

JOÃO
ALEXANDRE
GIBÃO
LOURENÇO

**APLICAÇÃO DA MANUTENÇÃO
CENTRADA NA FIABILIDADE EM
ORGANIZAÇÕES INDUSTRIAIS**

Relatório de Dissertação do Mestrado em
Engenharia de Produção

ORIENTADOR

Doutor, José Augusto da Silva Sobral

Data da realização da prova (mês e ano)

JOÃO
ALEXANDRE
GIBÃO
LOURENÇO

**APLICAÇÃO DA MANUTENÇÃO
CENTRADA NA FIABILIDADE EM
ORGANIZAÇÕES INDUSTRIAIS**

JÚRI

Presidente: (Grau, Nome, Instituição)

Orientador: Doutor, José Augusto da Silva Sobral

Vogal: (Grau, Nome, Instituição)

Vogal: (Grau, Nome, Instituição)

Data da realização da prova (mês e ano)

*Dedico este documento e todo o esforço investido
para que fosse possível a conclusão à minha
namorada, família e professor orientador que me
acompanharam durante todo o processo.*

Agradecimentos

Gostaria de expressar o maior agradecimento ao meu professor e orientador Doutor José Augusto da Silva Sobral, pela sua disponibilidade, esforço, dedicação e motivação em todos os momentos bons e maus durante todo este processo.

Agradeço também à minha família e à minha namorada Marta Baptista pelo apoio e incondicional e motivação que me deram durante todo o processo da dissertação.

Resumo

A presente dissertação tem como objetivo descrever detalhadamente o método Manutenção Centrada na Fiabilidade e elaborar uma ferramenta que permita agilizar e automatizar o processo de resposta ao Diagrama de Decisão. A Manutenção Centrada na Fiabilidade é um processo sistemático, em que uma equipa multidisciplinar responde a determinadas questões sobre um ativo a estudar. A ferramenta RCM TOOL foi desenvolvida a partir do *software* Microsoft Excel e consiste em sete folhas de cálculo, diversas macros e funcionalidades, com o intuito de permitir ao utilizador navegar e interagir com a ferramenta, encontrar as melhores Estratégias de Manutenção para os modos de falha em análise e extrair toda a informação obtida através da ferramenta num simples ficheiro *Portable Document Format*. Uma vez terminado o trabalho, pode-se concluir que se alcançaram os objetivos propostos, com uma descrição detalhada do processo Manutenção Centrada na Fiabilidade e com o desenvolvimento bem sucedido de uma ferramenta informática automatizada para utilização na fase do processo inerente ao Diagrama de Decisão, possibilitando a determinação das melhores Estratégias de Manutenção, de forma eficaz, simples e rápida, assim como de outras Estratégias Padrão identificadas.

Palavras-chave: Manutenção, Fiabilidade, Manutenção Centrada na Fiabilidade, Estratégia de Manutenção.

Abstract

The present dissertation aims to provide a detailed description of the Reliability-Centered Maintenance method and to develop a tool that facilitates and automates the process of responding to the Decision Diagram. Reliability-Centered Maintenance is a systematic process in which a multidisciplinary team answers specific questions regarding the asset under study. The RCM TOOL was developed using Microsoft Excel and consists of seven worksheets, several macros, and functionalities designed to allow the user to navigate and interact with the tool, identify the most appropriate Maintenance Strategies for the failure modes under analysis, and export all the information obtained through the tool into a simple Portable Document Format file. Upon completion of this work, it can be concluded that the proposed objectives were achieved: a detailed description of the Reliability-Centered Maintenance process was provided, and an automated computer-based tool was successfully developed for use in the phase of the process corresponding to the Decision Diagram. This tool enables the determination of the most effective, simple, and fast Maintenance Strategies, as well as other identified Standard Strategies.

Keywords: Maintenance, Reliability, Reliability Centered Maintenance, Maintenance Strategy

Índice

Agradecimentos	i
Resumo	ii
Abstract	iii
Índice.....	iv
Lista de Figuras.....	vi
Lista de Tabelas	vii
Lista de Siglas e Acrónimos	viii
Capítulo 1.....	1
Introdução.....	1
1.1. Enquadramento.....	2
1.2. Objetivo.....	4
1.3. Estrutura do trabalho.....	4
Capítulo 2.....	6
Manutenção e Fiabilidade.....	6
2.1. Manutenção	7
<i>2.1.1. Evolução da Manutenção</i>	<i>8</i>
<i>2.1.2. Objetivos da manutenção.....</i>	<i>10</i>
<i>2.1.3. Tipos de manutenção</i>	<i>10</i>
2.2. Fiabilidade	13
Capítulo 3.....	18
Manutenção Centrada na Fiabilidade.....	18
3.1. Evolução da Manutenção Centrada na Fiabilidade.....	19
3.2. Manutenção Centrada na Fiabilidade.....	20
<i>3.2.1. Contexto operacional.....</i>	<i>21</i>
<i>3.2.2. Funções.....</i>	<i>23</i>
<i>3.2.3. Falhas funcionais.....</i>	<i>26</i>

3.2.4. Modos de falha	27
3.2.5. Efeitos das falhas	28
3.2.6. Consequências das falhas	29
3.3. RCM 3.....	33
3.3.1. Contexto operacional.....	34
3.3.2. Funções.....	35
3.3.3. Estados de falha.....	35
3.3.4. Modos de falha	35
3.3.5. Efeitos da falha	36
3.3.6. Consequência vs. Risco.....	36
3.3.7. Risco inerente	36
3.3.8. Diagrama de decisão	37
Capítulo 4.....	38
Desenvolvimento de uma ferramenta de apoio ao processo RCM.....	38
4.1. Desenvolvimento da ferramenta RCM TOOL.....	39
4.2. RCM TOOL	39
4.2.1. Estrutura da Ferramenta	39
4.2.2. Página Inicial	40
4.2.3. Base de Dados	41
4.2.4. Diagrama de Decisão RCM.....	43
4.2.5. Termos e Conceitos.....	44
4.2.6. Tipos de Manutenção.....	45
4.2.7. Relatório Final.....	46
4.2.8. Ajuda.....	48
4.3. Utilização da ferramenta RCM TOOL.....	49
Capítulo 5.....	51
Conclusão e trabalhos futuros	51
5.1. Conclusão.....	52
5.2. Dificuldades sentidas	53
5.3. Trabalhos futuros.....	53
Bibliografia	54

Lista de Figuras

Figura 2.1 – Tipos de Manutenção, adaptado de [24].	11
Figura 2.2 – Curva da banheira detalhada [38].	14
Figura 2.3 - Curva da banheira [38].	16
Figura 3.1 – Exemplo esquemático da função “Bombear a água do tanque X para o tanque Y a não menos de 800 litros por segundo”, adaptado de [11].	24
Figura 3.2 – Árvore de decisão do processo RCM, adaptado de [11].	30
Figura 4.1 – Demonstração da Página Inicial da RCM TOOL.	40
Figura 4.2 – Demonstração da arquitetura da folha Base de Dados da RCM TOOL.	42
Figura 4.3 – Demonstração da arquitetura da folha Diagrama de Decisão RCM da RCM TOOL.	43
Figura 4.4 – Demonstração da arquitetura da folha Termos e Conceitos da RCM TOOL.	45
Figura 4.5 – Demonstração da arquitetura da folha Tipos de Manutenção da RCM TOOL.	46
Figura 4.6 – Demonstração da primeira parte da arquitetura da folha Relatório Final da RCM TOOL.	47
Figura 4.7 – Demonstração da arquitetura da tabela sem Observações escritas, presente na folha Relatório Final da RCM TOOL.	47
Figura 4.8 – Demonstração da arquitetura da folha Ajuda da RCM TOOL.	49

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Características dos vários tipos de falhas, adaptado de [32][38].	15
Tabela 3.1 – Registo de funções, adaptado de [32].	26
Tabela 3.2 - Codificação das falhas funcionais, adaptado de [32].	27
Tabela 3.3 - Identificação dos modos de falha, adaptado de [32].	28
Tabela 3.4 - Questões dos processos RCM II e RCM 3, adaptado de [30].	34

Lista de Siglas e Acrónimos

EUA	Estados Unidos da América
FAA	<i>Federal Aviation Administration</i> (Administração Federal de Aviação)
FTA	<i>Fault Tree Analysis</i> (Análise de Árvore de Falhas)
FMEA	<i>Failure Mode and Effect Analysis</i> (Análise de Modos de Falha)
IoT	<i>Internet of Things</i>
JIT	<i>Just-In-Time</i>
OEE	<i>Overall Equipment Effectiveness</i> (Eficiência Global do Equipamento)
PDF	<i>Portable Document Format</i>
RCM	<i>Reliability Centered Maintenance</i> (Manutenção Centrada na Fiabilidade)
TPM	<i>Total Productive Maintenance</i> (Manutenção Produtiva Total)

Capítulo 1

Introdução

O presente capítulo apresenta uma breve introdução ao tema da dissertação, o enquadramento deste no âmbito do Mestrado de Engenharia de Produção e os objetivos a atingir com a sua realização. Por último, tem-se uma descrição da estrutura do documento para uma melhor compreensão e visão global do seu conteúdo.

1.1. Enquadramento

Atualmente, as organizações industriais operam num ambiente destacado por sistemas produtivos cada vez mais complexos e pela competitividade das organizações rivais.

A disponibilidade e performance dos ativos de uma organização são os elementos críticos da sustentabilidade das empresas em competição. Neste cenário, a manutenção e a fiabilidade assumem um papel fundamental, permitindo às organizações assegurarem várias métricas [1].

A continuidade operacional, a Manutenção dos sistemas operacionais garante condições de funcionamento estáveis e previsíveis, e a Fiabilidade procura antecipar e reduzir a probabilidade de falhas, promovendo uma maior continuidade operacional dos sistemas. Consequentemente, através da relação direta entre a Manutenção, a Fiabilidade e o desempenho operacional, a organização mantém elevados padrões de qualidade e de pontualidade perante os seus clientes [2][3].

Elevada eficiência dos processos e otimização dos recursos, a condição a que os equipamentos se encontram está fortemente relacionado com a eficiência dos processos e da qualidade final dos produtos. A aplicação de Estratégias de Manutenção e de metodologias da Engenharia de Fiabilidade permite maior disponibilidade por parte dos equipamentos e estabilidade. Esta estabilidade proporcionada não só uma maior qualidade dos produtos, mas também uma redução dos custos de produção e manutenção, uma vez que evita perdas de materiais, tempo e energia [4][2].

E a segurança das pessoas e do ambiente, a implementação de Estratégias de Manutenção preventivas e preditivas e de práticas de engenharia de Fiabilidade, permitem reduzir a probabilidade de falhas críticas, o que minimiza riscos e garante condições de trabalho mais seguras [5][6][7]. Em simultâneo, equipamentos fiáveis e devidamente mantidos têm menos probabilidades de falhas que resultem em emissões poluentes, fugas ou desperdícios de matérias-primas [6][8].

Com a utilização estruturada de diversas ferramentas, métodos e metodologias no âmbito da Manutenção e da Fiabilidade vai muito além de reduzir falhas. Por exemplo, a aplicação de práticas como Análise de Modos de Falha (FMEA), Manutenção Produtiva Total (TPM) ou Manutenção Centrada na Fiabilidade (RCM) reduzem os custos de manutenção e de operação, visto que otimiza a utilização dos ativos, e promovem uma maior disponibilidade dos equipamentos, reduzindo o tempo de paragem

destes[9][10][11].

A FMEA permite identificar antecipadamente os Modos de Falha mais críticos, a sua severidade e ocorrência. Desta maneira, esta metodologia reduz o risco de paragens inesperadas, reduz os custos associados de produção e de Manutenção e aumenta a qualidade do produto final [9].

O TPM, por sua vez, incentiva a participação ativa de operadores e equipas de Manutenção em atividades de manutenção autónomas, inspeções regulares e melhoria continua. Esta abordagem reduz os custos associados, uma vez que evita falhas inesperadas e prolonga a vida útil dos ativos. Ao evitar falhas inesperadas, os tempos de paragem diminuem e a eficiência global do equipamento (OEE) aumenta. Através da melhoria contínua e do envolvimento dos colaboradores, a qualidade do produto tende a aumentar, dado a menos erros operacionais, e reforça a segurança, uma vez que equipamentos bem mantidos têm menos chances de acidentes [10].

O RCM é um processo que define que Estratégias de Manutenção devem ser aplicadas em cada ativo, com base nas suas funções e Modos de Falha, assim como outras estratégias, que podem ir desde a identificação de necessidades de formação, necessidade de documentação técnica atualizada, ou outras tarefas. Esta, ao equilibrar intervenções preditivas, preventivas e corretivas, otimiza os recursos e reduz os custos de produção e Manutenção. Através da análise das funções dos Modos de Falha, os tempos de paragem vão diminuir, uma vez que os ativos críticos vão receber a atenção necessária. A eficiência operacional e a qualidade do produto vão aumentar, dado que a manutenção é priorizada aos ativos cuja a falha impacta diretamente a segurança ou a produção [11].

O RCM é um processo que ao longo das últimas décadas tem vindo a ser utilizado, estando comprovado e amplamente aceite pela comunidade, sendo aplicado numa grande diversidade de setores industriais [12]. Rahayu Khasanah [13] realizou uma investigação com o objetivo de avaliar os efeitos da implementação do RCM na indústria. Nessa investigação, o autor estudou e analisou a implementação do RCM numa linha de produção de amoníaco de uma empresa de fertilizantes na Indonésia, através da comparação de custos de manutenção, antes e depois da implementação, tendo concluído que se verificou uma redução média de 33,75% nos custos anuais de manutenção após a implementação, contribuindo para a melhoria de desempenho da fábrica.

1.2. Objetivo

Os objetivos principais do presente trabalho passam não só por descrever o processo Manutenção Centrada na Fiabilidade de forma detalhada, mas também pelo desenvolvimento de uma ferramenta de apoio ao processo, mais concretamente para automatizar e agilizar a parte referente ao Diagrama de Decisão RCM. Esta ferramenta permite encontrar a melhor Estratégia de Manutenção para os respetivos Modos de Falha mais rapidamente, e de forma sistemática.

