



**Aplicação de metodologia “Reliability Centered  
Maintenance 3” (RCM3) ao sistema de refrigeração do  
sistema de armas Pandur II 8x8**

**Filipe Emanuel Carvalho da Silva**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

**Engenharia Mecânica**

Orientadores: Tenente Coronel Énio Rodrigo Pereira Chambel

Prof. Virgínia Isabel Monteiro Nabais Infante

**Júri**

Presidente: Prof. Luís Filipe Galvão dos Reis

Orientador: Prof. Virgínia Isabel Monteiro Nabais Infante

Vogais: Prof. Luís António de Andrade Ferreira

Major Luís Filipe Pratas Quinto

**Janeiro 2021**



# Resumo

A evolução do paradigma da manutenção ao longo dos tempos, tem originado uma série de mudanças, quer ao nível das tarefas de manutenção realizadas (na sua tipologia e na própria forma de as executar), quer ao nível dos objetivos da manutenção e da gestão dos ativos, assumindo-se cada vez mais como uma área de interesse fundamental para as organizações. No caso concreto do Exército Português, o processo de modernização gradual que atravessa, tem-se traduzido no aumento do grau de complexidade dos equipamentos à sua disposição, o que traz novos desafios à manutenção e à capacidade de manter (de forma eficaz e eficiente), a prontidão operacional dos equipamentos, sempre com o objetivo de atingir o nível de custos adequados.

Nesta dissertação aplicou-se a metodologia de manutenção RCM3 ao sistema de refrigeração das Pandur II 8x8. Esta metodologia tem como foco a fiabilidade dos equipamentos e permite identificar e avaliar os riscos associados aos modos de falha apresentados, bem como desenvolver estratégias adequadas que permitam gerir e mitigar esses mesmos riscos.

Começa-se por fazer uma revisão dos princípios da metodologia aplicada e de alguns conceitos utilizados ao longo da dissertação. É efetuada uma análise funcional ao sistema estudado, seguida de uma análise de modos de falha e efeitos. Após a definição e quantificação do risco são propostas as respetivas ações de mitigação de acordo com o processo de decisão RCM3. Por fim, as ações propostas foram comparadas com o plano de manutenção existente e foram tiradas conclusões acerca da sua adequabilidade, da robustez do sistema estudado e das lacunas existentes no processo de gestão da manutenção das Pandur II no Exército Português.

**Palavras-chave:** Manutenção, Fiabilidade, RCM3, Pandur II, Exército Português



# Abstract

The evolution of the maintenance paradigm over time has led to several changes, both in the maintenance tasks performed and in the objectives of maintenance and asset management, assuming itself as an area of fundamental interest for organizations. In the specific case of the Portuguese Army, the process of gradual modernization that it goes through, has resulted in the increase of the complexity of the equipment at its disposal, which brings new challenges to maintenance and to the ability to maintain (in an effective and efficient way) the operational readiness of the equipment, always with the aim of reach the appropriate cost level.

In this thesis, the RCM3 maintenance methodology was applied to the Pandur II 8x8 cooling system. This methodology focuses on the reliability of the equipment and allows to identify and evaluate the risks associated with the failure modes presented, as well as developing appropriate strategies to manage and minimize these risks.

We start with the review of the applied methodology principles, and some concepts used throughout this assignment. A functional analysis of the studied system is performed, followed by an analysis of failure modes and effects. After defining and quantifying the risk, the respective mitigation actions are proposed according to the RCM3 decision process. Finally, the proposed actions were compared with the existing maintenance plan and conclusions were drawn about its suitability, the robustness of the studied system, and the existing gaps in the Pandur II maintenance management process in the Portuguese Army.

**Keywords:** Maintenance, Reliability, RCM3, Pandur II, Portuguese Army

# Agradecimentos

Gostaria de deixar uma nota de agradecimento a todos os envolvidos neste trabalho e que de uma forma ou de outra contribuíram para a sua realização, em especial aos meus orientadores, Professora Virgínia Infante e Tenente Coronel Énio Chambel, pela constante disponibilidade e cuja ajuda e orientação foram fundamentais para a realização desta dissertação.

Quero também agradecer ao Capitão André Graça pela disponibilidade na obtenção dos registos das ordens de trabalho relativas às falhas do sistema e pela boa vontade em estar sempre disponível para responder a todas as minhas questões. Ao 1º Sargento Carlos Simões pela ajuda dada na determinação das estimativas dos tempos de reparação e pela disponibilidade em colaborar neste trabalho.

Esta dissertação representa o culminar do meu percurso académico, enquanto futuro engenheiro e oficial do quadro permanente do Exército Português, e como tal, quero agradecer àqueles que me acompanharam nesta caminhada, de forma muito particular à minha mãe e à minha namorada que sempre me apoiaram e motivaram em todos os momentos.

A todos, o meu bem-haja.

# Índice

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>Introdução .....</b>  | <b>1</b>  |
| 1.1      | Enquadramento .....  | 1         |
| 1.2      | Motivação .....  | 1         |
| 1.3      | Objetivos .....  | 2         |
| 1.4      | Estrutura da dissertação .....                                       | 2         |
| <b>2</b> | <b>Estado da Arte .....</b>  | <b>3</b>  |
| 2.1      | A Manutenção e a sua evolução ao longo dos tempos .....              | 3         |
| 2.2      | Adequação da metodologia de manutenção centrada na fiabilidade ..... | 5         |
| 2.3      | Comparação de Metodologias RCM2 versus RCM3 .....                    | 7         |
| 2.4      | Princípios da Manutenção centrada na fiabilidade (RCM3) .....        | 9         |
| 2.4.1    | Definição da RCM .....   | 9         |
| 2.4.2    | Objetivos da RCM .....   | 9         |
| 2.5      | Descrição da metodologia RCM .....                                   | 11        |
| 2.5.1    | Planeamento e preparação da RCM .....                                | 11        |
| 2.5.2    | Introdução às 8 questões do RCM3 .....                               | 12        |
| 2.5.3    | Failure Modes Effects and Criticality Analysis (FMECA) .....         | 15        |
| 2.5.4    | Registo de informação ao longo da aplicação do processo RCM3 .....   | 17        |
| 2.6      | Fiabilidade .....  | 18        |
| 2.7      | Dados Censurados .....   | 20        |
| 2.7.1    | Dados censurados à direita .....                                     | 21        |
| 2.8      | Distribuição de Weibull .....  | 21        |
| 2.9      | Métodos de estimação de parâmetros da distribuição de Weibull .....  | 25        |
| 2.9.1    | Métodos Gráficos .....   | 25        |
| 2.9.2    | Métodos analíticos .....   | 26        |
| <b>3</b> | <b>Caso Prático .....</b>  | <b>28</b> |
| 3.1      | O sistema de armas Pandur II 8x8 .....                               | 28        |
| 3.1.1    | Sistema de refrigeração .....  | 29        |
| 3.2      | A manutenção das Pandur II 8x8 no Exército Português .....           | 30        |
| 3.2.1    | Plano de manutenção atual das Pandur II .....                        | 32        |
| 3.3      | Aplicação da Metodologia RCM3 .....                                  | 33        |

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| 3.3.1    | Definição do Contexto Operacional.....                 | 33        |
| 3.3.2    | Ficha de informação RCM3Figura 17.....                 | 34        |
| 3.3.3    | Análise funcional do sistema de refrigeração.....      | 34        |
| 3.3.4    | Análise de modos de falha .....                        | 38        |
| 3.3.5    | Descrição dos efeitos da falha.....                    | 38        |
| 3.3.6    | Análise do Risco .....                                 | 44        |
| 3.3.7    | Definição de ações de mitigação de risco .....         | 47        |
| <b>4</b> | <b>Análise e discussão de resultados.....</b>          | <b>50</b> |
| <b>5</b> | <b>Conclusões, Limitações e Trabalhos Futuros.....</b> | <b>55</b> |
| 5.1      | Conclusões .....                                       | 55        |
| 5.2      | Limitações.....  | 56        |
| 5.3      | Propostas de Trabalhos Futuros .....                   | 56        |
| <b>6</b> | <b>Bibliografia .....</b>                              | <b>58</b> |



# Índice de figuras

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 1:</b> Evolução das expectativas da manutenção [3].....                                   | 4  |
| <b>Figura 2:</b> Visão geral do processo RCM [11].....  | 10 |
| <b>Figura 4:</b> Modelo de ficha de informação RCM3 [3].....  | 17 |
| <b>Figura 5:</b> Modelo de ficha de decisão RCM3 [3] .....  | 17 |
| <b>Figura 6:</b> Função fiabilidade [12] .....  | 19 |
| <b>Figura 7:</b> Representação gráfica da taxa de falha - curva da banheira, adaptado de [21] ..... | 20 |
| <b>Figura 8:</b> Dados censurados à direita [22] .....  | 21 |
| <b>Figura 9:</b> Função densidade de probabilidade acumulada para diferentes $\beta$ [24] .....     | 23 |
| <b>Figura 10:</b> Função fiabilidade para diferentes $\beta$ [24].....                              | 23 |
| <b>Figura 11:</b> Taxa de falha para diferentes $\beta$ [24] .....                                  | 24 |
| <b>Figura 12:</b> Função densidade de probabilidade acumulada para diferentes $\eta$ [24] .....     | 24 |
| <b>Figura 13:</b> Viatura Blindada de Rodas Pandur II 8x8 [31].....                                 | 28 |
| <b>Figura 14:</b> Representação esquemática do sistema de refrigeração, adaptado de [32] .....      | 30 |
| <b>Figura 15:</b> Cabeçalho da ficha de informação.....   | 34 |
| <b>Figura 16:</b> Registo das funções na ficha de informação .....                                  | 35 |
| <b>Figura 17:</b> Hierarquia de ativos - sistema de refrigeração .....                              | 36 |
| <b>Figura 18:</b> Análise funcional do sistema de refrigeração .....                                | 37 |
| <b>Figura 19:</b> Registo dos modos de falha na ficha de informação .....                           | 38 |
| <b>Figura 20:</b> Registo dos efeitos da falha na ficha de informação .....                         | 39 |
| <b>Figura 21:</b> Ficha de decisão .....  | 48 |

# Índice de tabelas

|  |    |
|--|----|
| <b>Tabela 1:</b> Dados técnicos do sistema de refrigeração, adaptado de [32] .....                               | 29 |
| <b>Tabela 2:</b> Órgãos do sistema de refrigeração.....  | 29 |
| <b>Tabela 3:</b> Plano de manutenção do fabricante para o sistema de refrigeração, adaptado de [34] e [32] ..... | 32 |
| <b>Tabela 4:</b> Estimção dos parâmetros de Weibull - Sensor de nível .....                                      | 41 |
| <b>Tabela 5:</b> Estimção dos parâmetros de Weibull – Válvula de descompressão.....                              | 41 |
| <b>Tabela 6:</b> Estimção dos parâmetros de Weibull – Sujidade nos radiadores .....                              | 42 |
| <b>Tabela 7:</b> Estimção dos parâmetros de Weibull – Fugas .....  | 42 |
| <b>Tabela 8:</b> Resultados obtidos pela censura de dados à direita .....  | 43 |
| <b>Tabela 9:</b> Modos de falha com poucos registos de ocorrência .....  | 44 |
| <b>Tabela 10:</b> Matriz do risco.....   | 45 |
| <b>Tabela 11:</b> Modos de falha com risco intolerável.....  | 47 |
| <b>Tabela 12:</b> Plano de manutenção proposto .....   | 49 |
| <b>Tabela 13:</b> MTBF de componentes a partir de bases de dados.....  | 52 |
| <b>Tabela 14:</b> Comparação entre Risco inicial e Risco revisto .....   | 54 |

# Lista de abreviaturas

|              |  |
|--------------|--|
| <b>CIP</b>   | Catálogo ilustrado de peças                    |
| <b>FMECA</b> | Failure Modes Effects and Criticality Analysis |
| <b>FND</b>   | Forças Nacionais Destacadas                    |
| <b>MTBF</b>  | Mean Time Between Failure                      |
| <b>NATO</b>  | North Atlantic Treaty Organization             |
| <b>RBI</b>   | Risk-Based Inspection                          |
| <b>RCA</b>   | República Centro Africana                      |
| <b>RCFA</b>  | Root Cause Failure Analysis                    |
| <b>RCM</b>   | Reliability Centered Maintenance               |



# 1 Introdução

Esta dissertação, realizada no âmbito do mestrado integrado em engenharia mecânica militar, tem como foco a aplicação da metodologia de manutenção centrada na fiabilidade - RCM3 ("Reliability Centered Maintenance 3") de forma a efetuar uma revisão ao plano de manutenção para o sistema de refrigeração do sistema de armas Pandur II 8x8, que equipa o Exército Português. O Exército executa o plano de manutenção proposto pelo fabricante e pretende-se perceber a adequabilidade do plano de manutenção atual, bem como identificar possíveis melhorias e alterações.

Neste capítulo é feito um breve enquadramento da dissertação, é descrita a motivação que lhe deu origem e são definidos os objetivos e a estrutura da dissertação.

## 1.1 Enquadramento

A exigência associada às missões do Exército, seja em território nacional, seja no estrangeiro em forças nacionais destacadas (FND), aliada ao grau de prontidão que lhe é exigido, requer uma grande disponibilidade por parte dos meios humanos, e dos equipamentos à sua disposição. Neste sentido a manutenção assume indiscutivelmente um papel essencial no bom funcionamento e na fiabilidade dos equipamentos, sendo responsável por garantir que estes cumprem o seu papel quando solicitados.

O sistema de armas Pandur II 8x8, é um equipamento moderno, versátil e de grande importância atualmente para o Exército e para o cumprimento da sua missão. A sua aquisição marcou uma nova fase na modernização do Exército Português, e tem sido amplamente utilizado no território nacional e também no estrangeiro, tendo participado em exercícios na Lituânia e mais recentemente empregue no teatro de operações da República Centro Africana (RCA).

Sendo este um equipamento moderno e vital para os interesses do Exército e do país é fundamental que seja alvo de uma correta manutenção, que lhe permita cumprir as expectativas e o seu propósito operacional e estratégico.

## 1.2 Motivação

O facto de as Pandur II serem um dos equipamentos mais recentes ao serviço do Exército, e por serem também um equipamento utilizado por poucos países na NATO (tirando Portugal apenas a Áustria e a República Checa utilizam esta versão das Pandur), tornam-no um equipamento ainda pouco conhecido, no que às necessidades e requisitos de manutenção (resultantes da sua utilização operacional contínua) diz respeito. Desta forma, Portugal segue as indicações do fabricante e executa o plano de manutenção por ele proposto existindo, portanto, espaço para uma análise crítica e adaptação às necessidades decorrentes da utilização conhecida do equipamento, durante o tempo que já esteve ao serviço do Exército Português.

O sistema de refrigeração em particular, foi escolhido para ser analisado nesta dissertação por ser um dos subsistemas com maior incidência de falhas, e com potencial de melhoria. O sistema de refrigeração foi referenciado (em virtude da sua experiência profissional) pelo oficial responsável pela gestão da frota de Pandur II do Exército, Capitão André Graça, como sendo um dos subsistemas da

Pandur com falhas mais recorrentes e que mais contribui para a indisponibilidade do sistema de armas. Do total de 2038 ordens de trabalho corretivas analisadas nesta dissertação, 126 são referentes ao sistema de refrigeração, o que corresponde a cerca de 6,2% das falhas registadas para todo o sistema de armas. Este é de facto um valor significativo, tendo em conta que o subsistema que mais falhas apresenta é o casco (com cerca de 10%), das quais a maioria estão relacionadas com rebentamento de pneus e componentes/peças exteriores partidas. Este tipo de falhas, não obstante ser recorrente, não é diretamente dependente de ações de manutenção (ou falta delas), não carecendo de grande tipo de intervenções nem existindo grande potencial de melhoria em termos de plano de manutenção.

Esta relevância em termos de falhas, associada ao facto de ser um sistema relativamente simples de compreender (no que à análise funcional e de modos de falha diz respeito), levou a que o sistema de refrigeração fosse selecionado para ser analisado nesta dissertação.

### **1.3 Objetivos**

Esta dissertação tem como objetivo principal aplicar a metodologia de manutenção RCM3 ao sistema de refrigeração das Pandur II 8x8. Compreende um conjunto de etapas correspondentes às diversas fases da aplicação da metodologia, que no seu conjunto contribuem para alcançar os objetivos finais da dissertação. Assim sendo, com este trabalho pretende-se:

- Analisar e compreender a metodologia RCM3;
- Efetuar uma análise funcional ao sistema de refrigeração das Pandur II 8x8 e seus componentes;
- Identificar e registar os potenciais modos de falha associados a cada componente;
- Definir e categorizar níveis de risco de inoperacionalidade associados aos modos de falha;
- Identificar e propor ações de mitigação de risco associados aos modos de falha identificados;
- Rever a adequabilidade do atual plano de manutenção referente ao sistema de refrigeração das Pandur II 8x8.

### **1.4 Estrutura da dissertação**

Este documento encontra-se dividido em cinco capítulos. O primeiro capítulo corresponde à introdução, onde efetua uma breve descrição do tema, dos objetivos e da motivação para a sua escolha. No segundo capítulo, efetua-se uma revisão de literatura das temáticas abordadas ao longo deste trabalho. Faz-se uma descrição da metodologia aplicada, são abordados conceitos aplicados como a fiabilidade e a vida de componentes, a distribuição de probabilidade de Weibull e a censura estatística de dados. No terceiro capítulo é apresentado o caso prático, com a descrição e explicação de todas as etapas efetuadas. É apresentada a análise funcional, a identificação dos modos de falha, a categorização do risco e o plano de manutenção proposto. No quarto capítulo são analisados e discutidos os resultados obtidos e são justificadas as ações de mitigação de risco adotadas. No quinto capítulo são apresentadas as conclusões desta dissertação, bem como algumas propostas de trabalhos futuros.

## 2 Estado da Arte

Neste capítulo é efetuada uma revisão de literatura com o objetivo de fazer um enquadramento teórico dos principais conceitos aplicados nesta dissertação de mestrado. É apresentada e definida a metodologia RCM3 e os pressupostos da sua aplicação e ainda alguns conceitos relativos a manutenção, fiabilidade e ciclo de vida de sistemas em serviço. Por fim são também referidas as normas que definem a aplicação da metodologia RCM3 e que foram adotadas neste trabalho.

### 2.1 A Manutenção e a sua evolução ao longo dos tempos

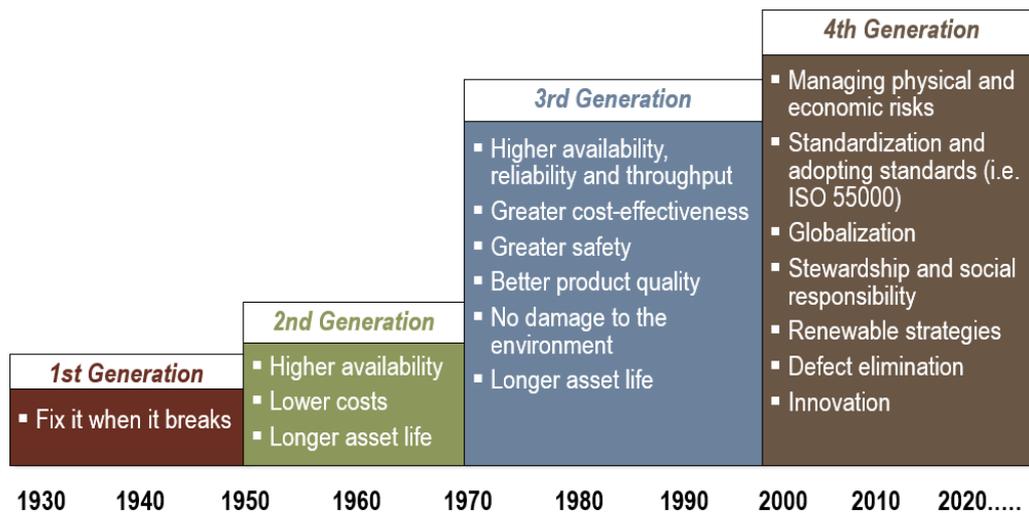
Para que se possa entender o que é a manutenção centrada na fiabilidade, ou em inglês “Reliability Centered Maintenance” (RCM) e qual a razão da sua utilização, é necessário primeiro entender o que é a manutenção e qual o seu propósito e finalidade. Existem atualmente na literatura diversas definições do conceito de manutenção sendo que são de seguida apresentadas duas.

A norma europeia EN 13306:2017 define a manutenção como sendo “a combinação de todas as ações técnicas, administrativas e de gestão realizadas durante o ciclo de vida de um item com a intenção de o manter ou restaurar até um estado onde consegue realizar a função pretendida”[1]. Por sua vez a definição proposta por John Moubray na sua obra “RCM II – Reliability Centered Maintenance” [2] (uma das obras de referência no que à aplicação da metodologia RCM diz respeito) e também adotada por Marius Basson na sua obra “RCM3: Risk-Based Reliability Centered Maintenance” [3] (uma revisão atual do trabalho de Moubray) considera que a manutenção é “Garantir que os ativos físicos continuem a fazer o que os seus utilizadores pretendem que façam”. Desta forma, facilmente se percebe que a manutenção serve para manter o nível de operacionalidade desejada de um determinado sistema em serviço, de maneira a garantir que possa cumprir a sua função.

Com o passar dos anos, a evolução da indústria e dos sistemas (em número e complexidade) originaram a conseqüente evolução da manutenção, traduzida no aparecimento de novas técnicas, diferentes visões ao nível da organização e gestão da manutenção e principalmente alterações ao nível das expectativas e objetivos (verifica-se o aumento da consciência entre a relação da manutenção com a qualidade do produto, bem como um aumento da pressão para conseguir uma elevada disponibilidade dos sistemas e uma preocupação crescente com a contenção dos custos). Atualmente a manutenção tem também de ser capaz de acompanhar as exigências governamentais e sociais relacionadas com a consciencialização para as questões ambientais do século XXI [3].

Todo este panorama faz com que a manutenção nos dias de hoje, seja manifestamente diferente do que era nas décadas passadas, no que diz respeito ao tipo de ações e técnicas realizadas, à filosofia adotada e às expectativas que lhe estão associadas [3].

A evolução da manutenção e das suas expectativas (o que se espera que a manutenção seja capaz de alcançar) pode ser dividida em 4 gerações que se encontram representadas na Figura 1.



**Figura 1:** Evolução das expectativas da manutenção [3]

A 1ª geração da manutenção, cobre o período meados da primeira metade do século XX. Esta caracterizou-se por ser uma época em que a indústria se encontrava pouco mecanizada e os equipamentos de uma maneira geral sobredimensionados, o que os tornava fiáveis e fáceis de reparar (devido também à sua baixa complexidade) não havendo portanto grandes preocupações com a prevenção da falha nem necessidade de manutenção sistemática, limitando-se as ações de manutenção simplesmente a limpeza e lubrificação de rotina e à reparação dos equipamentos com avaria [3].

O desenrolar da 2ª Guerra Mundial originou grandes mudanças ao nível industrial, motivadas pelo aumento das necessidades de produção e da diminuição da mão-de-obra disponível (consequências diretas da guerra), o que levou ao desenvolvimento da mecanização da indústria e ao consequente aumento da complexidade dos equipamentos. Assim verificou-se também uma crescente preocupação com a prevenção da falha, dando origem ao conceito de manutenção preventiva. Os custos associados à manutenção aumentaram e começaram a tornar-se significativos quando comparados com outros custos operacionais, o que levou ao aparecimento dos primeiros sistemas de planeamento e controlo da manutenção. Estes custos associados ao preço crescente dos sistemas e ao custo do capital em tempos de guerra levou a que as organizações se preocupassem em arranjar formas de aumentar o ciclo de vida dos seus ativos. Estes pressupostos serviram de base àquela que foi considerada como a 2ª geração da manutenção [3].

A 3ª geração (que terminou em meados dos anos 2000) pode ser considerada como sendo coincidente com a 3ª revolução industrial, ou seja, com o aparecimento da produção e do fabrico digitais, da internet, do computador pessoal e da personalização (customização) em massa. Todas estas alterações na indústria trouxeram novas exigências à manutenção, bem como maior disponibilidade e fiabilidade dos equipamentos. Foi inserida neste contexto que a utilização da metodologia RCM se generalizou e se introduziram as primeiras normas internacionais (referidas mais à frente no próximo subcapítulo), tornando-se rapidamente um dos alicerces desta 3ª geração da manutenção [3].

Por fim a geração atual, a chamada 4ª geração, encontra-se em sintonia com os desafios apresentados pela 4ª revolução industrial. Este é o tempo da “Internet of Things”, das “Smart Factories”, do “Big Data” e da inteligência artificial, que tem vindo a quebrar barreiras e a alterar profundamente a indústria tal como a conhecíamos, e espera-se que consiga melhorar a produtividade, a segurança, a fiabilidade e a qualidade da produção. Todas estas mudanças, naturalmente representam novos desafios para a manutenção, que se afigura como um elemento chave nas organizações atuais, com as suas filosofias de produção muito dependentes da sua capacidade produtiva (como o “just-in-time”) e os seus equipamentos altamente complexos (elevada mecanização e automatização da produção) e numerosos. É possível concluir que esta 4ª geração tem como grandes objetivos suprimir todas as falhas, garantir que os equipamentos cumprem os seus requisitos de funcionamento ao longo de toda a sua vida útil, desenvolver estratégias de gestão do risco (seja dos ativos, seja das organizações como um todo) e desenvolver estratégias de manutenção preventiva e preditiva capazes de contribuir para o cumprimento de todos estes objetivos [3].

Os grandes desafios da atualidade para quem trabalha na área da gestão da manutenção passam por conseguir selecionar as tarefas mais adequadas a cada equipamento e situação (o que se pode tornar complicado devido ao desenvolvimento tecnológico que originou um grande número de novas técnicas e procedimentos), saber lidar com o modo de falha em questão, encontrar a solução com menor custo associado, contribuir para alcançar os objetivos da organização em que se insere sem descorar as responsabilidades sociais e corporativas, conseguir perceber de que forma a globalização pode afetar os resultados do seu trabalho e também conseguir tirar proveito da grande quantidade de informação disponível atualmente [3].

## **2.2 Adequação da metodologia de manutenção centrada na fiabilidade**

A metodologia RCM tem a sua origem na indústria da aviação comercial e surgiu da necessidade de aumentar a fiabilidade das aeronaves e diminuir os custos associados às suas ações de manutenção. Desta forma, em 1960, e socorrendo-se da informação disponível acerca das falhas da já ampla frota de aviões existente nos Estados Unidos, a indústria aeronáutica Americana desenvolveu um processo abrangente e exaustivo para selecionar quais as ações de manutenção mais adequadas para manter as aeronaves em condições de operar [2].

