



ISEL

**INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA**  
**Departamento de Engenharia Mecânica**



## **Desenvolvimento de Modelo para a Melhoria do Planeamento da Manutenção**

**Eduardo Jorge Trindade Pêgo**  
(Licenciado em Engenharia Mecânica)

Trabalho Final de Mestrado para obtenção do grau de Mestre  
em Engenharia Mecânica

Orientadores:

Doutor António João Pina da Costa Feliciano Abreu  
Eng. Carlos Marques

Júri:

Presidente: Doutor João Manuel Ferreira Calado

Vogais:

Doutora Helena Victorovna Guitiss Navas  
Doutor António João Pina da Costa Feliciano Abreu

**Setembro de 2015**





**ISEL**

**INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA**  
**Departamento de Engenharia Mecânica**

## **Desenvolvimento de Modelo para a Melhoria do Planeamento da Manutenção**

**Eduardo Jorge Trindade Pêgo**  
(Licenciado em Engenharia Mecânica)

Trabalho Final de Mestrado para obtenção do grau de Mestre  
em Engenharia Mecânica

Orientadores:

Doutor António João Pina da Costa Feliciano Abreu  
Eng. Carlos Marques

Júri:

Presidente: Doutor João Manuel Ferreira Calado

Vogais:

Doutora Helena Victorovna Guitiss Navas  
Doutor António João Pina da Costa Feliciano Abreu

**Setembro de 2015**



## Agradecimentos

Gostaria de agradecer aos meus orientadores, Professor António João Pina Feliciano Abreu, Professor no Instituto Superior de Engenharia de Lisboa e Engenheiro Carlos Marques, da Parque-Escolar, por todo o apoio, indicações e disponibilidade demonstrada ao longo da realização da presente dissertação, permitindo que esta se realiza-se da melhor forma possível.

Gostaria também de agradecer ao Engenheiro Luís Borges e ao Engenheiro Nuno Gamito pela assistência e apoio durante a realização da presente dissertação. Gostaria ainda de agradecer ao Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, à Parque- Escolar e à Tecnologia de Gestão de Imóveis pela possibilidade de realizar a presente dissertação.

Não menos importante, gostaria de agradecer ao Engenheiro Victor Ribeirinha por todo o apoio e disponibilidade demonstrada ao longo da presente dissertação.

Gostaria ainda de agradecer a Nuno Pires, técnico residente da escola onde se encontra instalado o equipamento estudado durante a presente dissertação, pelos esclarecimentos prestados e pela disponibilidade demonstrada à data da visita às instalações técnicas e dos equipamentos nelas presentes.

Gostaria ainda de agradecer ao Engenheiro Tiago Silva, professor no instituto Superior de Engenharia de Lisboa pela disponibilidade e apoio demonstrados ao longo da realização da presente dissertação.

Gostaria também de agradecer à equipe de suporte do *software* MARS pelo envio da licença que permite a utilização deste ferramenta.

A todos os meus colegas e amigos, pelo apoio e motivação prestados ao longo da elaboração da presente dissertação. A todos eles os meus sinceros agradecimentos.

Agradeço ainda aos meus pais e à minha namorada por tudo o que me proporcionaram e suportaram ao longo da minha vida académica.

Por último, a todos aqueles que me apoiaram durante a elaboração da presente dissertação e que por lapso o nome não foi mencionado, os meus sinceros agradecimento



## **Resumo**

O objetivo da presente dissertação é desenvolver uma metodologia que permita a otimização dos intervalos de manutenção em sistemas reparáveis.

Para cumprir o objetivo proposto, foi desenvolvido um método que permite a distribuição das intervenções de manutenção preventiva baseada no critério do custo mínimo, na teoria dos sistemas reparáveis, nos conceitos de manutenção imperfeita e no modelo de vida virtual de um sistema.

Para suportar a metodologia proposta foi realizado um levantamento bibliográfico sobre a função de manutenção, tipos de manutenção existentes, filosofias, indicadores e custos associados à função de manutenção.

Para realizar a otimização dos intervalos de manutenção através do modelo proposto optou-se pelo método de algoritmos genéticos, ferramenta que permite o cálculo da melhor solução para o problema em análise através da analogia com a teoria de evolução das espécies.

Finalmente, foi construído um algoritmo computacional utilizando o *software* Matlab, onde são realizados três casos de estudo para demonstrar as potencialidades do mesmo.

## **Palavras Chave**

Otimização; Manutenção Imperfeita; Planeamento da Manutenção; Custo mínimo; Algoritmos Genéticos.



## **Abstract**

The objective of the current work is to develop a methodology that allows the optimization of the maintenance periods in repairable systems.

In order to fulfil this purpose, a methodology was created that allows the distribution of the preventive maintenance actions based on the minimal cost criteria, on the theory of the repairable systems, on the concepts of imperfect maintenance and on the model of virtual life.

To support the proposed model, literature review was made about the maintenance function, types of maintenance, maintenance philosophy's, maintenance performance indicators and maintenance costs.

To achieve the optimization of the maintenance periods, the genetic algorithm optimization technique was used, a tool that enables the calculation of the best solution using an analogy to the theory of the evolution of species.

Finally, the algorithm was computed using the Matlab software and three studies were performed to demonstrate the capabilities of the methodology proposed in the current work.

## **Keywords**

Optimization; Maintenance Planning; Imperfect Maintenance; minimal Cost; Genetic Algorithm.



## Lista de Símbolos e Abreviaturas

$A$  – Disponibilidade, do Inglês *Availability*.

$A_c$  – Disponibilidade Máxima entre duas intervenções de Manutenção Corretiva.

$A_I$  – Disponibilidade Intrínseca.

$A_O$  – Disponibilidade Operacional.

$A_p$  – Disponibilidade Máxima entre duas intervenções de Manutenção Preventiva.

$A_R$  – Disponibilidade Realizada.

$ADT$  – Tempo administrativo necessário para a realização de uma operação de Manutenção.

$C$  – Custo da Atividade de Manutenção.

$c_c$  – Custo, por unidade de tempo, seguindo uma política de Manutenção Corretiva.

$C_c$  – Custo médio de Manutenção Corretiva.

$c_p$  – Custo por unidade de tempo, seguindo uma política de Manutenção Preventiva.

$C_p$  – Custo médio de Manutenção Preventiva.

$CM$  – Custo total do Plano de Manutenção.

$CMC$  – Custo total das Manutenções Corretivas efetuadas.

$CMP$  – Custo total das Manutenções Preventivas efetuadas.

$CMT$  – Tempo de reparação, seguindo uma política de Manutenção Corretiva.

$d$  – Nível de melhoria da operação de Manutenção.

$ETPMT$  – Tempo de duração de Manutenção Preventiva, em horas.

$f$  – Distribuição de densidade de falha.

$F$  - Função de probabilidade acumulada de falha.

$FPM$  – Frequência de Manutenção Preventiva, em número de intervenções por hora.

$h$  - Função de Risco.

$i$  – Período de Manutenção.

$j$  – Número da atividade de Manutenção.

$k$  – Número total de atividades realizadas durante o Período de Manutenção  $i$ .

$l$  - Número do componente.

$L$  – Função de probabilidade.

$LDT$  – Tempo Logístico necessário para obter os componentes ou materiais necessários para a realização de uma operação de Manutenção.

$m$  – Número total de componentes reparáveis de um sistema.

$M$  - Tempo médio de falha, do inglês *Mean Time to Failure* (MTTF).

$m_c$  - Tempo médio de Manutenção de uma reparação Corretiva.

$m_p$  - Tempo médio de uma intervenção de Manutenção Preventiva.

$m_f$  – Valor expectável de falhas.

$MAMT$ - Tempo médio de reparação ou de Manutenção Preventiva necessário para a realização das tarefas de Manutenção.

$MDD$  – Tempo médio de paragem devido a Manutenção.

$MPMT$  – Tempo médio de Manutenção Preventiva.

$MTBF$  - Tempo Médio entre Falhas, do Inglês *Mean Time to Failure*.

$MTBMA$  - Tempo médio entre ações de Manutenção, Preventiva ou Corretiva.

$MTT$  – Tempo médio de Manutenção.

$MTTR$  – Tempo médio de reparação, do inglês *Mean Time to Repair*.

$n$  – Número total de Períodos de Manutenção.

$N$  – Número total de falhas.

$n_f$  – Número de falhas.

$p$  – Probabilidade de realizar uma intervenção de Manutenção Imperfeita.

$P_s$  - Somatório das probabilidades  $p$ .

$q$  – Fator de Redução de Dano.

$r$  – Número de cada Manutenção Preventiva realizada.

$R$  – Fiabilidade.

$R_{sis}$  – Fiabilidade do sistema.

$R_{min}$  – Nível de Fiabilidade mínimo exigido.

$s$  - Número total de Manutenções Preventivas efetuadas ao sistema.

$t$  – Instante de tempo considerado.

$T$  – Intervalo de tempo entre dois Períodos de Manutenção consecutivos.

$\bar{T}$  - Tempo médio acumulado de funcionamento até à falha.

$V$  – Vida Virtual.

$X$  – Atividade de Manutenção.

$z$  – Número de componentes do sistema.

$\alpha$  - Vida característica, para a qual 63.2% dos componentes se encontram em estado de falha.

$\beta$  - Parâmetro de forma.

$\theta$  – Parametro de vida da Lei da Potência.

$\Lambda$  – Intensidade de Falha.

$\lambda$  – Taxa de Falhas.

$\mu$  - Média da Função Normal.

$\mu_{log}$  - Média Logarítmica.

$\sigma$  - Desvio padrão da função normal

$\sigma_{log}$  - Desvio Padrão Logarítmico.

$\Phi$  - Distribuição Normal Cumulativa *Standard*.

# Índice

<b>Agradecimentos</b> .....	I
<b>Resumo</b> .....	III
<b>Palavras Chave</b> .....	III
<b>Abstract</b> .....	V
<b>Keywords</b> .....	V
<b>Lista de Símbolos e Abreviaturas</b> .....	VII
<b>Índice</b> .....	XI
<b>Índice de Figuras</b> .....	XIII
<b>Índice de Tabelas</b> .....	XV
<b>Capítulo 1 – Introdução</b> .....	1
1.1 Relevância do Tema .....	1
1.2 Objetivos .....	2
1.3 Estrutura da Dissertação .....	3
<b>Capítulo 2 – Estratégias de Manutenção</b> .....	5
2.1 Função Manutenção .....	5
2.2 Tipos de Manutenção .....	6
2.2.1 Manutenção Corretiva .....	7
2.2.2 Manutenção Preventiva .....	9
2.3 Equipamentos Reparáveis e Não Reparáveis .....	13
2.4 Padrão de Avarias .....	14
2.5 Filosofias de Manutenção .....	17
2.5.1 Manutenção Centrada na Fiabilidade .....	18
2.5.2 Manutenção Produtiva Total .....	20
2.5.3 Manutenção Centrada na Condição .....	23
2.6 Indicadores de Manutenção .....	24
2.6.1 Manutibilidade .....	24
2.6.2 Disponibilidade .....	28
2.6.3 Fiabilidade .....	30
2.7 Métodos Estatísticos para Modelação da Fiabilidade .....	32
2.8 Custos da Manutenção .....	35
<b>Capítulo 3 – Metodologia Proposta</b> .....	39
3.1 Critério da Disponibilidade Máxima .....	39
3.2 Critério do Custo Mínimo .....	40
3.3 Algoritmo Proposto .....	43
3.3.1 Conceito de Manutenção Perfeita e Imperfeita .....	45

3.3.2 Modelação da Manutenção Imperfeita.....	48
3.3.3 Metodologia Aplicada.....	50
3.3.4 Modelo de Estimativa do Fator de Remoção de Dano.....	51
3.3.5 Metodologia Alternativas para o Cálculo do Fator de Remoção de Dano.....	56
3.5 Modelo de Otimização.....	58
3.6 Implementação do Algoritmo.....	59
<b>Capítulo 4 - Caso de Estudo.....</b>	<b>65</b>
4.1 Descrição do Equipamento.....	65
4.2 Considerações Efetuadas.....	68
4.3 Casos de Estudo Realizados.....	71
4.3.1 Caso de Estudo 1.....	71
4.3.2 Caso de Estudo 2.....	72
4.3.3 Caso de Estudo 3.....	73
4.4 Resultados dos Casos de Estudo.....	73
4.5 Comparação de Resultados.....	79
<b>Capítulo 5 – Conclusões e Trabalhos Futuros.....</b>	<b>83</b>
5.1 Conclusões.....	83
5.2 Trabalhos Futuros.....	84
<b>Referências Bibliográficas.....</b>	<b>85</b>

## Índice de Figuras

Figura 2.1 - Tipos de Manutenção Existentes .....	7
Figura 2.2 - Processo de definição de Manutenção Preventiva.....	10
Figura 2.3 - Curva P-F .....	11
Figura 2.4 - Intervalo P-F.....	12
Figura 2.5- Padrão de Falhas A, Curva da banheira.....	14
Figura 2.6 – Padrão de falhas B. ....	15
Figura 2.7 – Padrão de falhas C. ....	16
Figura 2.8 – Padrão de falhas D.....	16
Figura 2.9 – Padrão de falhas E.....	16
Figura 2.10 – Padrão de falhas F.....	17
Figura 2.11 – Pilares do TPM. ....	22
Figura 2.12- Processo de reparação seguindo uma política de Manutenção Corretiva .....	26
Figura 2.13 - Processo de reparação seguindo uma política de Manutenção Preventiva.....	27
Figura 2.14 – Icebergue dos custos de Manutenção.....	36
Figura 2.15 – Custos de Manutenção .....	37
Figura 3.1- Evolução da Disponibilidade segundo o Critério da Disponibilidade Máxima.....	40
Figura 3.2 - Evolução dos custos de Manutenção segundo o Critério do Custo Mínimo. ....	42
Figura 3.3 – Impacto dos Tipos de Manutenção na Taxa de Falhas de um equipamento.....	47
Figura 3.4 – Evolução temporal entre Períodos de Manutenção.....	50
Figura 3.5 – Evolução da Intensidade de Falha para $\theta=0,5$ e $\beta=4$ .....	53
Figura 3.6 – Evolução da Intensidade de Falha com $\theta=0,5$ , $\beta=4$ e $q=0,333$ .....	55
Figura 3.7 – Ilustração de uma operação de crossover.....	60
Figura 3.8 – Ilustração de uma operação de mutação .....	60
Figura 3.9 - Processo de otimização por Algoritmos Genéticos .....	61
Figura 3.10 – Algoritmos Genéticos vs Métodos Convencionais. ....	62
Figura 3.11 - Interface gráfico do algoritmo proposto .....	63
Figura 4.1- Modelo simplificado de um chiller. ....	66
Figura 4.2- Esquema do chiller estudado .....	67
Figura 4.3 – Plano de Manutenção obtido para o Caso de Estudo 1.....	74
Figura 4.4 - Evolução da fiabilidade para o Caso de Estudo 1. ....	75
Figura 4.5 - Plano de Manutenção obtido para o Caso de Estudo 2.....	76
Figura 4.6- Evolução da Fiabilidade para Caso de Estudo 2.....	77
Figura 4.7- Plano de Manutenção obtido para o Caso de Estudo 3.....	78
Figura 4.8- Evolução da Fiabilidade para o Caso de Estudo 3.....	79



## Índice de Tabelas

Tabela 3.1 – Operações de Manutenção Preventiva.....	44
Tabela 3.2 - Métodos de modelação da teoria da Manutenção Imperfeita.....	47
Tabela 3.3 – Fatores para o cálculo do Fator de Remoção de Dano .....	57
Tabela 4.1 - Dados de falha do chiller. ....	69
Tabela 4.2 - Custos das Operações de Manutenção .....	69
Tabela 4.3 - Custos do plano de Manutenção atual e do Caso de Estudo 1. ....	80
Tabela 4.4 – Resultados obtidos para o Caso de Estudo 1 e 2. ....	81
Tabela 4.5 - Resultados do plano de Manutenção atual e do Caso de Estudo 3.....	82



# Capítulo 1 – Introdução

Este capítulo serve de introdução à dissertação, no qual se apresenta a relevância do tema, a metodologia apresentada e a estrutura do documento.

## 1.1 Relevância do Tema

Atualmente, a rápida evolução da tecnologia e a crescente automação dos equipamentos revelam uma tendência para a sofisticação e complexidade dos processos produtivos (Sachdeva *et al*, 2008). Considerando que a deterioração de um sistema começa assim que este é colocado em funcionamento e, tendo em consideração o impacto negativo que uma potencial falha pode provocar ao nível dos custos operacionais, produtividade do negócio, entre outros. O planeamento da função de manutenção deve ser bastante cuidadoso e os objetivos da manutenção devem ser bem definidos. (Muchiri *et al*, 2010).

Por outro lado, como as atividades de manutenção introduzem custos (Zhou *et al*, 2006), os gestores devem definir estratégias/planos que sejam suportadas numa análise cuidadosa de custo-benefício da função de manutenção (Rausand, 1998). Assim, para responder ao problema de como definir uma estratégia/plano de manutenção que tenha como objetivo uma minimização dos custos e uma maximização dos benefícios, surgiram várias filosofias/metodologias como é caso da Manutenção Centrada na Fiabilidade (Dhillon, 2002), Manutenção Produtiva Total (Chan *et al*, 2005), Manutenção baseada na Condição (IAEA, 2007), RAMS (Stapelberg, 2009), Manutenção Baseada no Risco (Khan & Haddara, 2003), entre outras. Tradicionalmente, os planos de manutenção preventiva sistemática, ou seja, a definição de um conjunto estruturado de tarefas que compreendem as atividades, os procedimentos, os recursos e a duração necessária para executar a manutenção são normalmente definidos segundo as recomendações dos fabricantes, o cumprimento de normas dos países em que se encontram sediados os equipamentos, ou em alternativa são baseados em informações resultantes de modelos matemáticos aproximados, que nem sempre são os mais adequados, uma vez que os equipamentos são sujeitos a distintas condições de utilização e os fabricantes normalmente não recebem um *feedback* adequado do desempenho dos equipamentos após a sua instalação (Rausand, 1998).

Em termos operacionais, a definição de um plano de manutenção preventiva sistemática tem por base a premissa que é aceite por todos os especialistas da área da Manutenção, existindo um impacto positivo na fiabilidade dos equipamentos quando estes são sujeitos com uma determinada periodicidade a intervenções de manutenção. No entanto, a elaboração desse plano requer que seja definido com algum rigor uma vez que: a afetação de um número elevado de intervenções conduz não só a um aumento dos custos de manutenção excessivo como também leva a uma redução da disponibilidade dos equipamentos. Por outro lado, a afetação de um número reduzido de intervenções de manutenção, conduz a um aumento da ocorrência de falhas aleatórias, que por sua vez se vai traduzir não só numa redução da disponibilidade do equipamento, onde num contexto em que a operacionalidade do equipamento é crítico para o sucesso da organização vai amplificar os impactos negativos resultantes da sua indisponibilidade, como também produz um aumento dos custos da manutenção, resultantes do incremento em ações de manutenção corretiva (Endrenyi *et al*, 2001).

Dada a relevância do tema, relacionada com a dificuldade na elaboração de um plano de manutenção preventiva adequada à utilização dos equipamentos, a presente dissertação apresenta uma metodologia baseada no critério do custo mínimo para determinar os intervalos ótimos de manutenção preventiva em função da utilização do equipamento. O modelo desenvolvido foi otimizado recorrendo aos algoritmos genéticos e foi computado utilizando o *software* computacional Matlab.

## **1.2 Objetivos**

O objetivo da presente dissertação é apresentar uma metodologia que permita a redução dos custos associados à manutenção através da otimização da manutenção planeada, utilizando um método que determina os intervalos de manutenção preventiva seguindo o critério de decisão do custo mínimo, limitando um nível mínimo de fiabilidade exigido ao equipamento.

Pretende-se desta forma construir uma ferramenta de planeamento da manutenção que permita auxiliar o gestor na decisão dos intervalos de manutenção preventiva a aplicar a equipamentos sujeitos a este tipo de intervenção.

### **1.3 Estrutura da Dissertação**

A presente dissertação encontra-se dividida em 5 capítulos, onde o primeiro capítulo corresponde à Introdução, em que são abordados a relevância do tema, o objetivo proposto e a estrutura da mesma.

Consta no segundo capítulo uma revisão bibliográfica da função de manutenção, englobando os tipos de manutenção existentes, as diferentes filosofias, alguns dos indicadores de manutenção e dos custos associados à mesma.

No terceiro capítulo é apresentada a Metodologia Aplicada para a otimização dos intervalos de manutenção preventiva. São descritos os critérios de decisão, nomeadamente o Critério do Custo Mínimo e o Critério da Disponibilidade Máxima, o Modelo de Vida Virtual, a Lei da Potência, a função objetivo e o método de otimização através de algoritmos genéticos. Finalmente é exposta a aplicação criada.

No quarto capítulo é descrito o equipamento estudado, um chiller refrigerado a ar instalado numa escola secundária, e os casos de estudo a ele associados, onde se apresenta o plano de manutenção atualmente implementado e são analisados os resultados dos três casos de estudo realizados.

O primeiro contempla a elaboração de um plano de manutenção para um equipamento com tempo de vida acumulado de 18800 horas, com nível mínimo de fiabilidade exigido de 90%. O segundo caso de estudo é efetuado para as mesmas condições iniciais do caso de estudo 1 mas com um nível mínimo de fiabilidade exigido de 98%. Com este estudo pretende-se verificar se existem melhorias ao nível da redução dos custos relativos às avarias através do aumento do número de operações de manutenção. Finalmente, no terceiro caso de estudo, pretende-se efetuar um plano de manutenção para um equipamento no início do seu funcionamento, com vida acumulada igual a zero, modelado a partir dos dados de falha de um equipamento similar a operar em condições semelhantes. O objetivo deste estudo é obter o melhor plano de manutenção, durante a vida útil do equipamento, para um nível de fiabilidade mínimo exigido de 90%

No quinto capítulo serão apresentadas as conclusões obtidas na presente dissertação e os trabalhos futuros a realizar.



## **Capítulo 2 – Estratégias de Manutenção**

No presente capítulo é realizada uma revisão bibliográfica da função de manutenção, dos tipos de manutenção existentes e das filosofias mais utilizadas na atualidade. São ainda abordados os indicadores de manutenção, as distribuições estatísticas que permitem modular a função de fiabilidade e os custos associados à função de manutenção.

### **2.1 Função Manutenção**

Manutenção pode ser definida como a combinação de todas as ações técnicas, administrativas e de gestão durante o ciclo de vida de um bem, destinadas a mantê-lo ou repô-lo num estado em que possa cumprir a sua função (NPEN 13306:2007).

Ao nível histórico, a Manutenção surgiu como necessidade de reparar avarias após a sua ocorrência, com o objetivo de restaurar a operacionalidade dos equipamentos. O conceito não era encarado como prioridade devido à simplicidade dos equipamentos, o que permitia evitar as avarias com processos simples de limpeza, revisão e lubrificação (Pintelon e Hertz, 2008).

As pressões de guerra provocadas pela Segunda Guerra Mundial aumentaram a procura de bens transformados e reduziram dramaticamente a mão-de-obra disponível, o que originou uma crescente automatização dos processos industriais. Este processo aumentou a complexidade dos equipamentos e a importância destes nos processos produtivos da indústria. À medida que aumentou a importância dos equipamentos nos processos produtivos, as paragens na produção começaram a ser bastante nocivas e surgiu o conceito de Manutenção Preventiva, cujo objetivo é evitar as avarias antes da sua ocorrência (Moubray, 1999).

Atualmente a Manutenção é vista como um dos indicadores chave para o sucesso das instituições, afetando diretamente a capacidade de resposta das organizações aos prazos e expectativas dos seus clientes e decisiva na sua estratégia de competitividade, tornando a Função de Manutenção vital na sustentabilidade de qualquer tipo de planta industrial. (Muchiri, 2011).

A manutenção tem como objetivos (Muchiri, 2011):

- Aumentar a Fiabilidade do sistema;
- Aumentar a Disponibilidade do sistema;
- Aumentar a qualidade dos produtos produzidos;
- Melhorar a operacionalidade do sistema;
- Aumentar a vida útil do sistema;
- Aumentar a segurança dos utilizadores do sistema;
- Reduzir o impacto ambiental provocado pela exploração dos equipamentos;
- Reduzir os custos das operações de Manutenção.

De acordo com Mobley (Mobley, 2004) uma correta implementação da Função de Manutenção permite baixar os custos de produção, uma vez que aumenta a disponibilidade dos equipamentos e conseqüentemente o tempo disponível para a produção. Permite reduzir os custos de Manutenção, nomeadamente em peças, horas extraordinárias e subcontratação. Uma adequada implementação da Função de Manutenção aumenta ainda a estabilidade dos processos, através da redução da variabilidade dos mesmos. Permite ainda estender a vida útil do equipamento e reduzir os custos de inventário.