1.3. Estrutura do trabalho

O presente trabalho encontra-se estruturado em cinco capítulos, com um fluxo de informação lógico e coerente, permitindo uma leitura inicial sobre alguns conceitos fundamentais relacionados com a temática em causa, complementado com o desenvolvimento de uma aplicação prática. Nos parágrafos seguintes descreve-se, de forma resumida, o conteúdo de cada capítulo.

No capítulo 1 apresenta-se uma introdução ao tema da dissertação, bem como o seu enquadramento e quais os objetivos da realização deste trabalho. Neste capítulo faz-se ainda um resumo de cada capítulo constante no trabalho.

No capítulo 2 é realizada uma revisão bibliográfica sobre o tema da manutenção, onde se apresentam alguns conceitos importantes nesta área, a sua evolução histórica, os seus objetivos e os diferentes tipos de manutenção. De seguida refere-se o conceito de fiabilidade no sentido mais aplicável em Engenharia, e tendo por base as definições relevantes para o presente trabalho, sem se entrar em funções mais matemáticas, como distribuições estatísticas e respetivas funções densidade de probabilidade, função fiabilidade, função probabilidade acumulada de falha, taxa de falhas ou outras.

No capítulo 3 apresenta-se o tema Manutenção Centrada na Fiabilidade (RCM), que, sendo este o tema central do trabalho desenvolvido, mereceu destaque em termos de uma descrição mais detalhada, apresentando-se todos os passos clássicos que fazem parte deste processo na sua versão original.

No capítulo 4 apresenta-se, inicialmente, o desenvolvimento da ferramenta RCM TOOL, onde se indica como a ferramenta foi desenvolvida e os objetivos da sua elaboração. Em seguida dá-se a conhecer a estrutura da ferramenta, bem como o layout e

funcionalidades de cada folha. Por fim encontra-se a descrição de utilização da ferramenta.

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões do trabalho desenvolvido, que competências foi possível desenvolver e qual o contributo que o desenvolvimento desta dissertação trouxe para a área da manutenção industrial. Por fim, apresentam-se algumas propostas para trabalhos futuros, na sequência do trabalho desenvolvido.

Capítulo 2

Manutenção e Fiabilidade

Neste Capítulo apresenta-se uma revisão bibliográfica sobre a função Manutenção, onde são abordados alguns conceitos, a evolução desta função ao longo do tempo, os objetivos a alcançar e os vários tipos ou estratégias de manutenção. Apresenta-se ainda a revisão bibliográfica sobre a Fiabilidade, a sua importância no contexto industrial, e como a mesma se insere num processo estruturado como o processo RCM (Manutenção Centrada na Fiabilidade).

2.1. Manutenção

A manutenção industrial evoluiu de uma função corretiva, vista apenas como custo, para um fator estratégico de competitividade. Estudos recentes mostram que práticas como a Manutenção Centrada na Fiabilidade (RCM) e a Manutenção Produtiva Total (TPM) contribuem para uma maior disponibilidade e qualidade operacional [14][15][16]. A transição para abordagens baseadas na condição e manutenção preditiva, apoiadas por uma sensorização e análise dos dados, tem reduzido significativamente as paragens não planeadas e melhorado a eficácia global dos equipamentos [17][18].

Do ponto de vista económico, as pesquisas demonstram que as empresas que adotam uma manutenção preditiva obtêm reduções relevantes nos custos derivados das falhas e do retrabalho, além de prolongarem a vida útil dos ativos [19][20]. Além disso, a manutenção preventiva sistemática diminui os riscos na segurança e no impacto ambiental, aspetos críticos em setores como o químico e o energético [21]. Trabalhos recentes reforçam que a implementação destas práticas representa não apenas ganhos financeiros diretos, mas também uma maior estabilidade operacional e qualidade do produto [22][23].

No entanto, a literatura aponta desafios para a adoção plena destas abordagens, incluindo os custos de implementação, a integração de dados e as barreiras culturais existentes nas organizações [17][23]. Assim, a combinação entre metodologias consolidadas (RCM, TPM), tecnologias digitais (IoT, inteligência artificial) e estratégias organizacionais é considerada essencial para que a manutenção se consolide como uma alavanca para o desempenho industrial [14][16].

De acordo com a norma NP EN 13306:2021 [24] o conceito de Manutenção é definido como “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 ele pode desempenhar a função requerida.”.

Para Pinto [25], a Manutenção é definida como as “atividades destinadas a manter os equipamentos em condições próprias de funcionamento, através de intervenções, reparações de avarias e substituições de peças”. Para Cabral [26], “é a combinação das ações de gestão, técnicas e económicas, aplicadas aos bens para otimização dos seus ciclos de vida, entendendo-se por bem o produto concebido para assegurar uma determinada função”.

Outras definições do que é a Manutenção podem ser encontradas na literatura, assim como dos conceitos e terminologia relacionadas com esta função. Para o presente trabalho adotam-se as definições constantes na NP EN 13306:2021.

Independentemente do objetivo considerado inicialmente, as ações de Manutenção devem seguir-se pelos seguintes conceitos [27]:

- Segurança: deve ser garantida a segurança de todos os elementos que intervém de qualquer maneira no processo, desde os equipamentos às pessoas;
- Qualidade: o número de defeitos deve ser minimizado, visando-se a obtenção de um rendimento cada vez maior. Esta aquisição deve ser alcançada respeitando as normas estabelecidas previamente;
- Criação de Valor: devem ser objetivados custos globais mínimos. Esses valores dependem dos custos de produção e/ou não de manutenção.
- Disponibilidade: visa garantir a maior operacionalidade dos equipamentos e sistemas, permitindo a regularização da produção e cumprimento de prazos.

2.1.1. Evolução da Manutenção

De acordo com alguma bibliografia sobre o tema, pode-se dizer que entre o início do século XX e a data da II Guerra Mundial tem-se a Primeira Geração de Manutenção, assumindo-se como algo inevitável na produção, onde a reparação e a substituição era realizada quando necessário, não sendo levantadas questões de otimização [28]. Nesta Geração a indústria era pouco mecanizada e os tempos de paragem não tinham grande relevância, devido à simplicidade dos equipamentos. Este tipo de Manutenção foi designado como Manutenção Reativa [29].

A Segunda Geração de Manutenção dá-se no princípio da II Guerra Mundial e termina no final dos anos 70 do século XX, havendo uma mudança de paradigma relativamente à gestão da Manutenção. Devido à escassez de mão de obra e à elevada procura, foi necessário mecanizar a indústria através do desenvolvimento de novos modelos e de ferramentas, aumentando assim a dependência destes pelos operadores. Com isto, os custos de Manutenção começaram a aumentar em relação aos custos de operação, aumentando assim a importância dos tempos de paragem dos equipamentos. Em contraste com a Primeira Geração, ao invés a substituição de componentes ser realizada

depois da ocorrência de uma falha, os componentes críticos de um ativo eram trocados após um intervalo de tempo pré-determinado. Assim, como este tipo de Manutenção previne as avarias, foi denominado como Manutenção Preventiva [30][31].

Entre 1980 e 2000 deu-se a Terceira Geração de Manutenção, ocorrendo um aumento de exigência a nível de qualidade do produto, de segurança no trabalho e de segurança ambiental [31]. Este aumento tem como causas o aumento considerável da complexidade dos equipamentos, devido a sua automatização e digitalização da indústria. Com a implementação filosofia *just-in-time* (JIT) foi necessário aumentar a disponibilidade e a capacidade produtiva dos equipamentos, uma vez que a quantidade de inventário existente em armazém é baixa [30]. Desta maneira, de forma a conseguir prever as avarias mais frequentemente, são elaboradas técnicas de Manutenção Preventiva Condicionada, através da monitorização dos equipamentos, possibilitando a identificação da necessidade de manutenção, antes da ocorrência da avaria [31].

A Quarta Geração de Manutenção dá-se no início do século XXI até aos dias de hoje. De forma a diminuir ainda mais os custos de operação e de Manutenção e de aumentar a segurança dos operadores e dos equipamentos, em comparação à Terceira Geração, inicia-se a gestão física e económica dos ativos com base no risco [30]. Introduziu-se ainda a Manutenção Preditiva, com o objetivo de auxiliar o desafio das empresas nesta geração de maximizar a fiabilidade dos equipamentos e antever ou prever as falhas. As atividades de Manutenção são determinadas através da análise continua de dados, tornando possível não só avaliar a condição, em tempo real, dos equipamentos, mas também prever o estado futuro destes [31]. Surgem também tecnologias sem fios que facilitam a conectividade dos ativos e dos sistemas que adquirem, armazenam e enviam dados pela *internet*, designadas por Internet das Coisas (IoT). As quantidades gigantes de dados (*Big Data*) são recolhidas por plataformas, onde normalmente existem algoritmos que tratam os dados e fornecem informação relevante para os gestores ou responsáveis pela Manutenção e gestão de ativos. Estes sistemas são atualmente referidos e conhecidos por Sistemas Ciberfísicos. Através destas tecnologias espera-se que a quantidade de desperdício, energia e tempos de paragem diminuam [30].

2.1.2. Objetivos da manutenção

Independentemente da empresa ou sector, a Manutenção tem como objetivo assegurar que os ativos físicos sejam preservados ou repostos de forma a que possam continuar a desempenhar as suas funções, com o intuito de produzir um bem nas melhores condições de custo, segurança e qualidade e/ou prestar um serviço nas melhores condições de segurança, custo e qualidade. [32].

Esta tem ainda como objetivo reduzir a perda de vidas e de equipamentos através de inspeções periódicas regulares, reduzir os custos de reparação e manutenção ao valor mais baixo possível e estabelecer um plano de manutenção para os ativos físicos antes que estes parem. Desta forma, evita-se a paragem súbita e os prejuízos significativos causados pelo impacto dessa paragem nas restantes unidades de produção associadas [33].

2.1.3. Tipos de manutenção

A Manutenção assume hoje um dia um papel fundamental na indústria, onde a produção e os custos de fabrico estão diretamente ligados à Manutenção. A partir de diversas estratégias, os objetivos principais da Manutenção são diminuir os custos ao máximo e manter os equipamentos disponíveis e capazes de realizar as suas funções. Na figura 2.1 pode-se observar as várias estratégias de manutenção segundo a norma NP EN 13306:2021 [24].

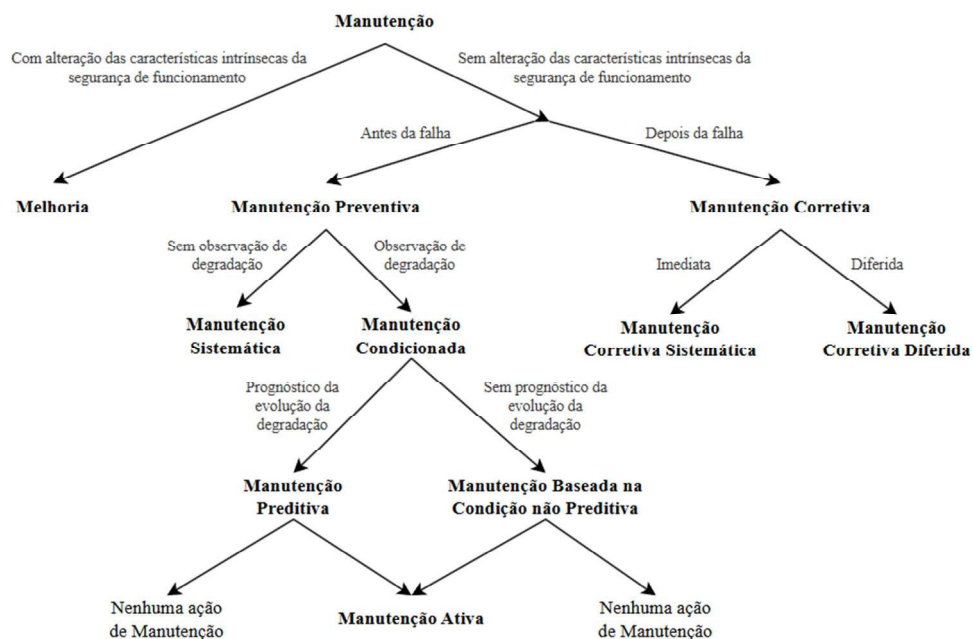


Figura 2.1 – Tipos de Manutenção, adaptado de [24].

Em seguida apresenta-se os diferentes tipos de Manutenção e suas definições de acordo com a norma NP EN 13306:2021 [24].

- **Manutenção preventiva** – Manutenção efetuada com a finalidade de avaliar e/ou mitigar a degradação e reduzir a probabilidade de falha de um bem;
- **Manutenção sistemática** – Manutenção preventiva efetuada a intervalos de tempo preestabelecidos ou segundo um número definido de unidades de utilização, mas sem controlo prévio da condição do bem;
- **Manutenção baseada na condição** – Manutenção preventiva que inclui a avaliação das condições físicas, análise e possíveis ações de manutenção decorrentes;
- **Manutenção preditiva** – Manutenção baseada na condição efetuada de acordo com as previsões extrapoladas de análises repetidas ou características conhecidas e avaliação de parâmetros significativos da degradação do bem;
- **Manutenção ativa** – Parte da manutenção onde as ações são diretamente efetuadas num bem a fim de o manter ou o restabelecer para um estado onde possa realizar a função requerida;
- **Melhoria** – Combinação de todas as ações técnicas, administrativas e de

gestão, com o objetivo de melhorar a fiabilidade intrínseca e/ou manutibilidade e/ou segurança de um bem, sem alterar a sua função original;

- **Modificação** – Combinação de todas as ações técnicas, administrativas e de gestão, com o objetivo de alterar uma ou mais funções de um bem.
- **Modernização** – Modificação ou melhoria do bem, considerando os avanços tecnológicos, com o objetivo de satisfazer novos requisitos ou alterações dos mesmos;
- **Manutenção corretiva** – Manutenção efetuada após deteção de avaria e destinada a repor um bem num estado em que pode realizar uma função requerida;
- **Manutenção corretiva diferida** – Manutenção corretiva que não é efetuada imediatamente após deteção de avaria, mas que é adiada de acordo com regras estabelecidas;
- **Manutenção corretiva imediata** – Manutenção corretiva que é efetuada sem atraso após deteção de uma avaria, de forma a evitar consequências inaceitáveis;
- **Manutenção programada** – Manutenção preventiva efetuada de acordo com um calendário pré-estabelecido ou de acordo com um número específico de unidades de utilização;
- **Manutenção oportunística** – Manutenção preventiva ou manutenção corretiva diferida realizada sem programação e ao mesmo tempo que outras ações de manutenção ou eventos específicos para redução de custos, indisponibilidade, etc;
- **Manutenção remota** – Manutenção de um bem efetuada sem acesso físico por parte do pessoal ao bem;
- **Manutenção em funcionamento** – Manutenção efetuada enquanto o bem se encontra em funcionamento e sem impacto no seu desempenho;
- **Manutenção no local** – Manutenção efetuada no local onde o bem por norma é utilizado ou armazenado;
- **Manutenção pelo operador** – Ações autónomas efetuadas por um operador;
- **Contratação externa de manutenção** – Contratualização de todas ou parte das atividades de manutenção de uma organização por um determinado período de tempo.