Posteriormente em 1978, Nowlan e Howard Heap da United Airlines, prepararam um relatório para o Departamento de Defesa dos Estados Unidos [4] onde foi utilizada pela primeira vez a designação de RCM, e que serviu de base para a formulação da estratégia de manutenção denominada de MSG-3 [5], que ainda hoje é utilizada por grande parte da indústria da aviação comercial para desenvolver e refinar os programas de manutenção [2]. O processo RCM tal como foi descrito por Nowlan e Heap foi também adotado por outras indústrias e rapidamente se estendeu a outras áreas fora da aviação, uma vez que cedo se percebeu que não existia à data (década de 1980) nenhuma outra técnica comparável, que permitisse obter os resultados que a RCM permitia (identificar as ações de manutenção críticas indispensáveis, para preservar as funcionalidades dos sistemas físicos, mantendo-os em condições de operar e minimizando os custos associados às ações de manutenção programada) [6].

Desde 1978, surgiram diversas versões do trabalho de Nowlan e Heap, às quais foi dado também o nome de RCM, no entanto, e apesar de algumas destas versões apresentarem aperfeiçoamentos e otimizações do processo original muitas outras surgiram, menos rigorosas e com tentativas de agilizar alguns dos passos do procedimento original, que se viriam a revelar imprecisas e com resultados diferentes de uma “verdadeira” metodologia RCM. Desta forma, e de maneira a obter um procedimento credível e que pudesse ser utilizado sem equívocos surgiu a necessidade de se normalizar o processo de aplicação da metodologia RCM, aparecendo em 1999 a primeira norma relacionada com o tema, a SAE JA1011 [6] e o guia associado SAE JA1012 [7] que orientaram diversas organizações na implementação da RCM, conferindo-lhe a tão desejada credibilidade. Um dos trabalhos mais notáveis da área foi, como já referido anteriormente, a metodologia proposta por John Moubray (o RCM 2) que se viria a tornar um trabalho de referência inclusive na definição das normas anteriores e amplamente utilizado por várias organizações em diversas áreas da indústria [8].

A metodologia de manutenção centrada na fiabilidade permite desenvolver e otimizar programas de manutenção para sistemas físicos, e quando corretamente aplicada permite aumentar a sua fiabilidade, o que resulta numa série de outros resultados positivos como a redução do tempo de inoperacionalidade, a diminuição dos custos associados, o aumento da segurança e da produtividade. Permite ainda obter programas de manutenção com uma quantidade de trabalho programado muito mais baixo do que os métodos tradicionais e quando utilizada para a revisão de programas de manutenção já existentes permite obter uma diminuição da quantidade de manutenções programadas, normalmente em valores da ordem dos 40% a 70% [2].

Os resultados que a RCM consegue alcançar numa organização quando aplicado da forma adequada, podem ser resumidos da seguinte forma [2]:

- Maior integridade ambiental e segurança (pois considera as implicações ambientais e de segurança dos modos de falha nos efeitos que estes têm na operação do ativo);
- Melhor desempenho operacional (fornece regras para selecionar as ações de manutenção mais adequadas e que mais valor acrescentam em cada caso);
- Maior custo-benefício da manutenção (o foco da RCM são as atividades de manutenção com maior repercussão na capacidade operacional do ativo, ou seja, o dinheiro da manutenção é gasto onde é mais preciso e tem maior efeito);
- Uma base de dados completa (a análise RCM permite obter um conjunto de informação relevante sobre as principais necessidades de manutenção dos equipamentos);
- Maior motivação das pessoas (em especial das envolvidas na análise RCM);
- Melhor trabalho de equipa;
- Maior vida útil de sistemas de elevado custo.

Uma das principais características da RCM é fornecer uma abordagem passo-a-passo, para ter consideração todos os pontos acima descritos e para tomar como parte integrante do processo todas as pessoas que têm contacto com o ativo em questão (operadores, equipa de manutenção, etc.) [3].

Existem atualmente várias metodologias relacionadas com a manutenção, que poderiam ter sido utilizadas nesta dissertação. A metodologia RBI (“Risk-Based Inspection”) permite efetuar uma avaliação sistemática da criticidade de equipamentos estáticos e a determinação de métodos apropriados de monitorização da condição, sendo, no entanto, muito focada no processamento de mecanismos de deterioração relacionados com hidrocarbonetos (corrosão, características de condutas e reservatórios sob pressão, etc.). Revela algumas fragilidades na determinação dos tempos despendidos nas inspeções/monitorização da condição e na determinação de estratégias alternativas de gestão do risco (um dos pontos fortes da RCM). Por sua vez, a metodologia TPM (“Total Productive Maintenance”) caracteriza-se por dar primazia aos detalhes, à responsabilidade partilhada com os operadores (considerando-os primeiros responsáveis pela manutenção, o que permite poupar tempo e tarefas de manutenção) e por encorajar uma visão holística da eficácia global do equipamento. Contudo, apresenta fragilidades ao nível da determinação das tarefas de manutenção necessárias, na avaliação do risco e na avaliação da esperança de vida dos equipamentos. Também a “Root Cause Analysis” poderia ter sido utilizada. Esta metodologia foca-se na determinação das causas das falhas, sendo também ela pouco ou nada dirigida para a formulação de ações de mitigação de risco adequadas, o que a torna mais adequada para análises de melhoria contínua.

Tendo em consideração tudo o que foi anteriormente descrito, é possível concluir que a RCM é uma metodologia que se adequa aos objetivos que se pretendem alcançar com este trabalho, por diversas razões. Em primeiro lugar porque o sistema de armas Pandur II tem um grande valor para o Exército no contexto atual em que se insere, por ser um equipamento moderno, versátil e amplamente utilizado no território nacional e em Missões além-fronteiras. Por ser um equipamento recente, o conhecimento que se possui do seu funcionamento e comportamento em serviço não é ainda generalizado, o que faz com que a análise funcional e o estudo dos modos de falha que a metodologia RCM pressupõe se constituam como uma mais valia informativa para todos os que contactam com este sistema de armas, permitindo também perceber quais as suas potencialidades e pontos fracos.

Em segundo lugar, segundo os dados disponíveis verifica-se, que este é um equipamento que apresenta uma disponibilidade inferior ao desejado pelo Exército, havendo, portanto, o objetivo de aumentar a disponibilidade de forma a não colocar em causa as missões em que se encontra envolvido. Assim, a RCM afigura-se como uma alternativa de confiança para efetuar a reformulação do plano de manutenção atual das Pandur, pois foca-se na fiabilidade do equipamento, permitindo o conseqüente aumento da sua disponibilidade.

### **2.3 Comparação de Metodologias RCM2 versus RCM3**

A RCM2 assumiu-se como uma das principais metodologias de aplicação do processo de manutenção centrada na fiabilidade, tendo sido aceite e reconhecida no meio industrial e aplicado às mais diversas áreas. No entanto, e apesar de se afigurar como um processo bastante completo, para acompanhar as

necessidades e os desafios atuais que as organizações enfrentam surgiu a necessidade de alterar e desenvolver a metodologia RCM2, tendo então surgido a nova metodologia RCM3.

Para quem esteja familiarizado com a RCM2, as alterações trazidas por esta nova RCM3 podem parecer pequenas ou até mesmo insignificantes, no entanto afiguram-se como um afastamento significativo em relação ao processo RCM definido pela norma SAE JA1011, apresentando benefícios significativos e uma mudança na forma como é interpretado e implementado. A RCM3 cria uma vertente para a definição das estratégias de manutenção e gestão do risco. A gestão da fiabilidade tornou-se altamente especializada e com a introdução de novas normas e tecnologia, a RCM3 coloca a fiabilidade no topo dos sistemas de gestão da organização e encontra-se totalmente integrado com outras abordagens baseadas no risco como a “Risk-based Inspection” (RBI) e a “Root Cause Failure Analysis” (RCFA) [3].

A RCM3 é à semelhança da RCM2 aplicável a todo o tipo de equipamentos e instalações e ambos possuem um âmbito de aplicação abrangente a qualquer tipo de processo. No entanto, a RCM3 é uma metodologia que se foca primariamente em identificar quais os riscos relacionados com as falhas, de seguida em quantificar os riscos e por fim em identificar a melhor maneira de lidar com esses mesmos riscos (é relevante notar que a metodologia assume que a combinação de uma falha, do efeito da falha e das consequências associadas implicam um risco específico) [3]. Ao considerar risco físico (ambiental e de segurança) e risco económico, o processo está a lidar com o risco como um todo, o que permite mitigar o risco do ativo falhar a um nível que é perfeitamente tolerável pela organização onde se insere.[8].

A Aladon<sup>1</sup>, detentora das marcas registadas das duas metodologias, resume as grandes diferenças entre RCM3 e RCM2 como sendo as seguintes [8]:

- “RCM3 excede as normas SAE e amplia a capacidade da RCM2 de se alinhar com os Sistemas de Gestão ISO mais recentes e internacionalmente aceites (ISO 55000 [9] e ISO 31000 [10])”.
- “A RCM3 está totalmente integrada com outros Sistemas de Gestão de Riscos Empresariais”;
- “A RCM3 não é somente mais uma iniciativa, afigurando-se como um processo de gestão de riscos de negócios, com potencial para se tornar o sistema de gestão mais importante para melhorar a segurança dos processos e a integridade dos ativos”;
- “A RCM3 constitui-se como a melhor resposta aos desafios e expectativas apresentados pela 4ª geração da manutenção”.

Na tabela que se encontra no anexo I, é feita uma comparação mais detalhada das duas metodologias no que aos seus pontos chave diz respeito.

---

<sup>1</sup> A Aladon é uma empresa norte Americana especializada em consultoria na área da manutenção e da gestão do risco, para a qual trabalharam John Moubray e Marius Basson (autores das obras de referência que definem as metodologias RCM2 e RCM3, respetivamente) e que foi a grande impulsionadora do desenvolvimento destas metodologias e da sua implementação.

## **2.4 Princípios da Manutenção centrada na fiabilidade (RCM3)**

Pretende-se neste subcapítulo fazer uma descrição dos princípios orientadores que definem as metodologias de manutenção centrada na fiabilidade, com ênfase na metodologia RCM3 (adotada nesta dissertação). São de seguida apresentadas a definição da metodologia RCM, os objetivos da sua utilização e os seus critérios de aplicação.

### **2.4.1 Definição da RCM**

Tal como foi anteriormente referido neste capítulo existem normas que definem as metodologias de manutenção centrada na fiabilidade e a sua correta aplicação. Neste sentido a primeira norma que surgiu sobre o tema, (como também já foi referido) a norma SAE JA1011 (em 1999), define que “RCM é um processo específico, utilizado para identificar as políticas que devem ser implementadas para gerir os modos de falha que podem causar a falha funcional de um qualquer ativo físico, num determinado contexto operacional” [6].

Alguns anos depois, em 2009, surgiu também uma norma europeia relacionada com a gestão da fiabilidade, e que define a aplicação da manutenção centrada na fiabilidade. Essa norma, a BS EN 60300-3-11 refere, por sua vez, que “RCM é um método para identificar e selecionar políticas de gestão de falha, de maneira a alcançar de forma eficiente e eficaz a desejada segurança, disponibilidade e economia de operação” [11].

John Moubray (também ele já citado como um dos autores de referência da área) definiu a manutenção centrada na fiabilidade como sendo “um processo utilizado para determinar o que deve ser feito de maneira a garantir que um determinado ativo físico continua a fazer o que os seus utilizadores pretendem que ele faça no seu contexto operacional atual” [2].

Por fim, resta apenas definir em concreto a RCM3, sendo que o seu autor, Marius Basson, a assume como sendo “um processo usado para definir o mínimo número necessário e seguro de ações de manutenção, engenharia e outras estratégias de gestão do risco de maneira a garantir um nível tolerável de segurança, integridade ambiental e capacidade operacional rentável, conforme especificado pelas normas de gestão de ativos da organização em que se insere” [3].

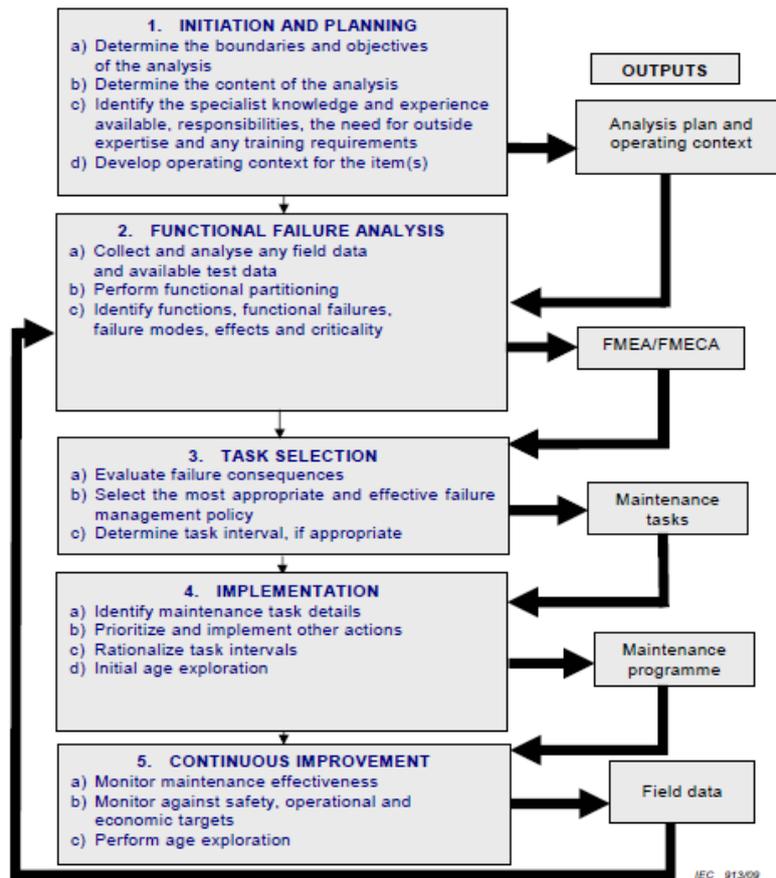
### **2.4.2 Objetivos da RCM**

A realização de uma análise com base na metodologia RCM pressupõe sempre que sejam efetuados os seguintes 5 passos, que descrevem de forma geral o que é a implementação do processo [11]:

1. Instauração e planeamento da RCM;
2. Análise de falhas funcionais;
3. Seleção de tarefas;
4. Implementação;
5. Melhoria contínua.

Estes 5 passos representam de uma maneira genérica uma síntese da sequência lógica de trabalho que deve ser efetuada durante a implementação de uma análise RCM, e mostram que este tipo de análise representa um programa abrangente, que não aborda apenas o processo de análise do ativo, mas também as atividades preliminares e de acompanhamento necessárias para garantir que são alcançados os resultados desejados [11].

A Figura 2 apresenta uma visão geral do processo, permitindo perceber quais as suas etapas essenciais e os resultados esperados em cada uma delas.



**Figura 2:** Visão geral do processo RCM [11]

Os objetivos de um programa de manutenção preventiva resumem-se de uma maneira geral aos seguintes [11]:

- Manter a função de um item no nível de desempenho necessário dentro do contexto operacional em que se encontra inserido;
- Obter as informações necessárias para a melhoria do projeto ou caso necessário introdução de redundância para os itens com fiabilidade que se revele inadequada;
- Alcançar estes objetivos minimizando os custos de manutenção e os custos de falhas residuais;
- Obter a informação necessária para avaliar a implementação do programa de manutenção em curso, de maneira a poder avaliar a eficácia das tarefas de manutenção definidas;

- A monitorização de componentes críticos, dispendiosos ou específicos de segurança, reveste-se de especial importância para o desenvolvimento e avaliação do programa de manutenção.

Marius Basson [3] refere que “estes objetivos reconhecem que os programas de manutenção não podem corrigir deficiências de projeto nos níveis de segurança e fiabilidade dos equipamentos e estruturas. O programa de manutenção só pode minimizar a deterioração e restaurar o item aos seus níveis operacionais de projeto. Se os níveis intrínsecos de fiabilidade forem considerados insatisfatórios, modificações no projeto, mudanças operacionais ou de procedimentos (como programas de formação) podem ser necessárias para atingir o desempenho desejado.”

Se corretamente aplicada a análise RCM3 permite obter, por sua vez, seis resultados tangíveis que se enumeram de seguida [11]:

1. Contexto operacional definido;
2. Risco inerente (associado com a operação e manutenção do ativo) definido e quantificado;
3. Calendários de manutenção para serem executados pela organização;
4. Procedimentos de operação e manutenção revistos (para o ativo em questão);
5. Risco revisto ou residual após implementação das estratégias de gestão de risco;
6. Propostas de “mudanças únicas” (relacionadas com alterações de projeto do ativo ou com o modo de operação).

Para além destes resultados tangíveis, permite também estimular o trabalho em equipa e aumentar o conhecimento sobre o ativo, tal como tinha sido referido no subcapítulo 2.2 deste trabalho.

## **2.5 Descrição da metodologia RCM**

Neste subcapítulo efetua-se uma descrição mais detalhada das etapas e das tarefas a realizar durante uma análise RCM, com o objetivo de complementar o que já foi anteriormente referido neste documento e perceber de forma detalhada as particularidades deste processo.

### **2.5.1 Planeamento e preparação da RCM**

Para que a análise RCM seja bem-sucedida é fundamental que se efetue um rigoroso e metucioso planeamento do processo que se pretende implementar, considerando-se assim que a primeira fase da aplicação da metodologia RCM corresponde efetivamente ao seu planeamento e preparação. Naturalmente que a primeira coisa a fazer é selecionar o ativo (ou parte dele) ao qual se vai aplicar a análise (de acordo com os critérios mencionados em 2.4.3) e definir claramente o contexto operacional em que este se insere. Depois de devidamente selecionado o equipamento ao qual se vai aplicar o processo, os elementos chave a ser considerados na fase de planeamento resumem-se da seguinte forma [11]:

- Definir concretamente o alcance e as fronteiras da análise;

- Definir e sempre que possível quantificar os objetivos da análise (estado atual e estado final desejado), bem como mecanismos para os medir;
- Prever o tempo necessário para analisar o equipamento;
- Identificar o responsável pelo processo e o facilitador/facilitadores;
- Identificar os participantes;
- Planear formação para os participantes e facilitadores;
- Planear auditorias de gestão das recomendações do RCM;
- Planear a implementação das recomendações que surgirem do processo (tarefas de manutenção alterações de projeto, alterações aos procedimentos operacionais).

É importante ainda salientar que uma análise RCM requer conhecimento especializado sobre o equipamento e o seu funcionamento (contexto operacional), do qual se destaca [11]:

- Conhecimento e experiência com o processo RCM;
- Conhecimento específico sobre o equipamento, o seu contexto operacional, a sua condição e conhecimento técnico sobre a área em que este se insere;
- Conhecer e compreender os modos de falha e os seus efeitos, as técnicas de manutenção e as ferramentas disponíveis;
- Conhecimento específico sobre os constrangimentos que possam existir (legislação ambiental e de segurança) e sobre os custos associados ao processo.

Outro aspeto importante a ter em consideração relaciona-se com as fontes da informação, sendo que para uma análise RCM devem ser consideradas sempre que disponíveis dados existentes sobre as falhas do equipamento, informação proveniente do fabricante, manuais técnicos, experiência dos técnicos da manutenção e dos operadores, especialistas na área, legislação existente sobre o tema e de uma maneira geral informação existente na literatura [3].

### **2.5.2 Introdução às 8 questões do RCM3**

Como já foi visto, o RCM3 ampliou a metodologia RCM de maneira a incluir o contexto operacional como sendo o inegável primeiro passo do processo e incluir o tratamento do risco físico e económico, garantindo desta forma que não só responde às questões essenciais definidas pelas normas SAE como vai mais além, alargando o seu âmbito de aplicação. Desta forma, o processo RCM3 exige que sejam respondidas 8 questões (que se apresentam de seguida) para equipamento ou sistema em análise [7],[3]:

#### **1. *Quais são as condições operacionais?***

A norma SAE JA1012 define o contexto operacional como sendo “As circunstâncias nas quais se espera que um ativo físico ou um sistema operem” [3].

Na prática pretende-se perceber e definir claramente como é que o ativo em estudo está a ser utilizado pela organização. Este é um aspeto importante na medida em que equipamentos semelhantes podem funcionar de maneira diferente se o seu contexto operacional for diferente, o que pode resultar também em programas de manutenção radicalmente diferentes, daí a importância de se proceder à definição do contexto operacional do ativo [3].

2. *Quais são as funções e os padrões de desempenho associados do ativo no seu contexto operacional atual?*

Para que seja possível implementar um processo que se pretende que estabeleça as ações necessárias para que um ativo físico continue a fazer o que os seus utilizadores pretendem que faça é necessário, naturalmente, que se determine de forma concreta o que os seus utilizadores pretendem que o ativo faça. Para além disto, é também necessário garantir que o ativo em estudo tem capacidade intrínseca (inicial) de operar da maneira pretendida [3].

As funções do ativo dividem-se em duas categorias, as funções primárias e as funções secundárias. As funções primárias resumem o motivo principal pelo qual o ativo foi adquirido e abrangem questões como velocidade, produção, capacidade de carga/armazenamento, produto e apoio ao cliente. Por sua vez as funções secundárias relacionam-se com a capacidade do ativo em efetuar mais do que apenas o definido pelas suas funções primárias, e integram questões como a segurança, limpeza, integridade estrutural, conformidade com regulações ambientais, etc. [3].

3. *De que formas o ativo falha em cumprir as suas funções?*

Esta é uma pergunta que se refere à identificação dos estados de falha, que no universo RCM são também conhecidos como falhas funcionais, uma vez que ocorrem quando um ativo é incapaz de cumprir uma função ou um padrão de desempenho considerado aceitável para o utilizador. O processo RCM3 efetua esta análise em dois níveis, primeiro identificando quais as circunstâncias que correspondem a um estado de falha e segundo questionando quais são os acontecimentos que podem originar esse estado de falha.

Esta definição engloba também o conceito de falha parcial, estado em que o ativo ainda funciona, mas com um desempenho que não é suficiente para cumprir os padrões aceitáveis para o utilizador[3].

4. *O que é que causa cada estado de falha (modos de falha)?*

Após a caracterização dos estados de falha, é necessário identificar todos os eventos prováveis de acontecer e causar cada um desses estados de falha identificados, eventos esses aos quais se dá o nome de modos de falha. Modos de falha prováveis de acontecer incluem aqueles que efetivamente já aconteceram (registos de avarias ocorridas) para aquele equipamento ou outro similar no mesmo contexto operacional, falhas que já estão a ser contempladas nos programas de manutenção preventiva existentes e falhas que não ocorreram ainda, mas que se considera que existe a possibilidade de virem a ocorrer no contexto operacional considerado. Modos de falha pouco prováveis, mas com consequências graves devem também ser listados, para serem considerados posteriormente na análise. Uma lista de modos de falha deve incluir os modos “tradicionais” como o desgaste, corrosão e

deterioração, mas também falhas causadas por erros humanos e erros de projeto, de maneira a que todos os modos de falha com probabilidade de acontecer possam ser considerados[3].

5. *O que acontece quando cada falha ocorre?*

A resposta a esta questão tem como objetivo reportar e descrever o que acontece quando cada modo de falha ocorre, ou seja, quais são os efeitos das falhas e qual é a severidade das suas consequências. Esta descrição deve incluir toda a informação necessária para a correta avaliação das consequências da falha, nomeadamente informação acerca de quando é mais provável que a falha ocorra, com que frequência iria ocorrer se nada fosse feito para o evitar, evidências de que a falha ocorreu, de que forma afeta a segurança, a produção e o meio ambiente, quais os custos associados e o que pode ser feito para reparar a falha [3].

6. *Quais os riscos associados a cada falha (quantificação do risco inerente)?*

Diferentes modos de falha podem ter diferentes consequências e repercussões na organização, uns podem afetar a produção, outros a segurança, mas independentemente da área afetada, é necessário ter a consciência que a ocorrência de uma falha afeta o normal funcionamento da organização, e demora tempo e custa dinheiro a reparar. Uma vantagem do RCM3 é que reconhece que o risco associado às falhas é de sobremaneira mais importante do que as suas características técnicas, assumindo até que a única razão para se efetuarem ações de manutenção preventiva não é evitar a falha, é sim evitar ou diminuir o risco a ela associado [3].

A norma ISO 31000 [10] define o risco como sendo “o efeito da incerteza nos objetivos”, sendo que o efeito pode ser um desvio positivo ou negativo em relação ao que é esperado. O risco pode ser entendido como uma combinação das consequências de um determinado evento com a probabilidade de este vir a acontecer.

$$\text{Risco} = \text{Severidade das consequências} \times \text{Probabilidade de ocorrência} \quad (2.1)$$

O RCM 3 classifica os riscos associados a falhas em cinco grupos, nomeadamente em Riscos físicos ocultos, Riscos económicos ocultos, Riscos físicos evidentes (ambientais e de segurança), Riscos económicos evidentes (operacionais) e Riscos toleráveis evidentes (não operacionais) [3].

7. *O que deve ser feito para reduzir riscos intoleráveis a um nível tolerável (utilização de estratégias de gestão do risco proativas)?*

Os riscos intoleráveis são riscos que devem ser eliminados ou mitigados pela organização, devido às consequências físicas e económicas que acarretam. Quando as falhas apresentam consequências significativas é necessário tomar medidas de ação proativas, que o RCM3 classifica em seis categorias diferentes [3].