## **2.2 Tipos de Manutenção**

A Manutenção pode ser subdivida em dois grandes tipos, Manutenção Corretiva e Manutenção Preventiva. A Manutenção Corretiva visa devolver um equipamento ao seu estado funcional após uma avaria, enquanto a Manutenção Preventiva procura eliminar as avarias ou, caso não seja possível eliminar a avaria, retardar ao máximo a sua ocorrência. A Manutenção Preventiva pode ainda ser subdivida em Manutenção Preventiva Sistemática ou Condicionada, a depender do tipo de intervenção a realizar (Yardley, 2006).

A Figura 2.1 representa os tipos de manutenção que tradicionalmente são aplicados a um Sistema Reparável.



Figura 2.1 - Tipos de Manutenção Existentes (Dhillon, 2002. Adaptado)

A Manutenção Corretiva também pode ser planeada sempre que a falha do componente em análise não coloque em risco o funcionamento do sistema ou caso o custo da falha ou a sua substituição não justifique a implementação de uma política de Manutenção Preventiva (Assis, 2014).

### 2.2.1 Manutenção Corretiva

Apesar do esforço efetuado para desenhar sistemas com a maior fiabilidade possível e mesmo efetuando uma Manutenção Preventiva cuidadosamente planeada, poderá eventualmente existir a ocorrência de uma falha. Quando se verificam estes acontecimentos é necessário efetuar uma reparação ao equipamento e conseqüentemente, realizar uma operação de Manutenção Corretiva (Dhillon, 2002).

Uma operação de Manutenção Corretiva, planeada ou não planeada, pode ser dividida em cinco grandes categorias, nomeadamente:

- Reparação;
- Recuperação;
- Reconstrução;
- Recuperação Total;
- Operações em componentes Adjacentes.

No caso da reparação, o equipamento é devolvido à sua condição operacional após uma falha, enquanto na recuperação são substituídos os componentes não reparáveis e recuperados os restantes elementos. Na reconstrução, a fiabilidade e o aspecto de um componente reparável é restituído a um estado parecido ou idêntico ao verificado à saída de fábrica, enquanto na recuperação total, todo o equipamento é restaurado, e o seu estado final é análogo ao verificado na reconstrução. Finalmente, as operações em componentes adjacentes são todas as operações de manutenção efetuadas em equipamentos envolventes ao que foi intervencionado, cuja operacionalidade possa ter sido afetada pela falha do componente principal.

Independentemente do tipo de operação realizada, o desenrolar de uma operação de Manutenção Corretiva pode ser dividida nas seguintes etapas (Assis, 2014):

- Detecção de uma falha;
- Registo da ocorrência;
- Preparação da operação;
- Realizar a operação;
- Testar o equipamento.

Para aumentar a efetividade da Manutenção é necessário reduzir o número de intervenções corretivas realizadas a um equipamento (Dhillon, 2002). Esta redução é obtida através:

- Uma maior eficiência no reconhecimento, localização e isolamento de falhas;
- Uma maior eficiência na permutabilidade dos componentes;
- O uso de equipamentos redundantes;
- Uma maior acessibilidade aos componentes;
- Maior atenção ao fator humano, em termos de ergonomia, formação dos operadores e material técnico disponível.

Existem diversos modelos matemáticos que permitem modelar a Disponibilidade de sistemas sujeitos a Manutenção Corretiva, cuja formulação pode ser consultada no trabalho de Dhillon. (Dhillon, 2002).

## 2.2.2 Manutenção Preventiva

A Manutenção Preventiva é um dos mais importantes componentes de um plano de Manutenção e é geralmente a atividade que implica uma maior alocação de recursos dentro das organizações (Dhillon, 2002).

A Manutenção Preventiva pode ser descrita como um conjunto de operações sistemáticas com vista a manter um equipamento num estado satisfatório através de inspeções, deteções e reparações sistemáticas, com o objetivo de diminuir a probabilidade de falha de um bem e antecipar, ou eliminar, as consequências de uma falha (Pintelon e Hertz, 2008).

A Manutenção Preventiva tem como objetivos:

- Aumento do tempo de vida útil do equipamento;
- Reduzir as paragens por falhas críticas de um equipamento;
- Permitir um planeamento mais adequado para as atividades de manutenção;
- Minimizar as quebras na produção devido a falhas nos equipamentos;
- Promover a segurança e higiene no trabalho.

Conforme anteriormente referido, a Manutenção Preventiva é constituída por um conjunto de operações, das quais se destacam:

- Inspeção;
- Pequenas operações de manutenção (limpeza, lubrificação, substituição de consumíveis, etc.);
- Calibração;
- Testes;
- Alinhamentos;
- Ajustamentos;
- Substituição periódica de componentes sujeitos a degradação.

Para desenvolver um plano adequado de Manutenção Preventiva é necessário utilizar um determinado conjunto de ferramentas, como manter um historio detalhado dos equipamentos a serem intervencionados, utilizar as recomendações dos fabricantes, manter dados em histórico relativos a equipamentos similares, manter os manuais de

serviço, manter pessoal técnico especializado e assegurar as ferramentas de teste e reparação adequadas para cada equipamento a ser intervencionado (Dhillon, 2002).

Após reunir as ferramentas necessárias para o planeamento da Manutenção Preventiva, é necessário criar um processo de definição deste tipo de Manutenção. Um exemplo deste processo encontra-se representado na Figura 2.2.

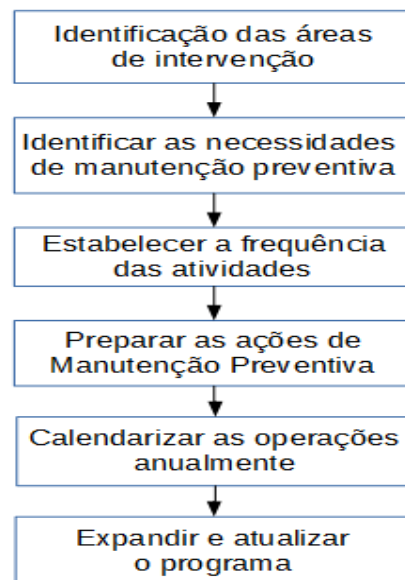


Figura 2.2 - Processo de definição de Manutenção Preventiva (Dhillon, 2002. Adaptado).

O primeiro passo deste processo é a identificação e escolha das áreas ou componentes críticos para o sucesso das operações, de forma a definir onde concentrar o esforço de Manutenção Preventiva numa fase inicial. Seguidamente deverá proceder-se à identificação das necessidades de Manutenção dos equipamentos seleccionados, para depois se definir a frequência das tarefas a realizar. O passo seguinte passa por planear todas as tarefas de Manutenção e regista-las por escrito, para posteriormente ser definida a calendarização de cada tarefa em cada equipamento seleccionado. Após a implementação da metodologia e análise dos resultados o plano de Manutenção, este pode necessitar de ser atualizado ou expandido para outros equipamentos, pelo que o processo volta ao início e será traçado um novo plano de Manutenção Preventiva (Dhillon, 2002).

### **Tipos de Manutenção Preventiva**

A Manutenção Preventiva pode ser subdividida em Preventiva Sistemática ou Preventiva Condicionada. A primeira abordagem consiste em determinar um conjunto de tarefas de

Manutenção baseadas no tempo de funcionamento de um equipamento, através de parâmetros como o Tempo Médio entre Falhas e no padrão de avarias vulgarmente denominado por curva da banheira (Mobley, 2004). Esta metodologia consiste em determinar um conjunto de operações de limpeza, calibração, lubrificação e substituição de componentes em intervalos constantes de tempo.

Já no segundo caso, são realizados um conjunto de intervenções ao equipamento, utilizando técnicas não intrusivas como análise de vibrações, análise de óleos entre outras ferramentas, que não só evitam a ocorrência de avarias nos equipamentos intervencionados como visam aumentar a disponibilidade dos equipamentos e reduzir os custos de Manutenção através da eliminação de intervenções sistemáticas desnecessárias (Mobley, 2004). Este método, que pode ser aplicado continuamente ao equipamento, permite determinar as tendências de funcionamento deste e possibilita determinar qual a melhor data para realizar a intervenção.

Uma das formas de determinar os intervalos de Manutenção utilizando uma estratégia de Manutenção Preventiva Condicionada é através da determinação da curva P-F de um equipamento (Moubray, 1999). Esta curva representa os acontecimentos verificados nos estados finais de uma avaria. Com base nesta representação, o equipamento deteriora-se até chegar a um determinado ponto, denominado por ponto potencial de falha P, a partir do qual é possível detetar uma falha no equipamento. Se não for tomada nenhuma ação para reparar o equipamento, a deterioração do equipamento evolui, normalmente de forma acelerada, até atingir o ponto onde surge uma falha. A Figura 2.3 demonstra o comportamento da curva P-F para um equipamento genérico.

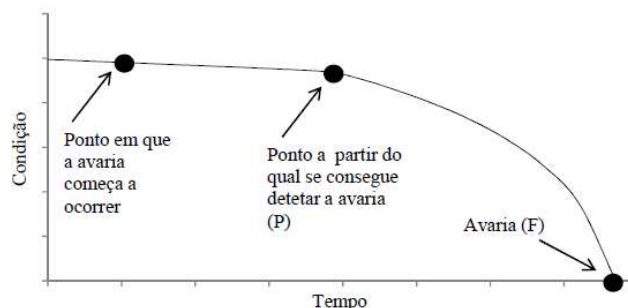


Figura 2.3 - Curva P-F (Moubray, 1999. Adaptado).

Caso seja possível detetar uma falha entre os pontos P e F, podem ser tomadas diversas ações para prevenir ou evitar a falha. A eficácia da intervenção depende da velocidade

dos mecanismos de propagação de falha e da possibilidade, ou não, de realizar a reparação antes de a falha se verificar. (Moubray,1999).

A curva P-F é possibilita a determinação de um intervalo de Manutenção a efetuar num equipamento, através do método conhecido como intervalo P-F. O intervalo P-F é o intervalo de tempo disponível para tomar qualquer medida necessária para reduzir ou evitar as consequências de uma falha. Pretende-se desta forma minimizar os impactos de uma avaria, nomeadamente no que diz respeito aos tempos de paragem, custos de reparação e fatores de segurança a respeitar.

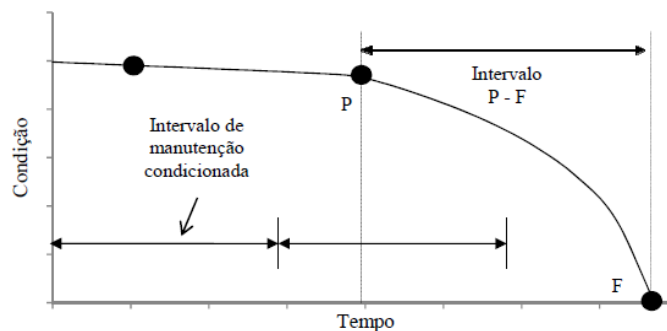


Figura 2.4 - Intervalo P-F (Moubray, 1999. Adaptado)

O intervalo P-F determina a periodicidade da Manutenção Condicionada a realizar. Caso o objetivo for detetar e corrigir a falha antes que esta aconteça, então a periodicidade da inspeção deve ser inferior ao valor registado no intervalo P-F.

### **Vantagens da Manutenção Preventiva**

Uma política de Manutenção Preventiva é preferível sempre que se verifique (Nieble,1994)

- Um elevado número de falhas de um equipamento;
- Um elevado número de produtos defeituosos;
- Aumento dos custos de reparação devido a lubrificação, inspeção ou troca de consumíveis negligente;
- Elevado número de tempos mortos devido a falha dos equipamentos;
- Redução da vida útil do equipamento.

Quando bem aplicada, a Manutenção Preventiva pode aumentar a Disponibilidade, a performance dos equipamentos, reduzir os tempos de paragem da produção e a

necessidade de horas extra, redução do número de equipamentos redundantes, redução de inventário, aumentar a produtividade, a segurança e reduzir os custos provocados pelas avarias (Levit,1997).

Como desvantagens verifica-se um aumento do custo inicial das operações de Manutenção e um possível aumento de falhas devido à introdução de novos componentes no sistema, assim como uma possível exposição ao dano de outros componentes durante a realização das operações de Manutenção.

### **2.3 Equipamentos Reparáveis e Não Reparáveis**

Ao efetuar um planeamento de Manutenção ou análise de Fiabilidade de um órgão ou bem é bastante importante classificá-lo como bem Reparável ou Não Reparável (Assis, 2014).

No caso de um bem Não Reparável, que pode ser um componente ou um equipamento, a sua Fiabilidade é a probabilidade deste sobreviver durante a sua vida expectável. Para estimar a sua Fiabilidade são utilizados os conceitos de Tempo Médio até à Falha, do inglês *Mean Time to Failure (MTTF)*, ou percentagem de unidades que falham até um determinado tempo  $t$ .

Existem três formas de caracterizar os padrões de falhas de um componente Não Reparável ao longo do tempo, definidas pelo comportamento da sua Função de Risco ao longo deste. Uma Função de Risco decrescente é característica de componentes que apresentam uma forte probabilidade de falha no período inicial do seu comissionamento e que à medida que o tempo aumenta, a probabilidade de falha diminui. Uma Função de Risco constante é característica de aplicações de cargas excessivas às projetadas para o equipamento em questão, em intervalos de tempo constantes e uma Função de Risco crescente é característica de falhas originadas pelo desgaste dos componentes (O'Connor e Kleyner, 2012).

Para um bem reparável, a Fiabilidade é a probabilidade de não ocorrerem falhas durante um determinado período de interesse. Neste caso, podem existir múltiplas falhas. No caso particular em que a Taxa de Falhas é constante, pode ser utilizado como medida de fiabilidade o tempo médio entre falhas.

Em equipamentos Reparáveis, é também necessário considerar a Disponibilidade do sistema, uma vez que as operações de Manutenção e reparação levam tempo a ser efetuadas. Neste caso, a Disponibilidade depende da Taxa de Falhas e do Tempo Médio de Reparação e é importante abordar a relação entre a Disponibilidade e a Fiabilidade do equipamento no planeamento das ações de Manutenção.

Para os Bens Reparáveis pode ser considerada uma análise análoga à apresentada para os Bens Não Reparáveis, substituindo a Função de Risco pela Taxa de Falhas.

## 2.4 Padrão de Avarias

O padrão de avarias de um equipamento pode ser modulado a partir da tradicional curva da banheira, caracterizada por um período com uma alta incidência de falhas conhecido por mortalidade infantil, seguido de um período constante ou gradualmente crescente denominado por vida útil e finalizando com um período crescente da probabilidade de falha designado por período de desgaste (Ann-Klutke *et al*, 2003). A Figura 2.5 representa o modelo da curva da banheira.

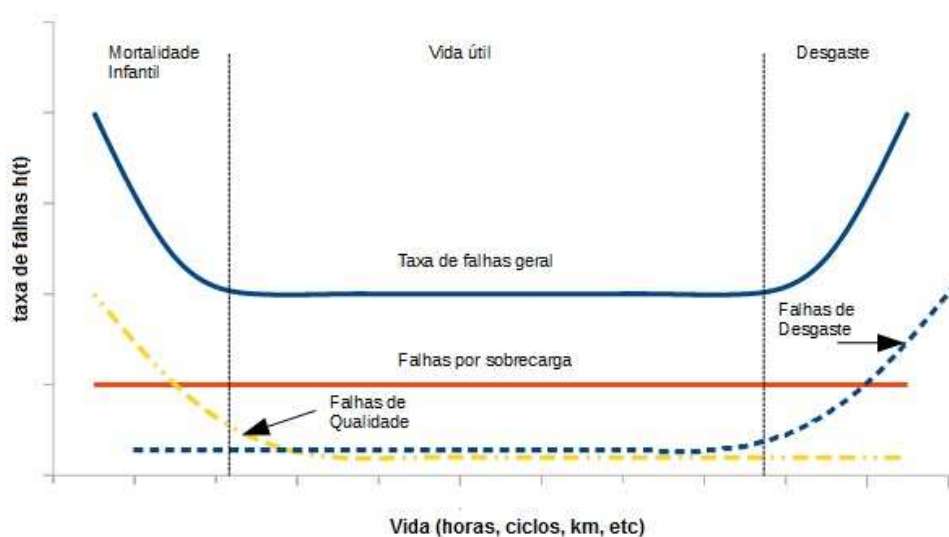


Figura 2.5– Padrão de Falhas A, Curva da banheira (O'Connor e Kleyner, 2012. Adaptado).

Através da análise da Figura 2.5, um equipamento cuja Taxa de Falhas segue o modelo da curva da banheira é caracterizado por uma Taxa de Falhas elevada no período inicial de exploração do equipamento. Este acontecimento encontra-se relacionado com os problemas de qualidade inerentes aos componentes do sistema e possíveis erros durante a instalação.

Com a evolução do tempo de exploração do sistema, a Taxa de Falhas diminui até ser obtido um valor constante. Neste período, denominado por vida útil o principal mecanismo de falha são as sobrecargas a que o sistema se encontra sujeito. Ao apresentar uma Taxa de Falhas constante durante este período, o seu valor é independente do tempo de exploração do equipamento.

Com o aumento do tempo de exploração do equipamento, existe um ponto a partir do qual o principal mecanismo de falha apresentado pelo sistema é o desgaste. A partir deste ponto, os mecanismos introdutórios de desgaste (fadiga, corrosão, etc.) levam ao aumento considerável da Taxa de Falhas do sistema.

No entanto, segundo a filosofia *RCM*<sup>1</sup>, nem todos os sistemas reparáveis seguem o padrão de falhas da curva da banheira representado na Figura 2.5. De acordo com Moubray (Moubray, 1999), os sistemas reparáveis podem ser modelados, para além da curva da banheira, por mais cinco padrões de falhas, representados nas Figuras 2.6 a 2.10.

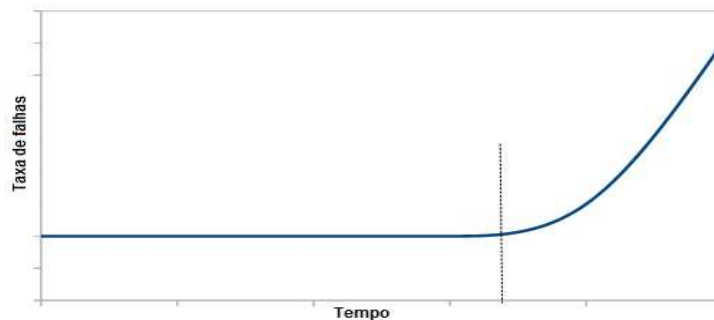


Figura 2.6 – Padrão de falhas B (Moubray, 1999. Adaptado).

O segundo modelo, denominado por modelo B e representado na Figura 2.6, é caracterizado por uma Taxa de Falhas constante ou ligeiramente decrescente até atingir a zona de desgaste, onde a probabilidade de falha aumenta.

---

<sup>1</sup> *Reliability Centered Maintenance*

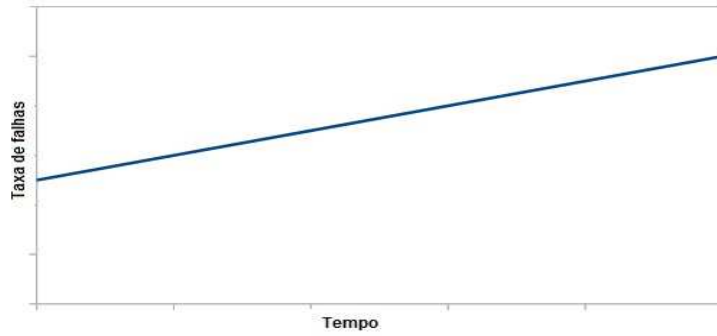


Figura 2.7 – Padrão de falhas C (Moubray, 1999. Adaptado).

O terceiro modelo, denominado por padrão de falhas C e representado pela Figura 2.7, é caracterizado por um ligeiro aumento da probabilidade de falha em função do tempo de funcionamento do equipamento, não se verificando um aumento da probabilidade de falhas devido a fenómenos de desgaste.

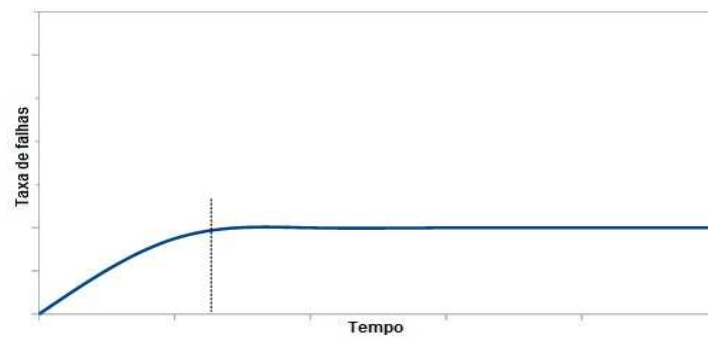


Figura 2.8 – Padrão de falhas D (Moubray, 1999. Adaptado)

O quarto modelo, denominado por padrão de falhas D e representado pela Figura 2.8, demonstra uma pequena probabilidade de falha quando o equipamento é novo, passando por uma rápida evolução da probabilidade de falha até esta atingir um patamar constante.

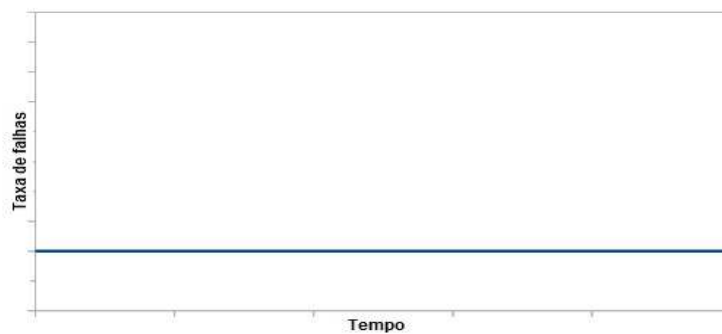


Figura 2.9 – Padrão de falhas E (Moubray, 1999. Adaptado).

O Padrão de falhas E, representado na Figura 2.9, é caracterizado por manter a probabilidade de falha constante para todos os estágios da sua vida. As falhas deste modelo são sempre aleatórias, não dependendo do tempo de funcionamento do sistema.

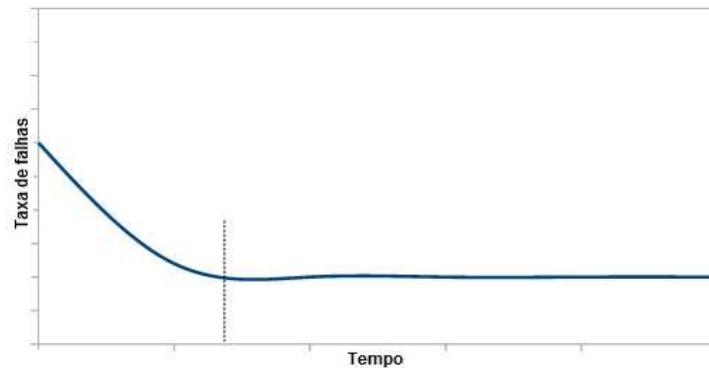


Figura 2.10 – Padrão de falhas F (Moubray, 1999. Adaptado).

O último modelo de falha da filosofia *RCM*, denominado por padrão de falhas F e representado pela Figura 2.10, é caracterizado por uma elevada Taxa de Falha no período inicial da sua vida, a denominada mortalidade infantil, que diminui até um patamar onde a Taxa de Falha se torna constante ou apresenta um ligeiro crescimento ao longo do tempo. A explicação detalhada dos padrões de falha e as suas causas podem ser observadas no trabalho de Smith (Smith, 2004).

Os padrões de falha anteriormente mencionados contrariam a ideia generalizada de que existe sempre uma ligação entre a Fiabilidade e o tempo de operação de um equipamento e de que quanto maior for as intervenções de *overhaul* realizadas num equipamento, menor é a sua probabilidade de falha. (Moubray, 1999)

## 2.5 Filosofias de Manutenção

Para responder ao problema de como definir/planear uma estratégia de Manutenção surgiram, ao longo do tempo, diversas Filosofias de Manutenção que pretendem definir linhas de orientação para otimizar a Manutenção efetuada e reduzir os custos associados à Função de Manutenção, das quais se destacam:

- Manutenção Centrada na Fiabilidade, do Inglês *Reliability Centered Maintenance (RCM)* (Rausand e Vatn, 2008);
- Manutenção Produtiva Total, do Inglês *Total Productive Maintenance (TPM)* (Chan *et al*, 2005);

- Análise de Ciclo de Custo de Vida, do Inglês *Life Cycle Cost (LCC)* (Assis, 2014);
- Fiabilidade, Disponibilidade, Manutibilidade e Segurança, do Inglês *Reliability, Availability and Safety (RAMS)* (Stapelberg, 2009).

Associadas a estas filosofias de manutenção surgiram, ao longo do tempo, diversas Políticas de Manutenção, nomeadamente

- Manutenção Centrada na Condição, do Inglês, *Condition-based Maintenance (CBM)* (IAEA, 2007);
- Manutenção Centrada na Falha, do Inglês *Failure-based Maintenance (FBM)* (Kelly, 1997);
- Manutenção Centrada no Tempo, do Inglês *Time-based Maintenance (TBM)* (Ahmad e Kamaruddin, 2012).