2.2. Fiabilidade

O conceito Fiabilidade é bastante antigo, sendo inicialmente conotado de uma forma simplista como algo positivo, com poucas falhas ou garantia de bom funcionamento. Só mais tarde foi associada a noção de probabilidade e de tempo a este conceito. Por exemplo, o departamento de defesa dos Estados Unidos da América define fiabilidade como “a probabilidade de um bem executar a função designada durante um determinado intervalo de tempo e sujeito a determinadas condições” [34].

Para Verma et al. [35], o conceito de Fiabilidade consiste na capacidade de um bem desempenhar as funções requeridas sob determinadas condições, durante um dado intervalo de tempo. O primeiro elemento-chave do conceito “cumprir uma função requerida”, refere-se ao bom funcionamento do bem dentro de determinados limites de desempenho, de forma a ser fiável. O segundo elemento-chave “sob determinadas condições”, indica que a Fiabilidade de um bem depende das condições de operação e do meio em que em que o mesmo se encontra e opera. O último elemento-chave “durante um dado intervalo de tempo” refere-se ao funcionamento do bem na forma esperada durante um dado intervalo de unidade de medida de desempenho [35].

A evolução tecnológica exige às empresas a conceção e a produção de produtos com características de desempenho cada vez mais elevadas, ou seja, os equipamentos operam a níveis mais elevados e simultaneamente incorporam grau de complexidade superior. Neste contexto, o principal objetivo da Engenharia da Fiabilidade consiste em acompanhar as melhorias de desempenho desejadas, mantendo, ou até elevando, os níveis de Fiabilidade [36].

No entanto, o conhecimento da Fiabilidade de um bem não garante que este vai funcionar durante um determinado intervalo de tempo sem falhar, mas sim qual é a probabilidade de não falhar nesse intervalo de tempo. Antes de determinar a Fiabilidade, é necessário saber as características intrínsecas, isto é, as características de fabrico e da qualidade do bem, e as características extrínsecas, ou seja, as condições em que o bem vai operar [37].

Da mesma maneira, podem definir-se dois tipos de Fiabilidade, a Fiabilidade intrínseca, onde os fabricantes determinam a Fiabilidade de um bem através de ensaios normalizados, em que o resultado não depende da sua aplicação real, e a Fiabilidade extrínseca, que é determinada pelos utilizadores de um equipamento a partir da sua experiência, onde o seu resultado depende inteiramente da aplicação real [37].

A curva da banheira é uma representação recorrentemente na área da manutenção e na fiabilidade, que tem como objetivo a descrição da taxa de falhas e um bem reparável ao longo da sua vida. Na figura 2.2 pode-se observar as curvas das falhas que levam à formação da curva resultante, sendo estas a curva de falhas iniciais, curva de falhas aleatórias e a curva de falhas por desgaste ou envelhecimento dos bens. Na curva de falhas iniciais a taxa de falhas decresce ao longo do tempo, contrariamente à taxa de falhas de desgaste, no entanto, a taxa de falhas aleatórias é constante ao longo do tempo. De seguida na tabela 2.1 são apresentadas as fases, o comportamento da taxa de falhas em cada fase e as causas principais das falhas [38].

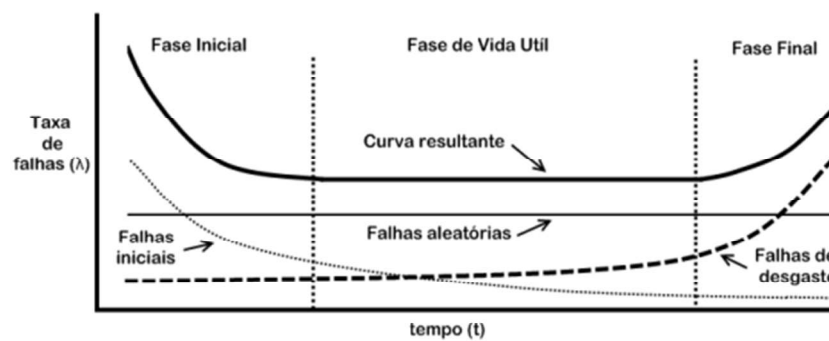


Figura 2.2 – Curva da banheira detalhada [38].

Tabela 2.1 – Características dos vários tipos de falhas, adaptado de [32][38].

Fases	Comportamentos	Causas
Mortalidade infantil	Taxa de falhas decresce	Controlo de qualidade pobre; Mão obra fraca; Tempo de ensaio insuficiente; Erro humano; Instalação imprópria; Materiais de fraca qualidade Instalação imprópria.
Vida útil	Taxa de falhas constante	Interferência ou sobreposição entre cargas admissíveis e aplicadas; Aplicação incorreta; Causas inexplicáveis; Defeitos que escaparam até às melhores equipas de deteção; Causas da natureza, (terramotos, inundações, tempestades, relâmpagos).
Envelhecimento	Taxa de falhas cresce	Idade; Desgaste; Fadiga; Fratura; Corrosão; Mau serviço de manutenção, reparação, etc; Projetos de vida curta.

A curva resultante, denominada de curva da banheira, figura 2.3, é uma representação que se divide em três fases distintas, tendo a fase mortalidade infantil, a fase de vida útil e a fase envelhecimento. Na fase mortalidade infantil a taxa de falhas é elevada e tem tendência a diminuir com o tempo. Na fase de vida útil a taxa de falhas é considerada constante e na fase envelhecimento a taxa de falhas é crescente, visto que as avarias existentes são de desgaste, isto é, com o passar do tempo e com a sua utilização, o bem tem tendência a falhar cada vez mais com o avanço do tempo[37][27].

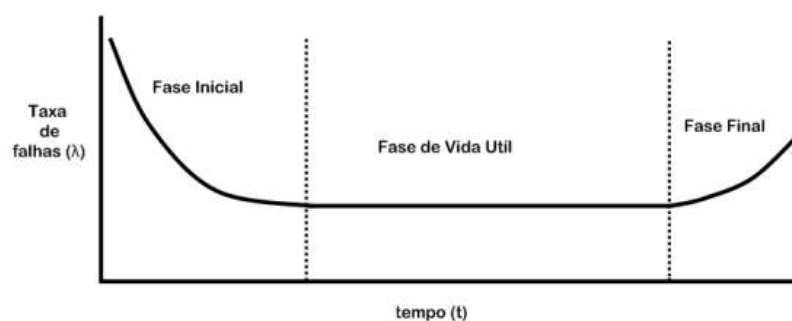


Figura 2.3 - Curva da banheira [38].

O controlo da vida útil dos bens é importante para as empresas, uma vez que, através de informação sobre o comportamento destes, é possível reduzir os custos, sem comprometer a qualidade e desempenho destes na realização da sua função durante o período de funcionamento estabelecido, com poucas ou zero falhas [36].

O conhecimento de vida útil de um bem que é obtido através de estudos de Fiabilidade permitem estimar o tempo de vida útil do mesmo e extrair informação crucial para facilitar o processo de tomada de decisão relacionado com a gestão da manutenção [36].

A Fiabilidade é um fator crítico para o desempenho sustentável das operações industriais. Vários estudos indicam que a implementação de sistemas fiáveis pode aumentar a produção em até 20%, como evidenciado por uma análise do Departamento de Energia dos Estados Unidos da América (EUA) [39].

Além disso, a fiabilidade reduz o risco de ocorrência de falhas inesperadas, melhorando a disponibilidade dos ativos e a eficiência operacional.

A fiabilidade também está em muitas situações diretamente ligada à qualidade dos produtos fabricados. Sistemas mais fiáveis garantem a consistência na produção, minimizando a quantidade de defeitos e a necessidade de retrabalho. A aplicação de técnicas de engenharia de fiabilidade, como a análise de modos de falha e efeitos (FMEA) e a análise de árvores de falhas (FTA), tem sido fundamental para identificar e mitigar riscos potenciais [40].

A fiabilidade desempenha também um papel crucial na segurança operacional e na conformidade regulatória. Equipamentos mais fiáveis reduzem o risco de acidentes e falhas catastróficas, protegendo os trabalhadores e o meio ambiente. A avaliação contínua da fiabilidade, incluindo a análise de dados de sensores e manutenção preditiva, tem se mostrado eficaz na prevenção de falhas e na extensão da vida útil dos ativos [41].

Por fim, a fiabilidade pode contribuir em larga escala para a competitividade empresarial. As empresas que investem em fiabilidade conseguem reduzir custos com manutenção corretiva, melhorar a satisfação do cliente e aumentar sua participação no mercado. A integração de tecnologias emergentes, como inteligência artificial e Internet das Coisas, tem potencializado os benefícios da fiabilidade na indústria moderna [42].

A fiabilidade tem sido aplicada com sucesso em diversos setores industriais, resultando em melhorias significativas em termo da eficiência e redução de custos. Por exemplo, um estudo de caso realizado na indústria de papel e celulose analisou diferentes decisões de manutenção para conjuntos de ferramentas de perfuração. Os resultados indicaram que decisões de substituição baseadas em dados de falhas reais levaram a uma redução na taxa de falhas e melhor planeamento de peças de reposição, demonstrando a eficácia da análise de fiabilidade na otimização da manutenção [43].

Na indústria mineira, a avaliação da fiabilidade de camiões de transporte foi realizada utilizando métodos paramétricos, não paramétricos e semi-paramétricos. A pesquisa revelou que, após 40 horas de operação, a fiabilidade dos camiões caía para 50%, destacando a importância de estratégias de manutenção preventiva para garantir a segurança e eficiência operacional [44].

Além disso, a implementação de manutenção preditiva baseada em análise de dados tem mostrado resultados positivos. Um estudo de caso na indústria automóvel demonstrou que a aplicação de métodos preditivos para monitorização de falhas resultou numa redução significativa de paragens não planeadas e um aumento da vida útil dos equipamentos [45].

Estes exemplos ilustram como a aplicação de princípios de fiabilidade pode levar a melhorias substanciais na operação de sistemas industriais, reforçando a importância da sua integração nas estratégias de gestão e manutenção.

Capítulo 3

Manutenção Centrada na Fiabilidade

Neste capítulo apresenta-se, inicialmente, a evolução da Manutenção Centrada na Fiabilidade e referem-se algumas áreas onde é utilizado este processo. Em seguida apresenta-se o conceito mais em detalhe e abordam-se e exploram-se os conceitos necessários para a implementação do processo RCM. Primeiramente, aborda-se o tópico referente ao contexto operacional, depois as funções e as falhas funcionais, de seguida aos modos de falha, o efeito das falhas, e por fim as consequências das falhas. Termina com uma breve introdução ao RCM 3.

3.1. Evolução da Manutenção Centrada na Fiabilidade

Este processo remonta aos anos 50, onde a Manutenção de ativos era predominantemente preventiva e corretiva. Esta abordagem começou a mostrar as suas limitações no setor aeronáutico devido ao elevado custo e complexidade dos novos equipamentos [29].

Na década de 1960, a Boeing apresentou um novo modelo de avião, o Boeing 747-100 que tinha o triplo da capacidade do seu modelo anterior, o Boeing 747. A Administração Federal de Aviação (FAA), com base no facto anterior, declarou a aeronave economicamente inviável. A United Airlines em conjunto com a Boeing decidiu analisar o princípio de que os componentes seguiam os padrões de desgaste apresentadas pela “curva da banheira”. O grupo de trabalho criado pelas duas empresas desenvolveu um programa de Manutenção proativo que tornou a aeronave 747-100 economicamente viável [30].

Em 1968, a partir da investigação realizada pelas empresas, os princípios do RCM foram inicialmente concebidos através da publicação do manual MSG-1: *Maintenance Evaluation and Program Evaluation* [20].

Em 1976, o Departamento de Defesa dos EUA encarregou a *United Airlines* de publicar um relatório detalhando o processo do seu programa de manutenção. Os engenheiros Stanley Nowlan e Howard Heap, escreveram então um livro sobre o processo e chamaram-lhe Manutenção Centrada na Fiabilidade [29].

Após a publicação do livro, o processo sofreu várias atualizações, sendo normalmente referido um dos trabalhos mais famosos, escrito por John Moubray. O referido autor publicou tão famoso RCM II, que serviu como modelo para o desenvolvimento e aplicação do processo em diversos setores industriais [30][29].

Em 2003 surgiu a ideia, numa reunião de John Moubray e Aladon Network, de incluir uma abordagem baseada no risco com o objetivo de abranger as falhas que impactam a segurança e o meio ambiental. Este trabalho arrancou em 2004, mas só ganhou impulso em 2014, quando Marius Basson e Theus Koekemoer juntaram-se para desenvolver o RCM 3 [47].

A Manutenção Centrada na Fiabilidade é um processo com cerca de seis décadas, tendo sido alvo de aplicação em diversos setores e com diversas finalidades. Fonseca, et. al [48], desenvolveram uma *framework* inovadora para a implementação do método RCM nas fases iniciais de processos industriais químicos. Utilizaram diversos algoritmos para

avaliar e determinar a probabilidade de precipitação e agravamento dos modos de falha do equipamento. Através de um sistema *expert*, o computador lê os dados gerados por um software de processamento de dados e apresenta ao utilizador um diagrama do processo RCM final. Este diagrama consiste na listagem de todos os modos de falha críticos que são mais propícios de ocorrer[48].