- Tarefas agendadas sob condição: são técnicas que se baseiam no pressuposto de que algumas falhas apresentam sinais de que vão ocorrer (condições físicas que indicam que a falha pode vir a ocorrer). Detetados estes sinais são tomadas as ações necessárias para que as falhas potenciais não se tornem em estados de falha efetivos. Incluem tarefas de

manutenção preditiva, tarefas de manutenção baseadas na condição e tarefas de monitorização da condição;

- Tarefas de revisão programadas: geralmente conhecidas como manutenção preventiva. A revisão programada implica a reconstrução de um componente ou a revisão do sistema ao fim de um determinado período em serviço, independentemente da sua condição;
  - Tarefas de alienação programada: a alienação programada segue a mesma linha de raciocínio da revisão programada, mas implica a alienação (como o próprio nome indica) do ativo;
  - Combinação de tarefas: esta estratégia apenas é selecionada quando uma falha ou uma combinação de falhas têm implicações relacionadas com risco físico e se considera que a implementação de uma única tarefa não é suficiente para a sua resolução;
  - Tarefas de deteção de falhas e verificações funcionais: tarefas de deteção de falhas implicam verificar periodicamente funções ocultas para determinar se estas falharam. As verificações funcionais implicam a verificação dos dispositivos de proteção que falham de forma evidente e cujo risco associado à falha é considerado intolerável;
  - Alterações pontuais: implicam alterações pontuais à capacidade incorporada de um ativo ou sistema como alterações de “hardware” ou alterações ao nível dos procedimentos de operação ou manutenção.
8. *O que pode ser feito para reduzir ou gerir os riscos toleráveis de uma maneira viável economicamente?*

O RCM3 reconhece três grupos de tarefas a implementar nesta categoria [3]:

- Ações de manutenção não programada: as tarefas de manutenção são efetuadas após a falha ocorrer.
- Otimização de sobressalentes: possui o objetivo de melhorar a resposta em casos de manutenção não programada, reduzindo o tempo de paragem do equipamento.
- Outros.

### **2.5.3 Failure Modes Effects and Criticality Analysis (FMECA)**

A resposta às questões 3, 4, 5 e 6 apresentadas no subcapítulo anterior, é conseguida através de uma análise na qual se identificam os possíveis modos de falha, os seus efeitos e a criticidade associada para cada um dos componentes em estudo. Este tipo de análise é designado por análise FMECA, e surgiu na década de 50 do século XX, tendo sido desenvolvida por engenheiros do Exército Norte Americano, que criaram o procedimento MIL-P-1629, e rapidamente se tornou na primeira técnica sistematizada para análise de fiabilidade [12].

A generalização da utilização deste procedimento na indústria, levou ao aparecimento de diversas normas e diretrizes orientadoras, que definem os princípios de aplicação desta técnica, das quais se destacam a norma militar MIL-STD-1629 [13] (a primeira norma publicada sobre o tema), a SAE ARP

5580 [14], a IEC 60812 [15] e a mais recente, SAE J1739 [16]. A análise FMECA, tem como principal objetivo identificar quais os equipamentos com maior probabilidade de falha (maior risco associado) de maneira a evitar que essas mesmas falhas ocorram, e constitui-se como uma das principais ferramentas analíticas da metodologia RCM. Esta análise é constituída por diversas fases [12]:

- **Definição do sistema:** Definição do sistema em estudo e das suas fronteiras, bem como das suas funções e contexto operacional (inclui a mesma informação que uma análise RCM). Implica também a recolha de toda a documentação e informação de interesse para a análise [12].
- **Análise da Estrutura do Sistema:** Nesta fase, é efetuada a divisão do sistema em vários subsistemas, consoante o objetivo, e é definido o nível de detalhe pretendido para a análise. O sistema deve ser representado de forma hierárquica, através de árvores de falha ou diagramas de blocos funcionais, por exemplo. É recomendado que a análise se efetue no nível hierárquico do sistema adequado, pois análises efetuadas em níveis muito baixos podem-se tornar demasiado complexas e desnecessárias, enquanto que análises efetuadas em níveis hierárquicos demasiado altos podem ser demasiado supérfluas [12].
- **Análise de Modos de falha e Efeitos:** Nesta etapa são identificadas todas as funções dos componentes que constituem o sistema em análise e é averiguado se existem falhas com efeitos considerados inaceitáveis para o sistema. Os componentes com falhas com consequências inaceitáveis devem ser analisados com maior detalhe (para os demais não é necessário), utilizando para o efeito as fichas/plano da metodologia FMECA. O modelo de ficha a utilizar é variável e pode ser adaptado consoante as necessidades. Ao preencher estas fichas, é reunida a informação relativa à função do componente, os possíveis modos de falha que este pode apresentar e as diversas possibilidades para a sua deteção (sinais de aviso, alarmes, etc.). Quanto aos efeitos (ou consequências) que os modos de falha podem ter sobre o sistema, devem ser descritos de forma detalhada, e abordando aspetos relativos a segurança, ambiente, consequências económicas, etc. [12].
- **Avaliação de Risco FMECA:** O Risco associado a cada modo de falha identificado deve ser calculado recorrendo tipicamente a dois métodos, o método RPN (*Risk Priority Number*) ou a análise de criticidade [12]. O RPN é obtido através do produto da classificação da severidade (S), da probabilidade de ocorrência (O) e da detetabilidade (D) dos modos de falha [17].

$$RPN = S \times O \times D \quad (2.2)$$

A Severidade descreve o efeito potencial de falha mais grave para o sistema e a detetabilidade refere-se à probabilidade da falha não ser detetada antes da utilização do sistema em estudo pelo cliente. A classificação e os valores atribuídos aos fatores S, O e D variam de acordo com a norma utilizada, bem como a consequente interpretação do valor de RPN [12], [17].



## 2.6 Fiabilidade

A fiabilidade é uma característica que, segundo a norma EN 13306:2017, se pode definir como sendo “a capacidade que um bem apresenta para cumprir uma determinada função solicitada, em determinadas condições durante um certo intervalo de tempo” [1]. A fiabilidade de um ativo, pode ser calculada a partir do registo das suas falhas observadas, ou de um conjunto de ativos comparáveis num dado intervalo de tempo, e a sua previsão representa o nível de confiança nele depositado. É possível interpretar a fiabilidade (do ponto de vista qualitativo) como sendo a probabilidade de sucesso de um ativo para um determinado intervalo de tempo  $[0, t]$ , sendo complementar da sua probabilidade de falha (acumulada) [1].

Quando se pretende efetuar uma previsão de fiabilidade, o recurso a modelos probabilísticos (que consideram  $t$  como uma variável aleatória) afigura-se como a única alternativa realista, isto porque, itens/componentes idênticos sujeitos a esforços e condições idênticas, vão ter tempos diferentes de falha, ou seja, não vão falhar todos ao mesmo tempo (para o mesmo valor de  $t$ ), o que inviabiliza a utilização de modelos determinísticos [18]. É importante ter em conta os principais conceitos que permitem quantificar a fiabilidade de um ativo, nomeadamente a função fiabilidade  $R(t)$ , a taxa de falha  $\lambda(t)$  e o “Mean Time Between Failure” *MTBF* (ou tempo médio entre falhas) [12]. Considerando que:

- $N_s$ : número de ativos/componentes que não falharam no momento  $t$ ;
- $N_i$ : número de ativos/componentes iguais testados;

Para um determinado momento  $t$ , a probabilidade de sobrevivência de certo ativo/componente é definida por:

$$R(t) = \frac{N_s(t)}{N_i} \quad (2.3)$$

Analogamente (e tendo em conta, como já referido, que a fiabilidade e a probabilidade de falha são complementares) a função fiabilidade de um ativo (que pode ser um sistema ou um componente) pode ser matematicamente descrita como:

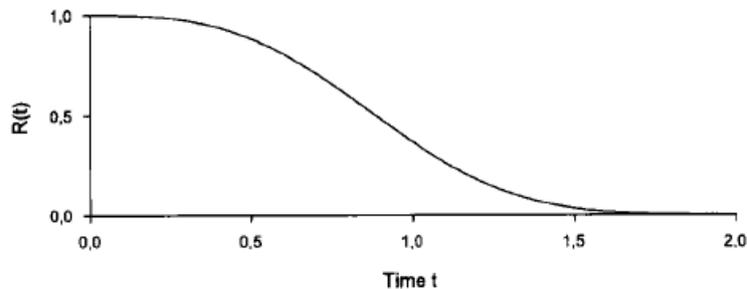
$$R(t) = 1 - \Pr(T \leq t) = 1 - F(t) \quad (2.4)$$

Em que  $F(t)$  representa a probabilidade de falha (também chamada de função de distribuição acumulada) e  $T$  representa a vida do ativo (isto é, o tempo desde que é posto em serviço até que se verifica a primeira falha).  $T$  pode ser definido em tempo de calendário, ou através de outros indicadores indiretos de tempo, como número de quilómetros percorridos, número de ciclos executados, número de Horas de motor efetuadas, etc. Desta forma, também é possível definir  $R(t)$  como:

$$R(t) = 1 - \int_0^t f(t)dt = \int_t^{\infty} f(t)dt \quad (2.5)$$

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} \quad (2.6)$$

Neste caso, recorreu-se à função densidade de probabilidade (ou função de mortalidade)  $f(t)$  (que representa a percentagem de ativos em falha por unidade de tempo) para definir a função de fiabilidade [18],[12].



**Figura 5:** Função fiabilidade [12]

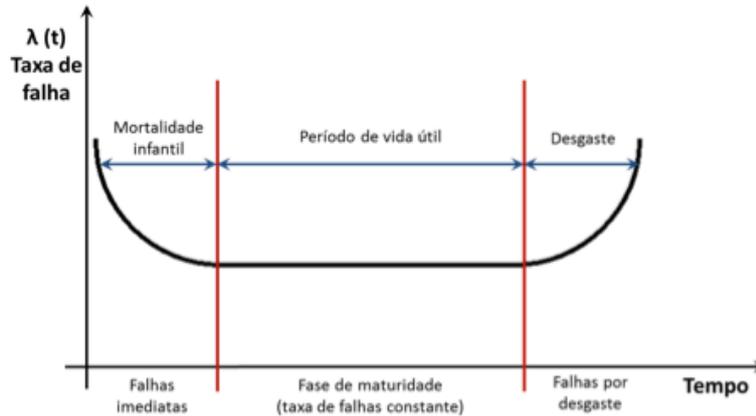
Tendo em consideração a origem dos dados de falha, é possível dividir a fiabilidade em fiabilidade inerente (também designada por intrínseca ou à saída de fábrica) e fiabilidade extrínseca (ou demonstrada). A primeira é obtida a partir de ensaios normalizados, realizados pelo fabricante, que não refletem as condições reais de serviço a que o ativo está sujeito, e resulta da qualidade intrínseca do projeto. A fiabilidade extrínseca (também designada operacional), por sua vez, é obtida através de dados de falhas operacionais, registados durante a utilização do ativo em condições de serviço, o que a torna de grande importância por ser o reflexo do ativo em condições reais de aplicação [19]. Outro dos parâmetros referidos com interesse para o estudo da fiabilidade é a taxa de falha  $\lambda(t)$ , que pode ser definida matematicamente como:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (2.7)$$

Ou pode de forma análoga ser calculada através da expressão:

$$\lambda(t) = \frac{\text{Número de falhas registadas}}{\text{Tempo total de operação}} = \frac{N_f}{T} \quad (2.8)$$

A representação gráfica da função taxa de falha encontra-se na Figura 6, e é conhecida por curva da banheira, devido à sua forma característica. Nesta curva encontra-se representado o padrão de falha típico, e é possível distinguir três zonas, correspondentes a três fases diferentes da vida de um ativo. A primeira fase, a que se dá o nome de mortalidade infantil, é caracterizada pela existência de uma taxa de falha elevada com tendência para decrescer mais ou menos rapidamente. Este comportamento é explicado pela presença de componentes inadequados, de imperfeições de fabrico, erros de projeto e defeitos de instalação [12],[20].



**Figura 6:** Representação gráfica da taxa de falha - curva da banheira, adaptado de [21]

Durante o período de vida útil, a taxa de falha tende a estabilizar e a manter-se constante, verificando-se a existência de falhas aleatórias relacionadas com as condições de uso do ativo. Esta fase corresponde ao período mais significativo da vida do ativo e termina no período correspondente à idade de vida nominal. Por fim o período de desgaste caracteriza-se por um aumento progressivo da taxa de falhas, originado essencialmente pela idade do ativo e pelo respetivo desgaste associado do material. O grande interesse do estudo desta fase reside no facto de se tentar determinar o seu início, de maneira a tentar evitar que um ativo entre na fase de desgaste e prevenir as consequências que daí possam advir [12], [20].

Quanto ao *MTBF* corresponde, como já referido, ao tempo médio entre falhas e é determinado através da equação (2.9), sendo importante ressaltar que corresponde ao inverso da taxa de falha [12]:

$$MTBF = \int_0^{\infty} R(t)dt = \frac{1}{\lambda} \quad (2.9)$$

## 2.7 Dados Censurados

Quando se procede à análise dos dados de falha, muitas vezes somos confrontados com a existência de informação com pouca qualidade (pouca informação relevante ou falta de registo de dados) ou até mesmo incompleta. No que diz respeito aos dados existentes (sejam eles provenientes de ensaios ou contexto operacional real), é praticamente impossível obter todos os elementos de um sistema, o que requer que se façam estimativas e aproximações dos parâmetros da distribuição em função dos dados disponíveis.

No caso de todos os ativos/componentes serem analisados até a falha (ou seja, é conhecido o tempo de falha de todos os componentes da amostra) diz-se que os dados obtidos são dados completos. Se por sua vez, existem componentes cujo tempo de falha é desconhecido (porque não ocorreu durante o período de análise ou porque não é possível ter acesso à informação) diz-se que os dados são censurados. Pese embora a informação fornecida por este tipo de dados ser incompleta, não deve ser ignorada sob pena de não se efetuar uma correta estimativa dos parâmetros da distribuição. Os dados

censurados, podem ser divididos em três tipos: dados censurados à direita, dados censurados à esquerda e os dados censurados por intervalo [12].

### 2.7.1 Dados censurados à direita

O tempo de falha de um determinado ativo diz-se censurado à direita, caso não se conheça o seu tempo exato de falha, e se saiba apenas que é superior ao tempo final de registo de informação (quer seja o tempo de conclusão do ensaio ou o tempo limite de recolha de dados operacionais). Neste caso, apenas sabemos quando o ativo é posto em serviço, mas não quando vai falhar [22].

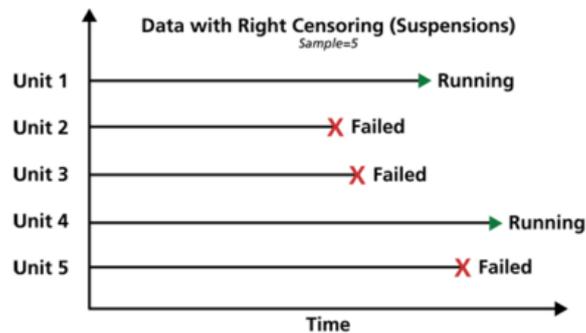


Figura 7: Dados censurados à direita [22]

Dentro desta categoria de censura à direita, ainda é possível dividir os dados em censura do Tipo 1 e censura do Tipo 2 [22]:

- Tipo 1: O registo de informação termina ao fim de um tempo pré-determinado (seja por motivos de ordem económica, tempo disponível, etc.). O tempo de observação, neste caso, é fixo e no final do registo, tal como já foi referido, apenas vai ser conhecido o tempo de vida dos ativos que falharam antes do tempo de fim de observação.
- Tipo 2: O registo de informação termina após se verificar um número pré-determinado de falhas (definido no início da análise). Todos os ativos em estudos são observados até a ocorrência do número de falhas pretendido, sendo o tempo de observação, neste caso, variável.

## 2.8 Distribuição de Weibull

Existem atualmente na literatura diversas distribuições de probabilidade que podem ser utilizadas para modelar a vida útil de um ativo, como a distribuição exponencial e a distribuição Binomial (no caso das distribuições aleatórias discretas) ou a distribuição normal e a distribuição exponencial (no caso das distribuições aleatórias contínuas). Apesar da grande variedade de modelos matemáticos aplicáveis, nesta dissertação vai abordar-se a distribuição de Weibull que pelas suas características se torna muito versátil, constituindo-se como um dos modelos mais utilizados para representar a vida de ativos em análises de fiabilidade [12],[23].

A distribuição de Weibull corresponde a uma expressão semi-empírica desenvolvida pelo sueco Ernest Weibull, em 1939, com o objetivo de modelar a dureza de certos materiais e efetuar previsões sobre a sua vida quando sujeitos a condições de fadiga. É uma distribuição adequada para ativos com vários

componentes e para casos em que a taxa de falha pode ou não ser constante, e em que se considera que a falha é causada pela mais grave imperfeição [18].

A distribuição de Weibull pode assumir várias formas, como a distribuição de três parâmetros que apresenta a seguinte função de distribuição:

$$F(t, \eta, \beta, \tau) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\tau}{\eta}\right)^\beta} \quad (2.10)$$

Os parâmetros acima mencionados  $\eta, \beta, \tau$ , designam-se respetivamente por parâmetro de escala, forma e localização, e a sua variabilidade e capacidade em assumir diversos valores conferem ao modelo uma grande versatilidade e capacidade de ajustamento a diversas formas de distribuições de probabilidade, o que permite representar qualquer fase da vida do equipamento (mortalidade infantil, vida útil ou desgaste) [23].

O modelo padrão de Weibull, corresponde a um caso particular da distribuição de três parâmetros, em que  $\tau = 0$ , ao qual se dá o nome de distribuição de Weibull de dois parâmetros e que assume a seguinte forma:

$$F(t, \eta, \beta) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (2.11)$$

O parâmetro de localização  $\eta$ , corresponde ao limite inferior do domínio  $t$  considerado, e representa a vida sem falha do ativo, isto é, o intervalo de tempo para o qual não ocorrem falhas. Assumir que este valor é zero, é equivalente a assumir que podem ocorrer falhas a qualquer altura, a partir do momento em que o ativo entra em serviço [23].

Tendo em conta que a fiabilidade é o complementar da probabilidade de falha, é possível escrever:

$$R(t) = 1 - F(t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (2.12)$$

A função densidade de probabilidade desta distribuição, é representada como:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (2.13)$$

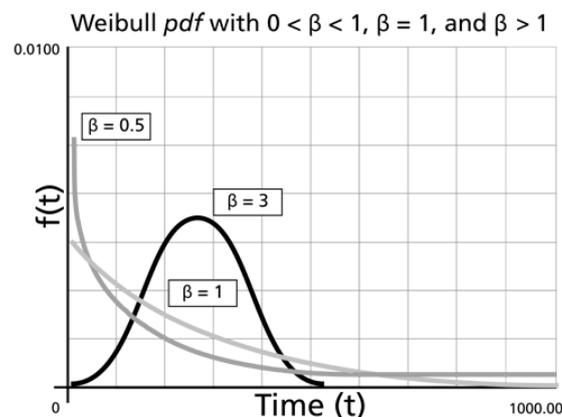
Tendo em conta as equações (2.12) e (2.13), a taxa de falha pode então ser definida, em termos de distribuição de Weibull, da seguinte forma:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \quad (2.14)$$

No que diz respeito ao parâmetro de forma  $\beta$ , é um valor adimensional, responsável pela forma da distribuição, e traduz o mecanismo de degradação do ativo, permitindo relacionar a distribuição com as fases de vida identificadas na curva da banheira (já descritas anteriormente). As variações deste valor refletem-se no comportamento da distribuição, aproximando-se, para certos valores, de outras distribuições de probabilidade utilizadas em estudos de fiabilidade [24]:

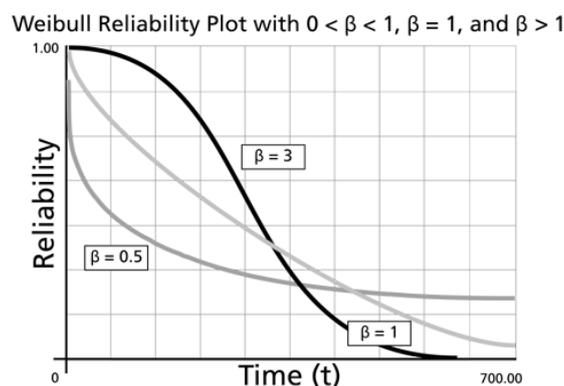
- $\beta = 1$ : a função densidade de probabilidade da distribuição de Weibull assume a forma da distribuição exponencial. Neste caso a taxa de falha é constante e dada por  $\lambda = \frac{1}{\eta}$ , o que permite representar o período de vida útil;
- $\beta < 1$ : a função densidade de probabilidade assume a forma da distribuição gama. Neste caso a taxa de falha vai ser decrescente, o que se adequa ao período de mortalidade infantil;
- $\beta > 1$ : a função densidade de probabilidade assume a forma da distribuição normal (se  $\beta = 3,5$ ) ou da distribuição log-normal (se  $\beta = 2$ ). Neste caso a taxa de falha é crescente, o que por sua vez, se adequa ao período de desgaste.

Na figura seguinte é possível verificar a variação da forma da função densidade de probabilidade da distribuição de Weibull com o parâmetro  $\beta$ .



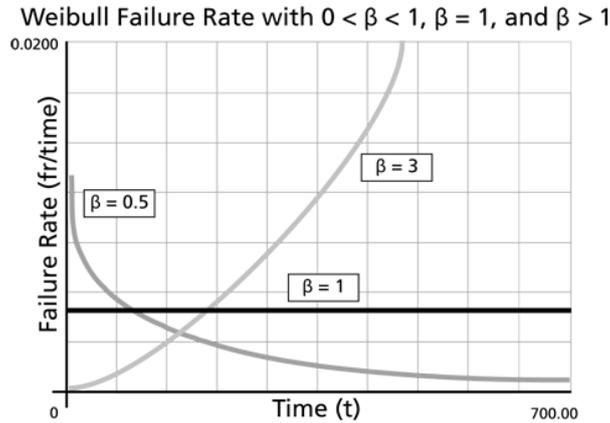
**Figura 8:** Função densidade de probabilidade acumulada para diferentes  $\beta$  [24]

Consequentemente também a fiabilidade é afetada pelo valor do parâmetro de forma da distribuição, tal como se descreve na Figura 9.



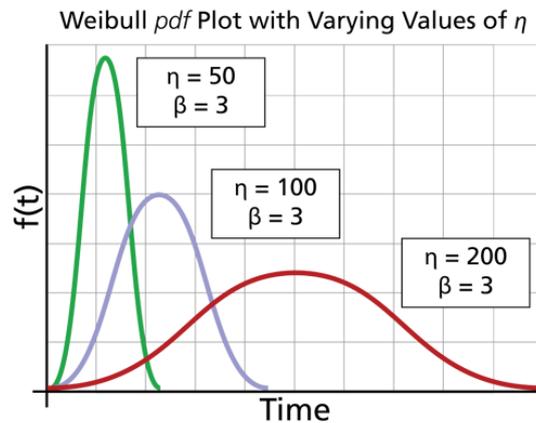
**Figura 9:** Função fiabilidade para diferentes  $\beta$  [24]

Por fim, tal como referido, também a taxa de falha é afetada pelo parâmetro de forma, refletindo o mecanismo de desgaste envolvido (e a correspondente zona da curva da banheira). Este comportamento pode ser comprovado na Figura 10.



**Figura 10:** Taxa de falha para diferentes  $\beta$  [24]

Resta apenas descrever um parâmetro da distribuição de Weibull, nomeadamente o parâmetro de escala  $\eta$ , também conhecido como vida característica, que corresponde ao intervalo tempo no qual ocorrem 63,2% das falhas. O valor deste parâmetro tem influência na distribuição, sendo que um aumento no valor de  $\eta$  (para o mesmo valor de  $\beta$ ) faz com que a curva da função densidade de probabilidade se torne mais achatada (a área de baixo da curva da função densidade de probabilidade tem um valor constante, o que faz com que o seu pico baixe com o aumento de  $\eta$ ) e se estenda para a direita. Por sua vez uma diminuição de  $\eta$ , tem um efeito contrário, levando à subida do pico da curva e ao seu encolhimento, deslocando-se para a esquerda. Ao contrário de  $\beta$ , este parâmetro apresenta as mesmas dimensões que a variável  $t$  (seja horas, quilómetros, ciclos, etc.) [24].



**Figura 11:** Função densidade de probabilidade acumulada para diferentes  $\eta$  [24]

Dos conceitos anteriormente enunciados, como sendo importantes numa análise de fiabilidade, falta ainda definir o *MTBF* para a distribuição de Weibull. Matematicamente corresponde à média da distribuição estatística, que se descreve pela seguinte equação (em que  $\Gamma$  é a função gamma):

$$MTBF = \bar{T} = \eta \Gamma\left(\frac{1}{\beta} + 1\right) \quad (2.15)$$

## 2.9 Métodos de estimação de parâmetros da distribuição de Weibull

Sendo a distribuição de Weibull amplamente utilizada e reconhecida, é possível encontrar na literatura diversos métodos que permitem estimar os parâmetros que a compõem,  $\eta, \beta$ , no caso do modelo padrão de dois parâmetros. Estes métodos, dividem-se essencialmente em dois tipos: os métodos gráficos e os métodos analíticos (ou estatísticos), sendo que existem também autores que referem a existência de métodos mistos, que não se irão abordar nesta dissertação [23].

### 2.9.1 Métodos Gráficos

Estes métodos permitem obter de uma forma simples os parâmetros da distribuição de Weibull através da representação gráfica dos dados correspondentes aos tempos de falha em análise, e constituem-se como uma boa alternativa para obter uma aproximação inicial dos parâmetros da distribuição, possibilitando também uma confirmação visual do ajustamento obtido para o conjunto de dados [23].

Segundo Abernethy [25] o método “WPP” – “Weibull Probability Plotting” corresponde ao método gráfico mais utilizado para determinar os parâmetros da distribuição de Weibull, sendo muito utilizado pela grande maioria dos softwares existentes atualmente no mercado. Este método tem como base a linearização da função de probabilidade acumulada (equação (2.12)), que se obtém ao efetuar duas vezes o logaritmo da referida função, obtendo-se as seguintes equações [18], [23], [25]:

$$\ln(R(t)) = -\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta \quad (2.16)$$

$$\ln[-\ln(R(t))] = \beta \ln(t) - \beta \ln(\eta) \quad (2.17)$$

Considerando que:

$$Y(t) = \ln[-\ln(R(t))] \quad (2.18)$$

$$B = -\beta \ln(\eta) \quad (2.19)$$

$$X = \ln(t) \quad (2.20)$$

Simplificando obtemos:

$$Y(t) = \beta X + B \quad (2.21)$$

É a equação (2.21) que permite dimensionar o gráfico de probabilidade de Weibull, que é representado por uma reta quando se verifica que a distribuição se ajusta ao conjunto de dados da amostra. Esta equação é obtida por regressão linear do conjunto de pontos constituído no eixo X pelo logaritmo dos tempos de falha (equação (2.20)) e no eixo Y pelo valor do logaritmo da probabilidade de falha acumulada ( $F(t)$ ) para cada um dos tempos de falha (equação (2.17)). Uma vez que, sem os valores de  $\eta$  e  $\beta$  o valor de  $F(t)$  é desconhecido, é necessário para aplicar este método, estimá-lo, o que pode ser feito através dos seguintes estimadores, em que  $i$  representa o número de ordem do tempo de falha em questão e  $n$  representa o número total de dados correspondentes a tempos de falha (ordenados de forma crescente) da amostra [23]:

$$F(t) = \frac{i}{n} \quad (2.22)$$

$$F(t) = \frac{i}{n+1} \quad (2.23)$$

$$F(t) = \frac{i-0,5}{n} \quad (2.24)$$

$$F(t) = \frac{i-0,3}{n+0,4} \quad (2.25)$$

$$F(t) = \frac{i-\frac{3}{8}}{n+\frac{1}{4}} \quad (2.26)$$

### 2.9.2 Métodos analíticos

Os métodos analíticos, podem ser considerados métodos mais completos, quando comparados com os métodos gráficos, uma vez que podem ser considerados mais gerais e aplicáveis a todo o tipo de modelos e conjuntos de dados, e cuja teoria subjacente permite uma boa compreensão das propriedades assintóticas dos estimadores [23].