Ao longo do presente tópico serão abordadas as Filosofias de Manutenção Centrada na Fiabilidade, Manutenção Produtiva Total e a Política de Manutenção designada por Manutenção Centrada na Condição. Os princípios das restantes Filosofias e Políticas enunciadas podem ser consultadas na bibliografia referenciada.

### **2.5.1 Manutenção Centrada na Fiabilidade**

A Manutenção Centrada na Fiabilidade, ou *Reliability Centered Maintenance (RCM)*, surge em 1974 de um pedido por parte do departamento de defesa dos Estados Unidos da América à United Airlines para a preparação de um processo para a Manutenção de aviões aplicável à aviação civil. (Moubray, 1999).

Desde a sua criação, o *RCM* tem sido aplicado com bastante sucesso a um número considerável de indústrias. Limitado à aviação numa primeira fase, o processo foi posteriormente adotado pela indústria militar, nuclear, petrolífera, entre outras. As experiências verificadas nas indústrias anteriormente referidas mostram uma significativa redução dos custos relativos à Manutenção Preventiva, assim como o aumento da Disponibilidade dos equipamentos sujeitos ao *RCM*. (Rausand, 1998).

O *RCM* foi desenvolvido para balancear os custos e os benefícios da Função de Manutenção, de forma a desenvolver um programa de Manutenção Preventiva com o melhor custo benefício para um determinado equipamento. O processo baseia-se na

caracterização das funções ao nível do equipamento e na determinação de todas as falhas que o impossibilitem de cumprir as suas funções, através da realização de um processo denominado por *Failure Modes, Effect and Criticaly Analisys (FMECA)*<sup>2</sup> (Rausand, 1998).

Ao implementar uma metodologia *RCM*, pretende-se (Netherton,1999):

- Desenvolver um plano de prioridades para facilitar as tarefas de Manutenção Preventiva;
- Recolher informação útil para melhorar a Fiabilidade de componentes com Fiabilidades insatisfatórias;
- Desenvolver um plano de Manutenção Preventiva que permita a reposição dos níveis de Fiabilidade em equipamentos sujeitos a desgaste;
- Atingir os objetivos anteriores respeitando o Critério do Custo Mínimo.

Ao realizar uma abordagem segundo a metodologia *RCM* é necessário responder às denominadas sete grandes questões da Manutenção Centrada na Fiabilidade, nomeadamente (Moubray, 1999):

- Que funções e normas de performance do bem estão presentes no contexto operacional do equipamento;
- Em que aspectos o equipamento falha em cumprir os seus requisitos;
- Quais as causas de cada falha funcional;
- O que acontece quando ocorre cada falha;
- Em que aspecto é importante cada falha;
- O que pode ser feito para prevenir ou prever cada falha;
- O que deve ser feito se não for possível encontrar uma tarefa que permita prever a falha.

---

<sup>2</sup> *Failure Modes, Effect and Criticaly Analisys (FMECA)*, é um processo sistemático de identificação de todos os modos de falha que podem surgir num componente (El-Haram & Homer, conforme em Ellis, 2008).

Após a resposta a cada uma das perguntas enunciadas passa-se para a elaboração do plano de Manutenção, que deve cumprir os seguintes passos:

- Identificar os componentes ou equipamentos mais importantes ao nível da Manutenção;
- Realizar uma recolha adequada dos dados de falha dos equipamentos anteriores;
- Desenvolver uma árvore de falhas a partir dos dados de falha obtidos;
- Aplicar uma metodologia lógica de decisão para os modos críticos de falha;
- Classificar os requisitos de Manutenção;
- Implementar as decisões da política *RCM*;
- Realizar todas as operações anteriores baseadas na experiência de campo.

Ao utilizar a metodologia *RCM* esperasse um aumento do tempo de produção ou funcionamento do equipamento, uma diminuição dos custos de Manutenção, melhores decisões e controlo e uma melhor gestão da mão-de-obra disponível (Endrenyi *et al*, 2001).

Segundo Dhillon (Dhillon, 2002) permite ainda uma melhoria na segurança, uma redução do impacto ambiental provocado pela utilização dos equipamentos, um aumento da qualidade do produto fabricado, um aumento da vida útil dos componentes, o desenvolvimento de um histórico adequado de Manutenção, e ainda um aumento na Fiabilidade e Disponibilidade das linhas de produção.

De acordo com Moubray (Moubray, 1999) uma correta aplicação do *RCM* permite uma redução entre 40 a 70% os trabalhos de Manutenção de rotina. Os seus benefícios podem ser agrupados em duas categorias, redução de riscos e redução de custos (Dhillon, 2002).

### **2.5.2 Manutenção Produtiva Total**

A Manutenção Produtiva Total, do inglês *Total Productive Maintenance (TPM)*, é uma Filosofia de Manutenção que visa aumentar a Disponibilidade dos equipamentos existentes e reduzir a necessidade de aumento de investimento de capital (Chan *et al*, 2005).

A palavra “Total” na filosofia *TPM* representa três das principais características da Manutenção Produtiva Total (Nakajima, 1988):

- Total eficiência representa a busca pela eficiência económica e pelo lucro;
- Manutenção total de sistemas significa a busca pela melhoria da política de Manutenção da empresa, de forma a aumentar a Manutibilidade, a Fiabilidade e a suportabilidade dos equipamentos;
- Total participação de todos os envolventes da empresa no processo de Manutenção. Nesta Filosofia, a Manutenção é um trabalho de equipa e cada operador é responsável pelo estado do seu equipamento.

Para aumentar a Disponibilidade dos equipamentos a filosofia *TPM* visa reduzir os desperdícios através da redução das denominadas seis grandes perdas de produtividade (Wilson *et al*, 2000, conforme em Brah e Chong, 2007). As seis grandes perdas consideradas pela filosofia *TPM* são:

- Paragens não programadas;
- *Set-ups* e ajustamentos;
- Tempos mortos e pequenas paragens;
- Quebra de velocidade/aumento do tempo de ciclo;
- Produtos defeituosos e necessidade de retrabalho;
- Arranque das máquinas.

Para reduzir as perdas anteriormente referidas, a metodologia *TPM* engloba os custos associados à Manutenção nos custos produtivos e realça a necessidade do comprometimento de toda a organização na implementação de um plano de Manutenção efetivo (Chan *et al*, 2005). Os pilares que suportam a filosofia *TPM* encontra-se representados na Figura 2.11.

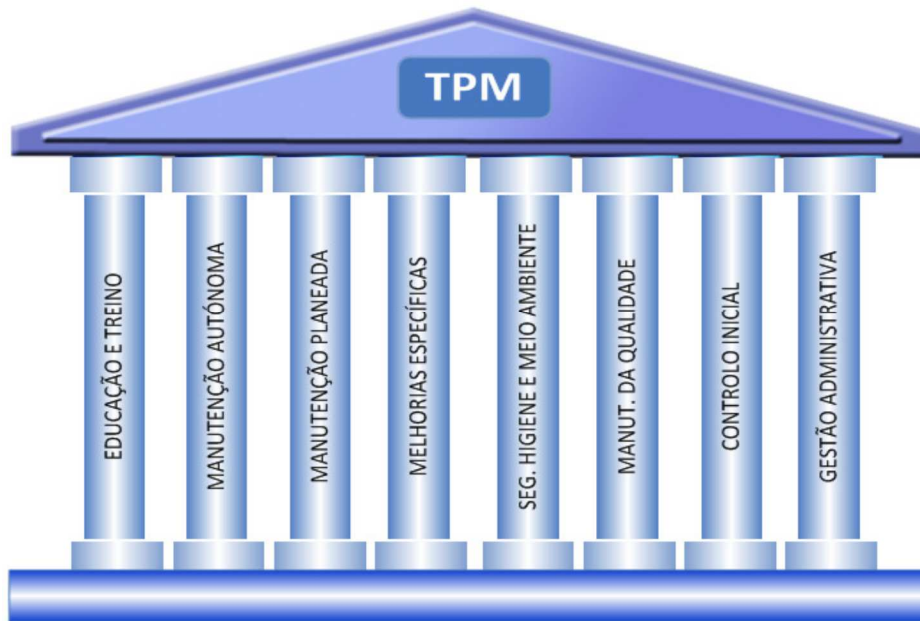


Figura 2.11 – Pilares do TPM.

A implementação de um plano de Manutenção baseado na Filosofia *TPM* visa (Chan *et al*, 2005):

- Maximizar a eficiência de um equipamento, e como consequência a eficiência geral da planta;
- Estabelecer um plano de Manutenção preventiva para toda a vida útil de equipamento;
- Implementar a filosofia *TPM* em todos os departamentos da empresa;
- Envolver todos dos colaboradores de uma companhia, desde a gestão de topo até aos funcionários de cada departamento;
- Promover as ações de Manutenção Preventiva através da motivação e sensibilização dos colaboradores, apostando em pequenas atividades de grupo.

No estudo realizado por Chan (Chan *et al*, 2005), a implementação da Filosofia *TPM* permitiu um aumento de 83% na produtividade e uma redução de 517 para 89 paragens para o mesmo período de tempo considerado. É ainda mencionado no mesmo estudo que a implementação do *TPM* permitiu uma melhoria no ambiente de trabalho e no comprometimento da força laboral com os objetivos da companhia.

### 2.5.3 Manutenção Centrada na Condição

A Manutenção Centrada na Condição, do inglês *Condition Based Maintenance (CBM)* é uma política de manutenção que define as operações de substituição dos componentes com base na sua condição atual e na previsão da sua condição futura (Raheja *et al*, 2006, conforme em Ellis, 2008)

Tem como principais objetivos (IAEA, 2007):

- Aumentar a Disponibilidade dos equipamentos, reduzindo as paragens forçadas e aumento a Fiabilidade do sistema;
- Aumentar o tempo de vida dos equipamentos, reduzindo o desgaste provocado por sucessivas reparações, minimizando o impacto da montagem e desmontagem de componentes através da deteção em tempo real dos problemas a eles associados;
- Reduzir os custos de Manutenção, reduzindo os custos de reparação, a necessidade de horas extraordinárias e a quantidade de *stock* em inventário.

Para realizar uma análise utilizando a metodologia *CBM* é necessário efetuar um estudo detalhado da fiabilidade dos equipamentos e dos custos associados à sua Manutenção (Márques e Herguedas, 2004), assim como um levantamento adequado dos modos e Taxas de alha, criticidade dos equipamentos e benefícios que cada tipo de Manutenção (Ellis, 2008), descritos no ponto 2.2 do presente documento, juntamente com uma monitorização em tempo real do estado do equipamento (Osisoft, 2007). A metodologia *CBM* pode englobar:

- Inspeções gerais executadas semanalmente;
- Inspeções mensais detalhadas;
- Informação geral do equipamento;
- Parâmetros de funcionamento em tempo real;
- Anormalidades detetadas em tempo real.

Para além das condições anteriormente mencionadas, para aplicar o *CBM* é necessário a determinação de parâmetros de prognóstico, caso de parâmetros de desgaste e deterioração, que são utilizados como indicadores para a deliberação dos intervalos de Manutenção necessários para evitar a ocorrência de falhas catastróficas nos sistemas. (Yam *et al*, 2001).

Os parâmetros definidos são medidos utilizando um conjunto de técnicas como análise de óleos, medição de vibrações, consumo de combustível, ambiente de operação, entre outros. É com base nos resultados obtidos utilizando as técnicas anteriores que se definem os intervalos de Manutenção a aplicar ao equipamento. (Banjevic *et al*, 2001). Segundo Banjevic (Banjevic *et al*, 2001), o *CBM* é muitas vezes utilizado em conjunto ou complemento a outras Filosofias de manutenção, caso, por exemplo, a Manutenção Centrada na Fiabilidade.

Como principais benefícios a Manutenção Centrada na Condição apresenta a caracterização em tempo real do estado do equipamento em estudo, reduz os tempos de paragem dos equipamentos devido à deteção antecipada de potenciais falhas, aumenta a capacidade de resposta às avarias e aumenta a eficiência produtiva dos equipamentos (Osisoft, 2007).

## **2.6 Indicadores de Manutenção**

De acordo com a norma NP EN 15341:2009, existem diversos indicadores de desempenho que permitem avaliar o exercício da Função de Manutenção. Estes indicadores encontram-se subdivididos em:

- Indicadores Económicos;
- Indicadores Técnicos;
- Indicadores Organizacionais.

Dos indicadores mencionados, são descritos na presente dissertação alguns dos indicadores para o planeamento da Função de Manutenção, nomeadamente os conceitos de Manutibilidade, Tempo Médio de Reparação, Disponibilidade e Fiabilidade, descritos ao longo do presente tópico.

### **2.6.1 Manutibilidade**

A Manutibilidade pode ser definida como a probabilidade de restaurar a condição de operacionalidade de um sistema após a ocorrência de uma falha (Dhillon, 2002) e tem como objetivo desenvolver sistemas que apresentem o menor tempo de reparação possível, de forma a maximizar a Disponibilidade dos equipamentos (Assis, 2014). Por outras palavras a Manutibilidade de um sistema afeta diretamente o Tempo Médio de

Reparação de um equipamento, fator que segundo a maioria dos autores (Dhillon, 2002, O'Connor e Kleyner, 2012, Rajpal *et al*, 2006) é um dos parâmetros mais utilizados para descrever a Manutibilidade de um sistema. No entanto, a Manutibilidade também pode ser descrita através do Tempo Médio de Manutenção Preventiva e pelo Tempo Médio de Paragem devido a Manutenção.

### **Tempo Médio de Reparação**

O Tempo Médio de Reparação, do Inglês *Mean Time to Repair (MTTR)* mede o tempo necessário para realizar uma intervenção de Manutenção. Para um sistema com  $m$  componentes reparáveis, pode ser obtido através da equação (Dhillon, 2002).

$$MTTR = \frac{\sum_{l=1}^m \lambda_l CMT_l}{\sum_{l=1}^m \lambda_l} \quad (2.1)$$

Onde:

$MTTR$  – Tempo Médio de Reparação.

$m$  – Número total de componentes reparáveis existentes no sistema;

$\lambda_l$  – Taxa de Falha  $\lambda$  para o componente reparável  $l$  do sistema, com  $l = 1, 2, \dots, m$ ;

$CMT_l$  – Tempo de reparação, seguindo uma política de Manutenção Corretiva, para o componente reparável  $l$ .

O Tempo Médio de Reparação depende do conjunto de atividades necessárias para realizar a intervenção de Manutenção Corretiva, que genericamente, se encontram descritas na Figura 2.12.



Figura 2.12– Processo de reparação seguindo uma política de Manutenção Corretiva (Assis, 2014).

Segundo O'Connor e Kleyner (O'Connor e Kleyner, 2012), o tempo de reparação tende a seguir uma distribuição Lognormal. Segundo os mesmos autores, os parâmetros para esta distribuição podem ser estimados a partir dos dados de reparações dos equipamentos, seguindo a distribuição anteriormente mencionada.

### **Tempo Médio de Manutenção Preventiva**

Para manter o nível de funcionamento de um equipamento são efetuadas um conjunto de manutenções preventivas ao longo da sua vida útil. Para este caso, o Tempo Médio de Reparação é definido como o Tempo Médio de Manutenção Preventiva, do Inglês *Mean Preventive Maintenance Time (MPMT)* e é obtido através da equação:

$$MPMT = \frac{\sum_{r=1}^s FPM_r ETPMT_r}{\sum_{r=1}^s FPM_r} \quad (2.2)$$

Onde:

$MPMT$  – Tempo Médio de Manutenção Preventiva;

$s$  - Número total de manutenções preventivas realizadas ao sistema;

$FPM_r$  – Frequência, em número de intervenções por hora, da Manutenção Preventiva  $r$ , com  $r = 1, 2, \dots, s$ ;

$ETPMT_r$  – Tempo, em horas, de duração da Manutenção Preventiva  $r$ .

O Tempo Médio de Manutenção Preventiva depende do conjunto de atividades necessárias para realizar a intervenção de Manutenção Corretiva, que genericamente, se encontram descritas na Figura 2.13.

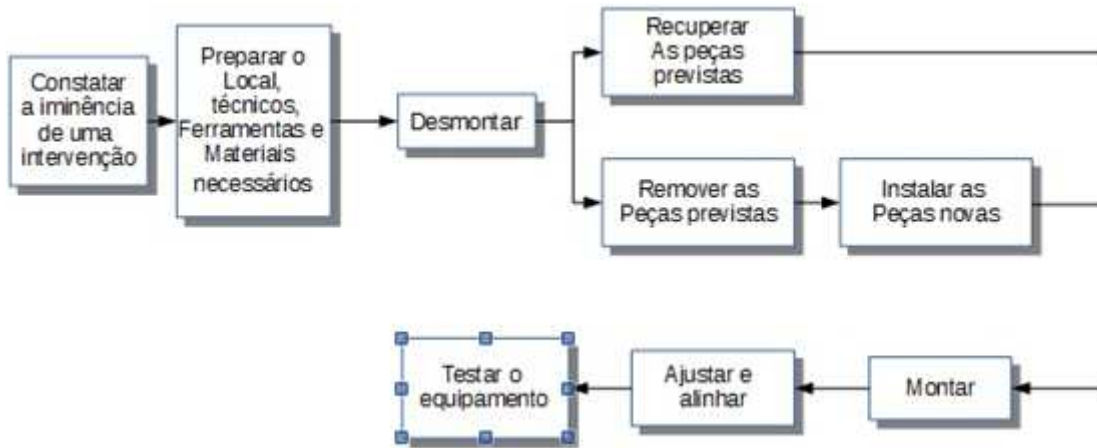


Figura 2.13 - Processo de reparação seguindo uma política de Manutenção Preventiva (Assis, 2014).

### **Tempo Médio de Paragem devido a Manutenção**

O Tempo Médio de Paragem devido a Manutenção, do Inglês *Mean Maintenance Downtime (MMD)* pode ser descrito como o tempo total de paragem devido às operações de Manutenção. Este indicador é composto pelo Tempo Médio de Manutenção Corretiva, obtido através do *MTTR*, pelo Tempo Médio de Manutenção Preventiva, obtido pelo *MPMT* e pelos tempos logísticos e administrativos necessários para a realização de uma tarefa de Manutenção. O seu valor pode ser obtido através da equação

$$MMD = MAMT + LDT + ADT \quad (2.3)$$

Onde:

*MMD* – Tempo Médio de Paragem devido a Manutenção;

*MAMT* – Tempo médio de Reparação ou Tempo Médio de Manutenção Preventiva necessário para a realização da tarefa de Manutenção;

*LDT* - Tempo logístico necessário para obter os componentes ou materiais necessários para a realização de uma operação de Manutenção;

*ADT* – Tempo administrativo necessário para a realização de uma operação de Manutenção.

## **Distribuições Estatísticas que Permitem Prever a Manutibilidade de um Sistema**

Do ponto de vista estatístico, a Manutibilidade pode ser modulada a partir de um conjunto de distribuições de probabilidade nomeadamente:

- Função Exponencial;
- Função de Weibull;
- Função Gamma;
- Função de Erlangian;
- Função Normal.

A formulação matemática para determinar a Manutibilidade de um sistema através das distribuições estatísticas anteriormente mencionadas pode ser encontrada em Dhillon (Dhillon, 2002).

### **2.6.2 Disponibilidade**

A Disponibilidade, representada pela letra A (*Availability*), pode ser definida como a percentagem de tempo em que um equipamento cumpriu os seus requisitos de funcionamento, durante o seu tempo disponível de funcionamento, ou ainda como a percentagem de um equipamento se encontrar operacional para uma determinada missão temporal (Assis, 2014).

Segundo O'Connor e Kleyner (O'Connor e Kleyner, 2012), a Disponibilidade de um sistema é dado pela equação

$$Disponibilidade = \frac{\textit{Tempo de funcionamento}}{\textit{Tempo de funcionamento} + \textit{tempo de paragem}} \quad (2.4)$$

A Disponibilidade pode ainda ser subdivida em Disponibilidade Intrínseca, Disponibilidade Realizada e Disponibilidade Operacional, seguidamente descritas.

#### **Disponibilidade Intrínseca**

Se considerarmos que um equipamento é deixado em funcionamento até falhar, seguindo uma política de Manutenção Corretiva, a Disponibilidade do sistema, denominada por Disponibilidade Intrínseca, é dada pela seguinte equação

$$A_I = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (2.5)$$

Onde:

$A_I$  – Disponibilidade Intrínseca de um sistema;

$MTBF$  - Tempo Médio entre Falhas do sistema;

$MTTR$  - Tempo Médio de Reparação do sistema.

### **Disponibilidade Realizada**

Se adicionarmos à equação (2.5) a variável resultante da realização de manutenções preventivas ao equipamento, a Disponibilidade denomina-se por Disponibilidade Realizada e é obtida pela seguinte equação

$$A_R = \frac{MTBMA}{MTBMA + MTT} \quad (2.6)$$

Onde:

$A_R$  – Disponibilidade Realizada do sistema;

$MTBMA$  - Tempo Médio entre Ações de Manutenção, Preventiva ou Corretiva;

$MTT$  - Tempo Médio de Manutenção.

### **Disponibilidade Operacional**

A Disponibilidade Operacional é a Disponibilidade do sistema considerando o seu ambiente de operação e inclui todas as fontes de paragem, adicionando ao tempo necessário para a realização de operações de manutenção os tempos relativos às atividades logísticas e administrativas necessárias para a realização das intervenções. O seu valor é obtido através da seguinte equação

$$A_O = \frac{MTBMA}{MTBMA + MDD} \quad (2.7)$$

Onde:

$A_O$  – Disponibilidade Operacional;

$MTBMA$  – Tempo Médio entre Operações de Manutenção, Corretiva ou Preventiva;

$MDD$  – Tempo Médio de Paragem devido a Manutenção.

### 2.6.3 Fiabilidade

O conceito de Fiabilidade pode ser definido de várias formas, no entanto a definição mais usual de Fiabilidade é a capacidade de um produto de realizar a sua função em determinadas condições, durante um determinado período de tempo ou outra unidade de medida de vida. (O'Connor e Kleyner, 2012).

Sendo a Fiabilidade tratada como uma probabilidade, a confiança dos resultados obtidos depende da quantidade de testes realizados e para se obter uma confiança elevada, é necessário proceder a um conjunto de ensaios durante vários meses de operação. (Ireson *et al*, 1995).

Do ponto de vista da probabilidade, a Fiabilidade pode ser representada pela seguinte equação

$$R(t) = 1 - F(t) \quad (2.8)$$

Onde:

$F$  – É função de probabilidade acumulada de falha do sistema;

$t$  - Instante de tempo, ou outra unidade de medida de vida, considerado.

#### **Fiabilidade de Sistemas em Série e Paralelo**

A Fiabilidade de um sistema depende da distribuição dos seus componentes, que podem encontrar-se associados em série, se a Fiabilidade do sistema depender da operacionalidade de todos os seus componentes, ou em paralelo se existirem redundâncias (Ireson *et al*, 1995).

Para um sistema em série, o seu sucesso depende da sobrevivência de todos os seus componentes e para este caso, a Fiabilidade, de um sistema composto por  $m$  componentes, é dada pela equação

$$R_{sis} = R_1 \times R_2 \times \dots \times R_m \quad (2.9)$$

Onde:

$R_1$  – Fiabilidade do primeiro componente do sistema;

$R_2$  – Fiabilidade do segundo componente sistema;

$R_m$  – Fiabilidade do componente  $m$  do sistema.

No caso de sistemas em paralelo, a Fiabilidade do sistema é obtida pela subtração do produto da probabilidade cumulativa de falha dos componentes em paralelo existentes no sistema, através da equação

$$R_{sis} = 1 - \prod_{i=1}^m (1 - R_l(t)) \quad (2.10)$$

Onde:

$R_{sis}$  – Fiabilidade do sistema;

$R_l$  - Fiabilidade do componente  $l$  do sistema;

$t$  – Instante de tempo considerado.

### **Tempo Médio Entre Falhas (MTBF) e Tempo Médio até à Falha (MTTF)**

O Tempo Médio Entre Falhas é um dos indicadores mais utilizados em Manutenção para definir o comportamento de sistemas que apresentem comportamento de falhas aleatório, com Taxa de Falhas constante (O'Connor e Kleyner, 2012). Neste caso, o sistema segue uma Distribuição Exponencial e o Tempo Médio Entre Falhas, do Inglês *Mean Time Between Failures (MTBF)* é obtido através da equação

$$MTBF = \frac{1}{\lambda} \quad (2.11)$$

Onde:

$MTBF$  – Tempo Médio Entre Falhas;

$\lambda$  - Taxa de Falha do sistema.

Em casos em que a Taxa de Falhas não é constante, como é o caso do período de desgaste, caracterizado por Taxa de Falhas crescente, o termo  $MTBF$  é substituído pelo Tempo Médio até à Falha, do Inglês *Mean Time to Failure (MTTF)* e pode ser obtido através das seguintes distribuições (O'Connor e Kleyner, 2012):

- Distribuição Normal;
- Distribuição LogNormal;
- Distribuição de Weibull.

A formulação matemática para a determinação do *MTTR* para as distribuições anteriormente mencionadas pode ser consultada no trabalho de O'Connor e Kleyner (O'Connor e Kleyner, 2012).

