hipótese alternativa contiver uma desigualdade, o teste diz-se unilateral (à direita, para o sinal $>$, à esquerda para o sinal $<$). Quando H_1 envolver uma não igualdade o teste diz-se bilateral. Assim, H_0 é considerada verdadeira ao longo do procedimento de teste até ao momento em que haja evidência estatística clara apontada em sentido contrário. A estratégia básica seguida no método do teste de hipóteses consiste em tentar suportar a validade de H_1 , uma vez provada a inverosimilhança de H_0 . Por outras palavras, conseguindo - se mostrar que, com uma elevada probabilidade, a hipótese nula é falsa, fica assim corroborada a validade da hipótese alternativa. Se, pelo contrário, não se puder rejeitar H_0 , a H_1 não será reforçada pelo teste. A estatística que é utilizada para verificar a plausibilidade da hipótese nula designa-se por estatística de teste (sendo aqui denotada por ET) e pode ser obtida segundo dois critérios distintos:

- Teste limitado por tempo

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

Onde:

N , é o número de ocorrências ($N \geq 4$)
 t_i , é o tempo decorrido até à avaria i
 t_0 , é o tempo total

- Teste limitado por ocorrência

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

A decisão de rejeitar ou não a hipótese nula fundamenta-se no valor que a estatística de teste toma. Para que esta decisão possa ser tomada de forma controlada, é conveniente que, à partida, se fixe o valor a partir do qual se considera improvável a validade da hipótese nula. Tal fixação corresponde à definição da regra de decisão para o teste, especificando-se assim, uma região de rejeição, como se observar na Figura 45 em que está retratado o exemplo de um teste unilateral à direita.

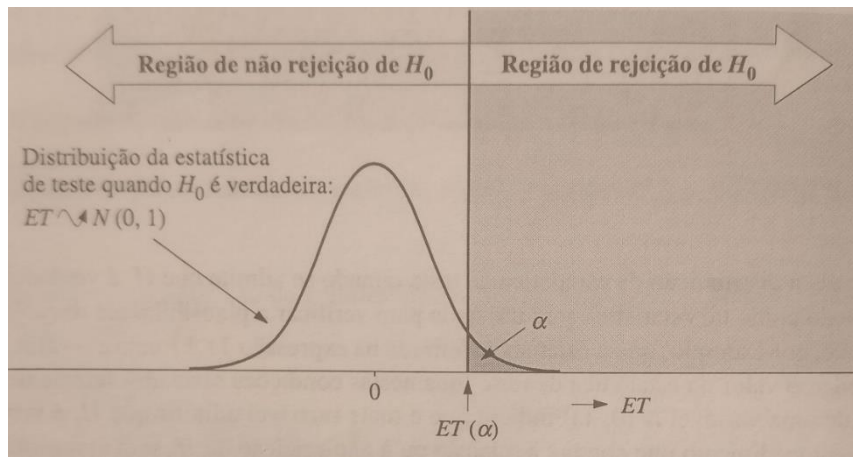


Figura 56 - Teste unilateral à direita. (Guimarães e Cabral 2007, pág. 338)

A região assinalada corresponderá à região de rejeição, desde que seja adotada a seguinte regra de decisão:

- Se o valor calculado para a ET pertencer à região de rejeição – neste caso, se $ET > ET(\alpha)$ – então a H_0 será rejeitada;
- Se a ET não se situar dentro da região de rejeição, então a H_0 não será rejeitada (o resultado do teste dir-se-á inconclusivo).

A probabilidade α de, no caso de H_0 ser verdadeira, a ET pertencer à região de rejeição designa-se por nível de significância do teste. O nível de significância representa, então, a probabilidade (ou risco) de se incorrer no erro de rejeitar H_0 quando esta hipótese é, de facto, verdadeira. Embora se possa atribuir ao nível de significância um valor qualquer situado entre 0 e 1, um dos valores mais frequentes e o utilizado foi o de $\alpha=0.05(5\%)$. Note-se que $ET(\alpha)$ se designa habitualmente por valor crítico da ET e o seu valor é obtido através da consulta da Tabela da Distribuição Normal Padronizada consoante o nível de significância previamente definido.

De acordo com o procedimento anteriormente descrito, no final toma-se uma decisão de rejeição ou de não-rejeição da H_0 . Esta dicotomia é, na realidade, artificial. De facto, a fixação do nível de significância é arbitrária e os dados amostrais podem contradizer a H_0 em maior ou menor grau. Ao maior ou menor grau de contradição da H_0 pelos dados amostrais dá-se o nome de valor de prova. O valor de prova corresponde à probabilidade de a estatística de teste tomar um valor igual ou mais extremo do que aquele que, de facto, é observado (Guimarães e Cabral 2007). Tal como a ET, o valor de prova é calculado admitindo que H_0 é verdadeira. Quanto menor for o valor de prova do teste maior será o grau com que a H_0 é contradita. Dada a relevância da informação contida no valor de prova, é recomendável a sua inclusão nos resultados que qualquer teste de hipóteses.