Existem na literatura diversos estimadores que podem ser utilizados para determinar os parâmetros da distribuição de Weibull, onde se destacam como sendo os mais utilizados o método dos momentos, o método dos mínimos quadrados, o método dos mínimos quadrados ponderados e o método da máxima verosimilhança (ou probabilidade) [23], [26], [27].

Nesta dissertação o foco reside no método da máxima verosimilhança ou MLE (“Maximum Likelihood Estimator”), uma vez que se trata de um dos métodos mais utilizados atualmente por força da sua grande versatilidade e capacidade em produzir resultados fiáveis. Este estimador utiliza a maximização da função de probabilidade do modelo estatístico em questão (neste caso distribuição de Weibull) para obter os parâmetros que caracterizam a sua distribuição. Em muitos casos, a função de probabilidade é muito complexa, não sendo possível obter a sua solução de forma analítica, obrigando ao recurso a métodos numéricos, para obter uma solução aproximada [28], [29].

Se tivermos um conjunto de  $n$  observações de uma variável aleatória  $T$ , correspondente a  $t_i = t_1, t_2, t_n$ , e se  $f(x)$  corresponder à função densidade de probabilidade da referida amostra, então  $f(x_i)$  irá corresponder à função densidade de probabilidade no *i*ésimo valor do conjunto. A função de verosimilhança assume a seguinte forma, em que  $\theta$  corresponde aos parâmetros desconhecidos [23], [30]:

$$L(\theta) = \prod_{i=1}^n f(t_i, \theta) \quad (2.27)$$

Pegando na distribuição de Weibull e substituindo a equação (2.13) na equação anterior, ficamos com a seguinte equação:

$$L(\eta, \beta) = \prod_{i=1}^n \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t_i}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t_i}{\eta}\right)^\beta} \quad (2.28)$$

Uma vez que esta é uma função monotonicamente crescente, é equivalente maximizar a função de verosimilhança ou o seu logaritmo, sendo que em muitos casos é mais fácil conseguir maximizar o logaritmo do que a própria função de verosimilhança. Assim sendo, aplicando o logaritmo, temos que:

$$\ln(L(\eta, \beta)) = \sum_{i=1}^n \ln \left[ \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t_i}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t_i}{\eta}\right)^\beta} \right] = n[\ln\beta - \beta\ln\eta] + (\beta - 1) \sum_{i=1}^n \ln x_i - \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i}{\eta}\right)^\beta \quad (2.29)$$

Como referido anteriormente, o objetivo deste modelo aplicado à distribuição de Weibull, passa por determinar os valores de  $\eta$  e  $\beta$  que maximizam a função anterior, o que pode ser feito com recurso a vários métodos numéricos.

Também é possível aplicar este estimador a conjuntos de dados com censura. Neste trabalho apenas se apresentam as equações correspondentes à aplicação do modelo para a distribuição de Weibull com dados censurados à direita do Tipo 1 por ser o que se reveste de interesse para esta dissertação. Neste caso específico, a função de verosimilhança representa-se da seguinte forma [23], [30]:

$$L(\theta) = \prod_{i=1}^n f(\theta, t_i)^{\delta_i} [1 - F(\theta, t_i)]^{1-\delta_i} \quad (2.30)$$

Em que a variável  $\delta_i$  assume o valor de 1 para dados não censurados. Aplicando a equação (2.13), temos:

$$L(\eta, \beta) = \prod_{i=1}^n \left[ \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t_i}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t_i}{\eta}\right)^\beta} \right]^{\delta_i} \left[ e^{-\left(\frac{t_i}{\eta}\right)^\beta} \right]^{1-\delta_i} \quad (2.31)$$

Aplicando por uma questão de conveniência o logaritmo à equação anterior:

$$\ln(L(\eta, \beta)) = m[\ln(1 - F(t))] + \sum_{i=1}^n \ln f(x_i) \quad (2.32)$$

Uma vez que:

$$m[\ln(1 - F(t))] = m \left[ \ln \left( e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \right) \right] = -m \left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta \quad (2.33)$$

Podemos escrever por fim:

$$\ln(L(\eta, \beta)) = -m \left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta + n[\ln\beta - \beta\ln\eta] + (\beta - 1) \sum_{i=1}^n \ln x_i - \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i}{\eta}\right)^\beta \quad (2.34)$$

## 3 Caso Prático

Neste capítulo pretende-se desenvolver um plano de manutenção para o sistema de refrigeração da Pandur II 8x8, através da aplicação da metodologia RCM3. É efetuada uma descrição do sistema em análise, seguida de um breve enquadramento acerca da manutenção do sistema de armas Pandur II 8x8 no Exército Português. Por fim são apresentados os passos seguidos na implementação da metodologia adotada.

### 3.1 O sistema de armas Pandur II 8x8

O Exército, enquanto ramo das Forças Armadas Portuguesas responsável pela componente terrestre das operações militares é equipado por diversas viaturas blindadas, nas quais se inclui a Pandur II 8x8. As viaturas blindadas de rodas Pandur II, fabricadas pela empresa *Steyr Daimler Puch Spezialfahrzeug GmbH*, inserem-se na categoria de viaturas blindadas de transporte de pessoal (VBTP), estão ao serviço do Exército desde 2009 e equipam as unidades da Brigada de Intervenção e as FND (em concreto a FND no teatro de operações da RCA) desde o ano de 2019).



**Figura 12:** Viatura Blindada de Rodas Pandur II 8x8 [31]

Atualmente o Exército possui uma frota de 188 destas viaturas, repartidas em 9 tipologias diferentes, que lhe conferem uma grande versatilidade ao nível da sua utilização tática e operacional. Cada viatura permite transportar até 10 militares (incluindo o condutor) com uma velocidade máxima em estrada pavimentada de cerca de 105 Km/h. É uma viatura com 4 eixos dos quais 2 são direcionais, possui 6 rodas motrizes (ou 8 no modo 8x8) e um peso que pode variar entre as 18,5 toneladas e as 22,5 toneladas. No que diz respeito às suas dimensões gerais apresenta um comprimento de 7,62 metros, uma largura de 2,87 metros e uma altura total de 2,84 metros [32].

Uma vez que a análise efetuada nesta dissertação se focou exclusivamente no sistema de refrigeração da Pandur II, este vai ser descrito de seguida de forma detalha. É importante referir que, não obstante existirem 9 tipologias de viaturas, todas elas possuem o mesmo sistema de refrigeração.

### 3.1.1 Sistema de refrigeração

Segundo a classificação efetuada pelo “Manual do Operador” e adotada nesta dissertação, o sistema de refrigeração é parte integrante do grupo de alimentação<sup>2</sup> (também conhecido como “Power Pack”), estando, no entanto, alguns dos seus componentes localizados noutras partes da viatura. A Tabela 1 apresenta de forma resumida as características técnicas deste sistema.

**Tabela 1:** Dados técnicos do sistema de refrigeração, adaptado de [32]

| CARATERÍSTICA                                  | DESCRIÇÃO  |
|--|--|
| TIPO DE SISTEMA                                | Refrigeração por circulação de líquido em circuito fechado.  |
| BOMBA  | Motorizada centrífuga de líquido de refrigeração.            |
| VENTOINHA                                      | Axial hidrostática com controlo de ventilação termostático.  |
| PERMUTADOR DE CALOR DO LÍQUIDO DE REFRIGERAÇÃO | Radiador de líquido de refrigeração/ar.                      |
| COMPENSAÇÃO DO LÍQUIDO DE REFRIGERAÇÃO         | Reservatório de compensação.                                 |
| CAPACIDADE DO SISTEMA                          | 70L +/- 5L   |
| LÍQUIDO DE REFRIGERAÇÃO                        | Mistura 1:1 de líquido anticongelante e água (para - 20 °C). |
| ADITIVO ANTICAVITAÇÃO                          | DCA4   |

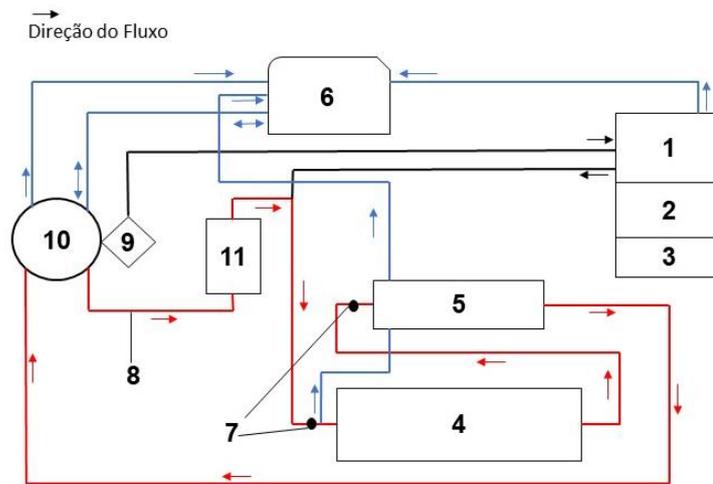
O sistema de refrigeração é responsável por arrefecer o motor e os óleos da transmissão automática, dos eixos motrizes e do sistema hidráulico, e é constituído pelos componentes apresentados na Tabela 2.

**Tabela 2:** Órgãos do sistema de refrigeração

|  |  |  |
|--|--|--|
| 1 - Radiador                                   | 5 – Permutador de calor para o óleo hidráulico | 9 - Termóstato   |
| 2 – Intercooler                                | 6 – Depósito de expansão                       | 10 – Bomba de água (líquido de refrigeração)           |
| 3 – Ventoinha                                  | 7 – Ligações rápidas                           | 11 – Permutador de calor para a transmissão automática |
| 4 – Permutador de calor para os eixos motrizes | 8 – Tubo de derivação para circuito pequeno    |  |

<sup>2</sup> O grupo de alimentação desta viatura é composto pelos seguintes elementos: motor, transmissão automática, sistema de refrigeração, sistema de admissão de ar, sistema de escape, gerador elétrico, compressor de ar condicionado, bomba hidráulica e veio de transmissão[32].

Na Figura 13 encontra-se representado de forma esquemática o sistema de refrigeração e os seus órgãos constituintes, bem como os 2 circuitos nos quais o sistema se divide.



**Figura 13:** Representação esquemática do sistema de refrigeração, adaptado de [32]

Este sistema é comandado pela bomba de água (que se encontra montada no motor) e por uma correia trapezoidal, e tal como referido, encontra-se dividido em 2 circuitos, aos quais se dá o nome de circuito de refrigeração grande e circuito de refrigeração pequeno.

Quando o líquido de refrigeração se encontra a uma temperatura até 75 °C circula no circuito pequeno (representado a vermelho na Figura 13), arrefecendo o bloco do motor e os permutadores de calor do óleo hidráulico (5), da transmissão automática (11) e dos eixos motrizes (4). Quando o líquido de refrigeração atinge a temperatura de 75 °C é redirecionado, por ação do termostato (9), para o circuito grande (representado a azul na Figura 13) onde vai circular através do radiador (1) para ser arrefecido. A ventoinha (3) é responsável por fornecer ar fresco ao radiador (1) e ao intercooler (2) [32].

Se a temperatura do líquido de refrigeração for demasiado elevada ou se o nível de fluido for demasiado baixo é emitido um aviso sonoro e acende uma luz de emergência (no painel de instrumentos da viatura).

### 3.2 A manutenção das Pandur II 8x8 no Exército Português

A organização, gestão e execução da manutenção dos equipamentos (incluindo as Pandur II) no Exército Português é efetuada segundo as diretrizes emanadas pelo despacho número 225 de 16 de novembro de 2011 do Chefe do Estado-Maior do Exército que define o “Conceito de Manutenção”. Segundo este documento as ações de manutenção no Exército encontram-se organizadas em 3 níveis distintos, que se descrevem de seguida [33]:

1. Manutenção de Unidade: tem como objetivo a conservação do equipamento e é efetuada pela tripulação da viatura ou pelo pessoal de manutenção da unidade<sup>3</sup>, caracterizando-se tipicamente

<sup>3</sup> Por unidade deve entender-se a Unidade/Estabelecimento/Órgão do EP ao qual o equipamento se encontra organicamente atribuído. No caso das Pandur II refere-se aos regimentos (pertencentes à brigada de intervenção) aos quais estas viaturas estão atribuídas e que efetuam a sua utilização operacional.

por curtas paragens do equipamento com base em pequenas reparações e por substituição modular.

2. Manutenção Intermédia: tem como objetivo conferir a operacionalidade a um qualquer equipamento colocado fora de serviço por avaria de um ou mais dos seus conjuntos ou subconjuntos, através da sua reparação e retorno à sua unidade de origem ou ao sistema de reabastecimento.

2.1 Manutenção Intermédia de Apoio Direto: estas unidades têm como finalidade organizar equipas de apoio de manutenção para apoio de sistemas específicos e seus equipamentos auxiliares.

2.2 Manutenção Intermédia de Apoio Geral: existe para apoiar o sistema de reabastecimento do Teatro de Operações, através da reparação de equipamentos e componentes. Este tipo de unidades tem capacidade de organizar equipas para cumprir requisitos de missões especiais.

3. Manutenção de Depósito: visa a reparação de equipamentos e o seu retorno ao sistema de reabastecimento do Exército, apoiando tanto as forças de combate como o programa de gestão de reabastecimento.

No caso concreto das Pandur II, a manutenção de unidade é garantida pelos módulos de manutenção existentes nas unidades operacionais que se encontram equipadas com estas viaturas. A manutenção intermédia de apoio direto fica a cargo da Companhia de manutenção da Brigada de Intervenção, sediada no Regimento de Manutenção no Entroncamento e por sua vez, tanto a manutenção intermédia de apoio geral como a manutenção de depósito são da responsabilidade do centro de manutenção da Unidade de Apoio Geral de Material do Exército, em Alcochete. A subcontratação de serviços de manutenção ao exterior, a manutenção nas FND e outras tipologias de serviços de manutenção são geridas pelo gestor da frota Pandur, sediada na Direção de Material e Transportes do Exército Português.

O “Conceito de Manutenção” do Exército reconhece 2 modalidades de execução da manutenção [27]:

- Manutenção Programada: “Consiste na substituição planeada de componentes de um dado equipamento antes que eles falhem, numa tentativa de minimizar eventuais problemas de funcionamento e, conseqüentemente, de aumentar a prontidão do material. Nesta modalidade incluem-se os programas de reparação geral e os usados com a reparação das aeronaves após determinado número de horas de voo.”
- Manutenção Pós-Avaria: “A adoção desta modalidade visa minimizar os custos de manutenção e, ainda assim, atingir os padrões de manutenção estabelecidos. Este conceito aplica-se a todos os níveis de manutenção, exceto à de depósito.

A modalidade em causa compreende uma inspeção extensiva dos artigos e componentes principais para diagnosticar avarias antes que se inicie a reparação propriamente dita ou a ação de substituição. A causa da inoperacionalidade é determinada ou prevista com base nessa inspeção e apenas se reparam as avarias localizadas.”

### 3.2.1 Plano de manutenção atual das Pandur II

Atualmente, e desde a sua aquisição, as ações de manutenção programada que são executadas no sistema de armas Pandur II, seguem o plano de manutenção proposto pelo fabricante. Este plano é dividido num conjunto de tarefas com periodicidades distintas, que abrangem de forma geral todos os sistemas da viatura. Na Tabela 3 são resumidas as tarefas de manutenção referentes ao sistema de refrigeração.

**Tabela 3:** Plano de manutenção do fabricante para o sistema de refrigeração, adaptado de [34] e [32]

|   |
|---|
| <b>Mensalmente:</b>   |
| Abrir bujões de drenagem do casco e verificar a existência de fugas de líquido de refrigeração.<br>Verificar se o sistema de refrigeração não apresenta danos nem fugas.<br>Verificar o nível do líquido de refrigeração. |
| <b>Semestralmente:</b>  |
| Verificar o nível de líquido refrigerante.<br>Verificar e se necessário acrescentar anticongelante e aditivo anti cavitação.  |
| <b>Anualmente (ou a cada 250 Horas de Motor):</b>   |
| Aspirar o Radiador.   |
| <b>Bienal (ou a cada 500 Horas de Motor):</b>   |
| Remoção (e reinstalação) do grupo de alimentação.<br>Verificar a correia trapezoidal da bomba de água.<br>Verificar visualmente as mangueiras do líquido de refrigeração.   |
| <b>A cada 4 anos (ou 1000 Horas de Motor):</b>  |
| Mudar o líquido de refrigeração.  |
| <b>A cada 6 anos (ou 1500 Horas de Motor):</b>  |
| Substituir a correia da bomba de água.  |

As tarefas efetuadas mensalmente e semestralmente enquadram-se no nível de manutenção de unidade, enquanto que as restantes tarefas se enquadram no nível de manutenção intermédia de apoio direto. Não está contemplada, no plano de manutenção programada das Pandur, nenhuma ação de manutenção de depósito.

### **3.3 Aplicação da Metodologia RCM3**

Neste subcapítulo descrevem-se os passos seguidos na implementação da metodologia RCM3 ao sistema analisado nesta dissertação. Descreve-se a sequência de tarefas efetuadas, as simplificações efetuadas e destacam-se os principais pontos a ter em conta na resposta a cada uma das questões da RCM.

#### **3.3.1 Definição do Contexto Operacional**

O primeiro passo a efetuar quando se pretende implementar uma análise baseada na RCM3 consiste na identificação do contexto operacional do equipamento em estudo [3].

Tal como já foi referido anteriormente neste trabalho, as Pandur II equipam as unidades pertencentes à Brigada de Intervenção do Exército Português, nomeadamente o Regimento de Infantaria (RI) 14 (situado em Viseu), o RI 13 (situado em Vila Real), o Regimento de Transmissões (situado no Porto), o Regimento de Engenharia 3 (situado em Espinho) e o Regimento de Cavalaria 6 (situado em Braga), encontrando-se distribuídas predominantemente pelo norte do país. O clima nesta região de Portugal continental é classificado como sendo clima temperado com inverno chuvoso e verão seco e pouco quente (na maior parte da região) e clima temperado com inverno chuvoso e verão seco e quente (na zona de Vila Real) [35].

Segundo dados da PORDATA [36] nos últimos 10 anos, entre 2009 e 2019, a temperatura média anual registada para esta esta região (dados referentes às estações meteorológicas de Bragança, Porto e Viana do Castelo) foi de 14,5 °C, a temperatura máxima (em média, registada para o mês mais quente do ano) de 27,5 °C e uma temperatura mínima (em média, registada para o mês mais frio do ano) de 3,1 °C. Esta gama de valores de temperatura, permite concluir que as viaturas foram utilizadas em condições de clima ameno, sem existência de temperaturas extremas.

Em território nacional, as Pandur II são utilizadas em treino operacional, com o objetivo de manter as capacidades táticas e a prontidão das forças que equipam, sendo empenhadas nos exercícios do Exército e nos exercícios setoriais das brigadas. Por serem viaturas de uso militar, pressupõe-se que se desloquem em estrada pavimentada, mas também em caminhos todo-o-terreno, sendo que em Portugal é possível assumir que são utilizadas, regra geral, em terreno com bons acessos e mobilidade. É importante salientar que o facto de existirem 9 tipologias de viaturas (que lhes conferem utilidade tática e operacional diferente) se vai refletir no nível de utilização da frota, com determinadas tipologias a terem uma utilização muito superior a outras. Foi possível estimar que cada viatura (considerando a utilização total das 188 viaturas da frota), em média, efetua por ano cerca de 79 Horas de Motor.

Para a determinação deste valor, foi primeiro calculado o número de horas de motor que cada viatura da frota efetuou por ano (entre 2014 e 2020), e de seguida calculou-se a média de todos os valores obtidos, por forma a obter um valor médio de horas de motor por ano e por viatura.

### 3.3.2 Ficha de informação RCM3 Figura 17

De maneira a registar toda a informação necessária ao processo RCM3 foi necessário definir um modelo de ficha de informação para utilizar nesta dissertação. O modelo utilizado foi adaptado a partir do exemplo apresentado por Marius Basson [3] e cumpre com os critérios definidos (relativos à informação que nela deve constar) pelas normas [13], [14]. Foram criadas três fichas de informação distintas, correspondentes a cada um dos três subsistemas analisados, que se encontram no anexo II desta dissertação.

| Ficha de informação RCM3 | Sistema: Refrigeração                 |       | Autor: Filipe Silva | Referência: Sistema de armas Pandur II 8x8 |                  | Data: |  |      |   |   |   |
|--------------------------|---------------------------------------|-------|---------------------|--|------------------|-------|--|------|---|---|---|
|                          | Subsistema: Conjunto da bomba de água |       | Modos de falha      |  | Análise do Risco |       |  |      |   |   |   |
| Função                   | Falha Funcional                       | Causa | Mecanismo           | Efeito da Falha                            |                  |       |  | Pted | P | C | R |
| Bomba de água            |                                       |       |                     |  |                  |       |  |      |   |   |   |

**Figura 14:** Cabeçalho da ficha de informação

Esta ficha apresenta o cabeçalho representado na Figura 14, onde é possível encontrar a identificação do equipamento em análise (neste caso o sistema de armas Pandur II), do respetivo sistema (nesta dissertação corresponde ao sistema de refrigeração) e também do subsistema a que se refere a informação registada. Dentro de cada subsistema encontra-se identificado o componente visado (correspondente à linha com sombreado verde), e para cada componente é registada a informação relacionada com a sua função, com as falhas funcionais que pode sofrer e com os consequentes modos de falha que lhe estão associados. São também descritos os efeitos, ou consequências, relacionadas com a ocorrência de cada um dos modos de falha identificados, informação que é utilizada para auxiliar a análise e quantificação do risco, cujo registo se efetua também nesta ficha, nomeadamente nas últimas quatro colunas.

### 3.3.3 Análise funcional do sistema de refrigeração

De maneira a ser possível efetuar uma análise funcional ao sistema de refrigeração, foi necessário identificar as fronteiras do sistema, ou seja, identificar claramente quais os componentes que fazem parte do sistema de refrigeração e que vão ser alvo de análise. A identificação dos conjuntos e componentes pertencentes ao sistema de refrigeração, e a sua relação hierárquica foram adaptados a partir da classificação efetuada pelo “Catálogo Ilustrado de Peças” (CIP) da Pandur II [37].

Esta classificação inclui 3 níveis, tal como representado na Figura 16, em que o primeiro nível corresponde ao sistema em estudo, isto é, o sistema de refrigeração (representado a vermelho). O segundo nível incorpora os 3 subsistemas que o constituem (representados a verde), e que são identificados pelo CIP, nomeadamente o “Sistema de refrigeração por circulação de líquido no grupo de alimentação”, o “Sistema de refrigeração por circulação de líquido no casco” e o “Conjunto da bomba de água”. Por fim, representados a azul encontram-se os componentes e conjuntos de componentes (no caso das mangueiras e tubagens, que englobam mais que um componente) principais, pertencentes a cada um dos subconjuntos. Decidiu-se efetuar a análise funcional para este nível, uma vez que, são estes os componentes que são efetivamente reparados, e é um nível que permite ter uma visão abrangente do sistema de refrigeração com detalhe suficiente para que nenhum dos principais componentes (e os seus modos de falha) sejam esquecidos.

Na Figura 17 encontram-se representadas as funções identificadas para cada componente dentro de cada subsistema. As funções identificadas foram também registadas nas fichas de informação, na segunda coluna, tal como se pode verificar na Figura 15.

|                                 |  |                                    |  |
|---------------------------------|--|------------------------------------|--|
| <b>Ficha de informação RCM3</b> |  | <b>Sistema: Refrigeração</b>       |  |
|                                 |  | <b>Subsistema: Conjunto da bor</b> |  |
| <b>Função</b>                   |  | <b>Falha Funcional</b>             |  |
| <b>Bomba de água</b>            |  |                                    |  |
| 1                               | Fazer circular o liquido refrigerante pelos 2 circuitos do sistema de refrigeração | A                                  | Liquido refrigerante não circula pelos circuitos do sistema de refrigeração. |

**Figura 15:** Registo das funções na ficha de informação

Como é possível verificar cada função é precedida de um número que a identifica. Para cada função são também registadas as falhas funcionais que lhe estão associadas, sendo que a identificação das falhas funcionais se efetua por meio de uma letra. Cada componente pode apresentar diversas funções, e cada função pode ter associadas diversas falhas funcionais.