## 2.7 Métodos Estatísticos para Modelação da Fiabilidade

Segundo a literatura (Nakagawa, 2005) as distribuições estatísticas mais utilizadas para modelar o comportamento de falha de um sistema são: a Distribuição Exponencial, a Distribuição Normal, a Distribuição de Weibull e a Distribuição Log-Normal. As formulações matemáticas de cada uma destas distribuições serão seguidamente descritas.

- Distribuição Exponencial

Bastante utilizada para modelar a Fiabilidade de componentes cuja Taxa de Falha não depende do tempo e cujo padrão de avarias não apresenta mecanismos de desgaste (Calixto, 2015), a função de densidade de probabilidade da Função Exponencial é dada pela seguinte equação (Kelly, 1997)

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (2.12)$$

Onde:

$f$  – Distribuição de densidade de falha;

$\lambda$  - Taxa de Falhas;

$t$  – Instante de tempo considerado, em horas, dias, ou outra unidade de medida de vida.

A função de distribuição cumulativa da Distribuição Exponencial é dada pela equação

$$F(t) = e^{-\lambda t} \quad (2.13)$$

Onde  $F$  é a distribuição cumulativa de falha e o significado das variáveis representadas na equação (2.13) ao descrito na equação (2.12).

- Distribuição Normal

Caracterizada por uma Função de Risco crescente, é utilizada para modular equipamentos que se encontrem em zona de desgaste (Ireson *et al*, 1995). A sua função de densidade de probabilidade é dada pela seguinte equação

$$f(t) = \sqrt{2\pi\sigma^2} \times e^{-\left(\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)} \quad (2.14)$$

Onde:

$f$  – Função de densidade de probabilidade de falha;

$\mu$  - Média da função normal;

$\sigma$  - Desvio padrão da função normal, cujo valor deve ser sempre positivo;

$t$  – Instante de tempo considerado, em horas, dias, ou outra unidade de medida vida.

A função de Distribuição Cumulativa Normal é dada pela equação

$$F(t) = \int_{-\infty}^t \sqrt{2\pi\sigma^2} e^{-\left(\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)}, -\infty < t < +\infty \quad (2.15)$$

Onde  $F$  é a distribuição cumulativa de falha e as variáveis representadas na equação (2.15) tem o mesmo significado das presentes na equação (2.14).

A equação (2.15) pode ser rescrita utilizando a Distribuição Normal *Standard*  $\Phi$ . Com base nesta consideração toma a forma da equação (2.16), seguidamente representada

$$F(t) = \Phi \frac{t - \mu}{\sigma}, -\infty < t < +\infty \quad (2.16)$$

Onde  $\Phi$  corresponde à distribuição normal cumulativa *standard* e as restantes variáveis representadas correspondem às descritas na equação (2.14).

Os valores da distribuição normal cumulativa *standard* podem ser consultados na Tabela A4, presente no Apêndice 1 dos trabalhos de (Ireson *et al*, 1995)

- Distribuição de Weibull

A distribuição de Weibull é bastante utilizada em engenharia devido à sua adaptabilidade para modular o comportamento dos três modos de falha representados na curva da banheira (Kelly, 1997). A função de probabilidade de falha da distribuição de Weibull, com dois parâmetros, é obtida pela equação

$$f(t) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta}, t, \alpha, \beta > 0 \quad (2.17)$$

Onde:

$f$  – Função de densidade de probabilidade de falha;

$\beta$  - Parâmetro de forma;

$\alpha$  - Vida característica, para a qual 63.2% dos componentes se encontram em estado de falha;

$t$  – Instante de tempo considerado, em horas, dias, ou outra unidade de medida de vida.

E a Função Cumulativa de Weibull é dada pela seguinte equação

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta}, t, \alpha, \beta > 0 \quad (2.18)$$

Onde as variáveis existentes na equação tem o mesmo significado das presentes na equação (2.17).

- Distribuição LogNormal

A Distribuição LogNormal é utilizada, a título de exemplo, para modular o comportamento à fadiga dos metais, a vida de semicondutores e materiais de isolamento elétrico (Ireson *et al*, 1995). A função de densidade de probabilidade é dada pela equação

$$f(t) = \frac{1}{(\sqrt{2\pi} t \sigma)} e^{-\left[\frac{(\ln(t)-\mu)^2}{2\sigma^2}\right]}, t > 0 \quad (2.19)$$

Onde:

$f$  – Função de densidade de probabilidade de falha;

$\mu_{log}$  - Média logarítmica;

$\sigma_{log}$  - Desvio padrão logarítmico, cujo valor deve ser sempre positivo;

$t$  – Instante de tempo considerado, em horas, dias, ou outra unidade de medida de vida.

A função de distribuição cumulativa de falha, segundo uma Distribuição LogNormal é dada pela equação

$$F(t) = \Phi \left[ \frac{\ln(t) - \mu}{\sigma} \right], t > 0 \quad (2.20)$$

Onde:

$F$  – Distribuição cumulativa de falha;

$\Phi$  – Distribuição normal *standard*;

$\mu$  - Média logarítmica;

$\sigma$  - Desvio padrão logarítmico, cujo valor deve ser sempre positivo;

$t$  – Instante de tempo considerado, em horas, dias, ou outra unidade de medida temporal.

## 2.8 Custos da Manutenção

Os custos de Manutenção são um elemento bastante importante para as empresas, uma vez que podem muitas vezes variar entre duas a vinte vezes o custo de aquisição para cada equipamento (Dhillon, 2002). Os custos de Manutenção podem ser subdivididos em quatro grandes categorias, nomeadamente os custos diretos, custos de perda de produção, custos de degradação e custos de paragens (Cavalier,1996).

Os custos diretos estão associados com a conservação da operacionalidade do equipamento, onde são incluídos os custos da Manutenção Preventiva Sistemática e Condicionada, os custos da Manutenção Corretiva, e os custos das intervenções de *overhaul*.

Os custos diretos dependem do custo da mão-de-obra disponível, dos materiais necessários para a realização de cada operação de Manutenção e dos custos dos serviços associados às reparações, nomeadamente quando estas são realizadas por entidades externas à empresa. (Cabral, 2006).

Os custos de perda de produção estão relacionados com as perdas provocadas na produção devido à indisponibilidade dos equipamentos, causada por uma avaria ou por uma intervenção de Manutenção Preventiva.

Os custos de degradação estão relacionados com a deterioração do estado do equipamento devido à aplicação uma política incorreta de Manutenção, originando produtos defeituosos, perda do rendimento de produção e fraca qualidade de produto (Cabral, 2006). Finalmente, os custos das paragens estão associados com a inoperacionalidade dos equipamentos enquanto estes se encontram em reparação ou inoperacionais.

Os custos da Manutenção dependem ainda de inúmeros fatores, nomeadamente da condição do equipamento, da experiência e formação do operador, da Política/Filosofia de Manutenção da instalação e das especificações do equipamento. (Levitt,1997).

Para além dos custos anteriormente mencionados, existem ainda os custos relativos à segurança e ao ambiente, provocados pela falha de um equipamento. Estes custos, para além de não serem fáceis de quantificar, podem colocar em causa a imagem da empresa no mercado e na sociedade em que esta se encontra inserida (Cabral, 2006).

Para uma melhor visualização dos custos associados à Função de Manutenção apresenta-se na Figura 2.14 o icebergue dos custos de Manutenção.



Figura 2.14 – Icebergue dos custos de Manutenção (Cabral, 2006).

Através da análise da figura 2.14 é possível visualizar que os custos diretos da função de manutenção são apenas a ponta do icebergue dos custos de manutenção, contabilizando, segundo Cabral (Cabral, 2006) apenas um quarto da totalidade dos custos associados à manutenção.

Relativamente aos custos diretos, à medida que se aumenta o nível de Manutenção, ou seja, que se aumente o número de intervenções de Manutenção efetuadas ao equipamento, aumenta o custo de Manutenção no entanto, se baixarmos o nível de Manutenção efetuado, aumentam os custos das avarias. O custo total de Manutenção é função dos custos anteriormente mencionados e o seu comportamento pode ser observado no gráfico ilustrado pela Figura 2.15.

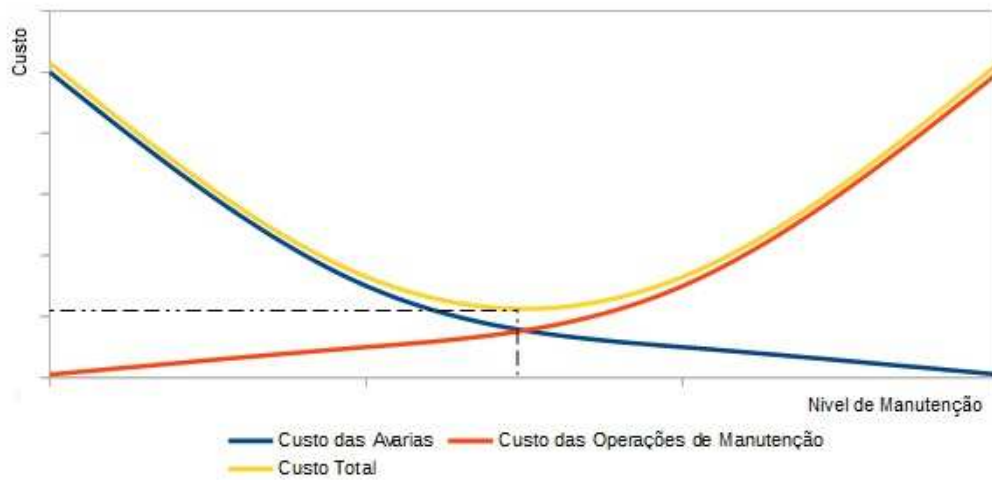


Figura 2.15 – Custos de Manutenção (Assis, 2014. Adaptado)

É de conhecimento geral que numa política adequada de Manutenção é necessário balancear os custos de Manutenção com os custos associados às avarias, de forma a atingir um nível de que minimize os custos totais da Função de Manutenção.



## Capítulo 3 – Metodologia Proposta

De acordo Endrenyi (Endrenyi *et al*, 2001), existem diversos critérios para a elaboração de um plano de manutenção. No entanto, as duas principais perspectivas que suportam a definição dos intervalos ótimos de manutenção preventiva sistemática são baseadas em dois critérios: os critérios de decisão baseados no Custo Mínimo e na Disponibilidade Máxima (Knezevic, 1997).

### 3.1 Critério da Disponibilidade Máxima

De acordo Kay (Kay, 1976) a Disponibilidade Máxima entre duas intervenções de Manutenção Corretiva  $A_c$  é dada pela seguinte equação:

$$A_c = \frac{M}{M + m_c} \quad (3.1)$$

Onde:

$A_c$  - Disponibilidade Máxima entre duas intervenções de Manutenção Corretiva;

$M$  - Tempo Médio de Falha, do inglês *Mean Time to Failure (MTTF)*;

$m_c$  - Tempo Médio de Manutenção de uma reparação corretiva.

No caso de uma Manutenção Preventiva, a Disponibilidade Máxima entre duas intervenções de Manutenção Preventiva  $A_p$  é dada pela seguinte equação:

$$A_p = \frac{\bar{T}}{\bar{T} + m_p R(t) + m_c [1 - R(t)]} \quad (3.2)$$

Onde:

$A_p$  - Disponibilidade Máxima entre duas intervenções de Manutenção Preventiva;

$m_p$  - Tempo Médio de uma intervenção de Manutenção Preventiva;

$m_c$  - Tempo Médio de Manutenção de uma reparação Corretiva;

$R(t)$  - Fiabilidade do componente ou sistema para o instante de tempo  $t$  considerado;

$t$  - Instante de tempo considerado, em horas ou outra unidade de medida de vida;

$\bar{T}$  - Tempo médio acumulado de funcionamento até à falha, obtido através da seguinte equação:

$$\bar{T} = \int_0^t R(t)dt \quad (3.3)$$

O critério de decisão para a Disponibilidade Máxima obtém-se respeitando a seguinte condição:

$$A_p - A_c > 0 \quad (3.4)$$

Sempre que se verifique a condição (3.4) é preferível realizar uma operação de Manutenção Preventiva, onde o objetivo passa por maximizar a equação (3.2). A evolução da Disponibilidade ao longo da vida acumulada é dada pelo gráfico representado na Figura 3.1.

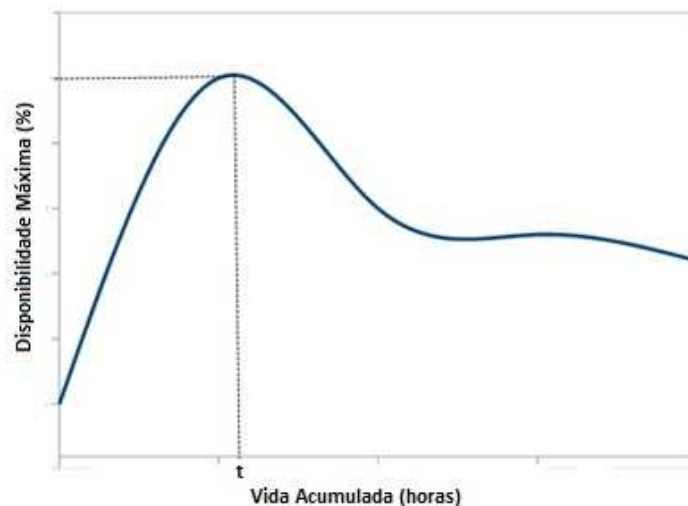


Figura 3.1 – Evolução da disponibilidade segundo o critério da disponibilidade máxima

O objetivo do critério da disponibilidade máxima é estimar o instante de tempo  $t$  que maximize a disponibilidade do sistema/componente. À direita deste valor a Disponibilidade decresce devido a um número excessivo de intervenções de manutenção, enquanto à esquerda ponto  $t$ , a Disponibilidade diminui devido a um aumento do número de avarias do sistema.

### 3.2 Critério do Custo Mínimo

Considerando que os equipamentos devem gerar retorno económico, outra forma de abordar o problema passa por tentar minimizar os custos de Manutenção do equipamento.

Se considerarmos que é realizada uma operação de Manutenção Corretiva num dado equipamento, o custo dessa intervenção  $C_c$  pode ser estimado através da seguinte equação:

$$C_c = \frac{c_c m_c}{M + m_c} \quad (3.5)$$

Onde:

$C_c$  – Custo Médio de Manutenção Corretiva;

$M$  - Tempo Médio de Falha, do inglês *Mean Time to Failure (MTTF)*;

$m_c$  - Tempo Médio de Manutenção de uma reparação Corretiva;

$c_c$  - Custo por unidade de tempo, seguindo uma política de Manutenção Corretiva.

No caso de uma Manutenção Preventiva, o custo da intervenção  $C_p$  pode ser estimado através da seguinte equação:

$$C_p = \frac{[1 - R(t)]m_c c_c + R(t)m_p c_p}{\bar{T} + m_p R(t) + m_c [1 - R(t)]} \quad (3.6)$$

Onde:

$C_p$  – Custo Médio de Manutenção Preventiva;

$m_p$  - Tempo Médio de Reparação para uma Manutenção Preventiva;

$m_c$  - Tempo Médio de Reparação de uma reparação Morretiva;

$c_p$  - Custo por unidade de tempo, seguindo uma política de Manutenção Preventiva;

$c_c$  - Custo por unidade de tempo, seguindo uma política de Manutenção Corretiva;

$\bar{T}$  - Tempo médio acumulado de funcionamento até à falha, obtido pela equação (3.3);

$R(t)$  - Fiabilidade do sistema, no instante de tempo  $t$  considerado, em horas ou noutra unidade de medida de vida.

Neste caso o critério de decisão é dado pela seguinte condição:

$$C_p - C_c < 0 \quad (3.7)$$

Caso a condição (3.7) se verifique, é preferível a realização de uma Manutenção Preventiva em detrimento de uma operação corretiva.

A evolução dos custos de manutenção em função da vida acumulada do sistema encontra-se representada no gráfico ilustrado pela Figura 3.2.

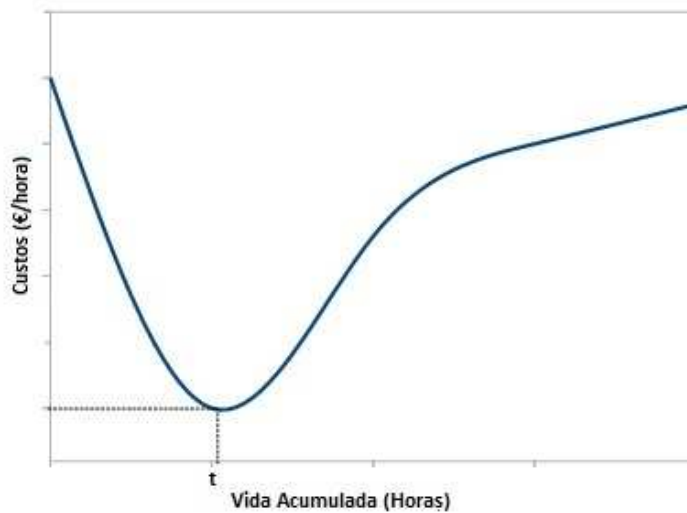


Figura 3.2 - Evolução dos custos de manutenção segundo o critério do custo mínimo.

O objetivo do critério do custo mínimo é estimar o instante de tempo  $t$  que minimize os custos das intervenções de manutenção. À direita deste ponto os custos de Manutenção aumentam devido ao elevado número de intervenções de Manutenção, enquanto à esquerda deste valor, os custos de Manutenção aumentam devido ao aumento do número de falhas verificado e conseqüentemente, um aumento do número de intervenções de Manutenção Corretiva realizadas.

No entanto, estes critérios são antagônicos uma vez que as condições que minimizam o custo são contrárias às que maximizam a Disponibilidade (Rezg *et al*, 2014).

De modo a aproximar estas duas perspectivas, vários autores propõem adição de uma restrição de Fiabilidade mínima nos dois critérios (Wang e Pham, 2000). Outros propõem a utilização de técnicas multiobjetivo atribuindo um determinado peso a cada critério e depois obter a solução que devolva o menor custo, com a maior Disponibilidade, respeitando a fiabilidade mínima imposta e os pesos atribuídos a cada critério de decisão (Cunha *et al*, 2015).

### 3.3 Algoritmo Proposto

O modelo proposto na presente dissertação é uma adaptação dos trabalho realizado por Tsai (Tsai *et al*, 2001) cujo objetivo é determinar os intervalos ótimos de Manutenção Preventiva baseado no critério de decisão do Custo Mínimo.

Assim, desprezando os tempos necessários para a reparação dos equipamentos, e seguindo a metodologia proposta por Tsai (Tsai *et al*, 2001) a equação (3.6) pode ser reescrita, tomando apenas em consideração os custos das intervenções, sob a forma da equação

$$CM = CMC + CMP \quad (3.8)$$

Onde:

$CM$  - Custo total do Plano de Manutenção;

$CMC$ - Custo total das Manutenções Corretivas efetuadas;

$CMP$  - Custo total das Manutenções Preventivas realizadas.

Assim, a função objetivo a ser minimizada pelo algoritmo proposto toma a forma da equação

$$MIN CM = CMC + CMP \quad (3.9)$$

Cujas variáveis se encontram descritas na equação (3.8).

Se dividirmos o tempo de exploração de um sistema reparável em Períodos de Manutenção, designados pela letra  $i$ , e considerando que em cada um destes períodos só pode existir um tipo de intervenção, Preventiva ou Corretiva, o custo de uma operação de Manutenção Preventiva é dado pela seguinte equação

$$CMP_i = \sum_{j=1}^k C_{ij} \quad (3.10)$$

Onde:

$CMP$  – Custo de uma intervenção de Manutenção Preventiva;

$i$  – Período de Manutenção;

$C_{ij}$  – Custo  $C$  da Operação de Manutenção  $j$  para o Período de Panutenção  $i$ .

$k$  – Número total de Operações de Manutenção  $j$ .

As Operações de Manutenção mencionadas na equação anterior podem englobar um conjunto de tarefas necessárias para assegurar o funcionamento de um equipamento. Neste caso, considerou-se um total de seis operações, nomeadamente Limpeza, Calibração, Alinhamento, Lubrificação, Pequenas Reparações e *Overhaul*. Para facilitar a compreensão dos custos associados a cada operação de manutenção, estes foram compilados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Operações de Manutenção Preventiva

Período de Manutenção (i)	Operações de Manutenção Preventiva					
	Limpeza	Lubrificação	Calibração	Alinhamento	Pequenas Reparações	<i>Overhaul</i>
1	$C_{11}$	$C_{12}$	$C_{13}$	$C_{14}$	$C_{15}$	$C_{16}$
2	$C_{21}$	$C_{22}$	$C_{23}$	$C_{24}$	$C_{25}$	$C_{26}$
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
$n$	$C_{n1}$	$C_{n2}$	$C_{n3}$	$C_{n4}$	$C_{n5}$	$C_{n6}$

Para o caso de a intervenção a realizar ser de carácter corretivo, a determinação do custo associado a cada operação de Manutenção Corretiva, para cada Período de Manutenção  $i$ , implica a subdivisão do sistema em componentes candidatos a uma política de Manutenção Preventiva e componentes cuja Taxa de Falhas não depende do tempo e para os quais a realização de intervenções preventivas não é benéfica (Tsai *et al*, 2001). Assim, cada componente  $m$  candidato a uma política de Manutenção Preventiva é modulado através da sua Função de Risco  $h_m$ , enquanto os restantes componentes seguem uma política de Manutenção Corretiva, considerando que seguem uma Distribuição Exponencial com Taxa de Falhas  $\lambda$  constante (Tsai *et al*, 2001).

Baseado nas condições anteriores, o custo de uma manutenção corretiva  $CMC$ , para um período de manutenção  $i$ , sujeita a um conjunto  $k$  de operações de manutenção  $j$  é dado pela equação

$$CMC_i = \sum_{m=1}^z \sum_{j=1}^k C_{ij} \left( \int_{t_{i-1}}^{t_i} \lambda_m(t) dt + \int_{t_{i-1}}^{t_i} h_{mi}(t) dt \right) \quad (3.11)$$

Onde:

$CMC_i$  - Custo de uma Manutenção Corretiva  $CMC$ , no Período de Manutenção  $i$ ;

$C_{ij}$  - Custos  $C$  de uma Manutenção Corretiva relativos ao Período Manutenção  $i$  para a Operação de Manutenção  $j$ , descritos na Tabela 3.1 do presente documento;

$h_{mi}(t)$  - Função de Risco  $h$  do componente reparável  $m$ , no período de manutenção  $i$ , sujeito a uma política de manutenção preventiva;

$\lambda(t)$  - Taxa de Falha do componente não reparável  $m$ , não candidato a uma política de Manutenção Preventiva, uma vez que o padrão de falhas não apresenta fenómenos introdutores de desgaste (Moubray, 1999), sujeito a uma política de Manutenção Corretiva, uma vez que apresentam um comportamento aleatório de falha, não dependente da vida acumulada do sistema, modelados através de uma Função Exponencial Negativa (Tsai *et al*, 2001);

$t_i$  - Instante de tempo (ex.: horas, dias, semanas) do período de manutenção  $i$ ;

$t_{i-1}$  Instante inicial de tempo do período de manutenção anterior  $i - 1$ ;

$k$  - Número total de atividades realizadas durante o período de manutenção  $i$ ;

$z$  - Número de componentes do sistema.

Considerando que durante a vida útil do equipamento este se encontra sujeito a  $n$  Períodos de Manutenção e substituindo na equação (3.9) as equações (3.10) e (3.11) o custo total de manutenção  $CM$  ao fim de  $n$  períodos de manutenção é dado pela seguinte equação

$$CM = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k C_{ij} + \sum_{i=1}^n \sum_{m=1}^z \sum_{j=1}^k C_{ij} \left( \int_{t_{i-1}}^{t_i} \lambda_m(t) dt + \int_{t_{i-1}}^{t_i} h_{mi}(t) dt \right) \quad (3.12)$$

Onde  $n$  é o número intervenções realizadas durante a duração do plano de manutenção.

### 3.3.1 Conceito de Manutenção Perfeita e Imperfeita.

No caso de um sistema reparável, quando são detetados componentes danificados ou em estado avançado de degradação, resultante de uma operação de Manutenção Corretiva ou Preventiva, a intervenção de manutenção pode passar pela reparação, caso esta se justifique do ponto de vista técnico ou económico ou então como alternativa, pela substituição total ou parcial dos componentes identificados (Mettas e Zhao, 2005).

De acordo com alguns autores (Sachdeva *et al*, 2008, El-Berry e Al-Bossly, 2013), quando é realizada uma intervenção de manutenção a um sistema reparável, admite-se nos seus modelos que a reparação consegue remover todo o dano acumulado pelo sistema até à data da intervenção, devolvendo-o a uma condição denominada de “tão bom como novo”, ou seja, é assumido que a Manutenção é perfeita.

No entanto, na prática, esta premissa não é verdadeira na maior parte das situações, uma vez que as intervenções de Manutenção vão introduzir um aumento de Fiabilidade no equipamento que se situa entre o estado anterior à intervenção e o estado “tão bom como novo” (Wang e Pham, 2000).