Análise a sistemas reparáveis

A análise efetuada a sistemas reparáveis tem como objetivo indagar qual é a tendência a frequência de avarias apresenta, isto é, se há indícios estatísticos de taxa de avarias decrescente, constante ou crescente. Começaremos por aplicar o teste bilateral, sempre que não se conheça a tendência do fenómeno. Este teste baseia-se nos seguintes procedimentos:

Definição das hipóteses:

- H_0 : taxa de avarias constante;
- H_1 : taxa de avarias não constante.

Para apurar estatisticamente a veracidade da hipótese nula necessita-se de calcular o valor Estatística do Teste (ET) e identificar a distribuição amostral. Uma vez que se trata de um teste bilateral, o valor crítico da ET é dado por $ET(\alpha/2)$, como é possível observar na Figura 13, que se compara com o valor de ET calculado, procedendo de seguida à tomada de decisão de acordo com os seguintes critérios:

- Se a $-1.96 \leq ET \leq 1.96$, não se rejeita a hipótese nula – o teste diz-se inconclusivo – pelo que não há evidências estatísticas de taxa de avarias não constante. “Aceita-se” assim, hipótese nula e conclui-se que os tempos entre ocorrências são IID, isto é, são provenientes de um processo de Poisson Homogéneo, tendo, portanto, uma taxa de avarias constante;
- No caso de o valor de a ET ficar fora daquele intervalo, rejeita-se a hipótese nula – o teste diz-se conclusivo – pelo que há evidências estatísticas de taxa de avarias não constante.

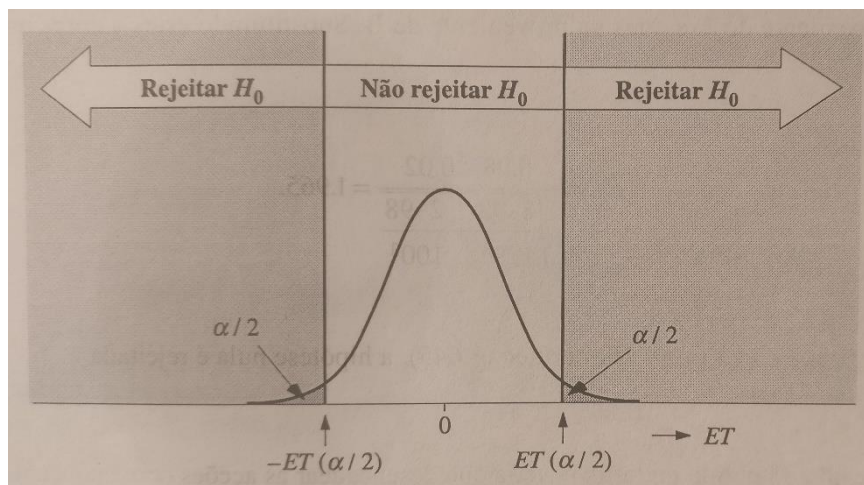


Figura 57 - Teste bilateral. (Guimarães e Cabral 2007, pág. 339)

Neste caso, verificada a evidência estatística de ocorrências não IID, constituindo portanto um processo de Poisson não homogéneo, 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 nos deparamos com uma fiabilidade crescente ou decrescente. Para o primeiro caso:

- H_0 : taxa de avarias constante;
- H_1 : taxa de avarias decrescente.

Calcular a ET do teste e caracterizar a distribuição amostral pela $N(0, 1)$, procedendo de seguida à tomada de decisão de acordo com os seguintes critérios:

- Se a $ET < -1.645$, o teste diz-se conclusivo e rejeita-se a hipótese nula considerando-se a taxa de ocorrências decrescente;
- Se a $ET \geq -1.645$, não se rejeita a hipótese nula – o teste diz-se inconclusivo – pelo que não há evidências estatísticas de taxa de avarias decrescente.

Ou, para a segunda alternativa,

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

Procedendo de seguida à tomada de decisão de acordo com os seguintes critérios:

- Se a $ET > 1.645$, o teste diz-se conclusivo e rejeita-se a hipótese nula considerando-se a taxa de ocorrências crescente;
- Se a $ET \leq 1.645$, não se rejeita a hipótese nula – o teste diz-se inconclusivo – pelo que não há evidências estatísticas de taxa de avarias crescente.

Aplicação do teste a sistemas não reparáveis

Quando a análise incidir sobre um sistema não reparável, sempre que possível redutível ao componente o teste tem como objetivo indagar se os tempos de avaria são Independentes e Identicamente Distribuídos:

Formulação das hipóteses subjacentes ao teste:

- H_0 : ocorrências IID;
- H_1 : ocorrências não IID.