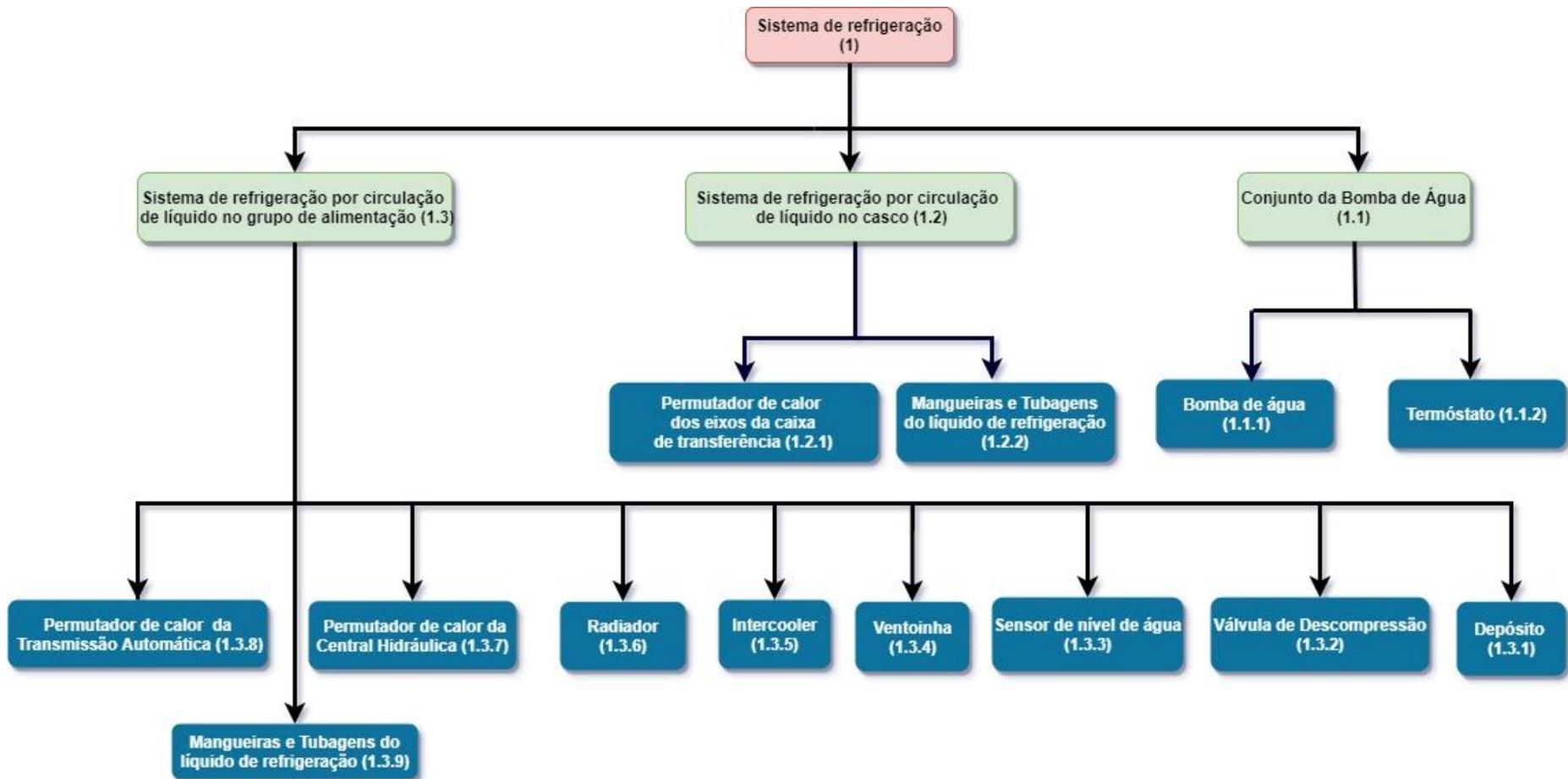


Figura 16: Hierarquia de ativos - sistema de refrigeração

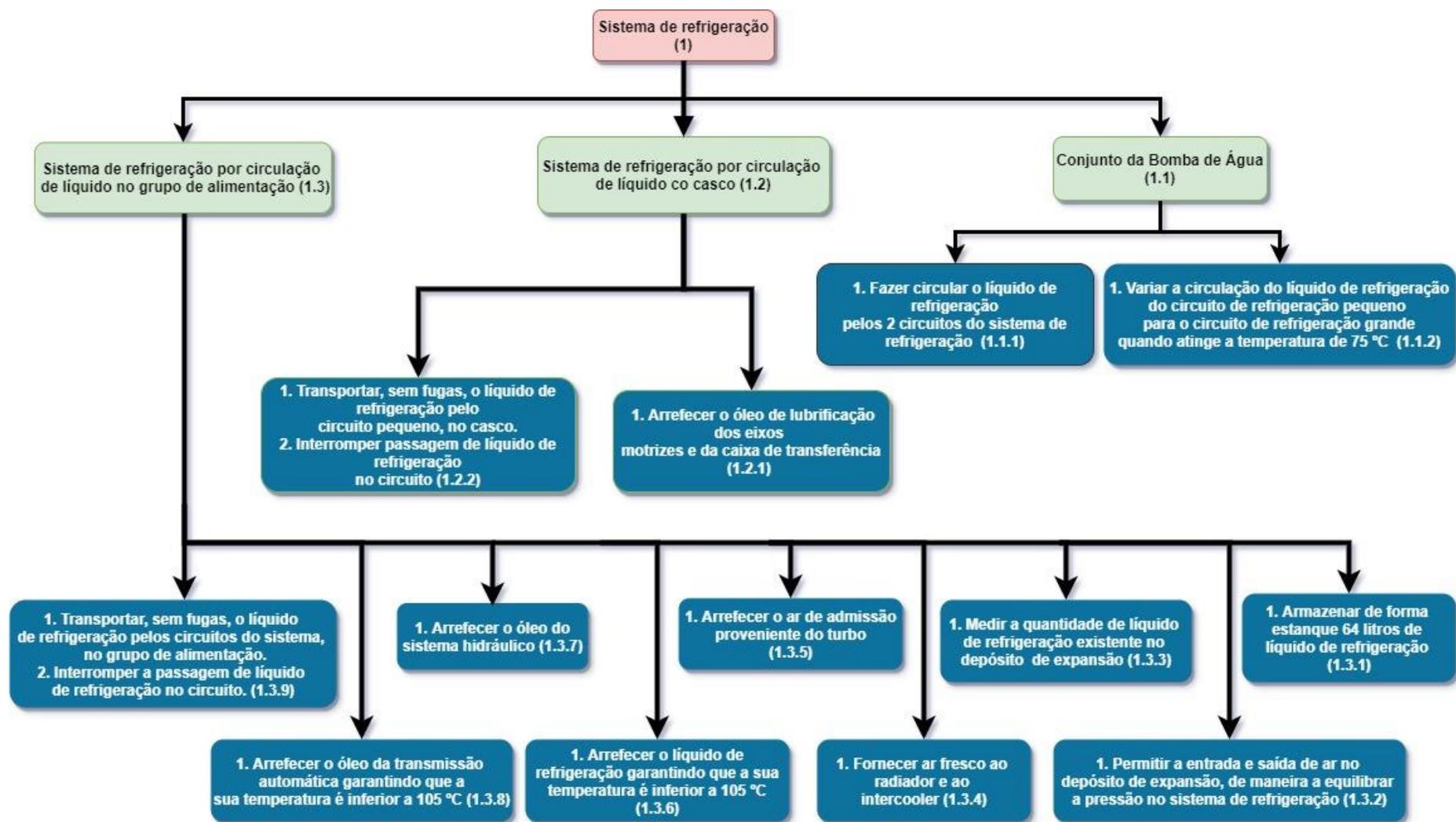


Figura 17: Análise funcional do sistema de refrigeração

### 3.3.4 Análise de modos de falha

Depois de efetuada (e registada nas fichas de informação) a análise funcional ao sistema, procedeu-se à identificação dos modos de falha para cada um dos componentes analisados. Para tal recorreu-se ao registo de falhas verificadas para a Pandur II, que corresponde a um total de 126 ordens de trabalho relativas ao sistema de refrigeração, respeitantes ao período entre janeiro de 2014 e abril de 2020. Para além dos modos de falha que foram possíveis identificar nas ocorrências de falhas registadas, foi também efetuada uma análise crítica (análise de engenharia), com o objetivo de complementar a análise com modos de falha possíveis (e prováveis) de ocorrer para os componentes do sistema de refrigeração.

Os modos de falha identificados não se encontram reproduzidos neste capítulo da dissertação, tendo sido remetidos para as fichas de informação em anexo (anexo III). A descrição dos modos de falha encontra-se dividida em causa e mecanismo, em que a causa refere o tipo de falha em si e o mecanismo descreve a origem dessa mesma falha. Como é possível verificar na Figura 18, os modos de falha registados são identificados por meio de um número que os antecede na ficha de informação.

|                |                               |   |
|----------------|-------------------------------|---|
| bomba de água  |                               | Autor: Filipe Silva   |
| Modos de falha |                               |   |
| Causa          |                               | Mecanismo   |
| 1              | Rotura da correia trapezoidal | Degradação da borracha em condições de serviço (condições de funcionamento difíceis ou existência de óleo da correia)<br><br>Instalação incorreta |

Figura 18: Registo dos modos de falha na ficha de informação

### 3.3.5 Descrição dos efeitos da falha

A descrição dos efeitos da falha é uma fase que se reveste de grande importância, na medida em que fornece a informação necessária à análise de risco que se efetua a cada modo de falha identificado, desta forma, também a descrição dos efeitos da falha é feita para cada um dos modos de falha identificados anteriormente.

Nesta descrição, tal como o nome indica, foi efetuada a caracterização das consequências resultantes do surgimento dos modos de falha, onde foram definidas, tanto as consequências operacionais para o sistema em causa e para a viatura, como os sinais de aviso das ocorrências e a sua frequência estimada (utilizada para definir a probabilidade de ocorrência do modo de falha quando se efetuar a análise de risco). Tanto as consequências, como os sinais de aviso de ocorrência, foram avaliados tendo em conta as características do sistema de refrigeração referidas nos manuais técnicos. A frequência de ocorrência dos modos de falha, foi por sua vez avaliada, com recurso à estimativa dos seus *MTBF*.

|  |  |
|--|--|
| Referência: Sistema de armas Pandur II 8x8 |  |
| Efeito da Falha                            |  |
| Efeito de falha local                      | Com o tempo de utilização em serviço, com a exposição a temperaturas elevadas e a intempérie, a borracha da correia trapezoidal vai sendo degradada, acabando eventualmente por partir. Este modo de falha apresenta um MTTF de 1529 Horas de motor.   |
| Efeito de nível superior seguinte          | A bomba de água não entra em funcionamento e o líquido refrigerante não circula pelos circuitos de refrigeração. Dá-se o sobreaquecimento do bloco do motor, do óleo da transmissão automática, do óleo hidráulico e do óleo de lubrificação dos eixos motrizes e da caixa de transferência. Acendem as luzes de emergência de fluido e de emergência de transmissão no painel de luzes de controlo e emergência, bem como é registada a subida da temperatura do bloco do |
| Efeito final                               | A substituição da correia tem um custo associado de 14,62 euros e um tempo médio de reparação de 40 minutos.   |
| Efeito potencial de pior cenário           | O sobreaquecimento do motor vai provocar danos na junta do cabeçote do motor e nos cilindros. O sobreaquecimento do óleo hidráulico vai provocar a inoperacionalidade do sistema hidráulico e em suma vai por em causa a utilização da Pandur em contexto operacional e o cumprimento da sua missão. No caso de os sistemas de aviso de temperatura falharem pode dar-se um incêndio no motor.   |

**Figura 19:** Registo dos efeitos da falha na ficha de informação

O registo dos efeitos da falha na ficha de informação é dividido em quatro categorias (Figura 19):

- Efeito de falha local: descreve o impacto do modo de falha no componente e a sua frequência de ocorrência;
- Efeito de nível superior seguinte: descreve o impacto do modo de falha no sistema em que se insere o componente e a sequência de acontecimentos desencadeados após a sua ocorrência (maioritariamente relacionados com mecanismos de aviso da falha);
- Efeito final: descreve as consequências do modo de falha na segurança, ambiente e capacidade operacional (onde se inclui tempo de paragem/reparação, custos associados, etc.);
- Efeito potencial de pior cenário: descreve as consequências da ocorrência do modo de falha no caso de não ser efetuada nenhuma ação para o detetar, prevenir, antecipar ou caso todos os sistemas de aviso falhem, levando a que a falha ocorra de forma catastrófica.

De maneira a ser possível determinar o valor do *MTBF*, é necessário obter informação acerca da distribuição de probabilidade representativa da vida dos componentes analisados. Neste trabalho, foi escolhida a distribuição de Weibull de dois parâmetros, pelas razões já enunciadas, nomeadamente por ser um modelo muito versátil e flexível que permite representar todas as fases da vida de um componente, o que se revela particularmente útil neste trabalho, uma vez que se trata de um estudo nunca feito, e em que não existe informação prévia relativa às falhas do sistema. O facto de ser possível estimar os parâmetros da distribuição com recurso a ferramentas informáticas (em específico o “Excell”) disponíveis por defeito no Exército foi também um fator que pesou nesta decisão, por facilitar uma futura implementação desta metodologia de análise em grande escala para todos os ativos do Exército.

O primeiro passo para a determinação dos parâmetros da distribuição de Weibull, foi, portanto, agrupar

os registos das falhas (do já referido universo de 126 ordens de trabalho relacionados com o sistema de refrigeração) por componente e por modo de falha. Verificou-se durante a análise das falhas, que grande parte das ocorrências era referente ao mesmo componentes ou ao mesmo tipo de falha, isto é, as falhas registadas eram quase sempre do mesmo tipo e afetavam quase sempre os mesmos componentes, o que levou a que para uma grande parte dos componentes do sistema, os registos de falhas se revelassem escassos e insuficientes para efetuar uma estimativa com valor matemático significativo.

Tendo em conta a informação presente nas ordens de trabalho analisadas, foi possível estimar os parâmetros da distribuição de Weibull e os *MTBF* para o sensor de nível e para a válvula de descompressão do depósito de expansão. Foi assumido, que os modos de falha identificados para estes componentes apresentavam iguais probabilidades de falha (e consequentemente o valor estimado do *MTBF* era aplicável a todos por igual), isto porque, a informação constante no registo das falhas era incompleta (referindo apenas inoperacionalidade do componente, sem qualquer tipo de detalhe acerca da causa ou mecanismo presente na origem da mesma), impossibilitando a identificação concreta do modo de falha presente.

De forma semelhante, também se verificou na análise que diversas ordens de trabalho referiam a existência de fugas de líquido de refrigeração, sem, na grande maioria das vezes, especificar o local ou origem da fuga. Assim sendo, foi assumido que todos os modos de falha causadores de fugas (referentes a vedantes, torneiras e ligações rápidas) apresentavam a mesma probabilidade de ocorrência, determinada pela estimativa efetuada com base nesta informação. Por fim foi também possível determinar o *MTBF* relativo ao modo de falha relacionado com a acumulação de detritos e sujidade no radiador. Depois de serem identificados e ordenados de forma crescente os tempos de falha correspondentes aos componentes e modos de falha descritos no parágrafo anterior, foi utilizado o método gráfico *WPP* (descrito anteriormente na secção 2.9.1 desta dissertação) para obter uma primeira estimativa dos parâmetros da distribuição de Weibull.

Tal como referido, a equação (2.20) pressupõe o conhecimento dos tempos de falha (o que se verifica):

$$X = \ln(t) \quad (2.20)$$

A equação (2.17) pressupõe o conhecimento da probabilidade acumulada de falha ( $F(t)$ ):

$$\ln[-\ln(R(t))] = \beta \ln(t) - \beta \ln(\eta) \quad (2.17)$$

Uma vez que esta é uma variável não conhecida, foi necessário recorrer aos estimadores de fiabilidade representados pelas equações (2.21) a (2.25). Os resultados obtidos encontram-se representados nas tabelas seguintes, em que os gráficos apresentados correspondem à aproximação obtida com o estimador que permitiu obter o melhor ajustamento (maior  $R^2$ ) ao conjunto de dados de tempos de falha, que para os quatro casos correspondeu ao estimador de Herd-Johnson (equação (2.23)).

Os valores  $\beta$  e  $\eta$  da distribuição de Weibull foram determinados a partir dos valores obtidos pela regressão linear, tal como se mostra pelas equações (2.19) e (2.21):

$$B = -\beta \ln(\eta) \quad (2.19)$$

$$Y(t) = \beta X + B \quad (2.21)$$

**Tabela 4:** Estimação dos parâmetros de Weibull - Sensor de nível

| Sensor de nível de água          |                                     |                                   |
|----------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|
| Tempos de falha (Horas de Motor) | Gráfico de probabilidade de Weibull | Parâmetros da distribuição        |
| 109                              |                                     | $\eta = 401,97$<br>$\beta = 1,38$ |
| 126                              |                                     |                                   |
| 195                              |                                     |                                   |
| 234                              |                                     |                                   |
| 346                              |                                     |                                   |
| 499                              |                                     |                                   |
| 554                              |                                     |                                   |
| 675                              |                                     |                                   |

**Tabela 5:** Estimação dos parâmetros de Weibull – Válvula de descompressão

| Válvula de descompressão         |                                     |                                    |
|----------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|
| Tempos de falha (Horas de Motor) | Gráfico de probabilidade de Weibull | Parâmetros da distribuição         |
| 72                               |                                     | $\eta = 382,30$<br>$\beta = 1,078$ |
| 74                               |                                     |                                    |
| 129                              |                                     |                                    |
| 129                              |                                     |                                    |
| 188                              |                                     |                                    |
| 216                              |                                     |                                    |
| 235                              |                                     |                                    |
| 394                              |                                     |                                    |
| 698                              |                                     |                                    |
| 737                              |                                     |                                    |
| 918                              |                                     |                                    |

**Tabela 6:** Estimação dos parâmetros de Weibull – Sujidade nos radiadores

| Sujidade nos radiadores          |  |                                     |                                   |
|----------------------------------|--|-------------------------------------|-----------------------------------|
| Tempos de falha (Horas de Motor) |  | Gráfico de probabilidade de Weibull | Parâmetros da distribuição        |
| 122                              |  |                                     | $\eta = 423,28$<br>$\beta = 1,42$ |
| 139                              |  |                                     |                                   |
| 167                              |  |                                     |                                   |
| 339                              |  |                                     |                                   |
| 449                              |  |                                     |                                   |
| 451                              |  |                                     |                                   |
| 521                              |  |                                     |                                   |
| 653                              |  |                                     |                                   |

**Tabela 7:** Estimação dos parâmetros de Weibull – Fugas

| Fugas                            |     |                                     |                                   |
|----------------------------------|-----|-------------------------------------|-----------------------------------|
| Tempos de falha (Horas de Motor) |     | Gráfico de probabilidade de Weibull | Parâmetros da distribuição        |
| 18                               | 222 |                                     | $\eta = 277,07$<br>$\beta = 1,03$ |
| 24                               | 232 |                                     |                                   |
| 50                               | 238 |                                     |                                   |
| 53                               | 300 |                                     |                                   |
| 61                               | 352 |                                     |                                   |
| 64                               | 399 |                                     |                                   |
| 77                               | 517 |                                     |                                   |
| 82                               | 554 |                                     |                                   |
| 88                               | 570 |                                     |                                   |
| 108                              | 600 |                                     |                                   |
| 119                              | 601 |                                     |                                   |
| 142                              | 763 |                                     |                                   |
| 205                              |     |                                     |                                   |

Uma vez que a frota de viaturas estudada é composta por 188 viaturas e muitas delas não sofreram falhas relacionadas com os componentes e modos de falha acima referidos, houve a necessidade de identificar quais as viaturas que não falharam porque o seu nível de utilização foi baixo (e como tal ainda não alcançaram o número de Horas de motor de utilização suficiente para registarem falhas), e

as viaturas que apesar de apresentarem um nível de utilização suficientemente elevado para terem falhado, não apresentaram falhas. Para tal foi utilizado como valor de referência, o maior valor de tempo de registado para cada um dos componentes e modos de falha anteriormente referidos, por exemplo, para o caso do sensor de nível, como o maior valor de tempo de falha registado foi de 675 Horas de motor, foram contabilizadas como não tendo falhado (mas com utilização suficiente para tal) todas as viaturas com mais de 700 Horas de motor e sem falhas registadas relacionadas com o sensor de nível.

Assim sendo, o conjunto de dados referentes às falhas das viaturas que compõe a frota, não pode ser considerado completo, havendo a necessidade de lhe aplicar uma censura à direita do Tipo1 (porque muitas das viaturas não falharam antes do tempo de fim da análise, sabendo-se apenas que irão falhar após este tempo). De maneira a que os resultados obtidos refletissem da melhor forma o tempo de vida dos componentes estudados, foi aplicado um algoritmo de censura à direita aos conjuntos de dados anteriormente referidos (sensor de nível de água, válvula de descompressão, radiadores e fugas). Foi utilizado o método da máxima verosimilhança (ou *MLE*) para proceder à determinação dos parâmetros da distribuição de Weibull e conseqüentemente do *MTBF*, pois tal como referido na secção 2.9.2 deste trabalho, apresenta uma grande versatilidade e capacidade em gerar resultados fiáveis, o que aliado ao facto de ser possível aplicar este método apenas com recurso ao “software” Excell, levaram à sua adoção nesta dissertação. Recuperando então a equação (2.34), que corresponde ao logaritmo da função de verosimilhança da distribuição de Weibull de dois parâmetros:

$$\ln(L(\eta, \beta)) = -m \left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta + n[\ln\beta - \beta \ln\eta] + (\beta - 1) \sum_{i=1}^n \ln x_i - \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i}{\eta}\right)^\beta \quad (2.34)$$

A aplicação do método consiste em maximizar a função anterior, variando os parâmetros  $\eta$  e  $\beta$ . Esta maximização pode ser feita através de métodos numéricos (uma vez que não é possível obter a solução exata da equação), sendo que no caso concreto desta dissertação se utilizou o “solver” disponível por predefinição no Excell. Este método requer que seja introduzida uma estimativa inicial dos parâmetros  $\eta$  e  $\beta$ , para tal, foram utilizados os valores calculados pelo método gráfico *WPP*, cujos resultados se encontram representados na Tabela 4, Tabela 5, Tabela 6 e Tabela 7. De seguida apresenta-se uma síntese dos resultados obtidos através da aplicação da censura à direita do Tipo 1, aos conjuntos de dados referentes às falhas do sensor de nível, válvula de descompressão, sujidade nos radiadores e fugas.

**Tabela 8:** Resultados obtidos pela censura de dados à direita

|   | Sensor de nível                    | Válvula de descompressão           | Sujidade nos radiadores            | Fugas                              |
|---|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| <b>Estimativa inicial</b>               | $\eta = 401,97$<br>$\beta = 1,38$  | $\eta = 382,30$<br>$\beta = 1,078$ | $\eta = 423,28$<br>$\beta = 1,42$  | $\eta = 277,07$<br>$\beta = 1,03$  |
| <b>Parâmetros obtidos</b>               | $\eta = 4330,66$<br>$\beta = 1,14$ | $\eta = 3267,94$<br>$\beta = 0,8$  | $\eta = 3742,36$<br>$\beta = 1,26$ | $\eta = 1514,86$<br>$\beta = 0,74$ |
| <b><i>MTBF</i><br/>(Horas de motor)</b> | 4134,37                            | 3696,19                            | 3478,83                            | 1827,43                            |

Para além dos valores presentes na Tabela 8 foram também estimados outros *MTBF* que se encontram registados nas fichas de informação, referentes a modos de falha com poucos registos de ocorrência nas ordens de trabalho (apenas um ou dois registos de ocorrência). Não obstante o pouco valor matemático do cálculo efetuado (relacionado com a pouca informação relativa a tempos de falha existente), decidiu-se efetuar a determinação do valor do *MTBF* (recorrendo ao algoritmo de censura de dados à direita previamente utilizado) com o objetivo de tentar perceber se o valor obtido poderia ser utilizado como uma estimativa válida ou não. Os modos de falha para os quais se efetuou este cálculo são apresentados na Tabela 9 (os valores obtidos podem, tal como já foi referido, ser consultados nas fichas de informação):

**Tabela 9:** Modos de falha com poucos registos de ocorrência

| <b>COMPONENTES</b>                                   | <b>MODOS DE FALHA</b>       |
|--|-----------------------------|
| <b>BOMBA DE ÁGUA</b>                                 | 1.A.1                       |
| <b>DEPÓSITO DE EXPANSÃO</b>                          | 1.B.1                       |
| <b>RADIADOR</b>                                      | 1.A.5                       |
| <b>INTERCOOLER</b>                                   | 1.A.2                       |
| <b>VENTOINHA</b>                                     | 1.A.1 e 1. A.2              |
| <b>PERMUTADOR DE CALOR DO ÓLEO HIDRÁULICO</b>        | 1.A.3                       |
| <b>PERMUTADOR DE CALOR DA TRANSMISSÃO AUTOMÁTICA</b> | 1.A.1                       |
| <b>MANGUEIRAS E TUBAGENS</b>                         | 1.A.1, 1.A.2, 1.A.5 e 1.A.6 |

Com o propósito de fornecer mais dados para a avaliação do risco, para além da informação já descrita referente às consequências e ao nível de ocorrência das falhas, foi também incluído o custo de reparação associado (informação retirada a partir dos registos das ordens de trabalho, quando presente, e do valor geral dos componentes no mercado, quando este valor não consta nas ordens de trabalho) e o tempo médio de reparação (neste caso a informação foi obtida a partir da experiência e do conhecimento empírico dos mecânicos). Esta informação encontra-se registada para cada modo de falha nas fichas de informação que se encontram em anexo.

### **3.3.6 Análise do Risco**

Nesta dissertação efetuou-se uma análise qualitativa, com o objetivo de quantificar o risco associado a cada modo de falha identificado para cada componente do sistema de refrigeração. Foi utilizado o método proposto na literatura de referência para a metodologia RCM3, nomeadamente a obra “RCM3: Risk-Based Reliability Centered Maintenance” [3], que combina a severidade da consequência com a probabilidade de ocorrência do modo de falha para obter uma classificação do risco, ao invés da tradicional abordagem do RPN (referido no subcapítulo 2.5.3 desta dissertação) definido pelas normas da análise FMECA. Para tal, foi definida uma matriz do risco (Tabela 10) que conjuga a probabilidade de ocorrência e a severidade (consequência) do modo de falha analisado, com o objetivo de lhe atribuir uma categoria de risco.