Assim, em função do nível de reparação/intervenção que um sistema reparável é sujeito, podemos então classificar as intervenções de manutenção em três níveis:

- **Manutenção Perfeita** – Corresponde a uma intervenção de Manutenção que consegue remover todo o dano acumulado pelo equipamento até à data da intervenção, devolvendo-o a uma condição denominada de “tão bom como novo” ou em inglês “*As Good as New*” (AGAN).
- **Manutenção Mínima** – Corresponde a uma intervenção de manutenção que apenas corrige a falha existente, sem retirar nenhum tipo de dano acumulado, devolvendo o equipamento ao estado imediatamente anterior à ocorrência de uma falha, denominado “tão mau como estava” ou “*As Bad as Old*” (ABAO). Ou seja, neste caso o objetivo da intervenção de Manutenção é permitir que o sistema cumpra a sua função requerida durante um intervalo de tempo limitado, até que outra reparação seja efetuada.
- **Manutenção Imperfeita** – Corresponde a uma intervenção de Manutenção em que ocorre uma remoção parcial de dano acumulado. O dano removido é dado pelo denominado Coeficiente de Remoção de Dano, designado pela letra  $q$ . Na literatura, existem vários modelos matemáticos que permitem modular a Manutenção Imperfeita, conforme ilustra a Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Métodos de modelação da teoria da Manutenção Imperfeita

Métodos de modelação	Autores
Regra (p,q)	Nakagawa (Nakagawa, 1979)
Regra (p (t),q (t))	Whitaker e Sarameniago (Whitaker e Sarameniago, 1989)
Método do fator de melhoria	Malik (Malik, 1979)
Método de vida virtual	Kijima (Kijima, 1988)
Modelo de choque	Kijima e Nakagawa (Kijima e Nakagawa, 1991)
Processo de quasi-renovação	Wang e Pham (Wang e Pham, 2000)
Regra (p,q) múltipla	Shaked e Shanthikumar (Shaked e Shanthikumar, 1986)

A Figura 3.3 ilustra o impacto de cada um dos níveis de Manutenção anteriormente mencionados na Taxa de Falhas de um equipamento.

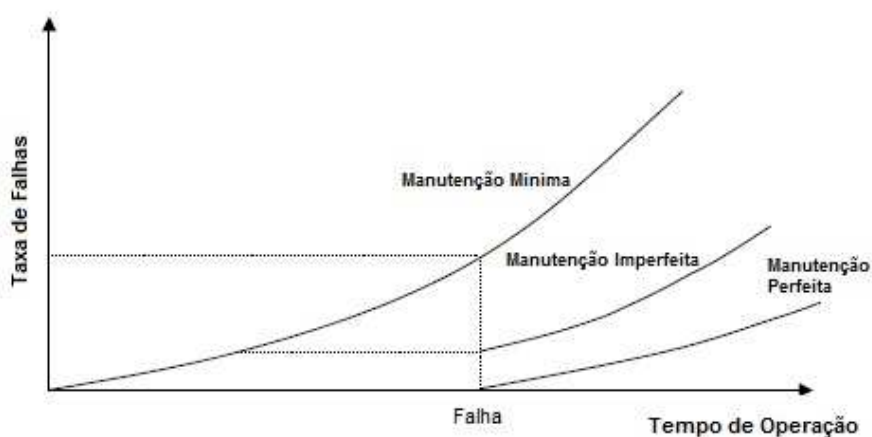


Figura 3.3 – Impacto dos tipos de manutenção na Taxa de Falhas de um equipamento (Wang e Pham, 2000. Adaptado).

Para além dos casos anteriormente mencionados, pode existir o caso em que a operação de Manutenção realizada introduza algum tipo de falha que não se verificava à data da intervenção (Mettas e Zhao, 2005). Neste caso a intervenção de Manutenção adiciona dano ao sistema e o estado final é designado por “pior do que estava”, do inglês “*Worst Than Old*”. Apesar deste nível de Manutenção não ser considerado no algoritmo efetuado a sua modelação pode ser observada no trabalho de Mettas e Zhao (Mettas e Zhao, 2005).

### 3.3.2 Modelação da Manutenção Imperfeita.

Para modelar a manutenção imperfeita recorreu-se ao “Método de Vida Virtual do Sistema”, proposto por Kijima (Kijima, 1988) Este modelo assenta no conceito de Vida Virtual de um sistema reparável (Mettas e Zhao, 2005).

A Vida Virtual de um sistema, para um determinado período de tempo  $t$ , no Período de Manutenção  $i$  é o valor de dano acumulado que a intervenção de Manutenção realizada no Período de Manutenção  $i$  não conseguiu retirar ao sistema. A quantidade de dano retirado em cada Período de Manutenção  $i$  depende do Fator de Remoção de Dano  $q$  de cada operação de Manutenção.

No seu trabalho, Kijima (Kijima, 1988) propõe duas situações para modular a vida virtual de um sistema reparável, seguidamente descritos.

#### **Primeiro Modelo de Kijima**

Assumindo que uma operação de reparação efetuada no Período de Manutenção  $i$  só consegue remover o dano existente no sistema entre esse período e o Período de Manutenção imediatamente anterior  $i - 1$  (Guo *et al*, 2011), a Vida Virtual do sistema, no Período de Manutenção  $i$ , é obtido através da equação

$$V_i = V_{i-1} + q(t_i - t_{i-1}) \quad (3.13)$$

Onde:

$V_i$  – Vida Virtual do sistema no Período de Manutenção  $i$ ;

$V_{i-1}$  – Vida Virtual do sistema no Período de Manutenção imediatamente anterior  $i - 1$ ;

$q$  – Fator de Remoção de dano;

$t_i$  – Instante de tempo verificado no Período de Manutenção  $i$ ;

$t_{i-1}$  – Instante de tempo verificado no Período de Manutenção imediatamente anterior  $i - 1$ .

Assim, o fim de  $n$  Períodos de Manutenção, a Vida Virtual do sistema é obtida através da equação

$$V_n = q((t_1 - t_0) + (t_2 - t_1) + \dots + (t_n - t_{n-1})) = qt_n \quad (3.14)$$

Onde:

$V_n$  – Vida Virtual do sistema no  $n$ -ésimo Período de Manutenção;

$q$  – Fator de remoção de dano;

$t_0, t_1, t_2, \dots$  – Instante de tempo verificado em cada Período de Manutenção  $i$ ;

$t_n$  – Instante de tempo verificado no  $n$ -ésimo Período de Manutenção;

$t_{n-1}$  – Instante de tempo verificado na penúltima manutenção efetuada,  $n - 1$ .

### **Segundo Modelo de Kijima**

No segundo modelo de Kijima supõe-se que uma operação de Manutenção consegue remover o dano acumulado entre dois Períodos de Manutenção  $i$  consecutivos, em simultâneo com o dano acumulado nos períodos anteriores aos mencionados (Guo *et al*, 2011). Com base nas considerações anteriores, a Vida Virtual do sistema é obtida através da seguinte equação

$$V_i = q(V_{i-1} + (t_i - t_{i-1})) \quad (3.15)$$

Onde:

$V_i$  – Vida Virtual do sistema no Período de Manutenção  $i$ ;

$V_{i-1}$  – Vida Virtual do sistema no Período de Manutenção imediatamente anterior  $i - 1$ ;

$q$  – Fator de Remoção de Dano;

$t_i$  – Instante de tempo verificado no período de manutenção  $i$ .

Assim, ao fim de  $n$  Períodos de Manutenção, a Vida Virtual do sistema é obtida através da equação

$$V_n = q(V_1 + V_2 + \dots + V_{n-1} + (t_n - t_{n-1})) \quad (3.16)$$

Onde:

$V_n$  – Vida Virtual do sistema  $V$  para o  $n$ -ésimo Período de Manutenção;

$q$  – Fator de Remoção de Dano;

$V_{i=1,2,\dots,n-1}$  – Vida Virtual do sistema para cada Período de Manutenção  $i$ ;

$t_n$  – Instante de tempo verificado no  $n$ -ésimo Período de Manutenção;

$t_{n-1}$  – Instante de tempo verificado na penúltima Manutenção efetuada,  $n - 1$ .

### 3.3.3 Metodologia Aplicada

Para a modelação da Vida Virtual do sistema foi seleccionado o 2º modelo de Kijima. Seja  $T$  o intervalo de tempo entre dois Períodos de Manutenção consecutivos, obtido através da equação

$$T = t_i - t_{i-1} \quad (3.17)$$

Onde:

$T$  – Intervalo de tempo entre dois Períodos de Manutenção  $i$  consecutivos;

$t_i$  – Instante de tempo verificado no Período de Manutenção  $i$  considerado;

$t_{i-1}$  – Instante de tempo verificado no Período de Manutenção imediatamente anterior ao considerado  $i - 1$ .

A Figura 3.4 demonstra a evolução, ao longo do tempo, dos períodos de manutenção.

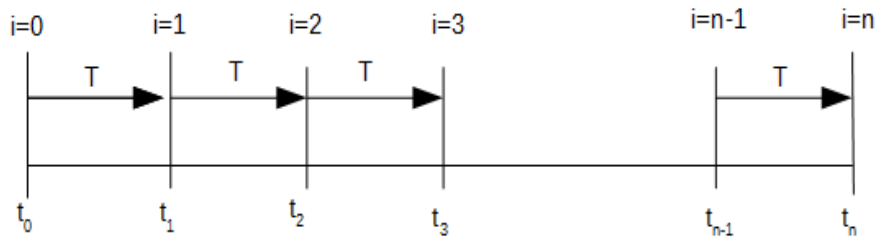


Figura 3.4 – Evolução temporal entre Períodos de Manutenção.

Desta forma, para cada Período de Manutenção  $i$ , a Vida Virtual do sistema é dada pela seguinte equação

$$V_i = q(V_{i-1} + T) \quad (3.18)$$

Onde:

$V_i$  – Vida Virtual do sistema no Período de Manutenção  $i$ ;

$V_{i-1}$  - Vida Virtual do sistema no Período de Manutenção  $(i - 1)$ ;

$T$  - Período de tempo decorrido entre dois Períodos de Manutenção;

$q$  - Fator de Remoção de Dano da operação de Manutenção, quando:

- $q = 0$ , descreve o caso de uma Manutenção Perfeita;
- $0 < q < 1$ , representa uma Manutenção Imperfeita;

- $q = 1$ , descreve o caso de Manutenção Mínima.;

O Fator de Remoção de Dano  $q$  pode ser estimado a partir dos dados de reparação do equipamento em análise, seguindo o Modelo Aritmético de Redução de Vida desenvolvido por Doyen e Gaudoin (Doyen & Gaudoin, 2002).

### 3.3.4 Modelo de Estimativa do Fator de Remoção de Dano

Para a descrição do Modelo Aritmético de Redução de Vida que permite estimar o Fator de Redução de Dano  $q$  de uma operação de Manutenção Imperfeita considerou-se necessário descrever a teoria em que este se baseia.

No Modelo Aritmético de Redução de Vida, a Intensidade de Falha  $\Lambda$  para um determinado instante de tempo  $t$  é calculada recorrendo a um processo não homogêneo de *Poisson*. A forma mais usual de modular um processo não homogêneo de *Poisson* é considerar que a Intensidade de Falha pode ser definida como potência do tempo, através do Processo da Lei da Potência, do Inglês *Power Law Process*. (Doyen e Gaudoin, 2002).

#### Processo não Homogêneo de *Poisson*

O Processo não Homogêneo de *Poisson* é um dos modelos mais populares para descrever o comportamento de falha de um sistema reparável. (Guo *et al*, 2011). A sua vasta utilização deve-se à capacidade do processo de exibir a tendência da evolução da Fiabilidade e da deterioração ao longo do tempo. Se definirmos  $N$  como o número total de falhas registado até ao instante de tempo  $t$ , a probabilidade  $P$  ser igual ao numero de falhas  $n_f$  registado ao até ao instante  $t$  é dada pela equação

$$P\{N(t) = n_f\} = \frac{m_f(t)^{n_f}}{n_f!} e^{-m_f(t)} \quad (3.19)$$

Onde:

$N(t)$  - Número total de falhas registado até ao instante  $t$ ;

$t$  - Instante de tempo à data da última falha considerada;

$n_f$  - Número de falhas, com  $n_f = 1, 2, \dots, n_f$ ;

$m_f(t)$  - Valor expectável de falhas até ao instante  $t$  considerado, obtido através da equação:

$$m_f(t) = \int_0^t \Lambda(t)dt \quad (3.20)$$

Onde:

$\Lambda(t)$  – Intensidade de Falha  $\Lambda$  para o instante de tempo  $t$  considerado.

Existem diversas metodologias utilizadas para descrever a tendência da Intensidade de Falha como é o caso da Lei da Potência (Gaudoin *et al*, 2006) e da Lei Linear logarítmica (Cox,1972, conforme em Guo *et al*, 2011).

### **Lei da Potência (Power Law Process)**

O modelo da Lei da Potencia, do Inglês *Power Law Process*, proposto por Duane em 1964 é um modelo de dois parâmetros bastante utilizado para modelar a Fiabilidade de um sistema reparável (Guo *et al*, 2011). Permite modular o comportamento de um sistema reparável considerando que desde o início do funcionamento do sistema ( $t = 0$ ) até à data da primeira interrupção devido à ocorrência de uma falha, o sistema segue uma distribuição de Weibull. Após a primeira falha, a Fiabilidade do sistema é modelada a partir da Intensidade de Falha  $\Lambda$  (Reliasoft, 2015). Com base na consideração anterior, a Intensidade de Falha  $\Lambda$ , em função do tempo  $t$ , é obtida através da seguinte equação

$$\Lambda(t) = \theta\beta t^{\beta-1} \quad (3.21)$$

Onde:

$\Lambda(t)$  – Intensidade de Falha  $\Lambda$  em função do instante de tempo  $t$  considerado;

$\theta$  – Parâmetro de vida, em horas;

$\beta$  – Parâmetro de forma.

A Figura 3.5 demonstra a evolução da Intensidade de Falha para  $\theta = 0,5$  e  $\beta = 4$ .

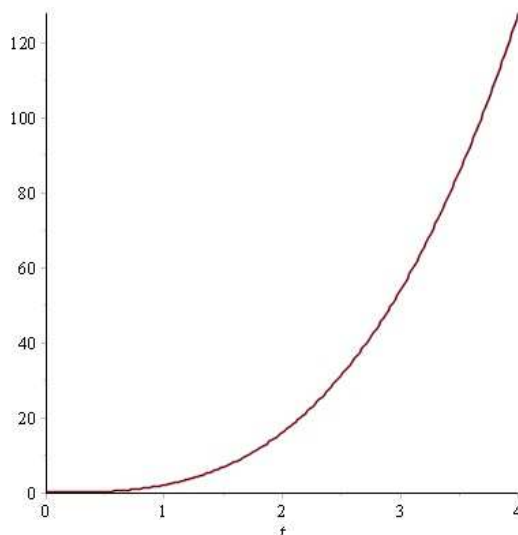


Figura 3.5 – Evolução da Intensidade de Falha para  $\theta=0,5$  e  $\beta=4$

Tal como na Distribuição de Weibull, também na Lei da Potência é o parâmetro de forma que determina a localização do sistema. Caso  $\beta < 1$ , o sistema encontra-se em mortalidade infantil, caso  $\beta = 1$  o sistema encontra-se em vida útil e caso  $\beta > 1$  o sistema encontra-se na zona de desgaste. (Gaudoin *et al*, 2006). No caso específico em que  $\beta = 1$  a Lei da Potencia descreve um Processo Homogéneo de *Poisson*, onde a intensidade de falha não depende do tempo de exploração do sistema.

A fiabilidade do sistema, segundo o Modelo da Lei da Potência, é obtida através da equação (Reliasoft, 2015)

$$R(t) = e^{-\Lambda t^\beta} \quad (3.22)$$

Onde:

$R$  – Fiabilidade do Sistema;

$\Lambda$  - Intensidade de Falha;

$\beta$  – Parâmetro de forma;

$t$  – Instante de tempo considerado, em horas, dias ou outra unidade de medida temporal.

### **Modelo de Redução Aritmética**

A lei da Potencia apenas permite modelar o comportamento de falha do sistema considerando que a ação de Manutenção efetuada devolve um nível de Intensidade de Falha  $\Lambda$  igual ao registado no instante de tempo anterior à falha (Guo *et al*, 2011). Para considerar os efeitos das outras Intervenções de Manutenção descritas na Tabela 3.1 da

presente dissertação é utilizado um modelo de redução de vida (como por exemplo o Modelo de Vida Virtual proposto por Kijima (Kijima, 1988), descrito no ponto 3.3.2 da presente dissertação).

Um modelo de redução de vida consiste em considerar que a Intensidade de Falha  $\Lambda$ , num determinado instante  $t$  é função da Vida Virtual do sistema  $V$  no mesmo instante  $t$ , respeitando a equação (Gaudoin *et al*, 2006)

$$\Lambda(t) = \Lambda(V) \quad (3.23)$$

Assumindo que nos intervalos de tempo entre duas intervenções consecutivas a Intensidade de Falha  $\Lambda$  segue um comportamento modulado a partir da equação (3.21) e que uma intervenção realizada no Período de Manutenção  $i$  consegue reduzir uma fração do dano acumulado até ao instante de tempo  $t$ , a Vida Virtual do sistema, no Período de Manutenção  $i$  é dada pela equação (Gaudoin *et al*, 2006)

$$V_i = q(T + V_{i-1}) \quad (3.24)$$

Onde:

$V_i$  – Vida Virtual do sistema no Período de Manutenção  $i$ ;

$T$  – Período de tempo entre duas manutenções consecutivas;

$V_{i-1}$  – Vida Virtual do sistema no Período de Manutenção anterior  $i - 1$ ;

$q$  - Fator de Remoção de Dano, que pode tomar valores:

- $q = 0$ : Manutenção Perfeita;
- $q = 1$ : Manutenção Mínima;
- $0 < q < 1$ : Manutenção Imperfeita;
- $q > 1$ : Manutenção que introduz dano no sistema.

Considerando que a Vida Virtual no início de funcionamento do sistema tem um valor igual a zero, ao fim  $n$  períodos de manutenção, a Vida Virtual do sistema é dada pela equação

$$V_n = t_n - (1 - q) \sum_{i=0}^n V_{n-i} \quad (3.25)$$

Onde

$V_n$  – Vida Virtual do sistema ao fim  $n$  Períodos de Manutenção  $i$ ;

$t_n$  - Instante de tempo  $t$  à dada do  $n$ -ésimo Período de Manutenção  $i$ ;

$q$  - Fator de Remoção de Dano.

E a Intensidade de Falha  $\Lambda$ , no  $n$ -ésimo Período de Manutenção  $i$  é obtida através da equação

$$\Lambda_n = \theta \beta V_n^{\beta-1} \quad (3.26)$$

Onde:

$\Lambda_n$  - Intensidade de Falha no  $n$ -ésimo Período de Manutenção;

$\theta$  - Parâmetro de vida;

$\beta$  - Parâmetro de forma;

$V_n$  - Vida Virtual do sistema no  $n$ -ésimo Período de Manutenção.

A evolução da Intensidade de Falha segundo o modelo de redução de vida anteriormente apresentado é ilustrada na Figura 3.6.

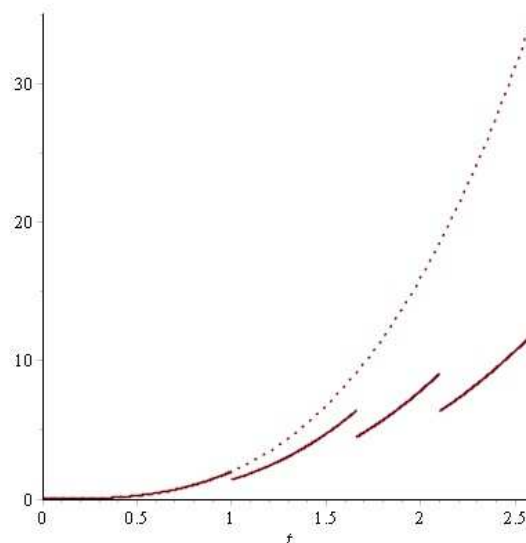


Figura 3.6 – Evolução da Intensidade de Falha com  $\theta=0,5$ ,  $\beta=4$  e  $q=0,333$

A curva a tracejado, representada na Figura 3.6, representa a evolução da Intensidade de Falha  $\Lambda$  caso não fosse efetuado qualquer tipo de intervenção, Corretiva ou Preventiva, ao sistema. A introdução de uma Operação de Manutenção leva a uma redução na Intensidade de Falha cujo valor, depende do Fator de Remoção de Dano  $q$ . Após a intervenção, a Intensidade de Falha continua a evoluir segundo a equação (3.26) até atingir um novo Período de Manutenção  $i$ , que irá remover novamente uma porção do

dano acumulado até ao instante de tempo onde ocorre essa intervenção, seguindo este ciclo até ao fim do comissionamento do equipamento.

### **Estimativa dos Parâmetros de Forma $\beta$ , Vida $\theta$ e Fator de Remoção de Dano $\beta$**

Os parâmetros  $\theta$ ,  $\beta$  e o Fator de Remoção de Dano  $q$  são estimados utilizando o método da Estimador de Máxima Verossimilhança, do Inglês *Maximum Likelihood Estimation* através da equação

$$L_n(\theta, \beta, q) = \sum_{i=1}^n \ln(V_i) - \int_0^t \Lambda_n dt \quad (3.27)$$

Onde:

$L_n$  - Valor da função logarítmica necessária para a estimativa dos parâmetros  $\theta, \beta$  e do Fator de Remoção de Dano  $q$ , no último Período de Manutenção  $n$  considerado;

$\theta$  - Parâmetro de vida;

$\beta$  - Parâmetro de forma;

$q$  - Fator de Remoção de Dano;

$\ln(V_i)$  – Logaritmo natural da Vida Virtual do sistema  $V$  no Período de Manutenção  $i$ ;

$\Lambda_n$  - Intensidade de Falha  $\Lambda$  no último Período de Manutenção considerado  $n$ ;

$t$  - Instante de tempo verificado à data do último Período de Manutenção  $n$ .

A explicação detalhada do método anterior pode ser consultada nos trabalhos de Mettas e Zhao (Mettas e Zhao, 2005) e Corset (Corset *et al*, 2009).

### **3.3.5 Metodologia Alternativas para o Cálculo do Fator de Remoção de Dano.**

Para além da metodologia descrita no ponto 3.3.4 e das apresentadas na Tabela 3.2, outra forma de estimar o Fator de Remoção de Dano é o modelo empírico proposta por Tsai (Tsai *et al*, 2001). Segundo este modelo o Fator de Remoção de Dano é estimado, considerando as Operações de Manutenção presentes na Tabela 3.1, a partir dos conhecimentos técnicos adquiridos pelo departamento de Manutenção ao longo das intervenções realizadas em equipamentos similares, em condições de operação semelhantes ao do equipamento em estudo. Com base nas considerações anteriores, o Fator de Remoção de Dano  $q$ , para o componente  $m$ , para um conjunto  $k$  de Operações de Manutenção  $j$  é estimado a partir da equação

$$q_m = 1 - \frac{1}{P_{S_m}} \sum_{j=1}^k p_{mj} d_{mj} \quad (3.28)$$

Onde:

$q_m$  – Fator de Remoção de Dano para o componente  $m$ ;

$p_{mj}$  – Probabilidade de realizar uma intervenção de Manutenção Imperfeita no componente  $m$  com a atividade  $j$ ;

$d_{mj}$  – Nível de melhoria da realização da Operação de Manutenção  $j$  no componente  $m$ ;

$P_{S_m}$  - Somatório das probabilidades  $p_{mj}$  para o componente  $m$ , obtida através da equação

$$P_{S_m} = \sum_{j=1}^k p_{mj} \quad (3.29)$$

Cujas variáveis se encontram definidas na equação anterior.

Se aplicarmos a metodologia anterior às Operações de Manutenção descritas na Tabela 3.1, o resultado obtido encontra-se representado na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Fatores para o cálculo do Fator de Remoção de Dano

Componente (m)	Operações de Manutenção Preventiva					Fator de remoção de dano $q$
	Limpeza	Lubrificação	Calibração	Alinhamento	Pequenas Reparações	
1	$p_{11}$ $d_{11}$	$p_{12}$ $d_{12}$	$p_{13}$ $d_{13}$	$p_{14}$ $d_{14}$	$p_{15}$ $d_{15}$	$q_1$
2	$p_{21}$ $d_{21}$	$p_{22}$ $d_{22}$	$p_{23}$ $d_{23}$	$p_{24}$ $d_{24}$	$p_{25}$ $d_{25}$	$q_2$
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
$m$	$p_{m1}$ $d_{m1}$	$p_{m2}$ $d_{m2}$	$p_{m3}$ $d_{m3}$	$p_{m4}$ $d_{m4}$	$p_{m5}$ $d_{m5}$	$q_m$

A operação de *overhaul* fica de fora desta metodologia, uma vez que se considera que este tipo de operação consegue remover todo o dano acumulado até a data da intervenção, o que implica um Fator de Remoção de dano  $q = 0$ .