Yavuz, et. al [49], aplicaram o método RCM em máquinas de empacotamento de comida, de forma a estudar o equipamento em questão. Através do RCM os autores pretenderam determinar se o equipamento é capaz de funcionar aos níveis esperados para o processo de empacotamento. A equipa conseguiu aumentar a Eficiência Geral do Equipamento, através da eliminação da perda de funções do equipamento [49].

Yssaada, et. al [50], realizaram um artigo científico, onde estudaram a aplicação de um modelo RCM para otimizar a manutenção de equipamentos de distribuição de energia, mais concretamente sistemas de alimentação elétrica. O modelo feito pelos autores foi capaz de definir precisamente os requisitos de fiabilidade, identificar funções críticas do sistema e definir a política de manutenção para o sistema e os seus componentes. Para além disto ainda possibilitou uma redução de custos de manutenção. Por fim, ao nível da fiabilidade do sistema, o método identificou os componentes que deviam ter mais em atenção, promovendo um controlo maior do sistema durante o estudo [50].

Igba, et. al [51], discutem a forma como uma abordagem de pensamento sistémico pode ser utilizada para identificar os aspetos relevantes e as possíveis interações entre o método RCM e as caixas de velocidades das turbinas eólicas. Abordam também a forma como as lacunas existentes no sistema podem ser colmatadas de modo a acrescentar valor ao negócio. As conclusões apresentadas pelos autores são uma abordagem sistémica à operação e manutenção de caixas de velocidades de turbinas eólicas, onde, através da otimização, incrementam o valor do ativo com um custo mínimo para o operador [51].

3.2. Manutenção Centrada na Fiabilidade

Nancy Regan [46] define processo Manutenção Centrada na Fiabilidade como “*um processo estruturado, utilizado para identificar as estratégias de gestão de falhas necessárias para garantir que um ativo cumpra os seus requisitos de missão no seu ambiente operacional, da forma mais segura e económica possível*”

De acordo com Moubray [11], autor da mais conhecida publicação sobre o processo

RCM, o método é definido como “*um processo utilizado para determinar o que pode ser feito para garantir que qualquer ativo físico continue a fazer o que os seus utilizadores necessitem que faça no contexto operacional atual*”.

De facto, a Manutenção Centrada na Fiabilidade é um processo sistemático que necessita de uma equipa multidisciplinar para responder a questões sobre qualquer ativo em estudo. As respostas vão originar planos de manutenção preventivos e proativos, permitindo retirar o maior valor de cada ativo aumentando o seu rendimento económico e operacional [30]. As sete questões a responder no processo RCM são:

1. Quais são as funções e os padrões de desempenho associados ao ativo no contexto operacional atual?
2. De que modo é que o ativo falha no cumprimento das suas funções?
3. O que causa cada falha funcional?
4. O que acontece quando cada falha ocorre?
5. Qual a importância de cada falha?
6. O que pode ser feito para prever ou prevenir cada falha?
7. O que deve ser feito se não for encontrada uma tarefa proativa adequada?

Este processo estruturado pretende responder a estas questões de uma forma metódica e sequencial. No entanto, antes de se iniciar propriamente o processo há que detalhar o contexto operacional em que o ativo funciona, uma vez que este condicionará fortemente o seu desempenho e influenciará a escolha da melhor estratégia de manutenção. Segue-se uma apresentação de cada etapa do processo RCM, começando com uma referência ao que deve constar na descrição do contexto operacional.

3.2.1. Contexto operacional

O contexto operacional pode ser definido como a apresentação e descrição do sistema e do ativo que se pretende estudar. Este pode ser apresentado num documento que inclui informação relevante para o processo RCM, devendo ser realizado antes do início de qualquer análise. A informação do contexto operacional é obtida através das seguintes três perguntas [32]:

1. Qual é o sistema?
2. Qual é o desempenho esperado pela organização?
3. Qual é o ambiente que é expectável operar?

A equipa de trabalho tem de conhecer de forma clara o contexto operacional antes de iniciar a análise, para isso o documento anteriormente referido contém diversas secções de informação, tais como [32]:

- Informação geral, propósito e uso;
- Âmbito de análise;
- Operação;
- Descrição do ativo;
- Dispositivos de proteção;
- Preocupações;
- Notas para o RCM;
- Planos futuros;
- Membros da equipa.

Na secção **informação geral, propósito e uso** faz-se uma descrição do sistema e da organização a ser estudada, como por exemplo a importância do sistema para a organização, as circunstâncias em que o sistema é operado, de que forma é que as falhas afetam a operação, a presença de redundâncias, etc.

No **âmbito de análise** são definidas as fronteiras de estudo, isto é, delimita-se o que se vai estudar.

Na **operação** faz-se uma descrição detalhada de como o sistema opera, incluindo todos os parâmetros, tais como pressões, temperaturas, entre outras. Os parâmetros apresentados refletem o que a organização espera do ativo e não as especificações de projeto.

A **descrição do ativo** é a descrição dos componentes principais e subconjuntos associados ao ativo, incluindo especificações, limites operacionais, etc.

Nos **dispositivos de proteção** aborda-se os dispositivos existentes que têm como objetivo assegurar a proteção das pessoas, do ativo e da organização em situações indesejáveis.

Na parte das **preocupações** realiza-se uma descrição de problemas ou questões relacionadas com o sistema em estudo, tais como a falta de formação, falhas crónicas de um componente, etc.

As **notas para o RCM** servem como suporte para as decisões durante o processo RCM.

Nos **planos futuros** são apresentadas potenciais alterações ao sistema, como por exemplo planos de formação já definidos, alteração prevista do número de turnos por dia, extensão ou redução prevista da instalação ou alteração do hardware.

Por fim, na secção dos **membros da equipa** indica-se os elementos da equipa responsável pelo processo RCM, os cargos correspondentes, os departamentos, etc.

3.2.2. Funções

Antes de ser possível aplicar um processo utilizado para determinar o que deve ser feito para garantir que qualquer ativo físico continua a realizar o que os seus utilizadores desejam no seu contexto operacional atual, são necessárias duas coisas. Em primeiro lugar é preciso determinar o que o utilizador do ativo quer fazer e segundo lugar assegurar que é capaz de fazer o que os seus utilizadores pretendem dentro do contexto operacional. Moubray afirma que não é possível definir o que é uma falha sem primeiro definir a função [11]. A definição de uma função é o propósito para o qual o ativo existe e aquilo que se espera do ativo. Trata-se de falhas funcionais.

A descrição de uma função é um princípio de engenharia bem estabelecido, esta consiste num verbo, num objeto e usualmente num padrão de desempenho. O verbo indica o que o ativo faz, o objeto o que está a ser afetado e por fim o padrão de desempenho, que é indicado através de uma quantidade, qualidade, pressão, etc [32].

Um exemplo de descrição de uma função pode ser observado na seguinte frase: “Bombear a água do tanque X para o tanque Y a não menos de 800 litros por segundo”.

O verbo utilizado na descrição da função é bombear, o objeto que está a ser afetado é a água e por fim o padrão de desempenho é indicado por “a não menos de 800 litros por segundo”. Este exemplo está ilustrado na figura 3.1.

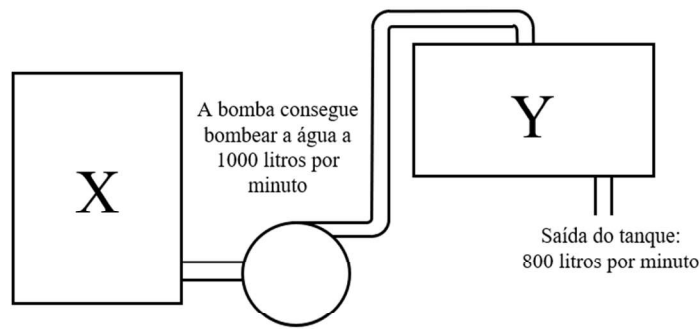


Figura 3.1 – Exemplo esquemático da função “Bombear a água do tanque X para o tanque Y a não menos de 800 litros por segundo”, adaptado de [11].

Os padrões de desempenho são introduzidos através do objetivo da manutenção, sendo este assegurar que o ativo continua a fazer o que o utilizador deseja. Um ativo quando é construído vem da fábrica com valores de capacidade estabelecidos. No entanto, quando o ativo está a ser utilizado pelo operador, o ativo deverá satisfazer o desejo do operador quanto aos requisitos de operação [32].

Na descrição de uma função, normalmente, é necessário indicar o padrão de desempenho da mesma. Em seguida apresenta-se os diferentes tipos de padrões de desempenho.

- **Múltiplos padrões de desempenho** – Uma função pode ter vários padrões de desempenho;
- **Padrão de desempenho quantitativo** – Padrões de desempenho devem ser quantificados sempre que possível, de forma a elevar a sua precisão;
- **Padrão de desempenho qualitativo** – Utilizado quando é impossível quantificar;
- **Padrão de desempenho absoluto** – Quando a função não necessita de um padrão de desempenho, como por exemplo “Para conter o líquido X”;
- **Padrão de desempenho variável** – Quando o padrão de desempenho varia ao longo do tempo;
- **Limites inferior e superiores** – Análise de um ativo quando o desempenho tem de estar entre 2 limites.

Um ativo físico tem mais do que uma função e uma vez que o objetivo da manutenção é garantir que este continua a realizar as suas funções, é necessário identificar todas as funções com os seus respetivos padrões de desempenho. As funções são divididas em dois grupos, a função primária e as funções secundárias [32].

A função primária é a principal razão pela qual a empresa adquiriu o ativo, sendo normalmente fácil de reconhecer, facilitando assim a sua descrição. Esta categoria de funções abrange questões como a velocidade, a produção, a capacidade de transporte ou de armazenamento, a qualidade do produto e o serviço ao cliente [11]

As funções secundárias reconhecem que cada ativo, para além de simplesmente cumprir a sua função primária, também possui outras funções adicionais. De forma a não se esquecer de nenhuma função secundária de um ativo criou-se o acrónimo “E.S.C.A.P.E.S”, onde são apresentadas sete categorias de funções secundárias (associadas a cada uma das letras do acrónimo, quando escrito em inglês), sendo estas[11]:

- Ambiente;
- Segurança;
- Controlo;
- Aparência;
- Proteção;
- Economia;
- Supérfluo.

As funções podem ser ainda classificadas como funções evidentes, quando a ocorrência da falha é visível para os operadores em condições normais, e funções ocultas, quando a ocorrência da falha não é visível em condições normais [32].

O registo de funções de um ativo deve ser realizado num documento, onde cada função é enumerada, tendo como início a função primária, como pode ser observado na tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Registo de funções, adaptado de [32].

	Função	Descrição
1	Função Primária	Rebocar equipamentos e objetos com peso até 500 Kg com velocidade até 20 Km/h, conforme requerido
2	Função Secundária	Manter a temperatura do motor entre 60 °C e 100 °C enquanto o motor estiver a funcionar (sistema de arrefecimento)
3	Função Secundária	Promover uma paragem controlada, sem carga, a uma velocidade de 20 Km/h, a uma distância inferior a 5,5 metros, conforme requerido, (travões hidráulicos).
4	Função Secundária	...

3.2.3. Falhas funcionais

Este subcapítulo é referente à segunda questão do RCM, onde se questiona as falhas funcionais. Inicialmente é necessário entender o que é uma falha, esta é definida por Moubray [11] como “*a incapacidade de qualquer ativo para fazer o que os seus utilizadores pretendem que ele faça*”. No entanto esta definição é simplista, uma vez que não toma em conta o facto que cada ativo tem mais do que uma função e que cada função tem múltiplos padrões de desempenho desejados.

No processo RCM utiliza-se o termo falha funcional em vez de falha, visto que se analisa a falha para todas as funções e não só a falha do ativo. Este termo é definido por Moubray [11] como “*uma falha funcional é definida como a incapacidade de qualquer ativo para cumprir uma função de acordo com o padrão de desempenho aceitável e esperado pelo utilizador*”.

Existem dois tipos de falhas funcionais, a falha total, que acontece quando o ativo não consegue realizar a sua função na totalidade, e a falha parcial que acontece quando o ativo consegue realizar a função, mas não cumpre o nível de desempenho especificado como satisfatório [32]. Como por exemplo, a função primária de uma bomba é bombear água com um caudal de 500 litros por minuto, se a bomba parar de bombear água na totalidade, temos uma falha total. Se a bombear a menos de 500 litros por minuto tem-se uma falha parcial.

A identificação das falhas funcionais é um passo de extrema importância na

ferramenta RCM, estas são escritas para cada função, designando as que são totais e as que são parciais. Normalmente cada falha funcional é codificada com uma letra no documento, como pode ser observado na tabela 3.2 [32].

Tabela 3.2 - Codificação das falhas funcionais, adaptado de [32].

	Função	Descrição		Falha funcional
1	Função Primária	...	A	Falha total
		...	B	Falha parcial
		...	C	Falha parcial
		...	D	Falha parcial
2	Função Secundária	...	A	Falha total
		...	B	Falha parcial
		...	C	Falha parcial
3	Função Secundária	...	A	Falha total

3.2.4. Modos de falha

Focando na terceira questão, um modo de falha é definido como “*o evento que pode causar a ocorrência da falha funcional do ativo*”. A equipa de trabalho vai identificar os modos de falha das falhas funcionais anteriormente identificadas, ou seja, as suas causas [32].

Os modos de falha mais comuns incluem:

- Desgaste normal;
- Erosão;
- Fadiga;
- Corrosão;
- Abrasão;
- Deterioração da lubrificação;
- Desalinhamentos;
- Erro humano.

A descrição de um modo de falha no documento do RCM é usualmente um nome, seguido de um verbo e se for necessário um contexto operacional, como por exemplo

“fadiga da pá da turbina e colmatação do filtro devido ao uso normal”. A descrição do modo de falha deve conter detalhe suficiente para que seja possível elaborar uma estratégia de gestão da falha. No entanto, é necessário chegar à causa da falha em concreto, o que permitirá definir a melhor estratégia a seguir. É de extrema importância assegurar-se que o modo de falha está relacionado com a causa da falha e não um efeito do modo de falha [32].