**Tabela 10: Matriz do risco**

**Efeito da falha/ Severidade da consequência**

| <b>Consequência</b> | <b>1<br/>Insignificante</b>                           | <b>2<br/>Baixa</b>   | <b>3<br/>Moderada</b>   | <b>4<br/>Elevada</b>   | <b>5<br/>Grave</b>  |
|---------------------|---|--|---|--|---|
| Segurança e saúde   | Primeiros socorros/<br>Risco para a saúde<br>ligeiro. | Tratamento médico/<br>Risco para a saúde<br>considerável.  | Lesão grave/ Impacto<br>reversível para a saúde.  | Óbito único ou perda de<br>qualidade de vida/<br>Impacto irreversível na<br>saúde.   | Vários óbitos/ impacto<br>na saúde que pode<br>levar à morte.   |
| Ambiental           | Dano ambiental<br>mínimo.                             | Impacto ligeiro –<br>recuperação a curto<br>prazo.   | Dano significativo – com<br>impacto irreversível<br>durante a vida do ativo.  | Dano grave com<br>impacto irreversível<br>após vida do ativo.  | Dano extremo com<br>impacto irreversível.   |
| Operacional         | Falha resolvida pelo<br>operador/tripulação           | Breve<br>indisponibilidade.<br>Reparação efetuada<br>na unidade orgânica<br>com duração inferior a<br>6 horas. | Indisponibilidade parcial.<br>Implica reparação na<br>unidade de manutenção<br>intermédia de apoio<br>direto com duração até<br>36 horas. | Indisponibilidade parcial.<br>Implica reparação na<br>unidade de manutenção<br>intermédia de apoio<br>geral com duração até<br>96 horas. | Indisponibilidade total<br>do sistema de armas.<br>Implica<br>reparação/substituição<br>na unidade de<br>manutenção de<br>depósito. |
| Económica           | Custos de reparação<br>até 1500 €.                    | Custos de reparação<br>de 1500 € até 10000 €.  | Custos de reparação de<br>10000 € até 50000 €.  | Custos de reparação de<br>50000 € até 500000 €.  | Custos de reparação<br>superiores a 500000 €.   |

**Probabilidade de ocorrência**

**Classificação do risco**

|                                     |   |              |              |              |              |              |
|-------------------------------------|---|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| <b>5<br/>Praticamente<br/>certo</b> | Falha ocorre uma ou mais<br>vezes a cada 250 Horas de<br>motor (ou 1 ano).  | <b>11(M)</b> | <b>16(S)</b> | <b>20(S)</b> | <b>23(H)</b> | <b>25(H)</b> |
| <b>4<br/>Provável</b>               | Falha ocorre menos de uma<br>vez a cada 250 Horas de motor<br>e é provável que ocorra num<br>prazo de 1250 Horas de motor<br>(ou 5 anos). | <b>7(M)</b>  | <b>12(M)</b> | <b>17(S)</b> | <b>21(H)</b> | <b>24(H)</b> |
| <b>3<br/>Eventual</b>               | Falha ocorre eventualmente e<br>pode dar-se num prazo de<br>2500 Horas de motor (ou 10<br>anos).  | <b>4(L)</b>  | <b>8(M)</b>  | <b>13(S)</b> | <b>18(S)</b> | <b>22(H)</b> |
| <b>2<br/>Improvável</b>             | Falha ocorre eventualmente e<br>pode dar-se num prazo de<br>5000 Horas de motor (ou 20<br>anos).  | <b>2(L)</b>  | <b>5(L)</b>  | <b>9(M)</b>  | <b>14(S)</b> | <b>19(S)</b> |
| <b>1<br/>Raro</b>                   | Falha nunca aconteceu e não é<br>expectável que aconteça num<br>prazo de 5000 Horas de motor<br>(ou 20 anos).                             | <b>1(L)</b>  | <b>3(L)</b>  | <b>6(M)</b>  | <b>10(M)</b> | <b>15(S)</b> |

Esta matriz, foi também adaptada a partir do exemplo sugerido na obra de referência “RCM3: Risk-Based Reliability Centered Maintenance” [3] e contempla cinco níveis de classificação de severidade (insignificante, baixa, moderada, elevada e grave) e de probabilidade de ocorrência (raro, improvável, eventual, provável e praticamente certo). A classificação da severidade é feita tendo em consideração quatro tipos de consequências, que podem resultar da ocorrência do modo de falha:

- Ambientais;
- Saúde e segurança;
- Operacionais;
- Económicas.

Cada modo de falha deve então ser analisado e avaliado segundo estes parâmetros, atribuindo-se um valor de severidade de acordo com a consequência mais grave identificada.

A descrição das consequências ambientais e de saúde e segurança apresentadas na matriz, estão de acordo com o sugerido por Basson [3]. Já a descrição das consequências operacionais e económicas foram adaptadas, de maneira a corresponderem à realidade e às necessidades do Exército Português. Os tempos e os locais de reparação apresentados nas consequências operacionais vão de encontro ao que se encontra definido na doutrina do Exército e os valores presentes nas consequências económicas foram definidos tendo em consideração o valor e o orçamento anual de manutenção das Pandur II.

A descrição dos vários níveis de probabilidade de ocorrência corresponde também ao sugerido por Basson [3] (em termos do número de anos apresentados), tendo sido acrescentado o valor de horas de motor correspondentes ao número de anos em questão. Para definir esta relação foram utilizados os valores anteriormente estimados para a utilização média das Pandur II refletida em número de horas de motor anuais (optou-se por este valor, por refletir um nível de utilização mais próximo da realidade).

A matriz utilizada neste trabalho, tal como referido, encontra-se representada na Tabela 10, e foi definida com o propósito de ser aplicável a todos os subsistemas do sistema de armas Pandur II, e não exclusivamente ao sistema de refrigeração, estudado nesta dissertação. “Marcando” na matriz as classificações de severidade e probabilidade de ocorrência obtém-se a classificação do risco correspondente. Por exemplo, um modo de falha com uma classificação de severidade de 3 e uma probabilidade de ocorrência de 2, vai ter uma classificação de risco de 9(M). Como é possível verificar, a matriz do risco apresenta quatro níveis de risco (divididos em vinte e cinco valores de risco diferentes correspondes às combinações possíveis entre a severidade e a probabilidade de ocorrência):

- Ligeiro (L);
- Médio (M);
- Severo (S);
- Grave (H).

Os níveis ligeiro e médio, são considerados riscos toleráveis, isto é, aceitáveis para a organização, enquanto que os níveis severo e grave são níveis de risco considerados intoleráveis, e que obrigam a uma intervenção e à adoção de medidas de mitigação do risco que os permitam tornar aceitáveis. A análise de risco para cada um dos modos de falha dos componentes que constituem o sistema de refrigeração, encontra-se nas fichas de informação, em anexo, mais concretamente nas últimas quatro colunas das fichas. Cada uma dessas colunas encontra-se identificada com uma letra:

- $P_{ted}$ : Probabilidade de ocorrência associada a uma função protegida<sup>4</sup>;
- P: Probabilidade de ocorrência;
- C: Consequência (ou severidade);
- R: Risco.

Seguindo esta análise de risco, e tendo em consideração a informação de apoio à decisão disponível nas fichas de informação, foram identificados como apresentando risco intolerável os modos de falha representados na Tabela 11. A identificação dos modos de falha que se encontra na tabela apresenta a mesma numeração a forma utilizada nas fichas de informação, com o propósito de permitir a identificação correta do modo de falha em questão, para além da numeração, encontra-se também referenciado o componente do sistema de refrigeração a que pertence.

**Tabela 11:** Modos de falha com risco intolerável

| <b>COMPONENTES</b>                                   | <b>MODOS DE FALHA</b>                                     |
|--|---|
| <b>BOMBA DE ÁGUA</b>                                 | 1.A.1 – 13(S)   |
| <b>RADIADOR</b>                                      | 1.A.5 – 17(S)   |
| <b>INTERCOOLER</b>                                   | 1.A.2 – 17(S)   |
| <b>VENTOINHA</b>                                     | 1.A.1 – 17(S)   |
| <b>PERMUTADOR DE CALOR DO ÓLEO HIDRÁULICO</b>        | 1.A.3 – 17(S)   |
| <b>PERMUTADOR DE CALOR DA TRANSMISSÃO AUTOMÁTICA</b> | 1.A.1 – 13(S)   |
| <b>MANGUEIRAS E TUBAGENS</b>                         | 1.A.1, 1.A.2, 1.A.5 – 17(S) e 1.A.3, 1.A.4, 1.A.6 – 13(S) |

### 3.3.7 Definição de ações de mitigação de risco

O processo de tomada de decisão (da metodologia RCM3) no que à identificação de tarefas e estratégias de mitigação de risco diz respeito, orienta-se pelo seu diagrama de decisão. O diagrama de decisão RCM3 é um quadro com uma série de questões relacionadas com a ocorrência das falhas e as suas consequências, que devem ser respondidas de acordo com a informação reunida ao longo do processo de aplicação da metodologia RCM3.

<sup>4</sup> Uma função protegida é aquela que está associada a sistemas de proteção como componentes redundantes.

Nesta dissertação, foi seguido o diagrama de decisão RCM3 (que se encontra no Anexo IV), respondendo às diversas questões nele presentes, com o objetivo de auxiliar na tomada de decisão, referente às ações de mitigação do risco que foram definidas e que constituem a proposta de plano de manutenção referente ao sistema de refrigeração das Pandur II.

Para registrar as respostas às questões do diagrama de decisão e a descrição das ações de mitigação do risco adotadas, foi necessário definir um modelo de ficha de decisão a utilizar nesta dissertação. O modelo utilizado foi adaptado a partir do modelo sugerido no livro de Basson [3], e apresenta a estrutura representada na Figura 20.

| Ficha de decisão RCM3 |    | Sistema: Refrigeração           |   |    |  |    |    |    |     |     |     | Referência: Sistema de armas Pandur II 8x8 |     |     |  |     |     |     |     |   |     | Autor: Filipe Silva |     |     |                      | Data: |     |     |     |                         |                                   |           |      |               |              |      |   |   |   |      |
|-----------------------|----|---------------------------------|---|----|--|----|----|----|-----|-----|-----|--|-----|-----|--|-----|-----|-----|-----|---|-----|---------------------|-----|-----|----------------------|-------|-----|-----|-----|-------------------------|-----------------------------------|-----------|------|---------------|--------------|------|---|---|---|------|
| Referência            |    | Avaliação da categoria do risco |   |    | Avaliação da estratégia de gestão do risco |    |    |    |     |     |     |  |     |     | Descrição da estratégia de gestão do risco |     |     |     |     |   |     |                     |     |     | Descrição de tarefas |       |     |     |     |                         | Revisão da classificação do risco |           |      |               |              |      |   |   |   |      |
| F                     | FS | FM                              | 1 | ES | HS   | EE | HE | EO | HP1 | HO1 | EP1 | EO1  | ET1 | HP2 | HO2  | EP2 | EO2 | ET2 | HP3 | HO3   | EP3 | EO3                 | ET3 | HP4 | HP5                  | HO4   | EP4 | EP5 | EO4 | Int. Inicial de tarefas | UM                                | Id. Pess. | Qtd. | Duração (Hrs) | Tipo de Mod. | Pted | P | C | R |      |
| Bomba de água         |    |                                 |   |    |  |    |    |    |     |     |     |  |     |     |  |     |     |     |     | Troca programada da correia da bomba de água. Verificações periódicas ao estado de conservação da correia (identificando a existência de fissuras cruzadas e faltas de material). |     |                     |     |     |                      |       |     |     |     | 1500/6 e 250/1          | HM/Ano                            | Mec.      | 1    | 0,75          | P            |      |   | 2 | 3 | 9(M) |

**Figura 20:** Ficha de decisão

À semelhança da ficha de informação, esta ficha apresenta também um cabeçalho onde é identificado o equipamento e respetivo sistema e subsistema em análise, bem como o componente (identificado na linha sombreada a verde) a que se refere a informação.

As colunas identificadas como “referência”, contemplam (por esta ordem) a identificação da falha, da falha funcional e do modo de falha correspondente ao componente em questão. As restantes colunas, até à coluna referente à “descrição da estratégia de gestão do risco”, estão relacionadas com as perguntas constantes no diagrama de decisão, sendo que cada conjunto de letras que se encontra na ficha de decisão corresponde a uma pergunta do diagrama (neste identificadas com o mesmo conjunto de letras). No caso de a resposta à pergunta ser “sim” é colocado um “S” na respetiva coluna da ficha de decisão, e no caso de a resposta ser “não” é colocada a letra “N”.

Na coluna referente à “descrição da estratégia de gestão do risco” é feito um breve resumo das tarefas a executar e nas colunas identificadas como “descrição de tarefas”, é registada informação relacionada com as tarefas descritas na coluna anterior. As diversas colunas da “descrição de tarefas”, referem-se ao seguinte:

- Intervalo inicial de tarefas: descreve a frequência de execução das tarefas de manutenção definidas;
- Unidade de medida: unidade em que se encontram expressos os valores definidos no intervalo de tarefas;
- Identificação de pessoal: identificação da tipologia de pessoal que deve efetuar a tarefa;

- Quantidade: número de elementos necessários para a execução das tarefas;
- Duração: tempo estimado de duração das tarefas propostas;
- Tipo de modificação: descreve a tipologia das tarefas adotadas (podem referir-se a alterações de procedimento, de formação, de reprojeto, etc.).

Por fim, nas últimas colunas é feita uma reavaliação do risco associado a cada modo de falha, baseada na previsão do impacto que as tarefas definidas possam vir a ter na mitigação das falhas associadas aos componentes. Em Anexo encontram-se as três fichas (uma para cada subsistema) de decisão efetuadas nesta dissertação, com as correspondentes descrições das estratégias de mitigação e gestão do risco, que no seu conjunto contribuem para formar (e neste caso concreto, reformular) um plano de manutenção para o sistema de refrigeração da Pandur II, que se encontra representado na Tabela 12. As tarefas propostas na Tabela 12, são analisadas e discutidas em detalhe no capítulo seguinte desta dissertação.

**Tabela 12:** Plano de manutenção proposto

| <b>TAREFAS</b>   | <b>OBSERVAÇÕES</b>  |
|--|---|
| <b>A cada utilização:</b>  |   |
| Testes de funcionamento aos sistemas de aviso de falha (sensor de temperatura e luzes de emergência de fluido e de transmissão).   | Tarefa adicional que não constava no plano de manutenção do fabricante.                                 |
| <b>Mensalmente:</b>  |   |
| Abrir bujões de drenagem do casco e verificar a existência de fugas de líquido de refrigeração.<br>Verificar se sistema de refrigeração não apresenta danos nem fugas.<br>Verificar o nível do líquido de refrigeração.            | Mantêm-se as tarefas do plano de manutenção do fabricante.  |
| <b>Semestralmente:</b>   |   |
| Verificar nível de líquido refrigerante.<br>Verificar e se necessário acrescentar anticongelante e aditivo anti cavitação.   | Mantêm-se as tarefas do plano de manutenção do fabricante.  |
| <b>Anualmente (ou a cada 250 Horas de Motor):</b>  |   |
| Aspirar Radiador.<br>Verificar correia trapezoidal da bomba de água.<br>Verificar manguueiras e tubagens do líquido de refrigeração.   | Verificações da correia da bomba de água e das manguueiras e tubagens com recurso a câmara de inspeção. |
| <b>Bienal (ou a cada 500 Horas de Motor):</b>  |   |
| Remoção (e reinstalação) do grupo de alimentação.<br>Verificar visualmente manguueiras do líquido de refrigeração.<br>Verificar visualmente correia trapezoidal da bomba de água.<br>Verificar visualmente o depósito de expansão. | Adiciona-se a verificação do depósito de expansão.  |
| <b>A cada 4 anos (ou 1000 Horas de Motor):</b>   |   |
| Mudar líquido de refrigeração.   | Mantêm-se as tarefas do plano de manutenção do fabricante.  |
| <b>A cada 6 anos (ou 1500 Horas de Motor):</b>   |   |
| Substituir correia da bomba de água.   | Mantêm-se as tarefas do plano de manutenção do fabricante.  |
| <b>A cada 7 anos (ou 1750 Horas de Motor):</b>   |   |
| Substituir os vedantes das ligações rápidas.   | Tarefa adicional que não constava no plano de manutenção do fabricante.                                 |
| <b>A cada 10 anos:</b>   |   |
| Efetuar limpeza do radiador.<br>Efetuar limpeza do Intercooler.  | Tarefa adicional que não constava no plano de manutenção do fabricante.                                 |

## 4 Análise e discussão de resultados

Neste capítulo pretende-se analisar de forma crítica os resultados obtidos e justificar as opções tomadas, em relação às ações de mitigação do risco adotadas. O plano de manutenção proposto varia apenas em quatro novas ações, que não eram efetuadas no plano de manutenção do fabricante, e na alteração da periodicidade de execução de duas tarefas já existentes, pelo que se pode afirmar que não constitui uma mudança significativa face aos procedimentos já efetuados e enraizados na estrutura e nas rotinas de manutenção deste equipamento.

A proposta de verificação dos sistemas de aviso, como o indicador de temperatura do motor e as luzes de emergência de fluido e transmissão, tem como propósito garantir que potenciais sobreaquecimentos da viatura relacionados com falhas do sistema de refrigeração são detetados atempadamente de maneira a prevenir consequências muito graves ao nível de outras falhas associadas que daí possam resultar.

A decisão de alteração das frequências de inspeção da correia da bomba de água e das mangueiras do líquido de refrigeração, de bienal para anual, deveu-se ao facto de terem ocorrido falhas da correia da bomba de água e existência de fugas relacionadas com as mangueiras, com tempos de falha inferiores a dois anos (ou 500 Horas de motor equivalentes). A inspeção era efetuada a cada dois anos, pois a sua inspeção visual requer a remoção do Powerpack da viatura, de maneira a ser possível aceder aos componentes referidos. Desta forma, a redução da periodicidade da inspeção para um ano requer a aquisição de um sistema ótico (câmara de inspeção) que permita efetuar as verificações visuais sem necessidade de remoção do Powerpack (de maneira a evitar sobrecarregar o trabalho relacionado com as manutenções periódicas e desta forma evitar acumular trabalho e tornar as revisões mais demoradas). Existem diversos modelos destas câmaras no mercado, com diversos custos consoante as características do equipamento pretendido. Dentro desta vasta gama, destaca-se a câmara “UniversalInspect Bosch 0603687000” [38] com um custo de cerca de 95 euros (dentro desta gama foi o equipamento mais barato encontrado) e a câmara “Bosch professional GIC 120” [39], com características ligeiramente superiores e um custo na ordem dos 180 euros.

Este é um equipamento que pode constituir-se como uma mais valia para as equipas de manutenção do Exército, uma vez que permite realizar inspeções em locais não acessíveis sem a necessidade de remover o PowerPack, o que aliado ao facto de ser um equipamento portátil, tanto pode ser usado em oficina (nas unidades de manutenção intermédia de apoio direto e apoio geral) como por equipas de contato nas unidades orgânicas ou em campanha, e pode ser utilizado para inspecionar não apenas o sistema de refrigeração, mas todos os sistemas cujos componentes se encontrem inacessíveis à vista desarmada, permitindo uma maior facilidade e frequência nas inspeções realizadas. O seu custo relativamente baixo é também uma vantagem, uma vez que não se configurará como um entrave de maior para a sua aquisição.

Foi também proposta a substituição programada dos vedantes das ligações rápidas a cada sete anos (pode ser feito a cada oito anos no caso da inspeção no final dos sete anos não coincidir com uma inspeção que implique a retirada do PowerPack) ou de forma equivalente 1750 Horas de motor. Esta

decisão foi tomada, uma vez que para os modos de falha relacionados com a degradação dos vedantes, se obteve uma estimativa para o *MTBF* de 1827 Horas de motor e por se tratar do tipo de falha mais recorrente no sistema de refrigeração. Por ser uma intervenção com um custo aceitável (a substituição dos vedantes de toda a frota terá um custo de 1782 euros, o que representa por viatura e por ano um custo de cerca de 1,41 euros), que se considera que pode vir a diminuir consideravelmente a ocorrência de falhas deste tipo foi então proposta esta ação de troca programada dos vedantes.

Foi também proposto efetuar-se uma limpeza do radiador a cada 10 anos, uma vez que se trata de um componente muito importante para o funcionamento do sistema de refrigeração e com um *MTBF* estimado de cerca de 2500 Horas de motor, o que equivale a cerca de dez anos. Esta limpeza considera-se necessária por se tratar de um equipamento militar, que é utilizado em condições todo-o-terreno onde é propício, e de certa forma inevitável; o acumular de sujidade neste tipo de componentes (daí que se tenha optado por manter também a realização da aspiração do radiador anualmente). O cálculo da distribuição de Weibull para este modo de falha, permitiu obter um valor de  $\beta \approx 1$ , o que revela o carácter aleatório da ocorrência destas falhas, e permite também concluir que a acumulação de sujidade neste componente é causada e se deve ao contexto operacional em que as Pandur II são utilizadas. Foi assumido nesta dissertação atribuir o mesmo valor do *MTBF* para a acumulação de sujidade no intercooler, por se tratar de um componente muito semelhante ao radiador, e que se encontra localizado junto a este, sofrendo o mesmo tipo de desgaste associado à utilização da viatura, daí que se tenha também proposto a sua limpeza ao fim de 10 anos.

Para os outros dois componentes em que também foi efetuado o cálculo do *MTBF* (sensor de nível e válvula de descompressão) não foram propostas quaisquer ações de manutenção programada, tendo sido definida a manutenção corretiva como a estratégia de gestão do risco a adotar, uma vez que se tratam de componentes com valores de *MTBF* elevados (muito acima do número de horas de motor que qualquer viatura apresenta atualmente), com carácter de falha aleatório e em que não existe informação sobre indicadores que possam ser utilizados para efetuar manutenção sob condição. No caso da válvula de descompressão, e tendo em conta que as consequências da sua falha poderem ser mais graves que a do sensor de nível, foi ponderada a sua troca programada, mas os avultados custos associados a essa renovação (cerca de 123000 euros para toda a frota) acabaram por fazer excluir esta opção.

Os restantes valores estimados para o *MTBF* e que se encontram representados na Tabela 9 no capítulo anterior, não foram tidos em conta para a seleção de tarefas de manutenção, uma vez que não se constituem como valores credíveis. Estes modos de falha apresentam uma ou duas ocorrências, o que na prática se traduz na existência de um ou dois tempos de falha, o que é manifestamente insuficiente para que a aplicação dos modelos matemáticos utilizados nesta dissertação possa ser considerada fidedigna e com significado matemático. A pouca informação disponível relativa a estas falhas não cumpre os requisitos mínimos necessários para que se possam aplicar os modelos utilizados corretamente, pelo que a informação relativa aos *MTBF* destes modos de falha tivesse sido desprezada, e se recorresse a bases de dados de taxas de falha para componentes genéricos, por forma a obter um valor que pudesse servir como estimativa inicial para a probabilidade de ocorrência da falha.

A Tabela 13 resume os valores retirados das duas bases de dados utilizadas, o livro de David Smith “Reliability, Maintainability and Risk. Practical methods for engineers” [40] e a “Nonelectronic parts reliability data” [41]. Os valores apresentados convergem em ambos os documentos (no caso em que existem nos dois) ou são apenas retirados de um deles e representam um valor médio correspondente à generalidade dos modos de falha apresentados por estes componentes, e não a nenhum modo de falha em específico.

**Tabela 13:** MTBF de componentes a partir de bases de dados

| <b>COMPONENTES</b>           | <b>MTBF (HORAS)</b> |
|------------------------------|---------------------|
| <b>BOMBA DE ÁGUA</b>         | 20000               |
| <b>TERMÓSTATO</b>            | 57537               |
| <b>DEPÓSITO DE EXPANSÃO</b>  | 31645               |
| <b>RADIADOR</b>              | 126582              |
| <b>PERMUTADORES DE CALOR</b> | 90909               |
| <b>MANGUEIRAS</b>            | 225733              |

Os elevados valores registados na Tabela 13, associados à pouca informação relativa a falhas levaram a que não fossem adotadas ações de manutenção programada para os modos de falha relativos aos componentes presentes na tabela. Na literatura foi também possível encontrar alguns artigos com informação, que acaba por ir ao encontro da decisão tomada, e de certa forma corrobora a decisão de efetuar manutenção corretiva.

Yutko, Jerath e Brennan, efetuam uma análise à taxa de falha de veículos complexos, nomeadamente autocarros (que são equipamentos bastante semelhantes às Pandur II em termos de motorização, sendo o motor utilizado na Pandur II também utilizado em alguns modelos de autocarros), e referem na análise dos dados, para um dos modelos que analisaram, a substituição da bomba de água para uma utilização de 347398 milhas (aproximadamente 559000 quilómetros), e para outro dos modelos a execução de uma ação de reparação relacionada com sobreaquecimento do motor (sem detalhe) para uma utilização de 382026 milhas (aproximadamente 614811 quilómetros) [42].

Estes valores vêm confirmar os elevados tempos de vida dos componentes associados ao sistema de refrigeração deste tipo de equipamentos.

Também Chan, Mui e Woo estudaram a política de manutenção e a fiabilidade dos radiadores de uma frota de autocarros, e referem para este componente em específico que [43]:

- O entupimento das alhetas por sujidade é facilmente observável visualmente e que a manutenção sob condição a efetuar é simplesmente realizar a sua limpeza;
- O entupimento dos tubos interiores do radiador pode ser detetado mediante a instalação de medidores de caudal, mas o seu elevado custo de instalação torna esta medida impraticável;
- A existência de fugas no radiador é difícil de prever, mas é facilmente observável se ocorrer;

Concluem que a adoção de estratégias de manutenção preditiva para reduzir o número de falhas relacionadas com entupimento e fugas nos radiadores se revela impraticável, e que tendo em conta a intensidade de falha dos radiadores que estudaram que se mostrou praticamente constante no tempo, do ponto de vista económico a manutenção preventiva se afigura como desnecessária, mas que do ponto de vista de engenharia, se efetua manutenção preventiva ao sistema de refrigeração (limpeza dos radiadores) quando os autocarros atingem os 6, 10 e 14 anos (coincide com principais revisões dos autocarros) [43].

Também James, efetua uma revisão de literatura focada nos temas da fiabilidade, disponibilidade e manutenibilidade em que cobre os aspetos mecânicos, tribológicos, elétricos e eletrónicos dos automóveis e conclui que existem disponíveis alguns trabalhos relacionados com a fiabilidade e análise do óleo de motor, e no entanto, nenhum que tenha sido identificado relativo à análise do óleo da transmissão nem do líquido de refrigeração, que se configuram também como importantes para a fiabilidade geral do motor e das viaturas [44]. Desta forma é possível afirmar que se verifica na literatura uma escassez de informação relativa à utilização de manutenção sob condição referente aos componentes que constituem um sistema de refrigeração automóvel típico. O Exército já efetua uma verificação periódica ao líquido de refrigeração, com recurso a testes rápidos, que permitem medir indicadores como o pH, o nível de concentração de sulfatos e cloretos, a temperatura do anticongelante e a concentração do aditivo DCA4, e efetua a mudança de líquido a cada 4 anos, o que se pode considerar um período relativamente longo. No entanto, há a possibilidade de estudar a realização alternativa de outro tipo de análises, mais complexas (algumas das quais podem ser feitas com equipamentos portáteis) e que permitam considerar a possibilidade de efetuar a troca do líquido de refrigeração apenas sob condição e não de forma programa por intervalo de tempo.