A título de exemplo da implementação deste método, digamos que existe a probabilidade de executar uma operação de lubrificação no componente  $m$  é igual a 1 ao longo do seu período de exploração, e que a operação de lubrificação consegue remover 90% das falhas relacionadas com problemas de lubrificação. Para este caso o Fator de Remoção de Dano da operação de lubrificação para o componente  $m$  é obtido através da equação (3.28) e toma o valor de  $q = 0,1$ .

### 3.5 Modelo de Otimização

Se considerarmos  $X_i$  como a Operação de Manutenção  $X$  a efetuar no Período de Manutenção  $i$ , a otimização da equação (3.9) é dada pela seguinte equação:

$$\text{MIN } CM(X_1, X_2, X_3 \dots X_n) = CMC + CMP \quad (3.30)$$

Sujeito a

$$R(t) \geq Rmin \quad (3.31)$$

Onde:

$CM$  – Custo total do Plano de Manutenção;

$X_1, X_2, X_3 \dots X_n$  - Definem as intervenções de Manutenção realizadas em cada intervalo temporal considerado;

$R(t)$  - Fiabilidade do sistema, no instante de tempo  $t$  considerado;

$Rmin$  – Fiabilidade mínima que o sistema pode atingir e que é previamente definida pela gestão;

$CMC$ - Custo de uma Manutenção Corretiva no Período de Manutenção  $i$ ;

$CMP$ - Custo de uma Manutenção Preventiva no Período de Manutenção  $i$ .

Na construção do algoritmo proposto, foram consideradas três tipos de decisões  $D$  quanto ao planeamento da manutenção preventiva, quando o valor associado às intervenções de manutenção  $X_i$  é:

- $D(X_i) = 0$ , Implica que não são afetados recursos nesse período para realizar uma intervenção de Manutenção planeada. Logo, o Fator de Redução de Dano  $q$  vai ser igual a 1.

- $D(X_i) = 1$ , Implica a afetação dos recursos necessários à realização de uma operação de Manutenção planeada Imperfeita. Logo, o Fator de Redução de Dano  $q$  vai estar compreendido entre  $0 < q < 1$ .
- $D(X_i) = 2$ , Implica a afetação dos recursos necessários à realização de uma operação de Manutenção planeada Perfeita, ou seja, uma operação de *overhaul* ao sistema. Logo, o Fator de Redução de Dano  $q$  vai ser igual a 0.

Para cada intervalo de manutenção  $X_i$ , o período de tempo avança  $T$  unidades temporais, um valor de tempo constante, que pode ser medido em horas, dias, meses ou outra unidade de medida temporal. Este valor é definido pelo utilizador e o obtido através do tempo de funcionamento do equipamento.

### 3.6 Implementação do Algoritmo

Com o objetivo de implementar o modelo proposto recorreu-se aos Algoritmos Genéticos como ferramenta de otimização. O processo de otimização baseado nos Algoritmos Genéticos tem como princípio o modelo de evolução de espécies proposto por Charles Darwin, onde os indivíduos mais fortes tem maior probabilidade de sobrevivência e reprodução do que os indivíduos mais fracos (Aljadhali e El-Telbany, 2009).

Ao utilizar uma população de potenciais soluções, os Algoritmos Genéticos aumentam a probabilidade de obter uma aproximação razoável ao mínimo global da função, diminuindo o risco da otimização devolver um dos mínimos relativos da função a ser minimizada (Tsai *et al*, 2001).

Segundo Aljadhali (Aljadhali e El-Telbany, 2009) a otimização é iniciada com criação de uma população inicial, onde cada individuo é uma potencial solução do problema. Seguidamente, o grupo de indivíduos que compõem a população competem entre si pelo direito de reprodução ou de passarem para a nova geração. A escolha dos indivíduos é feita a partir do seu *fitness*, e passarão à próxima geração os indivíduos que apresentarem o melhor valor de *fitness*.

A nova geração é construída a partir dos melhores indivíduos da geração anterior e dos indivíduos resultantes da reprodução destes. A reprodução é realizada a partir da função de *crossover*, onde os cromossomas, *strings* binárias que compõem os indivíduos de uma população, trocam partes do seu código e criam novos indivíduos. Este processo é

ilustrado pela Figura 3.7, onde os bits a vermelho são os genes que sofreram alterações pelo processo de *crossover*.

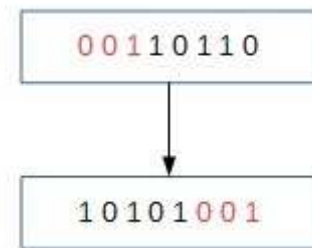


Figura 3.7 – Ilustração de uma operação de *crossover*.

Para aumentar a variedade da população é inserida uma função de mutação, que consiste em criar um operador de mutação que altera aleatoriamente um ou mais bits de um cromossoma. O processo de mutação encontra-se representado na Figura 3.8, onde o bit a vermelho é o gene que sofre mutação no cromossoma.

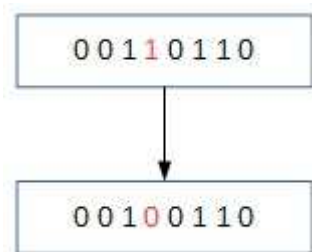


Figura 3.8 – Ilustração de uma operação de mutação

Finalizada a reprodução, é calculado o *fitness* da nova geração e o processo repete-se até se obter a solução pretendida. A Figura 3.9 demonstra o processo de otimização descrito.

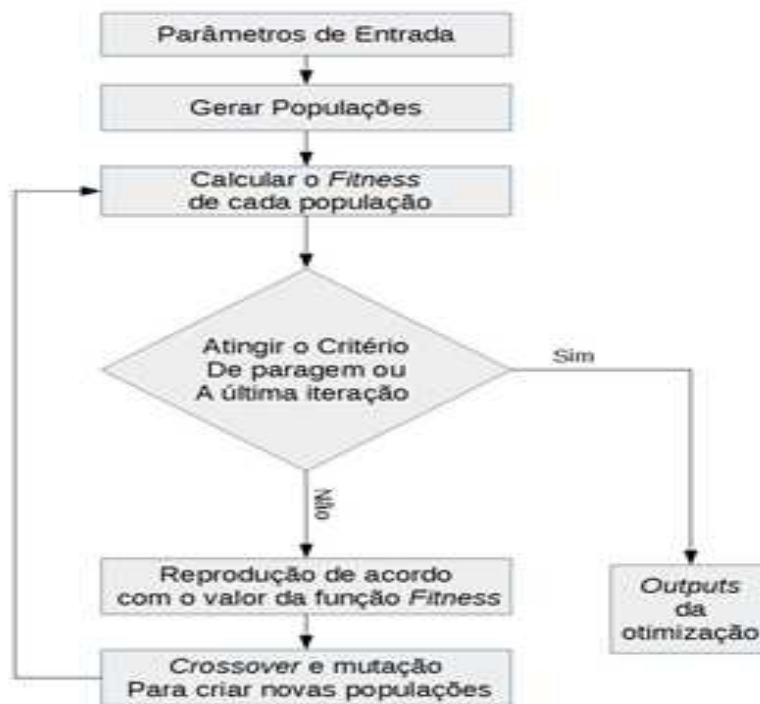


Figura 3.9 - Processo de otimização por Algoritmos Genéticos (Tsai *et al*, 2001. Adaptado)

Os Algoritmos Genéticos diferem dos métodos convencionais nas seguintes características (Goldberg, 1989):

- Procuram a solução final através de um conjunto de soluções em vez de trabalharem com o resultado da solução anterior;
- A otimização é realizada a partir de uma população com um determinado conjunto de soluções, não uma única solução;
- A otimização segue o valor da função de *fitness* de cada individuo, não recorre a derivadas ou outros métodos auxiliares;
- Os algoritmos genéticos utilizam regras de transição probabilísticas em vez de determinísticas.

As diferenças anteriormente descritas encontram-se representadas na Figura 3.10.

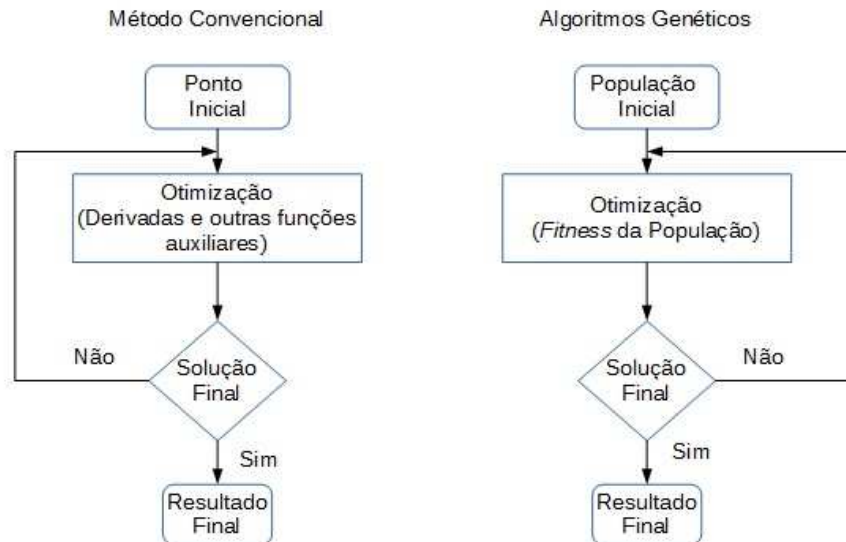


Figura 3.10 – Algoritmos Genéticos vs. Métodos Convencionais.

Com o desenvolvimento das aplicações informáticas, os Algoritmos Genéticos têm sido cada vez mais aplicados com sucesso em diversas áreas da engenharia e na otimização de problemas complexos (Liu *et al*, 2006).

Neste trabalho o algoritmo foi programado utilizando o *software* Matlab. Para o cálculo da fiabilidade assumiu-se que a distribuição de falhas do equipamento segue o modelo de dois parâmetros da Lei da Potência. Para estimar os parâmetros desta distribuição utilizou-se o *software* MARS, , que realiza a estimativa utilizando a metodologia de Estimativa da Máxima Verossemelhança, do Inglês *Maximum Likelihood Estimation (MLE)*.

O Algoritmo Genético utilizado no modelo proposto foi extraído da metodologia desenvolvida por Wang e Handschin (Wang e Handschin, 2000). Segundo este método, todos os cromossomas solução presentes na população de potências soluções são compostos por números inteiros positivos, em substituição dos cromossomas binários normalmente utilizados. Esta simplificação permite a redução do tempo necessário para atingir a solução final do problema (Wang e Handschin, 2000).

Para a programação no *software* Matlab utilizou-se a adaptação do método anteriormente descrito. Para proceder à computação do algoritmo foi necessário a elaboração de uma função de criação da população e de mutação customizada, de forma a garantir que todos os indivíduos que compõem a população de possíveis soluções apresentam um valor

inteiro positivo. Estas funções foram construídas seguindo a informação presente na documentação do *software* Matlab (Matworks, 2015). No entanto, não foi inserida a função de *crossover*, uma vez que esta é desaconselhada para populações compostas por indivíduos inteiros positivos. (Matworks, 2015).

Relativamente à restrição de Fiabilidade, esta foi introduzida na função objetivo, uma vez que a utilização de uma população customizada não permite qualquer tipo de restrição para além do limite inferior e superior que os indivíduos que compõem a população podem tomar. A restrição é efetuada atribuindo uma penalização ao custo de não alocar recursos para a realização de manutenção preventiva (Manutenção do tipo 0).

A Vida Virtual do equipamento é calculada através da equação (3.24) e o Fator de Remoção de Dano  $q$  foi estimado utilizando o *software* MARS (Corset *et al*, 2009), através da equação (3.27).

Para facilitar a interface entre o utilizador e o código de programação do algoritmo, foi desenvolvida uma aplicação utilizando a ferramenta de interface visual (GUIDE) disponível no *software* Matlab. A Figura 3.11 representa o resultado final da aplicação desenvolvida.

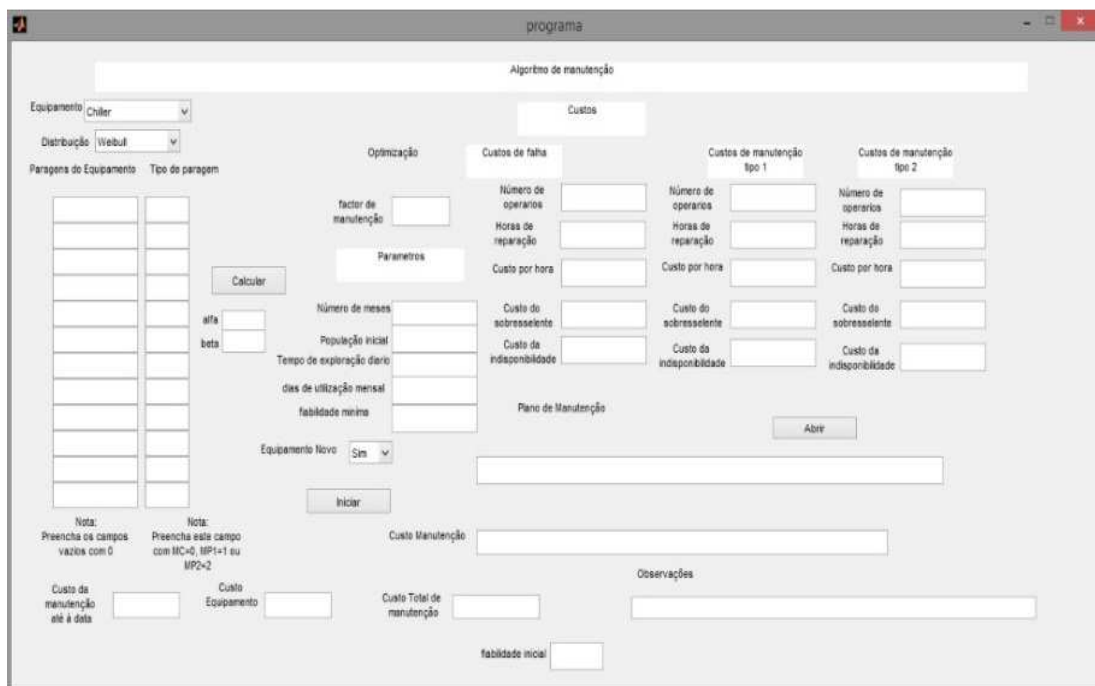


Figura 3.11 - Interface gráfico do algoritmo proposto

Para proceder ao planeamento da manutenção com base no algoritmo proposto é necessário dispor de alguns dados operacionais como por exemplo: o instante temporal da ocorrência das falhas e os custos associados a cada tipo de Manutenção. Para além, dos dados operacionais é necessário definir o horizonte temporal de planeamento assim como o Fator de Remoção de Dano  $q$ .

O processo inicia-se com a introdução dos dados presentes no histórico de avarias no campo “Paragens do Equipamento” e o tipo da intervenção é inserido no campo designado por “Tipo de Intervenção”. Seguidamente procede-se à introdução dos custos relativos a cada tipo de intervenção, conforme representado na Figura 3.11. Após seleccionar o tipo de distribuição estatística desejada para modelar o sistema são obtidos, após carregar no botão calcular, os parâmetros da distribuição escolhida e os custos das intervenções realizadas até à data.

Após obtidos estes valores é necessário introduzir o Fator de Redução de Dano, definir o horizonte temporal da simulação e realizar a sua subdivisão em Períodos de Manutenção. Após os passos anteriores, define-se o tempo de avanço entre dois períodos de manutenção consecutivos. Esta divisão é feita multiplicando o tempo de exploração diário pelo número de dias de utilização do equipamento.

As últimas etapas passam por definir o nível mínimo de fiabilidade exigido ao sistema e o número de indivíduos presentes na população do algoritmo genético que irá otimizar os custos do plano de manutenção. A escolha deste parâmetro deve ser cuidadosa, uma vez que uma população muito pequena apresenta pouca diversidade e pode colocar em risco a convergência do método, enquanto uma população demasiado elevada aumenta de forma considerável o tempo de cálculo da solução final. Para este parâmetro aconselha-se um valor igual a 50 indivíduos, no entanto, caso seja necessário aumento da diversidade da população, o seu número pode ser aumentado até aos 200 indivíduos, com as consequências anteriormente mencionadas.

## **Capítulo 4 - Caso de Estudo**

O caso de estudo da presente dissertação é a aplicação da metodologia proposta ao longo da presente dissertação, ao planeamento da manutenção de uma unidade de climatização, cuja manutenção é gerida pela empresa Parque Escolar. A dissertação foi proposta pela empresa Tecnologia de Gestão de Imóveis, S.A. (TDGI) com o objetivo de elaborar um algoritmo que calculasse o calendário de manutenção para os equipamentos de climatização instalados na Escola Secundária D. Pedro V.

Dada a complexidade do sistema de aquecimento, ventilação e ar condicionado (AVAC) instalado e devido a restrições temporais, aliadas à ausência de dados de falha relativos ao sistema em análise, ficou definido que o estudo ficaria restringido ao equipamento de tratamento de água utilizada na climatização, o chiller.

O algoritmo tem como objetivo principal determinar o intervalo de tempo entre operações de Manutenção Preventiva que devolva o menor custo para a entidade proprietária do equipamento.

### **4.1 Descrição do Equipamento**

O equipamento estudado é um chiller de condensação a ar da marca Daikin, com capacidade de refrigeração de 550 KW. Recebe este nome devido ao condensador do equipamento ser um permutador de calor água-ar, evitando desta forma a necessidade da instalação de um circuito secundário de água com torre de refrigeração, necessário para arrefecer a água um condensador do tipo água-água.

De uma forma muito simplificada, um chiller pode ser ilustrado através do diagrama representado na Figura 4.1.

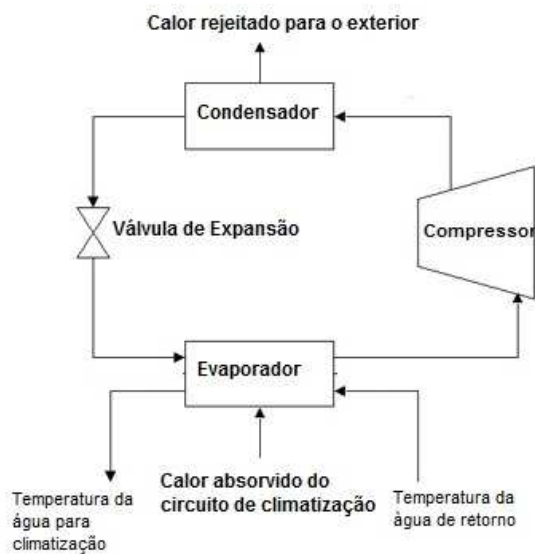


Figura 4.1 – Modelo simplificado de um chiller.

O processo de refrigeração do chiller é seguidamente explicado, seguindo o manual do fabricante do equipamento. (Daikin, 2007).

### **Ciclo de Refrigeração do Chiller**

O gás refrigerante proveniente do evaporador é sugado para o compressor, devido à ação do motor elétrico. No compressor, o gás é comprimido, aumentando a sua pressão. No entanto, durante este processo, o Fluido frigorígeno no estado gasoso mistura-se com o óleo de lubrificação presente no compressor. Para separar o óleo do fluido no estado gasoso, a mistura passa por um filtro. Durante este processo, o óleo acumula-se no fundo deste dispositivo é conduzido de volta ao reservatório de óleo.

Após a passagem pelo filtro, o fluido refrigerante é conduzido para o condensador, onde é distribuído pelo permutador de calor. Durante este processo, o fluido transfere calor para o ar de refrigeração, reduzindo a sua temperatura e começa a condensar. O calor transferido para o ar de arrefecimento é rejeitado, com uma temperatura superior à verificada antes de entrar em contacto com o condensador, para a atmosfera exterior pela ação das ventoinhas do condensador.

Após a saída do condensador, o fluido sub-arrefecido circula por um filtro de secagem (dryer filter) e perde pressão no elemento de expansão. Esta queda de pressão decorre da vaporização parcial do líquido de refrigeração na válvula de expansão.

Após a saída do elemento de expansão, o fluido, em fase de mistura a baixa temperatura e pressão entra no evaporador, onde absorve calor da água que retorna do circuito de climatização, através dos tubos de expansão directa do evaporador. Durante este processo o calor contido na água de climatização é transferido para o fluido de refrigeração, que vaporiza. Após terminar o processo de vaporização, o fluido encontra-se no estado de vapor sobreaquecido.

Ao chegar ao estado de vapor sobreaquecido, o vapor retorna ao compressor, iniciando um novo ciclo de refrigeração (Daikin, 2007).

### **Componentes Constituintes do Chiller**

O Chiller em estudo é composto, para além dos componentes referidos na figura 4.1, por um conjunto de outros elementos, representados na Figura 4.2.

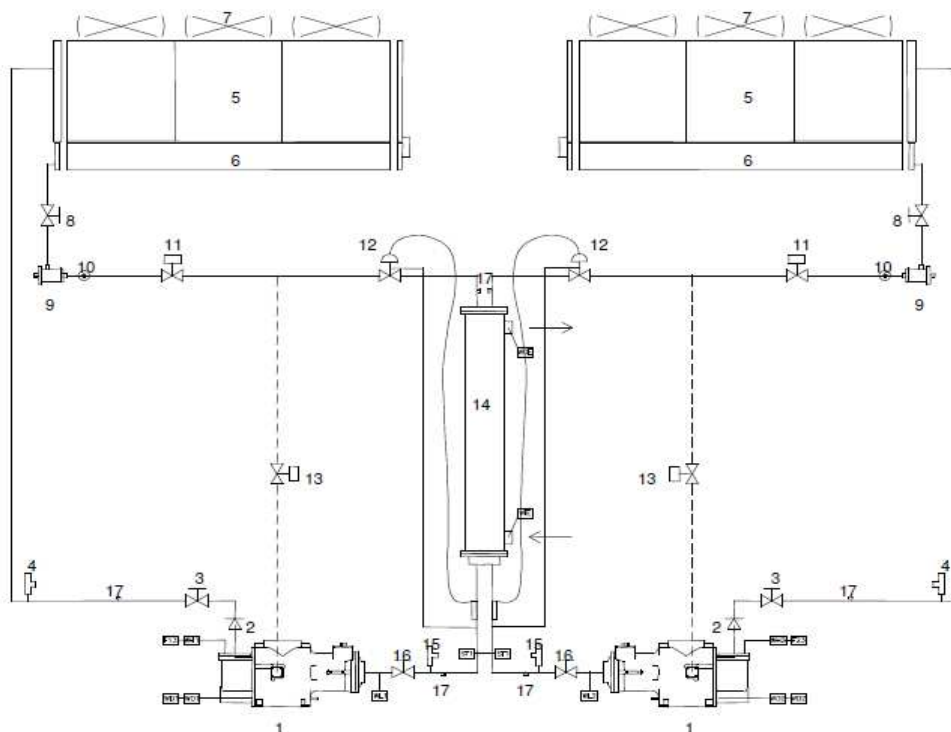


Figura 4.2 – Esquema do chiller estudado (Daikin, 2007).

Respeitando a numeração da Figura 4.2, o equipamento em estudo é composto por 17 componentes, seguidamente descritos:

1. Compressor de Parafuso;
2. Válvula de retenção;
3. Válvula de saída do compressor;
4. Válvula de segurança da linha de alta pressão;
5. Condensador;
6. Secção de sub-arrefecimento;
7. Ventoinha axial;
8. Válvula de corte da linha de líquido;
9. Filtro de secagem (dryer filter);
10. Indicador de líquido e humidade;
11. Válvula de expansão termostática;
12. Válvula de injeção de líquido;
13. Evaporador de expansão directa;
14. Válvula de segurança da linha de baixa pressão;
15. Válvula de sucção do compressor;
16. Conector de carga com válvula.

## **4.2 Considerações Efetuadas**

Devido a um conjunto de condicionantes não foi possível obter dados que permitissem a construção de um histórico de avarias para o equipamento em análise, assim como um levantamento adequado dos custos relativos a cada uma das intervenções realizadas. Desta forma, foram executadas um conjunto de considerações, descritas ao longo do presente ponto.

### **Dados de Falha, Fator de Redução de Dano e Período de Funcionamento**

À data da realização do estudo não se encontravam disponíveis dados em histórico, referentes às avarias do chiller. Para contornar este problema, realizou-se uma pesquisa na literatura de referência de forma a encontrar dados de falha de um equipamento similar, que permitam a modelação do equipamento. Estes dados, retirados de do estudo realizado por El-Berry e Al-Bossly (El-Berry e Al-Bossly, 2013), encontram-se representados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1- Dados de falha do chiller.

Interrupção	Tempo (horas)
1	3000
2	5200
3	4400
4	2200
5	4000

Para os dados descritos na Tabela 4.1, aplicando a equação (3.27) através do *software MARS*, obteve-se um parâmetro de vida  $\theta = 8,84 \times 10^{-16}$  horas, um parâmetro de forma  $\beta = 4.16$  e um Fator de Redução de Dano  $q = 0,333$ .