No documento os modos de falha são identificados com um número, como pode ser observado na tabela 3.3. Assim a identificação do modo de falha é referida através do número da função, seguido da letra da falha funcional e por fim o número do modo de falha, como por exemplo 1A1, 1A2, 1B1, etc.

Tabela 3.3 - Identificação dos modos de falha, adaptado de [32].

	Função	Descrição		Falha funcional		Modo de falha
1	Função Primária	...	A	Falha total	1	Modo de falha
		...	A	Falha parcial	2	Modo de falha
		...	B	Falha parcial	1	Modo de falha
		...	C	Falha parcial	1	Modo de falha
2	Função Secundária	...	A	Falha total	1	Modo de falha
		...	B	Falha parcial	1	Modo de falha
		...	C	Falha parcial	1	Modo de falha
3	Função Secundária	...	A	Falha total	1	Modo de falha

3.2.5. Efeitos das falhas

O quarto passo do RCM é referente aos efeitos das falhas, que descrevem o que acontece quando os modos de falha ocorrem se nada for feito. A descrição de um efeito de falha deve ser escrita de forma detalhada, de forma que permita que a equipa de trabalho avalie as consequências do modo de falha. Para cada modo de falha só há um efeito de falha, desta forma um efeito de falha não tem nenhuma identificação no documento do RCM [32].

A descrição de um efeito de falha deve incluir:

- Descrição do processo da falha, (exemplo: evidências detetáveis e não detetáveis para os operadores);
- Evidencia física que a falha ocorreu, (exemplo: correia partida, veio partido);
- Como a falha afeta a segurança e/ou o ambiente, (exemplo: algum regulamento é desrespeitado ou alguém pode ser ferido);
- Como a falha afeta a capacidade operacional, (exemplo: paragem da produção durante 2 dias a um custo 100000 de euros/dia);
- Restrições operacionais específicas em resultado da falha, (exemplo: restrições decorrentes da ocorrência da falha);
- Danos secundários, (exemplo: indicar danos que resultem noutros bens em consequência do modo de falha);
- O que pode ser feito e quanto tempo demora a reparação, (exemplo: detalhar o que pode ser feito, tempo de paragem e tempo de reparação);

3.2.6. Consequências das falhas

As consequências das falhas são o quinto tópico a ser abordado no processo RCM. Estas são avaliadas em quatro áreas, sendo estas, a segurança, o ambiente, a operação e a não operação. Neste tópico utiliza-se um diagrama de decisão, denominado como Diagrama de Decisão RCM, que permite [32]:

- Classificar os modos de falha;
- Avaliar as consequências das falhas;
- Determinar se uma manutenção proativa é tecnicamente apropriada;
- Determinar se uma estratégia padrão é recomendada para gerir o modo de falha.

O diagrama de decisão RCM pode ser observado na figura 3.2. Cada modo de falha é analisado neste diagrama, onde através das questões colocadas é possível formular soluções lógicas e definir estratégias proativas e estratégias padrão, caso uma tarefa proativa não seja encontrada.

Neste Diagrama de Decisão RCM, a primeira pergunta é:

“Sem inspeção, a perda da função causada por este único modo de falha será evidente para os operadores em condições normais?”. Os operadores respondem apenas se existe algum fenómeno experienciados pelos mesmos, como por exemplo vibrações excessivas ou ruído, que os alertem para uma falha em desenvolvimento ou que já decorreu. Através desta questão é possível caracterizar a falha como evidente ou oculta [32].

Depois da classificação da falha, segue-se a avaliação das consequências das falhas por ordem de prioridade. Começa-se por analisar as consequências a nível da segurança, depois ao nível ambiental, segue-se em termos operacionais e por último a nível não operacional. Todos estes tópicos estão presentes, quer nas falhas evidentes, como nas ocultas. Quando o efeito das falhas afeta a qualquer nível a segurança do operador, as consequências são avaliadas a nível de segurança. São consideradas consequências a nível ambiental quando a falha viola uma lei ambiental, norma ou regulamento. Se o efeito da falha afetar negativamente a capacidade operacional, são consideradas consequências a nível operacional. Por fim, quando o efeito da falha afeta apenas o custo da reparação, sem efeitos adversos na segurança, ambiente ou na operação, as consequências são consideradas ao nível não-operacional [32].

De acordo com as consequências identificadas anteriormente através das questões, as respostas vão dar indicação da melhor estratégia a seguir, podendo ser [11]:

- Manutenção condicionada;
- Manutenção preventiva, tipo restauro;
- Manutenção preventiva, tipo substituição;
- Combinação de tarefas;
- Estratégias padrão.

A atribuição de tarefas de manutenção proativas e os intervalos associados a essas tarefas dizem respeito à sexta pergunta do processo RCM. Existem dois tipos de Manutenção proativa, a Manutenção baseada na condição (*On-Condition*) e a manutenção preventiva [11].

A Manutenção baseada na condição é realizada num dado intervalo para detetar uma potencial condição de falha, para que uma manutenção possa ser executada antes da falha ocorrer. Uma condição potencial falha pode ser detetada utilizando técnicas de monitorização da condição de acordo com o controlo de um determinado parâmetro,

como por exemplo vibrações, temperaturas, pressões, ruído, entre outros [32].

Os intervalos referidos têm como base o intervalo P-F, sendo uma regra básica, normalmente seguida realizar o controlo com uma frequência de pelo menos 50% do intervalo P-F considerado [32].

A manutenção preventiva respeita apenas duas tarefas sendo estas as tarefas programadas de restauro e de substituição [11].

Uma tarefa de preventiva tipo restauro é quando se faz uma manutenção programada de forma sistemática, onde se retira o bem, se transporta para a oficina, se fazem as tarefas previstas, como por exemplo troca de um rolamento, retentor, anilhas, e se volta a montar o bem no equipamento novamente após o restauro [32].

Uma tarefa preventiva tipo substituição é quando se faz uma manutenção programada de forma sistemática, onde é retirado o bem e se substitui por outro igual, mas novo. Ambas as tarefas são realizadas de forma a prevenir a ocorrência de falhas sem ser feita uma inspeção do bem, sendo ambas realizadas em intervalos de tempo fixos. No processo RCM, a programação de uma tarefa de manutenção proativa só se aplica se satisfazer dois critérios, for tecnicamente apropriado e se valer a pena [32].

A combinação de tarefas significa mais do que uma tarefa de manutenção atribuída a um dado modo de falha, podendo ser tarefas baseadas na condição, restauro e substituição [32].

Por fim tem-se as estratégias padrão, sendo este o sétimo e último passo do processo RCM. Estas estratégias passam por [32]:

- Procedimentos de verificação;
- Tarefas de *Failure Finding*;
- Nenhuma manutenção agendada;
- Outras estratégias (reprojeto, procedimentos operativos adicionais, revisão de publicações técnicas, recomendação de formação e mudanças no abastecimento).

Os procedimentos de verificação são a única estratégia presente no diagrama de decisão RCM no lado das falhas evidentes, sendo o último tipo de tarefas consideradas para modos de falha evidentes. Estes consistem na realização de tarefas em intervalos específicos de forma a verificar se a falha já ocorreu, visto que não é aceitável operar ou continuar a operar em condição de falha[32].

As tarefas de *Failure Finding* são tarefas que procuram se um dispositivo de segurança se encontra num estado de avaria, tendo como objetivo reduzir o risco de falhas múltiplas para um nível aceitável. Estas estão presentes no diagrama de decisão RCM, no lado das falhas ocultas, sendo o último tipo de tarefa consideradas nos modos de falhas ocultas [32].

Outra estratégia padrão é simplesmente não praticar nenhuma manutenção agendada, isto significa que a manutenção nem sempre é resposta para gerir um dado modo de falha. Esta solução pode aparecer nos dois tipos de modos de falha, no entanto, não aparece nas colunas das consequências ambientais e de onde algo tem que ser feito para evitar essas falhas. [32].

Por fim, tem-se as outras estratégias padrão, uma série de outras soluções, para além da manutenção proativa, que surgem tanto para modos de falha evidentes como para ocultos. Neste tipo de estratégias padrão deve-se salientar que mesmo que seja identificada uma tarefa proativa como solução, existe uma oportunidade de atribuir também uma estratégia padrão. Alguns exemplos destas estratégias podem incluir o reprojeção, procedimentos operativos adicionais, mudanças no abastecimento/fornecedor, recomendação de formação, etc [32].

3.3. RCM 3

Em 2019, Basson define o RCM como *“um processo utilizado para definir a quantidade mínima necessária de manutenção segura, engenharia e outras estratégias de gestão de risco, para garantir o nível mínimo tolerável de segurança, integridade ambiental e capacidade operacional económica, conforme especificado no sistema de gestão de ativos da organização”* [30].

O RCM3, tal como o RCM II, prioriza a Manutenção da função requerida para o ativo, no entanto, no RCM3 o impacto e os custos das ocorrências de falhas são minimizados, através de estratégias de gestão de risco [30].

Na tabela 3.4 estão apresentadas as perguntas do RCM2 e do RCM 3, onde se podem observar as diferenças nas perguntas em cada versão do RCM [30].

Tabela 3.4 - Questões dos processos RCM II e RCM 3, adaptado de [30].

RCM II		RCM3
1.	Quais são as funções e os padrões de desempenho associados ao ativo no contexto operacional atual? (Funções)	Quais são as condições de operação (como é que o equipamento ou sistema está a ser utilizado)?
2.	De que modo é que o ativo falha no cumprimento das suas funções? (Falhas Funcionais)	Quais são as funções e os padrões de desempenho associados ao ativo no seu contexto operativo atual? (Funções)
3.	O que causa cada falha funcional? (Modos de falha)	De que modo é que o ativo falha no cumprimento das suas funções? (Estados de falha)
4.	O que acontece quando cada falha ocorre? (Efeitos da falha)	O que causa cada estado de falha? (Modos de falha)
5.	Qual a importância de cada falha? (Consequências da falha)	O que acontece quando cada falha ocorre? (Efeitos da falha e severidade das consequências)
6.	O que pode ser feito para prever ou prevenir cada falha? (Tarefas proactivas e respetivos intervalos)	Quais são os riscos associados a cada falha (risco inerente quantificado)?
7.	O que deve ser feito se não for encontrada uma tarefa proactiva adequada?	O que pode/tem de ser feito para reduzir riscos intoleráveis para níveis toleráveis (utilizando estratégias de gestão do risco proactivas)?
8.	--	O que pode ser feito para reduzir ou gerir riscos toleráveis mantendo um bom nível de custo benefício?

Em seguida, apresenta-se a comparação que Basson realizou entre as duas versões do RCM, que é dividida em 8 elementos, sendo estes, as funções, os estados da falha, os modos de falha, os efeitos da falha, as consequências versus risco, o risco inerente e o diagrama de decisão. São ainda apresentadas as diferenças entre as versões [30][47].

3.3.1. Contexto operacional

Na versão RCM II o contexto operacional é referenciado ao longo do processo, sendo considerado na identificação dos modos de falha e no desenvolvimento de estratégias de gestão da falha [30].

O RCM3 dá grande importância à definição do contexto operacional, uma vez que todas as decisões e suposições têm-no como base. A primeira pergunta do processo a ser respondida é a definição do contexto operacional. A determinação do risco associada a cada modo de falha tem como influencia o contexto operacional [30].

3.3.2. Funções

Devido à maior exigência por parte dos proprietários do ativo, dos operadores, da sociedade e dos reguladores, no RCM3 é necessário considerar na definição das funções secundárias do ativo a limpeza e higiene, os requisitos legais e regulamentares, a reciclagem e o aproveitamento e reutilização do ativo [30].

3.3.3. Estados de falha

O estado de falha no RCM II é definido pelo estado geral da falha, ou seja, falha total e falha parcial. Já no RCM 3, o termo falha funcional foi substituído por estado de falha. O estado geral da falha, estado de falha (processo de falha) e falha parcial (estado de falha, onde o ativo já não cumpre os critérios de desempenho), são claramente definidos e distintos do estado final (falha total). Desta maneira, o RCM3 lida com todo o tipo de falhas possíveis no nível apropriado [30].

Desta forma, o consenso entre a equipa de trabalho é mais rapidamente atingido, dando origem à identificação apropriada de estratégias de gestão de risco num espaço de tempo menor [30].

3.3.4. Modos de falha

Na versão RCM3 o grupo de trabalho consegue definir o estado de falha e o mecanismo de falha, permitindo assim identificar as causas raiz consistentemente e com um nível de detalhe apropriado. O grupo de trabalho define um ou mais mecanismos por cada modo de falha, assegurando assim o nível de detalhe apropriado ao desenvolvimento de estratégias de gestão do risco [30].

3.3.5. Efeitos da falha

No RCM II os efeitos de falha são descritos como o que pode acontecer se nada for feito para prevenir determinada falha. No entanto, no RCM3 os efeitos da falha são descritos em 3 níveis sendo estes [30]:

- Efeito local de falha;
- Próximo efeito de nível superior;
- Efeito final.

É descrito ainda o efeito potencial do pior cenário que considera o efeito da falha da proteção, permitindo uma análise base ao ativo [30].

3.3.6. Consequência vs. Risco

No RCM II são considerados quatro categorias para a consequência do risco, sendo estas a segurança, o ambiente, operacional e não operacional. No RCM 3 divide-se em evidente e oculto e em cada uma delas pode ter riscos físicos ou económicos [30].

Os riscos físicos são riscos com consequências na saúde, segurança ou ambiente, e os riscos económicos são riscos que têm impacto na capacidade operacional e equilíbrio financeiro da organização [30].

Esta caracterização das consequências do risco permite uma melhor distinção entre risco tolerável e risco intolerável de acordo com a definição dada pela organização. Assim, os riscos toleráveis não necessitam de ser analisados, levando a uma poupança de tempo e recursos [30].