Como se trata novamente de um teste bilateral, a tomada de decisão resulta mais uma vez em:

- Se $-1.96 \leq ET \leq 1.96$ 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;
- 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, 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, não é plausível ajustar os dados a uma qualquer distribuição teórica (A. F. Leitão 1999).

ANEXO E: Determinação do valor de F_β

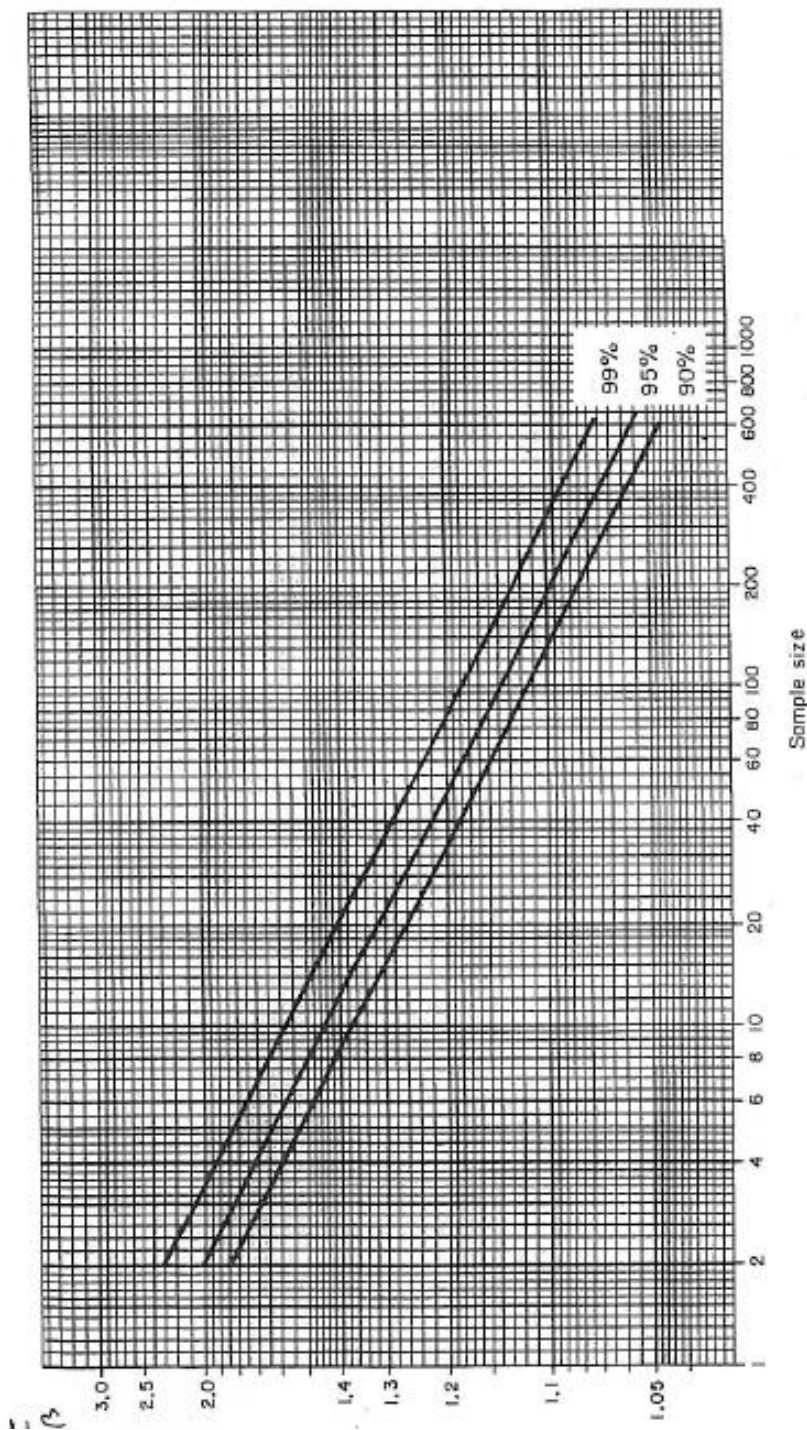


Figura 58 - Gráfico para obtenção do valor de F_β

ANEXO F: Formulários de registo

Registo da entrada/saída de Válvulas Proporcionais

[illegible]

Obs:

1-Tem passagem 2- Fuga de ar(obturador/chapéu) 3- Gráfico incorreto 4- Não faz nada
5- Lenta 6- Material substituído

Figura 59 - Tabela para registo manual substituição VP - M.P

Registo da entrada/saída de Válvulas Proporcionais

[illegible]

Figura 60 - Tabela para registo manual de substituição de VP - Turnos.

Registo da reparação de Válvulas Proporcionais

[illegible]

Figura 61 - Tabela para registo manual das reparações de VP na oficina do DE5.