Para o caso dos componentes Não Reparáveis, considera-se que estes seguem uma Distribuição Exponencial Negativa, cuja Taxa de Falhas não depende do tempo de exploração do equipamento, adotando o valor consultado na bibliografia (Tsai et al, 2001) correspondente a  $\lambda = 2 \times 10^{-6}$ .

Para a determinação do período de funcionamento do equipamento estudado, considera-se que este se encontra em funcionamento das 08:00 horas às 18 horas e 30 minutos, de Segunda a Sexta-Feira, durante todos os meses do ano, exceptuando o mês de Agosto.

Com base nos pressupostos anteriores, o regime de funcionamento do chiller contabiliza 10,5 horas por dia, 22 dias por mês, 11 meses por ano.

### **Custos de Manutenção**

Relativamente aos custos de Manutenção, dada a inexistência de dados reais relacionados com o valor despendido para cada Manutenção efetuada ao equipamento, foram utilizados valores mencionados na literatura relativos à manutenção de um chiller (Danfoss, 2015). A tabela 4.2 ilustra os valores considerados neste caso de estudo para cada tipo de decisão.

Tabela 4.2 - Custos das Operações de Manutenção

Tipo de decisão	Custos de manutenção (€)
0 – Não realizar qualquer intervenção de manutenção planeada	$0,25 \times \text{Custo equipamento}$ (custo associado a intervenção de manutenção corretiva)
1 – Realizar uma manutenção imperfeita	905,00
2 – Realizar uma manutenção perfeita	12.416,00

Para obter o custo de aquisição do equipamento, consultou-se as tabelas comerciais do fabricante Daikin para um equipamento com as mesmas características do estudado. O

valor considerado, baseado na condição anterior, toma o valor de 66.241,00 € (Daikin, 2015).

### **Modelação da Fiabilidade do Sistema**

Para modelar o chiller é preciso identificar quais os componentes reparáveis e não reparáveis presentes no equipamento, descritos na Figura 4.2. No entanto, devido às condicionantes descritas no ponto anterior, simplificou-se o sistema considerando que este é composto pela associação em série dos componentes Reparáveis com os não Reparáveis. Com base nos pressupostos anteriores, a fiabilidade do sistema,  $R_{sis}$ , é obtida através da seguinte equação

$$R_{sis} = R_{NR} \times R_R \quad (4.1)$$

Onde:

$R_{sis}$  – Fiabilidade do sistema;

$R_{NR}$  – Fiabilidade dos componentes Não Reparáveis;

$R_R$  – Fiabilidade dos componentes Reparáveis.

Os componentes não reparáveis seguem uma Distribuição Exponencial com Taxa de Falhas  $\lambda$  constante. Relativamente aos componentes Reparáveis, a sua Fiabilidade é modelada a partir da Lei da Potência, descrita no ponto 3.3.4, cujos parâmetros correspondem aos que foram estimados a partir dos dados de falha descritos na Tabela 4.1. Assim, a Fiabilidade do sistema  $R_{sis}$  para um determinado instante de tempo  $t$  é obtida através da equação

$$R_{sis}(t) = e^{-\lambda t} \times e^{-\Lambda t^\beta} \quad (4.2)$$

Onde:

$R_{sis}$  – Fiabilidade do sistema;

$t$  – Instante de tempo considerado;

$\lambda$  – Taxa de Falhas dos componentes Não Reparáveis;

$\Lambda$  – Intensidade de Falha dos componentes Reparáveis do sistema;

$\beta$  – Parâmetro de forma da Lei da Potência.

## **Modelação da Função Objetivo**

Devido às condicionantes anteriormente referidas, a equação (3.12) toma a forma da equação:

$$CM = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k C_{ij} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k C_{ij} \left( \int_{t_{i-1}}^{t_i} \lambda(t) dt + \int_{t_{i-1}}^{t_i} \Lambda(t) dt \right) \quad (4.3)$$

Onde:

$CM$  - Custo do Plano de Manutenção.

$C_{ij}$  - Custos  $j$  de uma operação de Manutenção, relativos ao Período Manutenção  $i$ , para a Operação de Manutenção  $j$ , descritos na Tabela 3.1 do presente documento;

$\Lambda(t)$  - Intensidade de Falha do sistema Reparável;

$\lambda(t)$  - Taxa de Falha dos componentes Não Reparáveis do sistema;

$t_i$  - Instante de tempo (ex.: horas, dias, semanas) do Período de Manutenção  $i$ ;

$t_{i-1}$  - Instante inicial de tempo do Período de Manutenção anterior  $i - 1$ ;

$k$  - Número total de atividades realizadas durante o Período de Manutenção  $i$ ;

$n$  - Número total de Períodos de Manutenção.

## **4.3 Casos de Estudo Realizados.**

No presente capítulo são descritas as simulações realizadas no algoritmo desenvolvido. Em todos os estudos, mantém-se constantes as variáveis dos custos para cada tipo de Manutenção ( $CMP$  e  $CMC$ ), os parâmetros das distribuições teóricas que modelam a Fiabilidade dos componentes ( $\theta, \beta$  para a Lei da Potência e  $\lambda$  para a distribuição exponencial), o Fator de Remoção de Dano  $q$  e o período de tempo entre dois Períodos de Manutenção  $T$ .

### **4.3.1 Caso de Estudo 1**

O primeiro caso de estudo realizado pretende desenvolver um plano de Manutenção para um chiller cujo histórico de avarias é dado pela tabela 4.1, considerando que este se encontra em exploração com uma vida acumulada de 18800 horas.

Para este caso, a Vida Virtual do sistema, no início da simulação, é igual a 1818 horas, obtido aplicando a equação (3.18) aos dados presentes na tabela 4.1, considerando as

reparações efetuadas como Manutenção do tipo 1 (Manutenção Imperfeita com um fator de redução de dano de  $q = 0,333$ ).

A simulação é realizada para um período de funcionamento de 5 anos, dividido em 55 Períodos de Manutenção  $i$ , nos quais, para cada Período de Manutenção, pode ser efetuada uma Operação de Manutenção do tipo 0 (não alocar recursos para realizar uma operação de Manutenção Preventiva, com Fator de Remoção de Dano  $q = 1$ ), do tipo 1 (realização de uma Manutenção Imperfeita, com Fator de Remoção de Dano  $q = 0.333$ ) ou do tipo 2 (realização de uma Manutenção Perfeita, com Fator de Remoção de Dano  $q = 0$ ).

Entre cada Período de Manutenção  $i$ , a Vida Virtual do sistema irá avançar  $T$  horas, correspondente a 10,5 horas durante 22 dias uteis para o presente caso de estudo, equivalente a um valor de  $T = 231$  horas. A simulação é executada para 55 variáveis, correspondentes aos 55 Períodos de Manutenção considerados, com uma população inicial de 50 indivíduos, com fiabilidade mínima exigida de 90 %, critério de paragem de 75 gerações sem alteração do indivíduo que apresenta melhor valor de *fitness* e uma tolerância na alteração de valores da função de *fitness* na ordem de  $1 \times 10^{-6}$ .

### **4.3.2 Caso de Estudo 2**

Neste caso de estudo pretende-se verificar se para as mesmas condições do Caso de Estudo 1, aumentar o nível de fiabilidade mínimo exigido traz vantagens na redução dos custos relacionados com as potenciais avarias.

A simulação é efetuada para um período de funcionamento de 5 anos, dividido em 55 Períodos de Manutenção  $i$ , nos quais, para cada Período de Manutenção  $i$ , pode ser realizada uma operação de Manutenção do tipo 0 (não alocar recursos para realizar uma operação de Manutenção Preventiva, com Fator de Remoção de Dano  $q = 1$ ), do tipo 1 (realização de uma Manutenção Imperfeita, com Fator de Remoção de Dano  $q = 0.333$ ) ou do tipo 2 (realização de uma Manutenção Perfeita, com Fator de Remoção de Dano  $q = 0$ ).

Entre cada Período de Manutenção, a Vida Virtual do sistema avança  $T$  horas, que no presente estudo corresponde a 10,5 horas durante 22 dias uteis, totalizando  $T = 231$  horas.

A simulação é efetuada para 55 variáveis, correspondentes aos 55 Períodos de Manutenção considerados, com uma população inicial de 50 indivíduos, com Fiabilidade mínima exigida de 98 %, com critério de paragem de 75 gerações sem alteração no individuo que apresenta um melhor *fitness* e uma tolerância na alteração de valores da função de *fitness* de  $1 \times 10^{-6}$ .

### 4.3.3 Caso de Estudo 3

Neste caso de estudo pretende-se demonstrar a capacidade do algoritmo para gerar um plano de Manutenção para um equipamento no início da sua comissão, cujo histórico de avarias provém de um equipamento similar, a operar em condições semelhantes. Esta consideração implica uma vida acumulada de 0 horas, e conseqüentemente, uma vida virtual inicial igual a 0.

A simulação é realizada para a vida expectável do equipamento, equivalente a um período de 20 anos, dividido em 220 Períodos de Manutenção, nos quais, para cada período, pode ser efetuada uma operação de Manutenção do tipo 0 (não alocar recursos para realizar uma operação de Manutenção Preventiva, com Fator de Remoção de Dano  $q = 1$ ), do tipo 1 (realização de uma Manutenção Imperfeita, com Fator de Remoção de Dano  $q = 0.333$ ) ou do tipo 2 (realização de uma Manutenção Perfeita, com Fator de Remoção de Dano  $q = 0$ ).

Entre cada Período de Manutenção, a Vida Virtual do sistema avança  $T$  horas, que no presente estudo corresponde a 10,5 horas durante 22 dias uteis, Totalizando o valor de  $T = 231$  horas.

A simulação é realizada considerando 220 variáveis, correspondentes aos 220 Períodos de Manutenção, com uma população inicial de 50 indivíduos, com Fiabilidade mínima exigida de 90 %, com critério de paragem de 75 gerações sem alteração no individuo que apresenta um melhor valor de *fitness* e uma tolerância na alteração de valores da função de *fitness* de  $1 \times 10^{-6}$ .

## 4.4 Resultados dos Casos de Estudo

No presente ponto são discutidos os resultados dos casos de estudo realizados na presente dissertação.

## Caso de Estudo 1

O plano de manutenção que minimiza o custo total das intervenções de manutenção preventiva, devolvido pelo algoritmo, para a simulação realizada no Caso de Estudo 1, ao qual se atribuiu a designação de PM corresponde a

$$PM = 1\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0$$
$$0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0$$

Os valores 0 e 1 correspondem, para o primeiro caso a Manutenção do tipo 0 e no segundo a Manutenção do Tipo 1. Para facilitar a visualização da distribuição das intervenções de Manutenção anteriormente enunciadas ao longo do tempo, é representada, na Figura 4.3, a representação gráfica do plano de Manutenção obtido para as condições indicadas no Caso de Estudo 1 da presente dissertação.

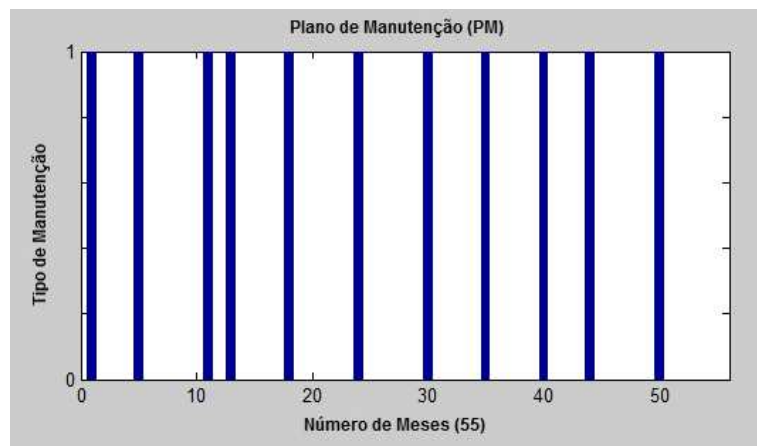


Figura 4. 3 Plano de Manutenção obtido para o Caso de Estudo 1.

O plano de Manutenção sugerido, contabiliza um total de 11 intervenções, com um custo total de 12.492,00 €, dos quais  $11 \times 905,00 \text{ €} = 9.955,00 \text{ €}$  são os custos associados às 11 intervenções de Manutenção do tipo 1 (Manutenção Imperfeita com Fator de Redução de Dano  $q = 0,333$ ) e os restantes  $12.492,00 \text{ €} - 9.955,00 \text{ €} = 2.537,00 \text{ €}$  correspondem ao somatório dos custos das avarias que possa vir a ocorrer em qualquer período em que não são alocados recursos de Manutenção ao sistema (Manutenção do tipo 0).

O plano Manutenção proposto não inclui nenhuma intervenção de *overhaul* (Manutenção do tipo 2), uma vez que o seu custo, presente na Tabela 4.2 é muito superior ao custo de uma Manutenção Imperfeita. Alias o custo total do plano de Manutenção proposto é

apenas 12.492,00 € – 12.416,00 € = 76,00 € superior ao custo de uma intervenção do tipo 2, o que leva a concluir que sem uma restrição temporal para a realização deste tipo de intervenção, para os dados considerados no presente estudo, não é sugerida.

A evolução da Fiabilidade do sistema sujeito ao plano de Manutenção proposto para o caso em análise encontra-se ilustrada no gráfico da Figura 4.4.

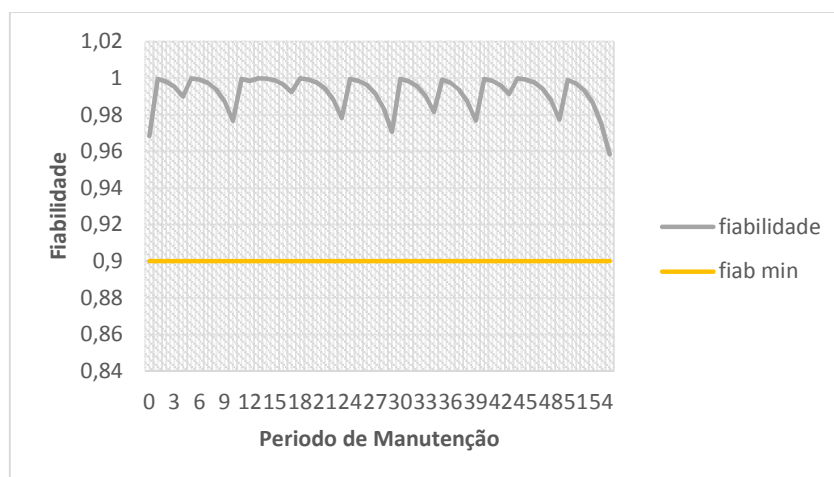


Figura 4.4 - Evolução da Fiabilidade para o Caso de Estudo 1.

Através da análise da evolução da Fiabilidade do sistema com a aplicação do plano de Manutenção sugerido pelo algoritmo para o Caso de Estudo 1, verifica-se que o nível de Fiabilidade mínimo exigido nunca é atingido. Este acontecimento deve-se ao fato de os custos associados às falhas serem superiores aos custos de uma intervenção do tipo 1 (Realizar uma operação de Manutenção Imperfeita) antes de ser atingido o nível mínimo de fiabilidade imposto, pelo que tomam prioridade em relação a esta restrição.

No entanto, os resultados obtidos apenas são válidos para as condições referidas no presente capítulo, uma vez que alterando os custos associados aos tipos de Manutenção considerados, tipo 0, não alocar recursos de Manutenção ao sistema, tipo 1, realizar uma intervenção de Manutenção Imperfeita e tipo 2, realizar uma intervenção de Manutenção Perfeita, ou com outro valor para o Fator de Remoção de Dano  $q$ , os resultados alteram-se e o comportamento apresentado na Figura 4.4 pode alterar-se substancialmente.

## Caso de Estudo 2

O plano de Manutenção que minimiza o custo total das intervenções de Manutenção Preventiva, para as condições da simulação realizada no Caso de Estudo 2 da presente dissertação, corresponde a

$$PM = 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0$$
$$0\ 1\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0$$

Para a facilitar a visualização da distribuição das intervenções de Manutenção anteriormente enunciadas é representada, na Figura 4.5, a representação gráfica do plano de Manutenção obtido através do algoritmo proposto para as condições indicadas no presente caso de estudo.

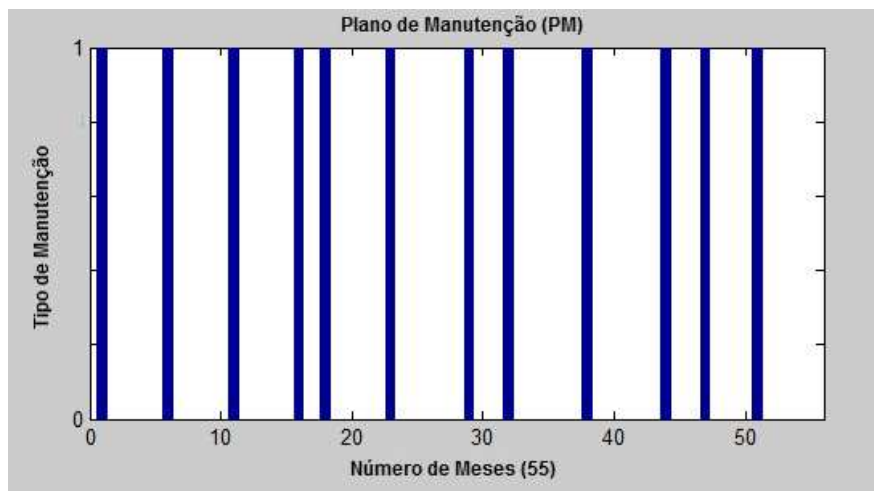


Figura 4.5 - Plano de Manutenção obtido para o Caso de Estudo 2.

O plano de Manutenção sugerido pelo algoritmo para as condições do Caso de Estudo 2 contabiliza um total de 12 intervenções, registando um custo total de 12.915,00 €, dos quais  $12 \times 905,00 \text{ €} = 10.860,00 \text{ €}$  são os custos associados às 12 intervenções de Manutenção do tipo 1 (Manutenção Imperfeita com Fator de Redução de Dano  $q = 0,333$ ) e os restantes  $12.915,00 \text{ €} - 10.860,00 \text{ €} = 2.055,00 \text{ €}$  correspondem aos custos totais de uma potencial falha que possa ocorrer nos períodos entre manutenções do tipo 1.

Tal como no caso de estudo anterior, não são indicadas operações de Manutenção do tipo 2 (Manutenção Perfeita com Fator de Redução de Dano  $q = 1$ ), pelas mesmas razões enunciadas no caso de estudo anterior

A evolução da fiabilidade do sistema sujeito ao plano de Manutenção proposto para o Caso de Estudo 2 encontra-se representada no gráfico da Figura 4.6.

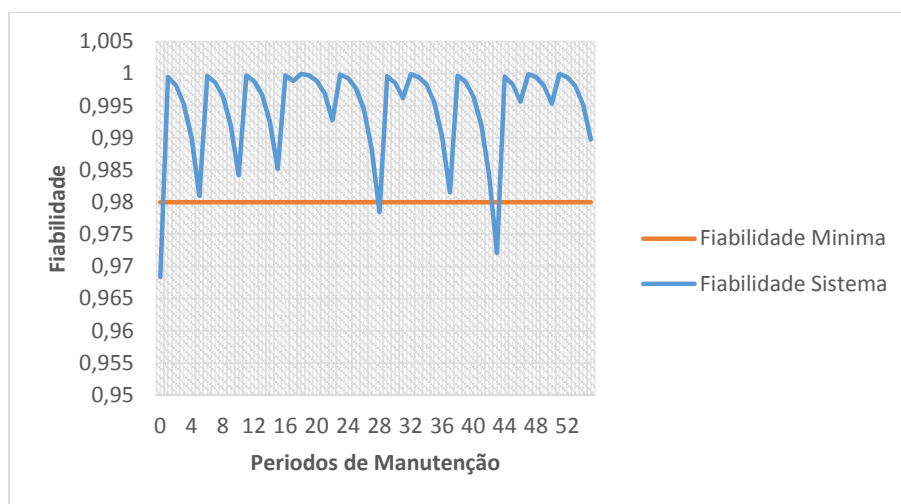


Figura 4.6- Evolução da Fiabilidade do sistema para o Caso de Estudo 2.

Após a análise do gráfico da Figura 4.6 é possível verificar que existem situações em que o nível mínimo de Fiabilidade é ultrapassado. Esta condição verifica-se devido à análise se efetuar em instantes de tempo discretos, cujo valor entre dois Períodos de Manutenção consecutivos depende da variável  $T$ . Para eliminar este problema é necessário reduzir o valor desta variável, limitando desta forma a evolução da Fiabilidade para valores inferiores ao mínimo exigido.

No entanto é possível verificar o impacto da restrição de Fiabilidade exigida na sua evolução ao longo do tempo, uma vez que cada vez o limite é ultrapassado é sugerida uma intervenção de Manutenção no Período de Manutenção seguinte. As restantes Operações de Manutenção são distribuídas ao do tempo em análise de forma a reduzir os custos associados às falhas que possam ocorrer nos intervalos entre reparações onde não são alocados recursos para a realização de Manutenção Preventiva ao sistema (Manutenção do tipo 0).

### Caso de Estudo 3

O plano de Manutenção que minimiza o custo total das intervenções de Manutenção Preventiva, após a simulação efetuada para as condições do Caso de Estudo 3, corresponde a:

```
PM = 0 0 0 0 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 1 0 0 0 0 1 0 0 0  
1 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 1 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 1 0 0 1 0 0 0 0 0 1 0  
1 0 0 0 0 0 0 1 0 1 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 1 0 0 1 0 1 0 0 0 0 1 0 0 0 1 0 0  
0 1 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 1 0 1 0 0  
0 0 0 1 0 0 1 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 1 0 0 0 0 0 1 0 0 1 0 0 0 0 0 0  
1 0 0 0 0 1 0 1 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 1 0 1 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0
```

Para facilitar a visualização da distribuição das intervenções de Manutenção ao longo do tempo, encontra-se representado, na Figura 4.7 a representação gráfica do plano de Manutenção obtido através do algoritmo para as condições do Caso de Estudo em análise.

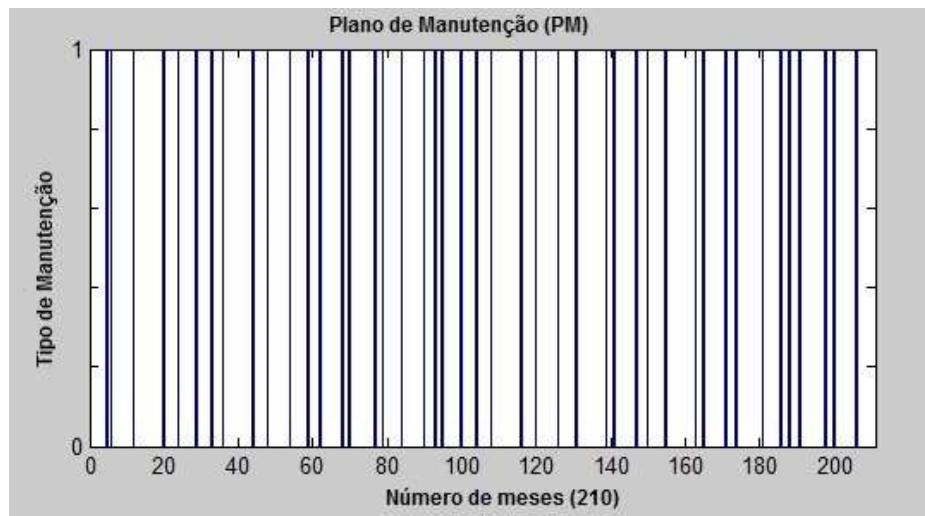


Figura 4.7- Plano de Manutenção obtido para o Caso de Estudo 3.

O plano de Manutenção sugerido pelo algoritmo para o Caso de Estudo em análise totaliza 44 intervenções, correspondentes a um custo total de 49.568,00 €, dos quais  $44 \times 905,00 \text{ €} = 39.820,00 \text{ €}$  são os custos associados às 44 intervenções de Manutenção do tipo 1 (Manutenção Imperfeita com Fator de Redução de Dano  $q = 0,333$ ) e os restantes  $49.568,00 \text{ €} - 39.820,00 \text{ €} = 9.748,00 \text{ €}$  correspondem ao somatório dos custos das falhas que podem surgir nos períodos entre Manutenções do tipo 1.

A evolução da Fiabilidade do sistema sujeito ao plano de Manutenção proposto para o Caso de Estudo 3 encontra-se representada no gráfico da Figura 4.8.