3.3.7. Risco inerente

O RCM II guia-se por uma abordagem subjetiva à gestão de risco e apenas considera-o quando as falhas têm impacto na segurança ou no ambiente. Este processo determina o que deve ser feito para que um ativo preserve as suas funções, a partir da minimização ou eliminação das consequências da falha [30]

O RCM3 segue uma estratégia sistemática de gestão do risco, utilizando um processo que determina o que deve ser feito a um ativo para preservar as suas funções minimizando o risco associado a cada falha [30].

A avaliação do risco permite estabelecer estratégias de gestão mais assertivas, dando origem a um programa de gestão de falhas mais robusto e eficaz na redução de riscos intoleráveis. Uma vez definidas as estratégias de gestão para os modos de falha com risco intolerável, estas podem ser posteriormente analisadas quanto ao seu nível de risco e ao respetivo impacto financeiro [30].

3.3.8. Diagrama de decisão

O RCM II trata todas as funções ocultas da mesma maneira, considerando que todas as tarefas de manutenção preventiva e preditiva são tarefas proativas de gestão da falha. Considera ainda que inspeções, alterações de melhoria e manutenções não programadas como ações pré-definidas. Desta maneira, a redução da consequência de uma falha é primeiramente obtida através da otimização dos dispositivos de proteção[30].

No RCM3 não se consideram os dispositivos de proteção existentes nos ativos, centrando a análise nos modos de falha como se essas proteções não existissem. Por outro lado, o risco económico é muito abrangente, considerando os custos das falhas, mas também todos os outros custos que possam resultar dessas falhas. A periodicidade das inspeções é definida economicamente através da comparação dos custos com essas inspeções com os custos com a ocorrência das falhas [30].

Capítulo 4

Desenvolvimento de uma ferramenta de apoio ao processo RCM

Neste capítulo apresenta-se a ferramenta RCM TOOL, para apoio do processo RCM. Inicialmente apresentam-se as várias páginas da ferramenta, sendo estas a Página Inicial, Base de Dados, Diagrama de Decisão RCM, Termos e Conceitos, Tipos de Manutenção, Ajuda e Relatório Final. Em seguida, descrevem-se separadamente todas as páginas da ferramenta, referindo o layout, o conteúdo e as funções de cada uma. Por fim, descreve-se a utilização prática da ferramenta RCM TOOL.

4.1. Desenvolvimento da ferramenta RCM TOOL

Para a criação da ferramenta, a base utilizada foi o processo RCM II clássico. A RCM TOOL tem como intuito otimizar e agilizar o processo RCM, em particular no preenchimento do Diagrama de Decisão RCM. Tradicionalmente, o preenchimento do Diagrama é realizado de forma manual, o que tende a tornar o processo moroso e de difícil execução. A ferramenta proporciona ao utilizador uma experiência mais eficiente e intuitiva, permitindo simultaneamente compreender parte do processo RCM e facilitar o preenchimento estruturado do Diagrama. A ferramenta fornece uma abordagem moderna e instintiva para a definição de Estratégias de Manutenção, ajustadas aos diferentes modos de falha de um ativo em análise.

A RCM TOOL foi desenvolvida a partir do *software* de cálculo Microsoft Excel, onde se recorreu às bases do *software*, para desenvolvimento estético e funcional, e ao separador Programador para ter acesso a *Visual Basic Applications* (VBA) e à criação de macros, de modo a se desenvolver uma ferramenta o mais automática possível. Utilizaram-se diversas funcionalidades para tornar a utilização da ferramenta o mais parecido a uma aplicação, tais como botões de navegação e de interação, folhas de suporte e guias de utilização e exportação de documentos.

4.2. RCM TOOL

Nesta secção do capítulo dá-se a conhecer a estrutura da ferramenta, bem como a sua arquitetura e composição, funcionalidades, modo de utilização e algumas características.

4.2.1. Estrutura da Ferramenta

A ferramenta é composta por sete páginas. A primeira página é a Página Inicial, onde se introduz a ferramenta e se inicia o processo. Em seguida, tem-se a Base de Dados, onde o utilizador fornece algumas informações necessárias para o processo. Depois destaca-se o Diagrama de Decisão RCM, sendo o corpo principal da RCM TOOL, uma vez que o utilizador irá responder às questões da árvore de decisão nessa página. Também, fazem parte três páginas de suporte/informação, sendo estas Termos e Conceitos, Tipos de Manutenção e Ajuda. Por fim, encontra-se a página referente ao Relatório Final, onde o

utilizador vai encontrar uma tabela com os Modos de Falha analisados, as Estratégias de Manutenção obtidas e espaços em branco para escrever observações que se julguem pertinentes.

4.2.2. Página Inicial

A Página Inicial é a página de entrada da ferramenta ao utilizador, servindo como menu inicial da ferramenta, apresentada na figura 4.1. Esta folha tem como funções dar a conhecer a ferramenta ao utilizador e iniciar o processo do Diagrama de Decisão RCM.

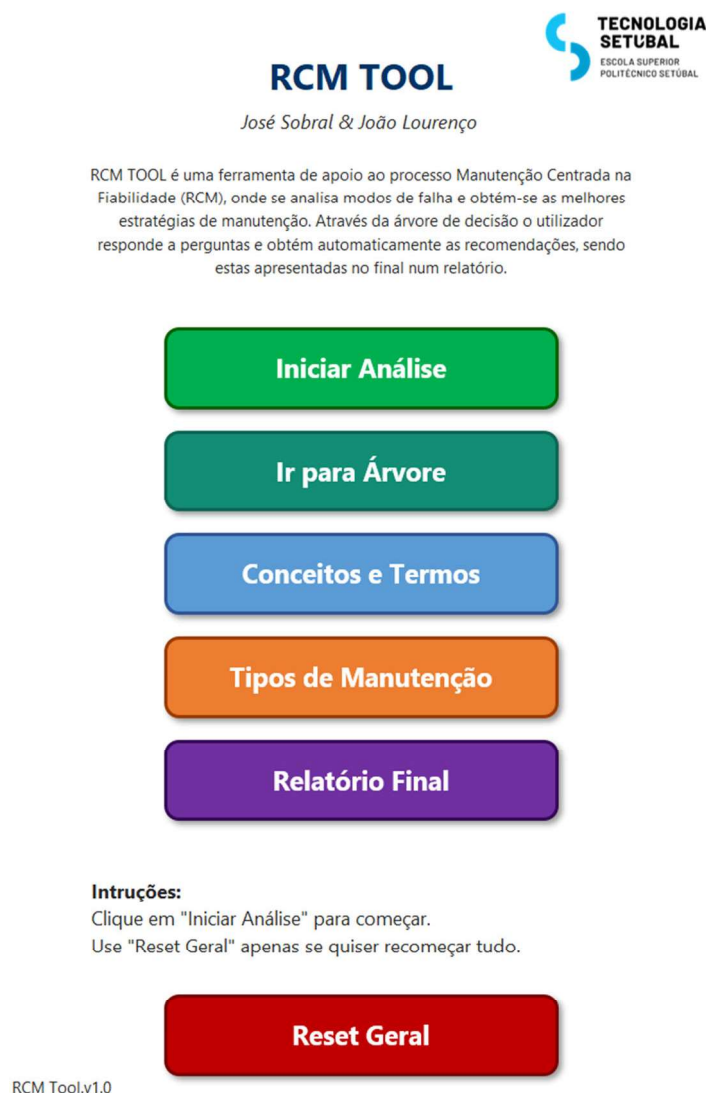


Figura 4.1 –Demonstração da Página Inicial da RCM TOOL.

Na parte de cima da folha encontra-se o nome da ferramenta e nome dos desenvolvedores. Em seguida, tem-se uma breve introdução à ferramenta e indicação da principal funcionalidade. Por baixo, encontram-se cinco botões, que o utilizador pode utilizar para navegar pela ferramenta.

Em primeiro lugar, o botão “Iniciar Análise”, que inicia o processo direcionando o utilizador para a página “Base de Dados”, para o subsequente fornecimento de informações. Em segundo, destaca-se o botão “Ir para Árvore”, transportando o utilizador para a página Diagrama de Decisão RCM, onde se encontra a árvore de decisão. Em seguida, dois botões “Conceitos e Termos” e “Tipos de Manutenção”, direcionando o utilizador para as páginas de informação. Em último lugar, o botão “Relatório Final”, que transporta o utilizador para a página “Relatório Final”, que corresponderá ao fim da análise e consequente emissão de um Relatório.

As instruções de utilização da página encontram-se por baixo dos botões, onde se explica ao utilizador como deve iniciar o processo e utilizar o botão “Reset Geral”, encontrado diretamente abaixo. Ao clicar neste último botão o utilizador pode limpar o conteúdo adicionado pelo utilizador ao longo da ferramenta, reiniciando o processo.

4.2.3. Base de Dados

A folha Base de Dados, observada na figura 4.2, tem um layout parecido à Página Inicial. Nesta secção o utilizador introduz informações suas e sobre o ativo em questão, de forma a facilitar o processo de preenchimento da árvore de decisão.

Base de Dados

Voltar à Página Inicial

Ir para Árvore

Limpar Tabela

Instruções:

Escreva as informações nos campos corretos.

Descreva o contexto operacional para melhor entendimento do processo de análise.

Quando terminar, clique no botão "Ir para Árvore", este irá começar o questionário.

Instalação	
Ativo em análise	
Data da análise	
Nome do utilizador	
Contexto Operacional	

RCM Tool.v1.0

Figura 4.2 – Demonstração da arquitetura da folha Base de Dados da RCM TOOL.

Na parte superior da folha encontram-se três botões, dois de navegação e um de interação com a página. O primeiro botão “Voltar à Página Inicial”, como diz o nome, transporta o utilizador para a Página Inicial. O segundo botão “Ir para Árvore”, transfere o utilizador para a página do Diagrama de Decisão RCM, onde se encontra a árvore de decisão. O terceiro botão “Limpar Tabela” ao ser ativado irá limpar todo o conteúdo da tabela.

As instruções de utilização desta página estão abaixo dos botões, onde é indicado ao utilizador o que fazer. Inicialmente, deve preencher a tabela abaixo das instruções e, em seguida, deve clicar no botão “Ir para Árvore” para continuar o processo e iniciar o questionário.

Por último, tem-se uma tabela de informação, onde o utilizador poderá escrever a instalação onde o ativo se encontra, o ativo a ser alvo de estudo, a data da análise, o nome do utilizador e, por último, o contexto operacional.

4.2.4. Diagrama de Decisão RCM

A folha Diagrama de Decisão RCM, apresentada na figura 4.3, é o corpo central da ferramenta, onde o utilizador indica o modo de falha que quer analisar (um de cada vez). Em seguida responde às questões apresentadas na árvore de decisão e obtém uma Estratégia de Manutenção para cada modo de falha do ativo alvo de estudo. O percurso dentro da árvore adapta-se às respostas realizadas, permitindo múltiplos resultados e opções. O utilizador ao confirmar as suas respostas para cada modo de falha, não sendo possível repetir Modos de Falha, as Estratégias de Manutenção e Modos de Falha são automaticamente guardadas e transferidas para o Relatório Final.

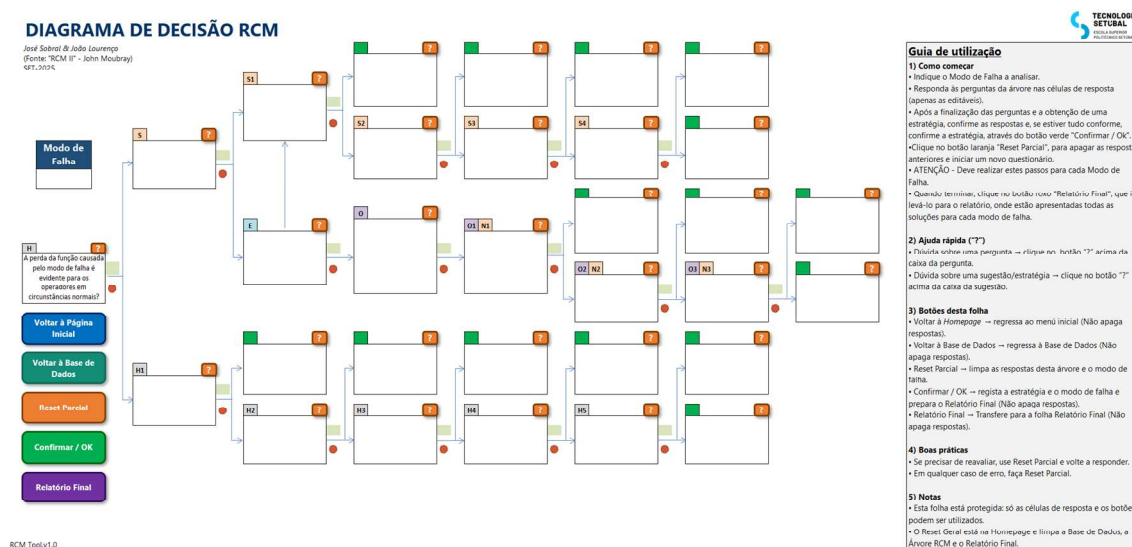


Figura 4.3 – Demonstração da arquitetura da folha Diagrama de Decisão RCM da RCM TOOL.

No lado esquerdo da folha encontram-se cinco botões, dois de interação na folha e três de navegação. O primeiro botão “Voltar à Página Inicial”, tal como anteriormente, transporta o utilizador para a Página Inicial. O segundo botão de navegação “Voltar à Base de Dados”, transfere o utilizador para a folha Base de Dados. O terceiro botão “Reset Parcial” é o primeiro botão de interação, tendo como função limpar as respostas dadas e o Modo de Falha da folha. O quarto botão “Confirmar / Ok” ao ser ativado vai guardar o Modo de Falha e a Estratégia / Tipo de Manutenção encontrado, e transferi-los para o Relatório Final. O último botão “Relatório Final” transfere o utilizador para o Relatório Final. O Modo de Falha analisado apresenta-se numa célula acima dos botões.