Em relação aos modos de falha identificados com risco considerado intolerável, e que se encontram identificados na Tabela 11, é importante referir que os que estão associados à bomba de água, ao radiador, ao intercooler, à ventoinha e aos permutadores de calor do óleo hidráulico e da transmissão automática apresentam na revisão do risco (registada nas fichas de decisão) uma diminuição do risco para valores aceitáveis, sem ter sido adotada nenhuma medida de manutenção proativa (foi definida a execução de manutenção corretiva), isto porque, em virtude dos valores previamente calculados para o *MTBF* (e que posteriormente por não serem fidedignos foram descartados) se considerou uma probabilidade de ocorrência muito superior à probabilidade de ocorrência real. Na revisão do risco, foi considerada essa probabilidade de ocorrência real que permite então obter valores de risco consideravelmente mais baixos e toleráveis. Relativamente aos modos de falha 1.A.3 e 1.A.4 das mangueiras e tubagens, as tarefas de manutenção propostas, prevê-se que tenham como consequência a diminuição da frequência de ocorrência e por inerência do risco associado.

Na Tabela 14 encontra-se a comparação entre o valor do risco inicial para a análise efetuada e o valor do risco residual previsto após a adoção das medidas de mitigação do risco propostas nesta dissertação.

Tabela 14: Comparação entre Risco inicial e Risco revisito

| COMPONENTE   | MODO DE FALHA | RISCO INICIAL | RISCO REVISTO |
|--|---------------|---------------|---------------|
| <b>Bomba de água</b>                                 | 1.A.1         | 13(S)         | 9(M)          |
|  | 1.A.2         | 6(M)          | 6(M)          |
|  | 1.A.3         | 6(M)          | 6(M)          |
|  | 1.A.4         | 6(M)          | 6(M)          |
|  | 1.A.5         | 6(M)          | 6(M)          |
|  | 1.B.1         | 6(M)          | 6(M)          |
| <b>Termóstato</b>                                    | 1.A.1         | 6(M)          | 6(M)          |
|  | 1.A.2         | 6(M)          | 6(M)          |
|  | 1.A.3         | 6(M)          | 6(M)          |
|  | 1.B.1         | 6(M)          | 6(M)          |
|  | 1.B.2         | 6(M)          | 6(M)          |
| <b>Permutador de calor da caixa de transferência</b> | 1.A.1         | 6(M)          | 6(M)          |
|  | 1.A.2         | 6(M)          | 6(M)          |
|  | 1.A.3         | 6(M)          | 6(M)          |
| <b>Mangueiras e Tubagens</b>                         | 1.A.1         | 17(S)         | 9(M)          |
|  | 1.A.2         | 17(S)         | 9(M)          |
|  | 1.A.3         | 13(S)         | 9(M)          |
|  | 1.A.4         | 13(S)         | 9(M)          |
|  | 1.A.5         | 17(S)         | 9(M)          |
|  | 1.A.6         | 13(S)         | 9(M)          |
|  | 1.B.1         | 6(M)          | 6(M)          |
|  | 2.A.1         | 9(M)          | 9(M)          |
| <b>Depósito de expansão</b>                          | 1.A.1         | 3(L)          | 3(L)          |
|  | 1.B.1         | 5(L)          | 3(L)          |
|  | 1.B.2         | 9(M)          | 9(M)          |
|  | 1.B.3         | 6(M)          | 6(M)          |
| <b>Válvula de descompressão</b>                      | 1.A.1         | 9(M)          | 9(M)          |
|  | 1.A.2         | 9(M)          | 9(M)          |
| <b>Radiador</b>                                      | 1.A.1         | 8(M)          | 5(L)          |
|  | 1.A.2         | 9(M)          | 9(M)          |
|  | 1.A.3         | 6(M)          | 6(M)          |
|  | 1.A.4         | 6(M)          | 6(M)          |
|  | 1.A.5         | 17(S)         | 9(M)          |
| <b>Intercooler</b>                                   | 1.A.1         | 8(M)          | 5(L)          |
|  | 1.A.2         | 17(S)         | 9(M)          |
|  | 1.A.3         | 6(M)          | 6(M)          |
|  | 1.A.4         | 6(M)          | 6(M)          |
| <b>Ventoinha</b>                                     | 1.A.1         | 17(S)         | 9(M)          |
|  | 1.A.2         | 17(S)         | 9(M)          |
|  | 1.A.3         | 6(M)          | 6(M)          |
| <b>Permutador de calor do óleo hidráulico</b>        | 1.A.1         | 6(M)          | 6(M)          |
|  | 1.A.2         | 6(M)          | 6(M)          |
|  | 1.A.3         | 17(S)         | 9(M)          |
| <b>Permutador de calor da transmissão</b>            | 1.A.1         | 13(S)         | 9(M)          |
|  | 1.A.2         | 6(M)          | 6(M)          |
|  | 1.A.3         | 6(M)          | 6(M)          |
| <b>Sensor de Nível</b>                               | 1.A.1         | 9(M)          | 9(M)          |
|  | 1.A.2         | 9(M)          | 9(M)          |
|  | 1.B.1         | 9(M)          | 9(M)          |

## 5 Conclusões, Limitações e Trabalhos Futuros

Neste capítulo apresentam-se as conclusões retiradas ao longo da elaboração desta dissertação, as limitações e simplificações assumidas ao longo do processo bem como algumas propostas de trabalhos futuros e recomendações.

### 5.1 Conclusões

Efetuada um balanço do trabalho realizado é possível retirar uma série de ilações referentes à manutenção do sistema de refrigeração das Pandur II, quer ao nível do procedimento relacionado com o registo e tratamento da informação relativa a falhas, quer ao nível das tarefas de manutenção realizadas, e que resultaram num conjunto de propostas que se acredita, poder trazer melhorias para o Exército Português ao nível da execução e da gestão da manutenção do sistema de armas Pandur II e que podem ser estendidas ao conjunto dos equipamentos em serviço no Exército.

Tudo isto leva a que nesta dissertação, para além do plano de manutenção proposto, se identifique a necessidade de melhorar o registo das falhas no Exército, propondo-se desta forma o seguinte:

- Sistematização de inclusão de informação acerca do modo de falha nos registos das ordens de trabalho, podem ser utilizados como opção (para o caso deste sistema) os modos de falha identificados nas fichas de informação, como forma de aproveitar o trabalho efetuado nesta dissertação (inclusão de foto na ordem de trabalho);
- Obrigatoriedade de inclusão do registo das Horas de motor, Quilómetros e Horas do trem de potência;
- Definição de procedimento generalizado a utilizar aquando da abertura e encerramento das ordens de trabalho, de maneira a que o tempo em que estas se encontrem abertas, corresponda efetivamente ao tempo desde que a falha foi detetada até que foi reparada.

Após a análise efetuada durante esta dissertação, é possível concluir que este é um sistema robusto, com vários componentes com poucas ou nenhuma falhas, e no caso dos componentes com modos de falha mais recorrentes, apresentam valores de *MTBF* elevados. No caso destes últimos modos de falha, a determinação da distribuição de Weibull que lhes está associada revelou valores do parâmetro  $\beta$  próximos de 1, confirmando que as taxas de falha revelam que os componentes se encontram na fase de vida útil, apresentando falhas aleatórias e difíceis de prever.

Também o plano de manutenção do fabricante se revelou adequado, necessitando apenas de alguns ajustes, de maneira a mitigar os riscos associados aos modos de falha mais recorrentes, no entanto a impossibilidade em obter valores de taxa de falha (ou *MTBF*) que obrigou a recorrer a bases de dados, torna-se uma limitação, na medida em que impede que ações de manutenção possam ser definidas para esses componentes, com maior rigor e mais adequadas à realidade da vida deste sistema em específico. Outra mais valia desta dissertação, reside no facto de ter mostrado que é possível efetuar uma análise deste género, sem necessidade de grande investimento e com recursos a ferramentas disponíveis no Exército.

Em relação à aplicação da metodologia RCM3, esta trouxe algumas diferenças face à metodologia RCM2, nomeadamente:

- Foi tido em consideração o contexto operacional do equipamento em análise, o que permitiu ter em conta as exigências e os requisitos operacionais associados à utilização das Pandur II;
- Os modos de falha foram divididos em causa e mecanismo, identificando a falha em concreto, e a potencial causa que estará na sua origem;
- A análise do risco e o diagrama de decisão tiveram em consideração as consequências e a sustentabilidade ambiental;
- A descrição dos efeitos da falha é feita de modo mais detalhado e fornecendo mais informação de apoio à decisão;
- O próprio diagrama de decisão RCM3 apresenta algumas diferenças face ao diagrama de decisão RCM2, na forma como propõe lidar e tratar o risco.

## **5.2 Limitações**

No decorrer deste trabalho, foram surgindo algumas limitações que foram assumidas e que muitas vezes obrigaram a adotar simplificações, que tiveram influência no desenvolvimento do trabalho e na aplicação da metodologia, e que conseqüentemente influenciaram os resultados obtidos.

Uma limitação com grande importância para o trabalho e para os resultados obtidos, está relacionada com as ordens de trabalho (documentos onde se registam as ações de manutenção) e com a informação nelas registada. Muitas das ordens de trabalho analisadas não apresentavam uma descrição do tipo de falha (referindo apenas, a título de exemplo: sensor de nível inoperacional), o que condiciona a identificação do modo de falha em questão e levou a que fosse assumido nesta dissertação que a probabilidade de ocorrência fosse igual para todos os modos de falha relativos ao mesmo componente (como foi o caso do sensor de nível, por exemplo), o que não é verdade. Para além da falta de detalhe na descrição das falhas, verificou-se também que várias ordens de trabalho não continham a informação relativa o número de horas de motor, ou quilometragem da viatura na data em que a falha ocorreu, o que impossibilita a determinação do tempo de falha associado. Estas lacunas levaram a que várias ordens de trabalho referentes ao sistema de refrigeração não fossem utilizadas nesta dissertação (em específico na parte da determinação dos *MTBF*). Outra imprecisão identificada nas ordens de trabalho prende-se com o tempo decorrente entre a abertura e o encerramento da ordem, existindo casos com duração de 0 horas e outros com duração de 78000 horas, o que revelou não ser informação fidedigna e que foi desprezada, impedindo o cálculo do tempo de indisponibilidade das viaturas associado a cada modo de falha.

## **5.3 Propostas de Trabalhos Futuros**

Por fim, no seguimento do trabalho efetuado nesta dissertação são propostos os seguintes trabalhos futuros:

- Estender a análise RCM3 à totalidade do sistema de armas Pandur II, tratando-o como um único sistema;
- Adotar esta metodologia para outros sistemas de armas do Exército Português;
- Recorrer a modelos com Redes de Petri, como representação da dinâmica real do processo incluindo as condições de falha;
- Analisar a viabilidade da aplicação ao sistema de refrigeração, de estratégias de manutenção preditiva, relacionadas com a aplicação de modelos matemáticos e computacionais, envolvendo modelos de inteligência artificial;
- Consciencialização de todos os intervenientes na gestão e execução da manutenção dos sistemas de armas para o registo mais preciso e objetivo das ordens de trabalho no que diz respeito as falhas dos sistemas a fim de facilitar a recolha e tratamento de dados de fiabilidade, nomeadamente relativos às taxas de falha.

## 6 Bibliografia

- [1] BSI, *BS EN 13306:2017 - Maintenance Terminology*. United Kingdom, 2017.
- [2] John Moubray, *RCM II - Reliability Centered Maintenance*, 2nd Editio. Oxford, 1997.
- [3] Marius Basson, *RCM 3: Risk-Based Reliability Centered Maintenance*. South Norwalk: Industrial Press, INC., 2018.
- [4] F.S.Nowlan and Howard Heap, "Reliability centred maintenance," 1978.
- [5] Maintenance Steering Group - 3 Task Force, "Maintenance Program Development Document MSG-3," Washington DC, 1983.
- [6] SAE, *SAE JA1011 - Evaluation Criteria for Reliability-Centered Maintenance (RCM) Process*, vol. 4970. United States of America, 2009.
- [7] SAE International, *SAE JA1012- A Guide to the Reliability-Centered Maintenance (RCM) Standard*. Warrendale, Pennsylvania, United States of America, 2002.
- [8] The Aladon Network, "Aladon - Reliability Centered Maintenance (RCM)," 2020. [Online]. Available: <https://www.thealadonnetwork.com/about-aladon/methodologies/reliability-centered-maintenance-rcm/>. [Accessed: 19-Mar-2020].
- [9] International Standardization Organization (ISO), *ISO 55000 - Asset Management - Overview, Principles and Terminology*. 2011.
- [10] International Standardization Organization (ISO), *ISO 31000 - Risk management*. 2009.
- [11] "BS EN 60300-3-11: 2009 BSI Standards Publication Dependability management — maintenance," 2009.
- [12] M. Rausand and A. Hoyland, *System reliability theory*, 2nd Editio. New Jersey: John Wiley and Sons, Inc., 2004.
- [13] Department of Defence - USA, *MIL-STD-1629A*, vol. s7-X, no. 252. United States of America, 1890, p. 326.
- [14] SAE International, *SAE ARP5580: Recommended failure modes and effects analysis (FMEA) practices for non-automobile applications*, no. 724. 2001, pp. 776–790.
- [15] I. STANDARD, *IEC 60812*. Switzerland, 2006, p. 13.
- [16] SAE International, *SAE J1937 - Potential Failure Mode and Effects Analysis in Design (Design FMEA) and Potential Failure Mode and Effects Analysis in Manufacturing and Assembly Processes (Process FMEA) and Effects Analysis for Machinery (Machinery FMEA)*. 2009.
- [17] L. Wang, Y. Gao, W. Xu, K. Hong, B. Wang, and X. Chen, "An Extended FMECA Method and Its Fuzzy Assessment Model for Equipment Maintenance Management Optimization," *J. Fail. Anal.*

- Prev.*, vol. 19, no. 2, pp. 350–360, 2019, doi: 10.1007/s11668-019-00611-3.
- [18] R. M. Gondim and M. A. V. Duarte, “Aplicação da estatística na manutenção preditiva,” *FAMAT em Rev.*, vol. 05, pp. 211–223, 2005.
- [19] E. J. M. Serrano, “Conceito, Classificação e Quantificação da Fiabilidade Humana na Relação Homem-Máquina,” Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2009.
- [20] L. O. R. Reis and J. J. de O. Andrade, “Análise de falhas e da posição na curva da banheira de moldes empregados em equipamentos de injeção,” *An. do XXIX ENEGEP*, 2009.
- [21] João Lafraia, *Manual de confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade*. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2001.
- [22] ReliaWiki, “Life data classification,” 2015. [Online]. Available: [http://reliawiki.org/index.php/Life\\_Data\\_Classification](http://reliawiki.org/index.php/Life_Data_Classification). [Accessed: 18-Sep-2020].
- [23] D. N. Murthy, M. Xie, and R. Jiang, *Weibull Models*, vol. 100, no. 471. New Jersey: John Wiley and Sons, Inc., 2004.
- [24] ReliaWiki, “The Weibull Distribution,” 2018. [Online]. Available: [http://reliawiki.org/index.php/The\\_Weibull\\_Distribution](http://reliawiki.org/index.php/The_Weibull_Distribution). [Accessed: 15-Sep-2020].
- [25] R. B. Abernethy, *The new Weibull handbook*, 5th ed. Florida: Robert B. Abernethy, 2006.
- [26] I. Pobocíková and Z. Sedláčková, “Comparison of four methods for estimating the Weibull distribution parameters,” *Appl. Math. Sci.*, no. 81–84, pp. 4137–4149, 2014, doi: 10.12988/ams.2014.45389.
- [27] M. Akram and A. Hayat, “Comparison of estimators of the weibull distribution,” *J. Stat. Theory Pract.*, vol. 8, no. 2, pp. 238–259, 2014, doi: 10.1080/15598608.2014.847771.
- [28] L. A. Ferreira and J. L. Silva, “Parameter estimation for Weibull distribution with right censored data using EM algorithm,” *Eksploat. i Niezawodn. - Maint. Reliab.*, vol. 19, no. 2, pp. 310–315, 2017, doi: 10.17531/ein.2017.2.20.
- [29] L. Held and D. Sabanés Bové, *Applied statistical inference: Likelihood and bayes*, vol. 9783642378. 2014.
- [30] WordPress, “Real Statistics using Excell - Fitting Weibull parameters via MLE.” [Online]. Available: <https://www.real-statistics.com/distribution-fitting/distribution-fitting-via-maximum-likelihood/fitting-weibull-parameters-mle/>. [Accessed: 20-Jul-2020].
- [31] Exército Português, “Exercito.pt.” [Online]. Available: <https://www.exercito.pt/pt/o-que-fazemos/viaturas/especiais/blindadas-de-rodas/Viatura Blindada Rodas PANDUR II 8x8>. [Accessed: 25-Jun-2020].
- [32] Steyr Daimler Puch Spezialfahrzeug GmbH, *Ministério da Defesa Nacional - Manual do Operador VBR Pandur 8x8 12,7 mm*, vol. 1. Viena: Ministério da Defesa nacional - Portugal,

- 2011.
- [33] E.-M. do Exército, “Despacho nº 225/CEME/2011 - Conceito de Manutenção do Exército.” p. 7, 2011.
- [34] Steyr Daimler Puch Spezialfahrzeug GmbH, *Manual de Manutenção/Reparação Nível II*, vol. 1. Viena: Ministério da Defesa nacional - Portugal, 2011.
- [35] Instituto Português do Mar e da Atmosfera, “IPMA.” [Online]. Available: <https://www.ipma.pt/pt/educativa/tempo.clima/>. [Accessed: 17-Aug-2020].
- [36] Fundação Francisco Manuel dos Santos, “PORDATA - Base de Dados Portugal Contemporâneo.” [Online]. Available: <https://www.pordata.pt/DB/Portugal/Ambiente+de+Consulta/Tabela>. [Accessed: 17-Aug-2020].
- [37] GD European Land Systems-Steyr GmbH, *CIP -Catálogo Ilustrado de Peças VBR Pandur 8x8 Terrestre*. Viena, Áustria: Ministério da Defesa nacional - Portugal, 2012.
- [38] “Ferramenta.pt.” [Online]. Available: [https://ferramentas.pt/camara-de-inspec-o-universalinspect-bosch-0603687000.html?utm\\_source=googleshopping&utm\\_medium=cpc&utm\\_campaign=googleshopping&gclid=Cj0KcQjwwuD7BRDBARIsAK\\_5YhXWp7hBH4Xbx1Q-u8BSCBog4ePc8qs7IRnoiH2fh3bs7bXkwW\\_OK5gaAizrEALw\\_wcB](https://ferramentas.pt/camara-de-inspec-o-universalinspect-bosch-0603687000.html?utm_source=googleshopping&utm_medium=cpc&utm_campaign=googleshopping&gclid=Cj0KcQjwwuD7BRDBARIsAK_5YhXWp7hBH4Xbx1Q-u8BSCBog4ePc8qs7IRnoiH2fh3bs7bXkwW_OK5gaAizrEALw_wcB).
- [39] “Ferramentaspro.pt.” [Online]. Available: <https://ferramentaspro.pt/p/camara-de-inspeo-gic-120-professional-bosch/387>. [Accessed: 28-Oct-2020].
- [40] D. J. Smith, *Reliability, maintainability and risk*, 9th editio., no. SEPT. Butterworth-Heinemann, 2017.
- [41] W. Denson, G. Chandler, W. Crowell, and R. Wanner, “NPRD-91 Nonelectronic Parts Reliability Data,” New York, 1991.
- [42] M. J. Yutko, K. Jerath, and N. S. Brennan, “A failure rate analysis of complex vehicles,” *Int. J. Heavy Veh. Syst.*, vol. 17, no. 1, pp. 76–98, 2010, doi: 10.1504/IJHVS.2010.029624.
- [43] C.-M. W. Ling-Yau Chang, Lai-Man Mui, “Reliability Analysis and Maintenance Policy of radiators for a large fleet of buses,” vol. 13, no. November 1996, pp. 117–126, 1997.
- [44] A. T. James, “Reliability, availability and maintainability aspects of automobiles,” *Life Cycle Reliab. Saf. Eng.*, no. 0123456789, 2020, doi: 10.1007/s41872-020-00130-3.

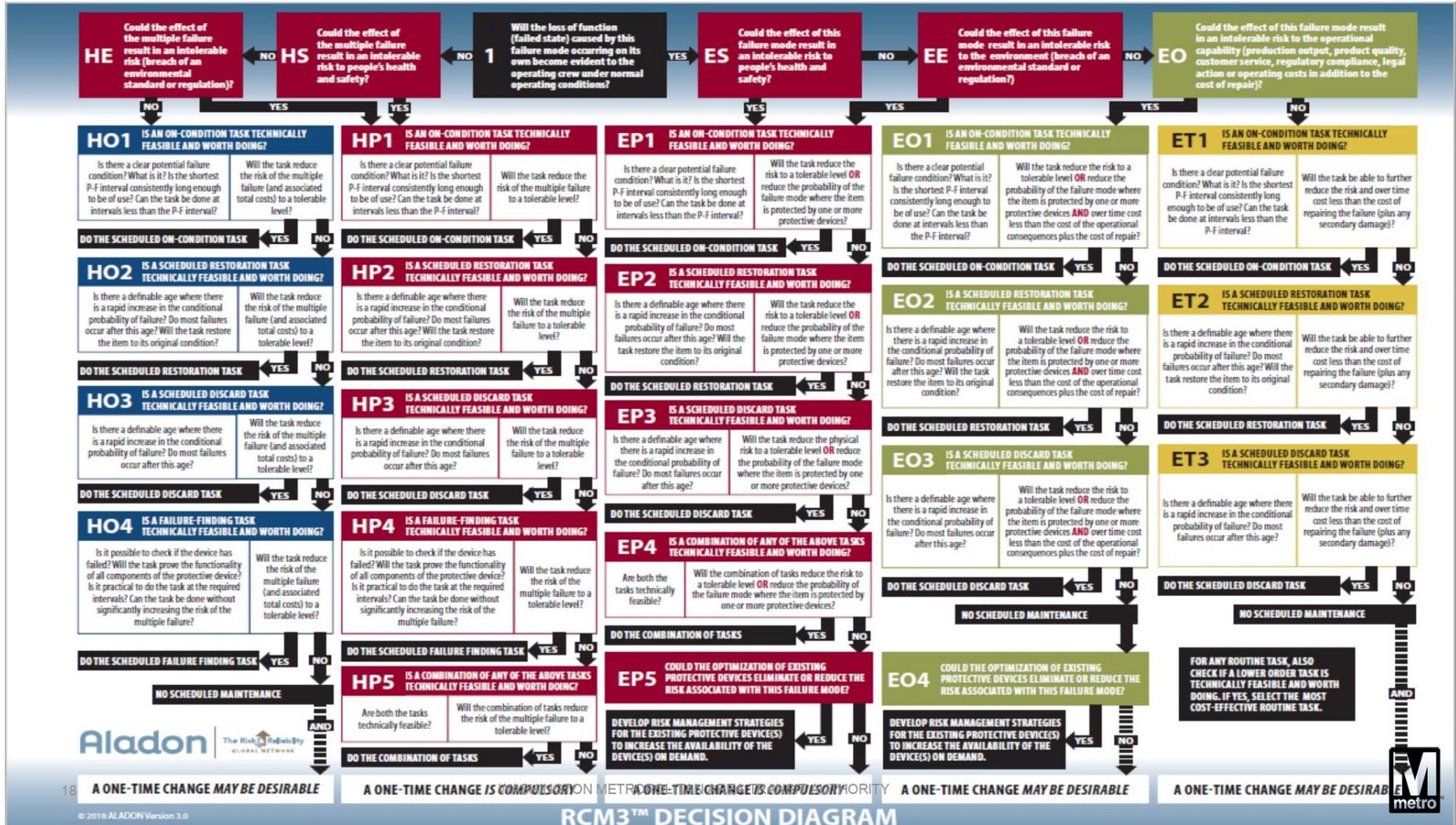
# Anexos

## Anexo I – Tabela de Comparação RCM2/RCM3

| Elemento RCM                  | RCM2 (SAE JA 1011)   | Destques RCM3  | Aperfeiçoamentos e Vantagens  |
|-------------------------------|--|--|---|
| <b>Contexto Operacional</b>   | Menciona e considera o Contexto Operacional (CO) ao longo do processo. O CO é considerado quando são identificados os modos de falha e quando são desenvolvidas as estratégias de gestão da falha. A norma SAE JA1011 menciona o CO como sendo importante, mas não um requisito fundamental para o processo. | O CO é o primeiro passo e a primeira questão que deve ser respondida na RCM3. O CO não só é importante, como é essencial para o desenvolvimento de um programa de gestão de risco sensato e defensável.  | Definir o CO é inegavelmente o primeiro passo do processo de RCM e todas as suposições e decisões são baseadas no CO, tomando a RCM3 compatível e excedendo os requisitos da norma SAE.<br>A avaliação e gestão do risco deve ser realizada dentro do contexto – de acordo com a norma ISO 31000. Otimização só é possível com o CO definido.   |
| <b>Modos de Falha</b>         | Define um Modo de Falha como o evento que causa a Falha Funcional / Estado de Falha. O facilitador / grupo de revisão deve ser constantemente lembrado do nível de detalhe correto (não para descrever os efeitos / sintomas da falha).  | Define um modo de falha como uma 'causa' e um 'mecanismo' que causa o Estado Falhado. Isto permite que o facilitador/grupo de revisão identifique as <i>causas de raiz</i> consistentemente e com o nível correto de detalhe. O mecanismo de falha também está ligado aos mecanismos de degradação.  | Permite uma identificação consistente e melhorada das causas das falhas, mesmo para facilitadores inexperientes. A modelação de equipamentos do tipo similar é mais fácil de executar e mais informação é transportada. A integração com outras abordagens baseadas no risco é agora fácil de conseguir. São as causas de raiz que são identificadas e tratadas e não os sintomas associados às falhas. |
| <b>Consequências Vs Risco</b> | Considera as consequências da falha e divide-as em quatro categorias: Segurança/Ambiente, Operacional, Não Operacional e uma única categoria de consequências de falhas ocultas. Todas as falhas são tratadas e as consequências avaliadas com base nas quatro categorias referidas.                         | Considera os Riscos <i>Físicos</i> e <i>Económicos</i> evidentes e separa os Riscos Ocultos em duas categorias, <i>Riscos Físicos</i> e <i>Riscos Económicos Ocultos</i> . Riscos Físicos são riscos que afetam a saúde, a segurança ou o meio ambiente, enquanto os Riscos Económicos afetam a capacidade operacional e o bem-estar financeiro. | Isto é valioso em ambientes de alto risco. É possível melhorar a integridade e o planeamento para testar dispositivos de proteção. O foco está nos dispositivos que podem ter impacto na segurança e melhora a compreensão do impacto económico e do risco dos mesmos.  |
| <b>Norma SAE JA 1011/1012</b> | RCM2 cumpre integralmente os requisitos mínimos das normas SAE JA 1011 e SAE JA 1012 RCM.  | A RCM3 cumpre totalmente os requisitos mínimos das Normas SAE JA 1011 e SAE JA 1012 e vai além desses requisitos.<br>RCM3 está alinhado com os Sistemas de Gestão ISO 55000 e ISO 31000.   | A RCM3 encontra-se alinhada com padrões novos e emergentes, tornando os resultados mais fáceis de defender.   |