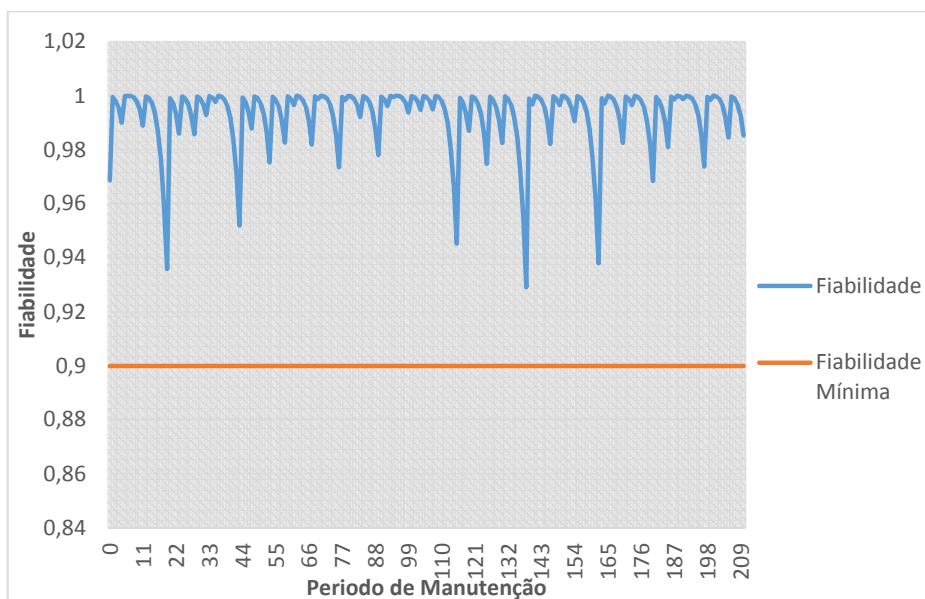


Figura 4.8- Evolução da fiabilidade do sistema no caso de estudo 3.

Através da análise da Figura 4.8 é possível constatar que o nível de Fiabilidade mínimo exigido de 90% nunca é atingido. Esta condição, já verificada no Caso de Estudo 1, deve-se ao fato de os custos relativos às avarias serem superiores ao custo de uma intervenção do tipo 1 (Manutenção Imperfeita) antes de o nível mínimo de Fiabilidade imposto ser atingido.

Como nos casos anteriores, as intervenções são distribuídas de forma a reduzir os custos associados às avarias que podem surgir nos períodos em que não são alocados recursos para a realização de Manutenção Preventiva (Manutenção do tipo 0), e quanto mais espaçadas estas se encontram maior é o custo das avarias. Este fator, juntamente com o valor do Fator de Remoção de Dano, explica a evolução da Fiabilidade do sistema representado na Figura 4.8.

#### 4.5 Comparação de Resultados

Para efetuar qualquer tipo de comparação com os estudos realizados é necessário proceder à descrição do plano de Manutenção atualmente em vigor no equipamento estudado.

O plano atual de Manutenção engloba um total de 5 intervenções por ano, correspondente 25 intervenções para o período de tempo considerado para as condições do Caso de Estudo 1 e 2, que toma o valor de 5 anos.

Assumindo que este tipo de intervenções são compostas por operações de Manutenção Imperfeita (Manutenção do tipo 1) e supondo que o seu valor é igual ao das intervenções de Manutenção do tipo 1 (Manutenção Imperfeita com Fator de Remoção de Dano  $q = 0,333$ ), cujo custo se encontra representado na Tabela 4.2 (905,00 € por intervenção), o custo total deste plano, considerando apenas as intervenções realizadas, equivale a  $25 \times 905,00 \text{ €} = 22.625,00 \text{ €}$ .

Já para o Caso de Estudo 3, o intervalo temporal da análise tem a duração de 20 anos, correspondente a 220 períodos de manutenção. Para este caso, considerando que as intervenções realizadas são de manutenção imperfeita (Manutenção do tipo 1), obtém-se um valor correspondente de  $220 \times 905,00 \text{ €} = 199,100,00 \text{ €}$ .

Relativamente ao custo das avarias que possam surgir nos períodos em que não é efetuada qualquer tipo de intervenção (Manutenção do tipo 0), não foi possível obter dados que permitam uma estimativa adequada dos mesmos, durante a realização do presente trabalho.

### **Comparação do Plano Atual de Manutenção com o Casos de Estudo 1**

Para facilitar a comparação de resultados entre o plano de Manutenção atual e o sugerido pelo algoritmo para as condições do Caso de Estudo 1, os resultados obtidos foram compilados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Custos do plano de Manutenção atual e do Caso de estudo 1.

	Resultados obtidos				
	Custo total	Número de intervenções	Tipo das Intervenções	Custo das Intervenções	Custo das avarias
Plano Atual	22.625,00 €	25	1	22.625,00 €	-
Caso de Estudo 1	12.492,00 €	11	1	9.955,00 €	2.537,00 €

O plano de Manutenção sugerido para as condições do Caso de Estudo 1, descrito no ponto 4.3.1, totaliza o valor de 12.492,00 €. A quantia anterior pode ser subdividida em custos diretos, associados à realização das intervenções de manutenção, cujo valor é 9.955,00€ decorrentes das 11 intervenções a realizar. A restante verba, correspondente a

2.537,00 € corresponde aos custos relacionados com as avarias que possam surgir nos períodos em que não são realizadas intervenções (Manutenção do tipo 0).

Comparativamente ao plano de Manutenção atualmente aplicado ao equipamento, correspondente a 25 intervenções, com um custo associado de 22.625,00 €, a aplicação do plano de Manutenção obtido através da metodologia proposta origina uma redução de  $25-11=14$  intervenções e conseqüentemente, a uma redução dos custos de  $22.625,00 - 9.955,00 = 12.670,00$  €.

O resultado anterior permite uma poupança, em termos percentuais, de 56 % nos custos alusivos à realização de intervenções de Manutenção Preventiva.

Como anteriormente referido, não foi possível estimar os custos das avarias do plano atual. No entanto, através da análise da Figura 2.15 ao apresentar um maior número de intervenções o custo relativo às avarias é menor. No entanto, sem uma estimativa real deste valor, não é possível a comparação destes resultados com os obtidos para o caso de estudo 1.

### **Comparação dos Resultados Obtidos para os Casos de Estudo 1 e 2.**

De modo a facilitar a análise dos resultados dos Casos de Estudo comparados, compilou-se os resultados obtidos na Tabela 4.5.

Tabela 4.4 – Resultados obtidos para o Caso de Estudo 1 e 2.

	Resultados obtidos				
	Custo total	Número de intervenções	Tipo das Intervenções	Custo das Intervenções	Custo das avarias
Caso de Estudo 1	12.492,00 €	11	1	9.955,00 €	2.537,00 €
Caso de Estudo 2	12.905,00 €	12	1	10.860,00 €	2.045,00 €

O Caso de Estudo 2 pretende demonstrar o impacto do aumento no nível mínimo de Fiabilidade exigido ao sistema. Após a análise dos resultados obtidos em ambos os Casos de Estudo, conclui-se que o aumento do nível mínimo de Fiabilidade imposto leva a uma redução de  $2.537,00 € - 2.045,00 € = 492,00€$  nos custos relativos às falhas que possam surgir nos períodos em que não são realizadas intervenções de Manutenção (Manutenção do tipo 0) ao sistema. Por outro lado, como seria de esperar, regista-se um

aumento de 12.905,00 € – 12.492,00 € = 413,00 € nos custos totais do plano de Manutenção, devido à introdução de uma nova intervenção.

Em termos percentuais, o plano devolvido pelo Caso de Estudo 2 permite uma redução de 19% nos custos relacionados com as avarias, com um aumento de 3% na totalidade dos custos. Este resultado leva a concluir que o plano de Manutenção devolvido pelo caso de estudo 2 é o mais indicado uma vez que com um ligeiro aumento dos custos totais do plano de Manutenção é possível uma redução significativa, 19%, dos custos relativos às avarias que podem surgir no intervalo temporal em análise.

### **Comparação do Caso de Estudo 3 com o plano de Manutenção atual**

Para facilitar a comparação dos resultados obtidos no Caso de Estudo 3 com o plano atual de Manutenção, estes foram compilados na tabela 4.4.

Tabela 4.5 - Resultados do plano de manutenção atual e do caso de estudo 3.

	Resultados obtidos				
	Custo Total	Número de Intervenções	Tipo das Intervenções	Custo das Intervenções	Custo das Avarias
Plano Atual	90.500,00 €	100	1	90.500,00 €	-
Caso de Estudo 3	49.586,00 €	44	1	39.820,00 €	9.748,00 €

Comparando os dados representados na Tabela 4.4 o plano de Manutenção devolvido pelo algoritmo para as condições do Caso de Estudo 3 permite uma redução nos custos totais do plano de Manutenção na ordem dos 45 %, um valor correspondente em euros, a uma redução de 40.914,00 €.

É notória a redução do número de intervenções realizadas para o mesmo período de tempo em análise, que passa de um total de 100 intervenções no plano atual para 44 no plano de Manutenção proposto. Ao nível dos custos diretos das intervenções, a redução verificada equivale a 56 %, que em euros, corresponde a uma redução nos custos de Manutenção na ordem dos 50.860,00 €.

Comparativamente ao custo de aquisição do equipamento, cujo valor é de 66.241,00 €, o plano atualmente aplicado corresponde a 1,37 vezes o custo de aquisição, o que vai de encontro ao referido no ponto 2.8. Já para o plano proposto pelo algoritmo para o Caso de Estudo 3, estes custos baixam para um valor de cerca de 60% dos custos de aquisição, o que permite uma grande redução dos custos para a entidade detentora do equipamento.

No entanto, é necessário acautelar que não foi introduzida a intervenção de *overhaul* (Manutenção do tipo 2 com Fator de Remoção de Dano  $q = 0$ ) que normalmente é efetuada a meio da vida expectável do equipamento. Esta condição implica um custo adicional de 12.492,00€ por intervenção, valor que aumenta consideravelmente os custos totais do plano de Manutenção.



## Capítulo 5 – Conclusões e Trabalhos Futuros

### 5.1 Conclusões

Através dos resultados dos Casos de Estudo efetuados, descritos no ponto 4.3, prova-se a importância da redução dos custos associados à função de Manutenção. De fato, a relevância deste tópico é abordada nos trabalhos de vários autores (Dhillon, 2002; Levitt, 1997; Cabral, 2006).

Com base nas considerações efetuadas no Caso de Estudo 1 do presente documento, o plano de Manutenção atualmente aplicado implica um custo total, para um período de 5 anos, de 22.625,00€ enquanto o custo do plano de Manutenção proposto tem um custo associado de 9.955,00 €, equivalente a uma poupança de 56% nos custos inerentes à Manutenção.

Ao nível das intervenções a realizar, tipo 1 (Manutenção Imperfeita) e tipo 2 (Manutenção Perfeita), é expectável um maior número de intervenções de tipo 1 (Manutenção Imperfeita), em deterioramento de intervenções do tipo 2 (Manutenção Perfeita), devido à grande diferença de valores entre ambas, conforme representado na tabela 4.2 do presente documento.

Relativamente ao número de intervenções verificou-se, com base nos resultados dos Casos de Estudo 1 e 2 que o aumento do nível de Fiabilidade mínimo exigido ao sistema leva a um aumento do número de intervenções e conseqüentemente, a um aumento dos custos diretos de Manutenção (custos relacionados com as intervenções realizadas). No entanto, os custos associados com as avarias diminuem. Comprova-se ainda, que caso se verifique uma redução do nível de Fiabilidade mínimo acontece o oposto. Estes resultados vão de encontro ao descrito no ponto 2.8 da presente dissertação.

Tendo em consideração que os custos de Manutenção, durante a vida útil do equipamento atingir valores entre 2 e 20 vezes o seu custo de aquisição (Dhillon, 2002), o plano de Manutenção devolvido pelo algoritmo, considerando que o equipamento se encontra no início do seu período de funcionamento e que dispõe de uma vida útil de 20 anos, para as condições referidas no caso de estudo 3 (descrito no ponto 4.3.3), devolve um custo direto (custo das intervenções), de 39.820,00 €, equivalente a 60% dos custos de aquisição do equipamento, cujo valor é igual a 66.241,00 €.

Os resultados obtidos nos estudos realizados leva à conclusão que a aplicação da metodologia proposta pode vir a ser uma ferramenta poderosa no auxílio da gestão de Manutenção, uma vez que aliado à capacidade de otimização demonstrada, o algoritmo criado na presente dissertação pode ser aplicado a qualquer sistema reparável que apresente um padrão de falha provocado por mecanismos de desgaste.

## **5.2 Trabalhos Futuros**

Ao longo da presente dissertação, devido a um conjunto de condicionantes referidas no Capítulo 4, efetuaram-se uma série de considerações para poder desenvolver os casos de estudo realizados. Como trabalho futuro a metodologia proposta deve ser testada num equipamento que possua um histórico de dados detalhado, e uma análise exaustiva de todos os custos associados às operações de Manutenção efetuadas no equipamento em questão. Só desta forma é possível quantificar ao certo os benefícios da metodologia proposta.

Durante a elaboração da presente dissertação não foi possível incluir no código do algoritmo o cálculo do Fator de Remoção de Dano  $q$  pelo método descrito no ponto 3.3.4. Fica a nota para futuro desenvolvimento incluir na programação existente o código que permita estimar este parâmetro sem recorrer a programas externos.

Para além da metodologia apresentada na presente dissertação, foi desenvolvido um algoritmo que permite estimar o tipo de operação a realizar para cada componente do sistema. Esta abordagem é muito semelhante à apresentada na metodologia proposta, descrita no Capítulo 3, e o seu objetivo é devolver o tipo de intervenção a efetuar nos componentes num instante de tempo determinado. A finalidade desta metodologia é indicar o ou os componentes constituintes do sistema em análise devem ser intervencionados em cada operação de Manutenção Preventiva. No entanto, devido à falta de dados de falha do sistema e dos seus constituintes, este algoritmo não foi incluído na presente dissertação, mas fica a proposta para desenvolvimento futuro.

## Referências Bibliográficas

Ahmad, R.; Kamaruddin, S.:” An overview of time-based and condition-based maintenance in industrial application” *Computers & Industrial Engineering*, Vol.63, Issue 1, (2012), pp.135-149.

Aljahdali, S.H., El-Telbany, M.E. Software reliability prediction using multi-objective genetic algorithm. *International Conference on computers systems*, Rabat, Marrocos, 10-13 May 2009.

Ann-Klutke, G.; Kiessler, P.C.; Wortman, M.A.: “A Critical Look at the Bathtub Curve” *IEEE Transaction on Reliability*, Vol.52, Issue 1, (2003), pp.125-129.

Assis, R., *Apoio à decisão em Manutenção na Gestão de Activos*, LIDEL- Edições Técnicas Ltd, Lisboa, Portugal, 2014.

Banjevic, D.; Jardine, A.K.S.; Makis, V.:” A control-limit policy and software for condition-based maintenance optimization” *INFOR*, 39, (2001), pp.32-50.

Brah, S.A.; Chong, W.-K.: ”Relationship between total productive maintenance and performance” *International Journal of Production Research*, Vol.42, Issue 12, (2007), pp. 2383-2401.

Cabral, J.S., *Organização e Gestão da Manutenção dos conceitos à prática...*, LIDEL-Edições Técnicas Ltd, Lisboa, Portugal, 2006.

Calixto, E., *Gas and Oil Reliability Engineering Modeling and Analysis*, Gulf Professional Publishing, Elsevier, Oxford, UK, 2015.

Cavalier, M.P.; Knapp, G.M.:”Reducing preventive maintenance cost error caused by uncertainty” *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 2, Issue 3, (1996), pp.21-36.

Chan, F.T.S; Lau, H.C.W.; Ip, R.W.L.; Chan, H.K; Kong, S.:” Implementation of total productive maintenance: A case study” *International Journal of Production Economics*, Vol.95, (2005), pp.71-94.

Corset, F.; Despréaux, S.; Doyen, L.; Gaudoin, O. MARS: a software tool for maintenance assessment of repairable systems, MMR. 2009, Moscow, Russia, 2009.

Cox, D.R.: "Regression models and life-tables" *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)*, Vol.34, no.2, (1972), pp187-220..

Cunha, A.G.; Antunes, C.H.; Coello, C.C. Evolutionary Multi-Criterion Optimization: 8th International Conference, *EMO 2015, part II'*, Springer, Guimarães, Portugal, 2015.

Daikin, *Technical data Air-cooled EWAD-AJYNN*, Daikin Europe, Oostende, Belgium, 2007.

Daikin, *Authorized Federal Supply Schedule Price List*, Daikin Applied Americas Inc., Minneapolis, USA, 2015.

Danfoss Turbocor, *Life cycle cost analysis*, Chillventa, 2015.

Dhillon, B.S., *Reliability Engineering, A modern Approach*. pp. 89-107, CRC Press LLC, Florida, USA, 2002.

Doyen, L.; Gaudoin, O.: "Classes of imperfect repair models based on reduction of failure intensity or virtual age" *Reliability Engineering and Systems Safety*, Vol.84, Issue 1, (2002), pp. 45-56.

El-Berry, A.; Al-Bossly, A.: "Application of Computer Model to Estimate the Consistency of Air Conditioning Systems Engineering" *International Journal of Engineering Technology*, Vol.5, Issue 2, (2013), pp.659-668.

El-Haram, M.A.; Horner, R.M.W.: "Building maintenance strategy: a new management approach" *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 3, Issue 4, (1997), pp.273-280.

Ellis, B.A.: "Condition Based Maintenance" *TJP*, (2008), pp.1-5.

Endrenyi, J.; Aboresheid, J.; Allan, R.N.; *et al.*: "The present status of maintenance strategies and the impact of maintenance in reliability", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol.16, Issue 4, (2001), pp.638-646.

Faghihinia, E.; Mollaverdi, N.:” Building a maintenance policy through a multi-criterion decision-making model” *Journal of Industrial Engineering International*, Vol.8, Issue 1, (2012), artigo 14.

Gaudoin, O.; Yang, B.; Xie, M.:”Confidence intervals for the scale parameter of the power-law process” *Comm. Statist.-Theory and Methods*, Vol.35, Issue 8, (2006), pp.1525-1538.

Goldberg, D.E, *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, Addison-Wesley Longman Publishing Co., Boston, USA, 1989.

Guo, H.; Liao, H.; Pulido, J.: Failure process modeling for systems with general repairs, *7<sup>th</sup> International Conference on Mathematical Methods in reliability: Theory, Methods and Applications (MMR2001)*, Beijing, China, 2011.

International Atomic Energy Agency, *Implementation Strategies and Tools for Condition Based Maintenance at Nuclear Power Plants*, IAEA, 2007.

Ireson, W.G., Coombs Jr, C.R., Moss, R.Y., *Handbook of Reliability Engineering and Management*, McGraw-Hill, New York, USA, 1995.

Kay, E.:”The effectiveness of preventive maintenance” *International Journal of Production Research*, Vol. 14, Issue 3, (1976), pp.329-344.

Kelly, J., *Maintenance Strategy*, Butterworth-Heinemann, Oxford, UK, 1997.

Khan, F.I.; Haddara, M.M.:”Risk-based maintenance (RBM): a quantitative approach for maintenance/inspection scheduling and planning” *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol.16, Issue 6, (2003), pp.561-573.

Kijima, M.:”Some results for repairable systems with general repair” *Journal of Applied Statistics*, Vol.26, Issue 9, (1989), pp.89-102.

Kijima, M.; Nakagawa, T.:”A cumulative damage shock model with imperfect preventive maintenance” *Naval Research Logistics*, Vol.38, Issue 2, (1991), pp.145-156.

Knezevic, J., *Systems Maintainability*, Chapman & Hall, London, England, 1997.

Levit, J. *Managing Factory Maintenance*, Industrial Press, New York, USA, 2005.

Liu, T.K.; Tsai, J.T.; Chou, J.H.: "Improved genetic algorithm for the job-shop scheduling problem" *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 27, Issue 9-10, (2006), pp.1021-1029.

Malik, M.: "Reliable preventive maintenance scheduling" *AIIE Transactions*, Vol.11, Issue 3, (1979), pp.221-228.

Marqu ez, A. C.; Herguedas, A.S.: " Learning about failure root causes through maintenance records analysis" *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol.10, Issue 4, (2004), pp. 254-262.

Mettas, A.; Zhao, W. Modeling and Analysis of Repairable Systems with General Repair. *Annual Reliability and Maintainability Symposium*, Alexandria, USA, 2005.

Matworks, *Genetic Algorithm*, Matworks Documentation, United States, 2015.

Mobley, R.K., *Maintenance Fundamentals*, Elsevier Butterworth-Heinemann, Oxford, UK, 2004.

Moubray, J. *Reliability Centered Maintenance*, Butterworth-Heinemann, Oxford, 2<sup>nd</sup> edition, 1999.

Muchiri, P.; Pintelon, L.; Gelders, L.; Martin, H.: "Development of maintenance function performance measurement framework and indicators" *International Journal of Production Economics*, Vol.131, Issue 1,(2011), pp.259-302.

Nakagawa, T.: " Optimum policies when preventive maintenance is imperfect" *IEEE Transactions on Reliability*, Vol.28, Issue 4, (1979), pp.331-332.

S. Nakajima, *Introduction to Total Productive Maintenance (TPM)*, Productivity Press, Cambridge, USA, 1988

Nakagawa, T., *Maintenance Theory of Reliability*, Springer-Verlag, London, UK, 2005.

Netherton, D.: "RCM tasks", *Maintenance Technology*, July/August, (1999), pp.61-69.

Nieble, B.W. *Engineering Maintenance Management*, Marcek Dekker, New York, USA, 1994.

Niu, G.; Yang, B.; Pecht, M.: "Development of an optimized condition-based maintenance system by data fusion and reliability-centered maintenance" *Reliability Engineering and System Safety*, Vol.95, Issue 10, (2010), pp.786-796.

NP EN13306 (2007) *Norma portuguesa para Terminologia de Manutenção*, Instituto Português da Qualidade, Caparica, Portugal.

NP EN 15341 (2009) *Indicadores de desempenho na manutenção*, Instituto Português da Qualidade, Caparica, Portugal.

Osisoft, *Condition-based Maintenance (CBM ) Across the Enterprise*, Osisoft Inc, San Leandro, USA, 2007.

O'Connor, P.D.T., Kleyner, A., *Practical Reliability Engineering*, John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, West Sussex, UK, 2012.

Pintelon, L.; Hertz, A.; Kobbacy, K. (orgs); Murthy, D.N (orgs), *Complex System Maintenance Handbook*, Springer-Verlag, London, UK, 2008.

Raheja, D.; Llinas, J.; Nagi, R.; Romanowsky, C.: " A holistic view of condition based maintenance", Working Paper, Center for Multisource Information Fusion (CMIF), SUNY, 2000.

Rajpal, P.S.; Shishodia, K.S.; Sekhon, G.S.: " An artificial neural network for modeling reliability, availability and maintainability of a repairable system", *Reliability Engineering and Systems Safety*, Vol. 91, (2006), pp.809-819.

Rausand, M.: "Reliability centered maintenance" *Reliability Engineering and System Safety*, Vol.60, (1998), pp.121-132.

Rausand, M; Vatn, J.; Kobbacy, K. (orgs); Murthy, D.N (orgs), *Complex System Maintenance Handbook*, Springer-Verlag, London, UK, 2008.

Reliasoft, *Life Data Analysis Reference*, Reliasoft Corporation, Arizona USA, 2015.

Rezg, N., Dellagi, S., Khatad, A. *Joint Optimization of Maintenance and Production Policies*, ISTE Ltd, 2014.

Sachdeva, A.; Kumar, D.; Kumar, P.: "Planning and optimizing the maintenance of paper production systems in a paper plant" *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 55, Issue 4,(2008), pp.817-829.

Shaked, M.; Shanthikumar, J.G.: "Multivariate imperfect repair" *Operations research*, Vol.34, Issue 3, (1986), pp.437-448.

Stapelberg, R. F., *Handbook of Reliability, Availability, Maintainability and Safety in Engineering design*, Springer – Verlag London Limited, England, 2009.

Tsai, Y.T.; Wang, K. S.; Teng, H., Y.: "Optimizing preventive maintenance for mechanical components using genetic algorithms" *Reliability Engineering and Systems Safety*, Vol.74, Issue 1, (2001), pp. 89-97.

Wang, Y.; Handschin, E.: "A new genetic algorithm for preventive unit maintenance scheduling of power systems" *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 22, Issue 5, (2000), p346-348.

Wang, H.; Pham, H. *Reliability and Optimal Maintenance*, Springer-Verlag, London, UK, 2000.

Whitaker, L.R.; Sarameniogo, F.,J.: "Estimating the reliability of systems subject to imperfect Maintenance" *Journal of American Statistical Association*, Vol.84, Issue 405, (1989), pp. 301-309.

Wilson, S.; Black, R.; Masters, K.; Millard, D.: " Strategic maintenance approach produces best return on capital" *Pulp and Paper*, Vol.74, Issue 10, (2000), pp.45-54.

Yam, R.C.M.; Tse, P.W.; Li, L.; Tu, P.: " Intelligent Predictive Decision Support System for Condition-Based Maintenance" *International Journal of advanced Manufacturing Technology*, Vol.17, Issue 5, (2001), pp.383-391.

Yardley, R., *Impacts of the Fleet Response Plan on Surface Combatant Maintenance*, RAND corporation, Santa Monica, USA, 2006.

Zhou, X.; Xi, L.; Lee, J.: "Reliability-centered predictive maintenance scheduling for a continuously monitored system subject to degradation" *Reliability Engineering and Systems*, Vol. 92, Issue 4, (2007), pp. 530-534.