A árvore de decisão está presente no centro da folha, e as questões são representadas pelos retângulos brancos com retângulos verdes-claros à sua frente e identificadas por código de letras. As Estratégias de Manutenção são apresentadas nos retângulos brancos com retângulos verdes-escuros por cima. Quando se obtém uma Estratégia de Manutenção, o retângulo fica preenchido a verde-escuro. A primeira questão está por cima dos botões, e em seguida, se a resposta for “Sim” o utilizador responde às questões na parte superior, se for “Não”, então responde às questões na parte inferior da folha.

As questões na parte superior dizem respeito aos Modos de Falha evidentes, sendo nesta parte abordadas questões pela seguinte ordem: segurança, ambiente, operacional, e por último, não-operacional. Na parte inferior abordam-se questões sobre os mesmos temas, no entanto, referem-se aos Modos de Falha ocultos. Por cima de todos os retângulos de questões e de Estratégias há botões de ajuda, onde o utilizador acede às folhas que contêm informação sobre a questão ou a estratégia em questão.

No lado direito da folha encontra-se o Guia de utilização da mesma, contendo os passos para a correta utilização, como utilizar as ajudas, informação sobre os botões presentes, boas práticas e informações sobre a folha.

4.2.5. Termos e Conceitos

A folha Termos e Conceitos, apresentada na figura 4.4, tem um layout simples, composto por 2 botões de navegação e uma tabela com os conceitos importantes no RCM. O utilizador deve utilizar esta folha quando tiver dúvidas sobre um conceito ou termo relacionado com o processo RCM.

TERMOS E CONCEITOS

Voltar ao Diagrama

Voltar à Página Inicial

Termos e Conceitos	Definição
Contexto operacional	Apresentação e descrição do sistema e do ativo que se pretende estudar.
Função	O propósito para o qual o ativo existe e aquilo que se espera do ativo.
Falha funcional	Incapacidade de qualquer ativo de cumprir uma função com um padrão de desempenho aceitável para o utilizador.
Modo de falha	Qualquer evento que cause uma falha funcional.
Efeito de falha	Descrição do que acontece quando ocorre um modo de falha.
Consequência da Falha	Impacto do efeito da falha ao nível da segurança, ambiente, operacional e não operacional
Função Primária	Função de um ativo que levou à empresa a adquiri-lo.
Funções Secundárias	Funções adicionais de um ativo, que não a função primária.
Falha Evidente	Função cuja a falha, por si só, acabará por se tornar evidente para a equipa operacional em condições normais.
Falha Oculta	Função cuja falha não se torna evidente para a equipa operacional em circunstâncias normais, se ocorrer por si só.
Falha Total	Falha que leva ao ativo não conseguir realizar a sua função na totalidade.
Falha Parcial	Falha que leva ao ativo conseguir realizar a função, mas não cumpre o nível de desempenho especificado como satisfatório.
Estratégias de Manutenção	Conjunto de métodos sistemáticos e técnicas para gerir e manter ativos de uma empresa, com o objetivo de prolongar a vida útil, otimizar o desempenho e reduzir custos associados de um ativo.

RCM Tool.v1.0

Figura 4.4 – Demonstração da arquitetura da folha Termos e Conceitos da RCM TOOL.

Na parte superior da folha tem-se dois botões de navegação, onde o primeiro botão “Voltar ao Diagrama” transporta o utilizador para a folha “Diagrama de Decisão RCM”, e o segundo botão “Voltar à Página Inicial”, direciona o utilizador para a folha Página Inicial.

A tabela encontra-se por baixo dos botões, onde são apresentados os conceitos/termos considerados como os mais importantes associados ao RCM, e correspondentes definições.

4.2.6. Tipos de Manutenção

Muito à semelhança da folha Termos e Conceitos, o layout da folha Tipos de Manutenção, apresentada na figura 4.5, é intuitivo, composto por dois botões de

navegação e uma tabela com as diversas Estratégias de Manutenção existentes no processo RCM. Esta folha deve ser consultada pelo utilizador sempre que existirem dúvidas acerca da Estratégia de Manutenção obtida pelo diagrama.



Figura 4.5 – Demonstração da arquitetura da folha Tipos de Manutenção da RCM TOOL.

No topo da folha situam-se os mesmos dois botões da folha anterior, o botão “Voltar ao Diagrama” e o botão “Voltar à Página Inicial”. Sob os botões tem-se a tabela com os Tipos de Manutenção, e respetivas definições.

4.2.7. Relatório Final

O Relatório Final, apresentado nas figuras 4.6 e 4.7 é a última folha que o utilizador acede, sendo composta por instruções de utilização, um botão de exportação do documento e uma tabela, (figura 4,7). A função desta folha é sintetizar e guardar todas os Modos de Falha e respetivas Estratégias de Manutenção definidas pelo diagrama RCM num ficheiro *Portable Document Format* (PDF).

RELATÓRIO FINAL - RCM TOOL



Exportar PDF

Instruções para a coluna Observações:

- a) Para a estratégia Manutenção Preventiva Condicionada deve indicar qual a tecnologia usada no controlo da condição, quais os parâmetros a monitorizar e valores limites admissíveis.
- b) Para a estratégia Manutenção Preventiva Sistemática (Restauração) deve indicar as atividades de restauro e qual a frequência com que as mesmas são realizadas (horas, quilómetros, atuações, número de peças produzidas, ...).
- c) Para a estratégia Manutenção Preventiva Sistemática (Substituição) deve indicar as atividades de substituição e qual a frequência com que as mesmas são realizadas (horas, quilómetros, atuações, número de peças produzidas, ...).
- d) Para a estratégia Planeamento de testes/ensaio (detecção) deve indicar o tipo de testes/ensaio a realizar, assim como a sua frequência e a necessidade de ferramentas ou equipamentos especiais.
- e) Para a estratégia Reprojetado deve indicar o bem sujeito a esta atividade, assim como prazo estimado para a sua execução.
- f) Para a estratégia Combinação de Atividades deve indicar qual o conjunto de atividades a realizar, assim como as suas características.
- g) Para a estratégia Manutenção Corretiva deve indicar o grau de urgência (exemplo: nível 1 a nível 5), de acordo com a criticidade do bem, e o prazo estimado para a sua execução.

RCM Tool.v1.0

1

Figura 4.6 – Demonstração da primeira parte da arquitetura da folha Relatório Final da RCM TOOL.

Modo de Falha	Estratégia / Tipo de Manutenção	Observações
1A1	MANUTENÇÃO PREVENTIVA CONDICIONADA	
1A2	MANUTENÇÃO PREVENTIVA SISTEMÁTICA (restauração)	
1A3	REPROJETO (obrigatório)	
1B1	MANUTENÇÃO PREVENTIVA CONDICIONADA	

Figura 4.7 – Demonstração da arquitetura da tabela sem Observações escritas, presente na folha Relatório Final da RCM TOOL.

Na zona superior da folha tem-se o botão “Exportar PDF”, que permite exportar a folha para um ficheiro PDF. Em seguida tem-se as instruções de utilização da secção, onde se indica ao utilizador o processo de uso da folha. Por fim, encontra-se a tabela, que está dividida em três colunas, nomeadamente sobre Modos de Falha, Estratégia de Manutenção e Observações. As duas primeiras colunas são automaticamente preenchidas ao longo do processo de utilização da ferramenta. A coluna das Observações é preenchida pelo utilizador com auxílio das instruções da folha. No final do preenchimento o utilizador clica no botão “Exportar PDF” e escolhe onde quer guardar o ficheiro PDF no seu dispositivo.

4.2.8. Ajuda

A folha Ajuda, apresentada na figura 4.8, apresenta explicações para todas as perguntas existentes no diagrama, servindo como suporte para o utilizador. Nesta folha encontram-se botões de navegação, o botão “Voltar à Página Inicial” e o botão “Voltar ao Diagrama”. O primeiro botão situa-se na parte superior da folha e o segundo encontra-se debaixo de cada explicação. Todas as perguntas estão identificadas com o respetivo código, como por exemplo, S, S1, O1, N1, etc.

AJUDA RÁPIDA

[Voltar à Página Inicial](#)

H

Nesta questão é perguntado ao utilizador se a perda da função causada pelo modo de falha em questão é evidente para os operadores do ativo em situações normais de funcionamento.
O utilizador responde "Sim", caso o operador verifique que existe algum fenómeno experienciado que possa provocar uma falha funcional devido ao modo de falha em estudo.
O utilizador responde "Não" caso o operador não verifique que existe algum fenómeno experienciado que possa provocar uma falha funcional devido ao modo de falha em estudo.

[Voltar ao Diagrama](#)

S

Nesta questão é perguntado ao utilizador se o modo de falha evidente causa a perda da falha ou um dano que possa ferir ou até ferir mortalmente alguém.
O utilizador responde "Sim", caso se verifique que é possível alguém se ferir com a ocorrência da falha.
O utilizador responde "Não", caso se verifique que não é possível alguém se ferir com a ocorrência da falha.

[Voltar ao Diagrama](#)

S1

Nesta questão é perguntado ao utilizador se é possível economicamente e fisicamente realizar uma atividade de forma a detetar a falha ou a possível ocorrência desta.
O utilizador responde "Sim", caso seja possível realizar-se a tarefa tendo em conta os níveis físicos e económicos.
O utilizador responde "Não", caso seja impossível realizar-se a tarefa tendo em conta os níveis físicos e económicos.

[Voltar ao Diagrama](#)

Figura 4.8 – Demonstração da arquitetura da folha Ajuda da RCM TOOL.

4.3. Utilização da ferramenta RCM TOOL

Tal como referido, a utilização da ferramenta RCM TOOL inicia na folha Página Inicial, onde se dá a conhecer ao utilizador a ferramenta. O utilizador decide iniciar o processo ou explorar a ferramenta, através dos botões de navegação presente na Página Inicial. Caso pretenda explorar, o utilizador pode navegar para a folha do Diagrama de Decisão RCM, Termos e Conceitos, Tipos de Manutenção e Relatório Final.

Ao clicar o botão “Iniciar Análise” a ferramenta leva o utilizador para a folha “Base de Dados”, onde o utilizador preenche a tabela com seus dados, da empresa e do ativo em análise. Em seguida, descreve pormenorizadamente o contexto operacional do ativo. Por fim, o utilizador clica no botão “Ir para Árvore” para dar início ao processo de resposta ao diagrama.

O utilizador encontra uma janela *pop-up*, apresentada na figura 4.8, questionando-o

qual o modo de falha que pretende analisar. De seguida, a célula da resposta vai ser desbloqueada e o utilizador pode começar a responder às questões. Quando uma Estratégia de Manutenção for obtida, a célula respetiva fica preenchida a verde-escuro. No seguimento, o utilizador clica no botão “Confirmar / Ok” com o intuito de guardar o Modo de Falha e correspondente Estratégia de Manutenção. De modo a analisar outro Modo de Falha, o utilizador clica no botão “Reset Parcial”, limpando todo o conteúdo da árvore de decisão. A janela *pop-up* torna a aparecer e o processo volta a repetir-se. Durante este processo, se existir alguma dúvida sobre uma questão ou Estratégia de Manutenção, o utilizador deve clicar nos botões laranjas “?”, localizados acima dos respetivos retângulos, que transportarão o utilizador para as folhas, Ajuda, no caso de dúvidas nas questões, e Tipos de Manutenção, no caso de dúvidas sobre as Estratégias de Manutenção. Após tratar o último Modo de Falha, o utilizador após confirmar o mesmo, clica no botão “Relatório Final” para ir para a folha Relatório Final.

No relatório, consoante a Estratégia obtida para cada Modo de Falha, o utilizador vai ter de escrever as observações necessárias indicadas pelas instruções de utilização da folha. Por fim o utilizador clica no botão “Exportar PDF” e escolhe o nome do ficheiro e o local onde pretende guardar no seu dispositivo.

Capítulo 5

Conclusão e trabalhos futuros

No presente capítulo são apresentadas as conclusões da dissertação desenvolvida, as dificuldades sentidas na sua realização e, por fim, serão mencionados possíveis trabalhos futuros, que podem contribuir para a melhoria da ferramenta RCM TOOL e que podem facilitar a utilização da mesma.

5.1. Conclusão

Para desenvolvimento da ferramenta RCM TOOL, foi inicialmente necessário explorar o processo RCM, uma vez que a ferramenta está diretamente ligada ao método. Para tal, detalhou-se cada passo deste, tendo-se primeiro explicado o que se pretende com a descrição do contexto operacional, sua definição, como é obtido e o seu conteúdo. Em seguida abordaram-se as funções, onde foi analisado a sua definição, o conceito de padrão de desempenho e os diferentes tipos de funções. As falhas funcionais foram o passo seguinte a ser estudado e, à semelhança do referido para as funções, estudou-se a definição de falha funcional e os diversos tipos de falhas funcionais. Posteriormente, procedeu-se à análise dos modos de falha, mais concretamente a sua definição e a sua descrição. Seguidamente, estudaram-se os efeitos das falhas, onde é necessário definir e descrever os efeitos que os modos de falha produzem. Por fim, tem-se as consequências das falhas, sendo este o tema fulcral da ferramenta desenvolvida (RCM TOOL). Estudou-se ao detalhe a árvore de decisão RCM e as Estratégias de Manutenção possíveis. Ainda se analisou o RCM 3 com o objetivo de conciliar os conhecimentos anteriormente obtidos e explorar as novas características do processo. Com base nas informações recolhidas, e tendo em consideração o processo mais adequado e prático para desenvolvimento de uma ferramenta, concluiu-se que o método RCM II seria o mais indicado.

Uma vez feita uma descrição completa sobre o processo RCM, seguiu-se a criação da ferramenta. A RCM TOOL foi concebida com o intuito de otimizar e agilizar o método RCM, especificamente no preenchimento do Diagrama de Decisão RCM, fornecendo uma abordagem mais moderna e intuitiva. A ferramenta foi arquitetada a partir do software de cálculo Microsoft Excel, sendo utilizadas as suas funcionalidades base e o separador Programador. A ferramenta é composta por 7 folhas de cálculo, Página Inicial, Base de Dados, Diagrama de Decisão RCM, Termos e Conceitos, Tipos de Manutenção, Relatório Final e Ajuda. Cada folha foi estruturada com o propósito de facilitar a interação do utilizador, através de botões de interação e de navegação em todas as folhas para tornar a ferramenta o mais semelhante a uma aplicação informática. Cada folha tem um propósito específico, a Página Inicial apresenta a ferramenta ao utilizador, e a Base de Dados inicia o processo de resposta à árvore de decisão. A folha Diagrama de Decisão RCM é o corpo central da ferramenta, tendo como finalidade encontrar a melhor estratégia de Manutenção para cada um dos modos de falha em estudo. O Relatório Final resume todas as Estratégias recolhidas pela ferramenta num ficheiro PDF. As restantes

folhas de cálculo, Termos e Conceitos, Tipos de Manutenção e Ajuda, têm como função oferecer suporte ao utilizador durante toda a utilização da RCM TOOL.

Em conclusão, os objetivos principais delineados inicialmente foram alcançados através do detalhe extensivo do método RCM II, para melhor entendimento deste, e do desenvolvimento da RCM TOOL, de forma a criar uma solução inovadora, automática, intuitiva, fácil de utilizar e produtiva para encontrar as melhores Estratégias de Manutenção para todos os modos de falha em análise.

5.2. Dificuldades sentidas

Nesta dissertação a principal dificuldade sentida foi a criação de macros a partir de VBA, devido à elevada complexidade das funcionalidades da software. Visto que um dos objetivos do desenvolvimento da ferramenta era torná-la semelhante a uma aplicação, foram implementadas diversas funcionalidades, tais como a navegação entre folhas, interação entre folhas, geração de células protegidas, transporte de conteúdo de células e exportação de uma folha de cálculo para um PDF numa só interação.

5.3. Trabalhos futuros

De maneira a dar continuidade ao estudo desenvolvido na presente dissertação dever-se-ia testar e validar a ferramenta em ambiente operacional real, uma vez que é a primeira versão desta, não tendo sido testada em nenhuma empresa. Através destes testes seria possível descobrir a compatibilidade que a ferramenta tem como o ambiente operacional real, melhorias estruturais da mesma, novos erros de utilização e implementação de novas funcionalidades.

Outro trabalho futuro proposto é a transformação da ferramenta criada em Microsoft Excel numa aplicação comercial. Esta alteração de plataforma de desenvolvimento pode gerar novas funcionalidades na ferramenta, tornar menos complexa a sua criação e dar mais visibilidade à ferramenta em si.

Por fim, propõe-se ainda complementar a ferramenta com as outras fases do processo RCM anteriores à utilização do Diagrama de Decisão RCM, tais como a identificação das funções, falhas funcionais e modos de falha.

Bibliografia

- [1] Annamraju, Syamsundar, (2017), Reliability Based Maintenance of Industrial Assets. ISBN: 9781522506522, doi: 10.4018/978-1-5225-0651-5.ch018.
- [2] Khayal, Osama, (2025), A Comprehensive Review of Maintenance Strategies and Their Impact on Industrial Performance, Volume2, ISSN 1858-9448.
- [3] Agoro, Habeeb, (2025), Reducing Downtime in Production Lines Through Proactive Maintenance Strategies.
- [4] Hamasha MM, Bani-Irshid AH, Al Mashaqbeh S, Shwaheen G, Al Qadri L, Shbool M, Muathen D, Ababneh M, Harfoush S, Albedoor Q, Al-Bashir A, (2023), Strategical selection of maintenance type under different conditions, Sci Rep, Volume 1, <https://doi.org/10.1038/s41598-023-42751-5>.
- [5] Dong-Uk Park, Kyung Ehi Zoh, Eun Kyo Jeong, Dong-Hee Koh, Kyong-Hui Lee, Naroo Lee, Kwonchul Ha, (2024), Assessment of Occupational Health Risks for Maintenance Work in Fabrication Facilities: Brief Review and Recommendations, Safety and Health at Work, Volume 15, ISSN 2093-7911, <https://doi.org/10.1016/j.shaw.2023.11.010>.
- [6] Sawhney, Rapinder & Sanil, Gurudatt & Thakur, Kaveri, (2012), The Relationship Between Worker Safety and Equipment Reliability, 10.13140/RG.2.1.2988.5528.
- [7] IPQ. (2019). NP EN ISO 45001: 2019– Sistemas de Gestão da Segurança e Saúde no Trabalho – Requisitos e orientação para a sua utilização. Instituto Português da Qualidade. Monte da Caparica.
- [8] IPQ. (2015). NP EN ISO 14001: 2015 – Sistemas de Gestão Ambiental – Requisitos e linhas de orientação para a sua utilização. Instituto Português da Qualidade. Monte da Caparica.
- [9] Stamatis. D. H, (2003), Failure Mode and Effect Analysis: FMEA from Theory to Execution, Milwaukee: ASQ Quality Press.
- [10] Noel Shannon, Anna Trubetskaya, Javed Iqbal, Olivia McDermott, (2023), A

total productive maintenance & reliability framework for an active pharmaceutical ingredient plant utilising design for Lean Six Sigma, *Heliyon*, Volume 9, ISSN 2405-8440, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e20516>.

- [11] Moubray, John. (1998), *Reliability Centered Maintenance*. United Kingdom: Aladon Ltd.
- [12] IEC, (2006), IEC 60300-3-11: Application guide – Reliability centred maintenance, Geneva: International Electrotechnical Commission.
- [13] Khasanah. Rahayu, (2012), Reliability-Centered Maintenance (RCM) Evaluation in the industry application, case study: Fertilizer company, *Journal PASTI*, Volume 10. Pages 8-14.
- [14] Geisbush, J. e Ariaratnam, S.T., (2023). Reliability centered maintenance (RCM): literature review of current industry state of practice. *Journal of Quality in Maintenance Engineering* 5 April 2023; 29 (2): 313–337. <https://doi.org/10.1108/JQME-02-2021-0018>.
- [15] Chan F.T.S., Lau, H.C.W., Ip, R.W.L., Chan, H.K. e Kong, S., (2005), Implementation of total productive maintenance: A case study, *International Journal of Production Economics*, Volume 95, Issue 1, Pages 71-94, <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2003.10.021>.
- [16] Wolska, M., Gorewoda, T., Roszak, M., e Gajda, L., (2023), Implementation and Improvement of the Total Productive Maintenance Concept in an Organization, *Encyclopedia*, 3(4), 1537-1564, <https://doi.org/10.3390/encyclopedia3040110>.
- [17] Hector I, Panjanathan R., (2024), Predictive maintenance in Industry 4.0: a survey of planning models and machine learning techniques, *PeerJ Computer Science* 10:e2016 <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.2016>.
- [18] Mołęda, M., Małysiak-Mrozek, B., Ding, W., Sunderam, V. e Mrozek D., (2023), From Corrective to Predictive Maintenance—A Review of Maintenance Approaches for the Power Industry, *Sensors*, 23(13), 5970; <https://doi.org/10.3390/s23135970>.
- [19] Thomas D. e Weiss B., (2021), Maintenance Costs and Advanced Maintenance Techniques in Manufacturing Machinery: Survey and Analysis, *Int J Progn Health Manag.*;12(1):10.36001/ijphm.2021.v12i1.2883. doi:

10.36001/ijphm.2021.v12i1.2883.

- [20] Siemens, (2024) The True Cost of Downtime. Siemens AG Digital Industries Customer Services. Article No. DICS-B10146-00-7600 PDF DÖ. Erlangen, Germany. https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:1b43afb5-2d07-47f7-9eb7-893fe7d0bc59/TCOD-2024_original.pdf.
- [21] Kaźmierczak, P., Żywicki, K., e Rewers, P., (2025), The Impact of Downtime on the Stability of the Production Schedule, Applied Sciences, 15(1), 150. <https://doi.org/10.3390/app15010150>.
- [22] Benhanifia, A., Cheikh, Z.B., Oliveira, P.M., Valente, A. e Lima, J., (2025), Systematic review of predictive maintenance practices in the manufacturing sector, Intelligent Systems with Applications, Volume 26, 200501. <https://doi.org/10.1016/j.iswa.2025.200501>.
- [23] Garcia, J., Rios-Colque, L., Peña, A., e Rojas, L., (2025), Condition Monitoring and Predictive Maintenance in Industrial Equipment: An NLP-Assisted Review of Signal Processing, Hybrid Models, and Implementation Challenges, Applied Sciences, 15(10), 5465. <https://doi.org/10.3390/app15105465>.
- [24] IPQ. (2021), NP EN 13306, (2021), Norma Portuguesa - Manutenção - Terminologia de manutenção (2a Edição), Instituto Português da Qualidade. Monte da Caparica.
- [25] Marco Antero Afonso Dos Santos, (2023), Avaliação e Gestão da Fiabilidade em Manutenção, Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.
- [26] Vanda Piedade, (2012), Manutenção Centrada na Fiabilidade – Manutenção de Equipamentos, Tese de Mestrado em Engenharia de Produção, Instituto Politécnico de Setúbal.
- [27] D. E. R. Cardoso, (2020), Aplicação de conceitos de manutenção preditiva com aplicação de ferramentas de Inteligência Artificial. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica. Faculdade de Engenharia Universidade do Porto.
- [28] Pintelon, Liliane., Maintenance: An Evolutionary Perspective, Complex System Maintenance Handbook. Pages 21-48, 2008, ISBN: 978-1-84800-010-0.
- [29] Jorge Miguel Moreira Dionísio, (2020) Modelo de Gestão Económica do Ciclo

- de Vida de um Ativo, Tese de Mestrado em Engenharia Manutenção, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.
- [30] João Francisco Rodrigues Silva, (2023), Implementação do Processo RCM num Ativo Crítico na Indústria Agroalimentar, Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.
- [31] Jorge Miguel Alves Fernandes, (2020), Análise e desenvolvimento do processo de manutenção em equipamentos de produção: Um Caso Prático da Renault Cacia, Tese de Mestrado em Engenharia e Gestão Industrial, Universidade de Aveiro.
- [32] Sobral. (2023). Manutenção e Fiabilidade (textos de apoio). Mestrado de Engenharia de Produção. Escola Superior de Tecnologia de Setúbal. Instituto Politécnico de Setúbal.
- [33] Khayal, Osama, (2024), Introduction to Maintenance Management. 10.13140/RG.2.2.36438.46408.
- [34] Department of Defense (DoD), "Test and Evaluation of System Reliability, Availability and Maintainability - 3235.1-H", Washington, 1982.
- [35] Ajit Kumar Verma, Srividya Ajit, Durga Rao Karanki. (2016). Reliability and Safety Engineering. Volume 2. ISBN: 978-1-4471-6268-1 Page 5. DOI:10.1007/978-1-4471-6269-8.
- [36] A. M. S. DUARTE, (2010), Acompanhamento e Análise da Degradação em Componentes Mecânicos, Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.
- [37] E. J. M. Serrano, (2009), Conceito, Classificação e Quantificação da Fiabilidade Humana na Relação Homem-Máquina, Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.
- [38] B. J. A. de Lemos, (2010), Análise RAMS na componente Manutenibilidade, Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Instituto Superior Técnico de Lisboa.
- [39] The University of Tennessee, (2024), "The Importance of Reliability and Maintainability in Manufacturing". Reliability and Maintainability Center, Knoxville, Disponível em: <https://rmc.utk.edu/the-importance-of-reliability-and-maintainability-in-manufacturing/>.

- [40] Ahmed, Q., Raza, S.A., Al-Anazi, D.M., (2020), Reliability-based fault analysis models with industrial applications: A systematic literature review, *Quality and Reliability Engineering International*, Volume37, Issue 4, Pages 1307-1333. <https://doi.org/10.1002/qre.2797>.
- [41] Tordeux, A., Julitz, T., Müller, I., Zhang, Z., Pietruschka, J., Fricke, N., Schlueter, N., Bracke, S. e Löwer, M., (2024), System Reliability Engineering in the Age of Industry 4.0: Challenges and Innovations. arXiv:2411.08913v1, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2411.08913>.
- [42] Payette, M., e Abdul-Nour, G., (2023), Machine Learning Applications for Reliability Engineering: A Review. *Sustainability*, 15(7), 6270. <https://doi.org/10.3390/su15076270>.
- [43] Ahmad, R., (2018). Reliability analysis comparison on punching tool sets due to different maintenance decisions: a case study from the pulp manufacturing industry. *Int J Adv Manuf Technol* 94, 1969–1979. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-1017-3>.
- [44] Moniri-Morad, A., Sattarvand, J., (2023), A comparative study between the system reliability evaluation methods: case study of mining dump trucks. *J. Eng. Appl. Sci.* 70, 103. <https://doi.org/10.1186/s44147-023-00272-y>.
- [45] Meddaoui, A., Hain, M. e Hachmoud, A., (2023). The benefits of predictive maintenance in manufacturing excellence: a case study to establish reliable methods for predicting failures. *Int J Adv Manuf Technol*, 128, 3685–3690. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-12086-6>.
- [46] Regan, Nancy, (2012), *The RCM Solution: A Practical Guide to Starting and Maintaining a Successful RCM Program*, New York: Library of Congress Cataloging-in-Publication.
- [47] Basson, M, (2019), *RCM3: Risk-Based Reliability Centered Maintenance*. Industrial Press, Inc. Connecticut. ISBN: 9780831136321.
- [48] D.J. Fonseca, G.M.Knapp, (2000), An expert system for reliability centered maintenance in the chemical industry. [https://doi.org/10.1016/S0957-4174\(00\)00019-1](https://doi.org/10.1016/S0957-4174(00)00019-1).
- [49] O. Yavuz, E. Doğan, E. Carus, A. Görgülü, (2019), Reliability Centered

Maintenance Practices in Food Industry, Procedia Computer Science, Volume 158, pages 227-234, <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.09.046>.

- [50] B. Yssaad, M. Khiat, A. Chaker, (2014), Reliability centered maintenance optimization for power distribution systems, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Volume 55, Pages 108-115, <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2013.08.025>.
- [51] Joel Igba, Kazem Alemzadeh, Ike Anyanwu-Ebo, Paul Gibbons, John Friis, (2013), A Systems Approach Towards Reliability-Centred Maintenance (RCM) of Wind Turbines, Procedia Computer Science, Volume 16, Pages 814-823, <https://doi.org/10.1016/j.procs.2013.01.085>.