|  |  |  |   |
|--|--|--|---|
| <h2 style="text-align: center;">Efeitos da Falha</h2>    | <p>O efeito de falha é definido numa frase (um parágrafo que descreve o que acontecerá se o modo de falha ocorrer e nada foi feito para evitá-lo). Requer que o facilitador registre os efeitos físicos de cada falha, fazendo as seguintes perguntas:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Que provas existem (se houver) de que a falha ocorreu?</li> <li>• De que forma (se houver) representa uma ameaça à segurança ou ao meio ambiente?</li> <li>• De que forma (se houver) afeta a produção ou as operações?</li> <li>• Que danos físicos (se houver) são causados pela falha?</li> </ul> <p>• O que deve ser feito para repará-lo?</p>   | <p>Com a RCM3 os efeitos estão separados em quatro níveis. A descrição dos efeitos de falha do RCM3 responde as seguintes perguntas:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Quando é que a falha é mais provável de ocorrer?</li> <li>• Com que frequência a falha ocorreria se nada fosse feito para a evitar?</li> <li>• Que provas existem (se houver) de que a falha ocorreu?</li> <li>• De que forma (se houver) representa uma ameaça à segurança ou ao meio ambiente?</li> <li>• De que forma (se houver) afeta a produção ou as operações?</li> <li>• Que danos físicos (se houver) são causados pela falha?</li> <li>• O que deve ser feito para repará-lo?</li> <li>• Causa algum dano secundário?</li> <li>• Qual é a perda de receita (se houver)?</li> </ul>  | <p>Indicadores mais fáceis de definir (diferença clara entre o que o operador/pessoal de manutenção vê vs. o que a gestão quer ver).</p> <p>O pior caso potencial descreve múltiplas condições de falha separadas e com o nível de detalhe apropriado. O foco está em aumentar a fiabilidade da função/sistema protegido como prioridade.</p> <p>A verdadeira análise de <i>base zero</i> agora é possível sem considerar sistemas de proteção para mitigar o risco inerente. Usando as definições de consequência definidas no quadro de risco das organizações, permite a todos relacionar e compreender os efeitos da falha e o risco que esta representa. Permite quantificar o risco inerente e desenvolver estratégias de mitigação do risco para riscos não toleráveis.</p>  |
| <h2 style="text-align: center;">Diagrama de Decisão</h2> | <p>O Diagrama de Decisão da RCM2 trata todas as Funções Ocultas da mesma forma (abordagem única).</p> <p>A lógica de decisão considera as tarefas de manutenção preditiva e preventiva como estratégias pró-ativas de gestão de falhas e deteção de falhas, redesigns e nenhuma manutenção programada como ações padrão.</p> <p>Uma combinação de tarefas também é vista como uma ação padrão e a mitigação das consequências é obtida principalmente através da otimização dos dispositivos de proteção (funções protegidas).</p> <p>Para que qualquer tarefa de manutenção proativa (MP) seja considerada, a MP deve ser tecnicamente viável (de acordo com as características da falha) e valer a pena (reduzir as consequências a um nível aceitável).</p> | <p>A RCM3 incorpora critérios adicionais para identificar <i>Riscos Físicos</i> e <i>Económicos Ocultos</i>. Uma verdadeira análise de <i>base zero</i> só é possível se a proteção relacionada com a falha em consideração for ignorada. O foco é colocado na fiabilidade da função protegida em primeiro lugar.</p> <p>Intervalos de procura de falhas são otimizados através do aumento da fiabilidade da função protegida (quando aplicável) como a principal preocupação. Dependência dos dispositivos de proteção é reduzida. O <i>valor dos</i> critérios para diferentes critérios de risco é significativamente diferente da lógica de decisão RCM2. Qualquer <i>Risco Físico</i> deve ser reduzido a um nível tolerável. Os <i>riscos económicos</i> são considerados e não apenas os custos. A estratégia de mitigação deve reduzir o risco operacional intolerável (agora quantificado) para que possa ser considerado. O processo RCM3 leva a uma mitigação de risco mais adequada.</p> | <p>Os critérios para <i>Riscos Económicos Ocultos</i> determinam o intervalo ideal para a deteção de falhas (proporcionando a maior disponibilidade) ao menor custo.</p> <p>O custo da tarefa de busca de falhas ainda deve ser aceitável para o usuário, caso contrário uma mudança única pode ser considerada para reduzir o custo global de múltiplas falhas (quando aplicável).</p> <p>Melhoria da integridade através de testes funcionais para sistemas de proteção que falham (com base na tolerância ao risco).</p> <p>O diagrama de decisão RCM3 foca a função protegida como uma prioridade.</p> <p>A necessidade de um dispositivo de proteção e os intervalos de procura de falhas só são considerados APÓS a integridade da função protegida ter sido atendida.</p> <p>Estas decisões são todas baseadas no risco.</p> |

Anexo II – Diagrama de decisão RCM3



### Anexo III - Fichas de Decisão RCM3

| Ficha de informação RCM3   |                 | Sistema: Refrigeração  | Autor: Filipe Silva |                               | Referência: Sistema de armas Pandur II 8x8  |  |  | Data:            |   |   |       |  |   |   |      |  |
|--|-----------------|--|---------------------|-------------------------------|---|--|--|------------------|---|---|-------|--|---|---|------|--|
| Subsistema: Conjunto da bomba de água  |                 | Modos de falha   |                     |                               | Efeito da Falha   |  |  | Análise do Risco |   |   |       |  |   |   |      |  |
| Função   | Falha Funcional | Causa  | Mecanismo           | Pted                          |   |  |  | P                | C | R |       |  |   |   |      |  |
| Bomba de água  |                 |  |                     |                               |   |  |  |                  |   |   |       |  |   |   |      |  |
| 1 Fazer circular o líquido refrigerante pelos 2 circuitos do sistema de refrigeração | A               | Líquido refrigerante não circula pelos circuitos do sistema de refrigeração. | 1                   | Rotura da correia trapezoidal | Degradação da borracha em condições de serviço (condições de funcionamento difíceis ou existência de óleo da correia) | Efeito de falha local  | Com o tempo de utilização em serviço, com a exposição a temperaturas elevadas e a intempérie, a borracha da correia trapezoidal vai sendo degradada, acabando eventualmente por partir. Este modo de falha apresenta um MTTF de 1529 Horas de motor.   |                  | 3 | 3 | 13(S) |  |   |   |      |  |
|  |                 |  |                     |                               | Instalação incorreta  | Efeito de nível superior seguinte  | A bomba de água não entra em funcionamento e o líquido refrigerante não circula pelos circuitos de refrigeração. Dá-se o sobreaquecimento do bloco do motor, do óleo da transmissão automática, do óleo hidráulico e do óleo de lubrificação dos eixos motrizes e da caixa de transferência. Acendem as luzes de emergência de fluido e de emergência de transmissão no painel de luzes de controlo e emergência, bem como é registada a subida da temperatura do bloco do motor no indicador próprio. |                  |   |   |       |  |   |   |      |  |
|  |                 |  |                     |                               | Desalinhamento da polia   | Efeito final   | A substituição da correia tem um custo associado de 14,62 euros e um tempo médio de reparação de 40 minutos.   |                  |   |   |       |  |   |   |      |  |
|  |                 |  |                     |                               | Tensão incorreta  | Efeito potencial de pior cenário   | O sobreaquecimento do motor vai provocar danos na junta do cabeçote do motor e nos cilindros. O sobreaquecimento do óleo hidráulico vai provocar a inoperacionalidade do sistema hidráulico e em suma vai por em causa a utilização da Pandur em contexto operacional e o cumprimento da sua missão. No caso de os sistemas de aviso de temperatura falharem pode dar-se um incêndio no motor.   |                  |   |   |       |  |   |   |      |  |
|  |                 |  | 2                   | Deposição de resíduos         | Líquido refrigerante contaminado  | Efeito de falha local  | A utilização de líquidos refrigerantes contaminados ou incompatíveis com o material da bomba pode levar à deposição de detritos e resíduos na superfície da bomba. Este modo de falha apresenta uma probabilidade de ocorrência muito baixa.   |                  |   |   |       |  | 1 | 3 | 6(M) |  |
|  |                 |  |                     |                               |   | Líquido refrigerante inadequado  | Efeito de nível superior seguinte  |                  |   |   |       |  |   |   |      | A acumulação de resíduos pode levar ao entupimento da bomba de água e impedir o normal funcionamento dos seus constituintes. |
|  |                 |  |                     |                               |   | Utilização de líquidos refrigerantes com composições químicas diferentes | Efeito final   |                  |   |   |       |  |   |   |      | A substituição da bomba de água implica um custo entre 60 a 80 euros e um tempo médio de reparação de cerca de 2 horas.      |
|  |                 |  |                     |                               |   | Efeito potencial de pior cenário   | Pode provocar a incapacidade da bomba de fazer circular o líquido refrigerante com as consequências acima referidas.   |                  |   |   |       |  |   |   |      |  |

|   |                       |  |                       |  |   |  |  |  |   |      |      |  |  |
|---|-----------------------|--|-----------------------|--|---|--|--|--|---|------|------|--|--|
| 1 | A                     | Líquido refrigerante não circula pelos circuitos do sistema de refrigeração. | 3                     | Corrosão   | Líquido refrigerante inadequado<br><br>Líquido refrigerante contaminado | <b>Efeito de falha local</b>   | A utilização de líquidos refrigerantes contaminados ou incompatíveis com o material da bomba pode corroer a superfície da bomba. Este modo de falha apresenta uma probabilidade de ocorrência muito baixa.   |  | 1   | 3    | 6(M) |  |  |
|   |                       |  |                       |  |   | <b>Efeito de nível superior seguinte</b>   | A corrosão das aletas da bomba de água impede a movimentação (circulação) do líquido refrigerante.   |  |   |      |      |  |  |
|   |                       |  |                       |  |   | <b>Efeito final</b>  | A substituição da bomba de água implica um custo entre 60 a 80 euros um tempo médio de reparação de cerca de 2 horas.  |  |   |      |      |  |  |
|   |                       |  |                       |  |   |  |  | <b>Efeito potencial de pior cenário</b>  | Pode provocar a incapacidade da bomba de fazer circular o líquido refrigerante, o que vai originar sobreaquecimento do motor e dos óleos arrefecidos pelo sistema de refrigeração com as consequências acima referidas. |      |      |  |  |
|   |                       |  |                       |  |   |  |  | <b>Efeito de falha local</b>             | A utilização de líquidos refrigerantes com aditivo anti cavitação inadequado pode originar o desgaste da superfície da bomba. Este modo de falha apresenta uma probabilidade de ocorrência muito baixa.                 |      |      |  |  |
|   |                       |  |                       |  |   |  |  | <b>Efeito de nível superior seguinte</b> | As zonas degradadas podem posteriormente corroer e afetar a capacidade da bomba de funcionar corretamente.  |      |      |  |  |
|   |                       |  |                       |  |   | <b>Efeito final</b>  | A substituição da bomba de água implica um custo entre 60 a 80 euros.  |  |   |      |      |  |  |
|   |                       |  |                       |  |   | <b>Efeito potencial de pior cenário</b>  | A corrosão sofrida após a cavitação pode afetar a bomba de tal forma que esta fica impedida de movimentar o líquido refrigerante, o que vai levar ao sobreaquecimento do motor e dos óleos arrefecidos pelo sistema de refrigeração com as consequências já referidas. |  |   |      |      |  |  |
|   |                       |  |                       |  |   | <b>Efeito de falha local</b>   | Uma correia mal montada ou com tensão desadequada vai provocar sobrecargas ou excesso de vibrações no veios e nos rolamentos da bomba de água. Este modo de falha apresenta uma probabilidade de ocorrência baixa.   |  |   |      |      |  |  |
|   |                       |  |                       |  |   | <b>Efeito de nível superior seguinte</b>   | O veios e os rolamentos vão sofrer um desgaste acelerado em virtude dessas sobrecargas.  |  |   |      |      |  |  |
|   |                       |  |                       |  |   | <b>Efeito final</b>  | A substituição da bomba de água implica um custo entre 60 a 80 euros.  |  |   |      |      |  |  |
|   |                       |  |                       |  |   | <b>Efeito potencial de pior cenário</b>  | Incapacidade da bomba de água em fazer circular o líquido refrigerante, que pode levar ao sobreaquecimento do motor e dos óleos arrefecidos pelo sistema de refrigeração com as consequências acima mencionadas.   |  |   |      |      |  |  |
| B | Perda de estanquidade | 1  | Degradação do vedante | Funcionamento em seco (sem líquido refrigerante)<br><br>Montagem incorreta do vedante<br><br>Uso de vedante inadequado<br><br>Líquido refrigerante contaminado | <b>Efeito de falha local</b>  | O funcionamento na ausência de líquido refrigerante, a montagem incorreta ou o uso de um vedante inadequado podem levar ao desgaste prematuro do material dos vedantes (borracha) e a ocorrência de fugas. Este modo de falha apresenta uma probabilidade de ocorrência muito baixa. |  | 1  | 3   | 6(M) |      |  |  |
|   |                       |  |                       |  | <b>Efeito de nível superior seguinte</b>                                | As fugas de líquido refrigerante podem entrar em contacto com os rolamentos da bomba de água levando à sua degradação.   |  |  |   |      |      |  |  |
|   |                       |  |                       |  | <b>Efeito final</b>   | A substituição da bomba de água implica um custo entre 60 a 80 euros um tempo médio de reparação de cerca de 2 horas.  |  |  |   |      |      |  |  |
|   |                       |  |                       |  | <b>Efeito potencial de pior cenário</b>                                 | A degradação dos rolamentos pode levar à imobilização da bomba e consequente incapacidade em fazer circular o líquido refrigerante.  |  |  |   |      |      |  |  |

| Termóstato |   |   |  |  |   |   |  |  |   |  |   |   |      |
|------------|---|---|--|--|---|---|--|--|---|--|---|---|------|
| 1          | Variar a circulação do líquido refrigerante do circuito de refrigeração pequeno para o circuito de refrigeração grande quando atinge a temperatura de 75 °C | A | líquido refrigerante não passa do circuito de refrigeração pequeno para o circuito de refrigeração grande (termóstato preso na posição de fechado) ou do circuito de refrigeração grande para o circuito pequeno (termóstato preso na posição de aberto) | 1  | Deposição de resíduos   | líquido refrigerante contaminado<br><br>líquido refrigerante inadequado |  | <b>Efeito de falha local</b>             | A acumulação de detritos pode impedir a passagem de líquido refrigerante, provocar atrasos na abertura e fecho da válvula e provocar erros na medição da temperatura. Este modo de falha apresenta uma probabilidade de ocorrência muito baixa.   |  | 1 | 3 | 6(M) |
|            |   |   |  |  |   |   |  | <b>Efeito de nível superior seguinte</b> | A restrição da abertura da válvula impede o fluido de mudar de circuito de refrigeração, causando sobreaquecimento ou sobreaquecimento. Não há nenhuma indicação da ocorrência desta falha.   |  |   |   |      |
|            |   |   |  |  |   |   |  | <b>Efeito final</b>                      | A substituição do termóstato tem um custo associado na ordem de 10 a 30 euros e um tempo médio de reparação de 1H30.  |  |   |   |      |
|            |   |   |  |  |   |   |  | <b>Efeito potencial de pior cenário</b>  | Sobreaquecimento (consequências já referidas) ou sobreaquecimento da viatura (que em caso de clima frio impede o motor e o óleo hidráulico de atingirem as temperaturas de funcionamento), pondo em causa a utilização da Pandur em contexto operacional e o cumprimento da sua missão. |  |   |   |      |
|            |   |   |  | 2  | Corrosão  | líquido refrigerante contaminado<br><br>líquido refrigerante inadequado |  | <b>Efeito de falha local</b>             | A existência de corrosão no interior do termóstato dificulta a abertura e fecho da válvula, podendo levar à imobilização da mesma. Este modo de falha apresenta uma probabilidade de ocorrência muito baixa.  |  | 1 | 3 | 6(M) |
|            |   |   |  |  |   |   |  | <b>Efeito de nível superior seguinte</b> | A incapacidade de abertura da válvula impede o fluido de mudar de circuito de refrigeração, causando sobreaquecimento ou sobreaquecimento. Não há nenhuma indicação da ocorrência desta falha.  |  |   |   |      |
|            |   |   |  |  |   |   |  | <b>Efeito final</b>                      | A substituição do termóstato tem um custo associado na ordem de 10 a 30 euros e um tempo médio de reparação de 1H30.  |  |   |   |      |
|            |   |   |  |  |   |   |  | <b>Efeito potencial de pior cenário</b>  | Sobreaquecimento (consequências já referidas) ou sobreaquecimento da viatura (que em caso de clima frio impede o motor e o óleo hidráulico de atingirem as temperaturas de funcionamento), pondo em causa a utilização da Pandur em contexto operacional e o cumprimento da sua missão. |  |   |   |      |
|            |   |   |  | 3  | Desgaste  | Nº elevado de horas de serviço sujeito a altas temperaturas             |  | <b>Efeito de falha local</b>             | Com o passar do tempo e a exposição a temperaturas elevadas, os componentes do termóstato tendem a desgastar-se. Este modo de falha apresenta uma probabilidade de ocorrência muito baixa.  |  | 1 | 3 | 6(M) |
|            |   |   |  | <b>Efeito de nível superior seguinte</b> | O desgaste dos componentes pode levar a atrasos na abertura da válvula. Não há nenhuma indicação da ocorrência desta falha.   |   |  |  |   |  |   |   |      |
|            |   |   |  | <b>Efeito final</b>                      | A substituição do termóstato tem um custo associado na ordem de 10 a 30 euros e um tempo médio de reparação de 1H30.  |   |  |  |   |  |   |   |      |
|            |   |   |  | <b>Efeito potencial de pior cenário</b>  | Sobreaquecimento (consequências já referidas) ou sobreaquecimento da viatura (que em caso de clima frio impede o motor e o óleo hidráulico de atingirem as temperaturas de funcionamento), pondo em causa a utilização da Pandur em contexto operacional e o cumprimento da sua missão. |   |  |  |   |  |   |   |      |

|   |   |  |   |                            |                                |   |  |  |   |                         |      |      |   |
|---|---|--|---|----------------------------|--------------------------------|---|--|--|---|-------------------------|------|------|---|
| 1   | Variar a circulação do líquido refrigerante do circuito de refrigeração pequeno para o circuito de refrigeração grande quando atinge a temperatura de 75 °C | B  | Efetuar a variação da circulação do líquido refrigerante do circuito de refrigeração pequeno para o circuito de refrigeração grande para uma temperatura diferente de 75 °C | 1                          | Montagem incorreta             | Erro humano                                       | <b>Efeito de falha local</b>   | A instalação do termostato com o sensor de temperatura voltado para o radiador origina um erro de medição. Este modo de falha apresenta uma probabilidade de ocorrência muito baixa.                   |   | 1                       | 3    | 6(M) |   |
|   |   |  |   |                            |                                |   | <b>Efeito de nível superior seguinte</b>   | Origina uma abertura e fecho da válvula para temperaturas diferentes do valores de referência de funcionamento. Não há nenhuma indicação da ocorrência desta falha.                                    |   |                         |      |      |   |
|   |   |  |   |                            |                                |   | <b>Efeito final</b>  | A montagem do termostato demora cerca de 1H30.   |   |                         |      |      |   |
|   |   |  |   |                            |                                |   | <b>Efeito potencial de pior cenário</b>  | Pode originar uma exposição mais prolongada dos componentes do sistema de refrigeração a temperaturas mais elevadas que o recomendado, potenciando o seu desgaste.                                     |   |                         |      |      |   |
|   |   | 2  | Perda de capacidade de medição de temperatura   |                            | Degradação do fluido do sensor | <b>Efeito de falha local</b>                      | Com o passar do tempo o fluido responsável por medir a temperatura do líquido refrigerante perde capacidade. Este modo de falha apresenta uma probabilidade de ocorrência muito baixa. |  | 1 | 3                       | 6(M) |      |   |
|   |   |  |   |                            |                                | <b>Efeito de nível superior seguinte</b>          | Origina uma abertura e fecho da válvula para temperaturas diferentes do valores de referência de funcionamento. Não há nenhuma indicação da ocorrência desta falha.                    |  |   |                         |      |      |   |
|   |   |  |   |                            |                                | <b>Efeito final</b>                               | A substituição do termostato tem um custo associado na ordem de 10 a 30 euros e um tempo médio de reparação de 1H30.   |  |   |                         |      |      |   |
|   |   |  |   |                            |                                | <b>Efeito potencial de pior cenário</b>           | Pode originar uma exposição mais prolongada dos componentes do sistema de refrigeração a temperaturas mais elevadas que o recomendado, potenciando o seu desgaste.                     |  |   |                         |      |      |   |
| <b>Ficha de informação RCM3</b>                         |   | <b>Sistema:</b> Refrigeração                                       |   | <b>Autor:</b> Filipe Silva |                                | <b>Referência:</b> Sistema de armas Pandur II 8x8 |  | <b>Data:</b>   |   |                         |      |      |   |
|   |   | <b>Subsistema:</b> Refrigeração por circulação de líquido no casco |   |                            |                                |   |  |  |   |                         |      |      |   |
| <b>Função</b>   |   | <b>Falha Funcional</b>   |   | <b>Modos de falha</b>      |                                | <b>Efeito da Falha</b>                            |  |  |   | <b>Análise do Risco</b> |      |      |   |
|   |   |  |   | <b>Causa</b>               | <b>Mecanismo</b>               |   |  |  |   | Pted                    | P    | C    | R |
| Permutador de calor dos eixos da caixa de transferência |   |  |   |                            |                                |   |  |  |   |                         |      |      |   |
| 1   | Arrefecer o óleo de lubrificação dos eixos motrizes e da caixa de   | A  | Óleo de lubrificação dos eixos motrizes e da caixa de transferência atinge uma temperatura superior ao  | 1                          | Sujidade no permutador         | Circulação em terreno com pó                      | <b>Efeito de falha local</b>   | O permutador de calor fica coberto de pó (ou outra sujidade) o que diminui a sua capacidade de trocar calor. Este modo de falha apresenta uma probabilidade de ocorrência muito baixa.                 |   | 1                       | 3    | 6(M) |   |
|   |   |  |   |                            |                                |   | <b>Efeito de nível superior seguinte</b>   | O óleo dos eixos motrizes e da caixa de transferência vai então sobreaquecer e atingir uma temperatura superior à temperatura de funcionamento recomendada. Não há indicadores deste sobreaquecimento. |   |                         |      |      |   |
|   |   |  |   |                            |                                |   | <b>Efeito final</b>  | A limpeza do permutador de calor tem um baixo custo associado apenas a mão-de-obra e um tempo médio de reparação de 4h40.  |   |                         |      |      |   |
|   |   |  |   |                            |                                |   | <b>Efeito potencial de pior cenário</b>  | Consequências do sobreaquecimento deste óleo? Risco associado?   |   |                         |      |      |   |

|   |   |   |  |   |                         |                                  |  |  |  |  |   |   |       |
|---|---|---|--|---|-------------------------|----------------------------------|--|--|--|--|---|---|-------|
|   |   |   |  | 2 | Corrosão                | líquido refrigerante contaminado |  | <b>Efeito de falha local</b>             | A contaminação dos fluidos que circulam no permutador pode levar à corrosão do metal que constitui o permutador. Este modo de falha apresenta uma probabilidade de ocorrência muito baixa.   |  | 1 | 3 | 6(M)  |
|   |   |   |  |   |                         | Óleo contaminado                 |  | <b>Efeito de nível superior seguinte</b> | A existência de corrosão afeta a capacidade do permutador de trocar calor, o que vai sobreaquecer o óleo dos eixos motrizes e da caixa de transferência. Não há indicadores deste sobreaquecimento.  |  |   |   |       |
|   |   |   |  |   |                         |                                  |  | <b>Efeito final</b>                      | A substituição/reparação do permutador de calor tem um tempo médio de reparação de 4H40.   |  |   |   |       |
|   |   |   |  |   |                         |                                  |  | <b>Efeito potencial de pior cenário</b>  | O sobreaquecimento do óleo dos eixos motrizes e da caixa de transferência pode originar uma incorreta lubrificação dos mesmos e afetar o funcionamento da viatura, pondo mesmo em causa a sua utilização. Pode levar também ao aumento significativo do desgaste destes componentes. |  |   |   |       |
|   |   |   |  | 3 | Fuga                    | Vedantes degradados              |  | <b>Efeito de falha local</b>             | A existência de fluidos contaminados, de uma pressão excessiva no sistema ou a utilização de vedantes inadequados podem originar a degradação acelerada dos mesmos e conseqüente fuga de fluidos. Este modo de falha apresenta uma probabilidade de ocorrência muito baixa.          |  | 1 | 3 | 6(M)  |
|   |   |   |  |   |                         | Vedantes inadequados             |  | <b>Efeito de nível superior seguinte</b> | A fuga dos fluidos pode originar desgaste de outros componentes ou corrosão do próprio permutador de calor. Não há indicadores deste sobreaquecimento.   |  |   |   |       |
|   |   |   |  |   |                         |                                  |  | <b>Efeito final</b>                      | A substituição dos vedantes do permutador de calor tem um tempo médio de reparação de 4H40.  |  |   |   |       |
|   |   |   |  |   |                         |                                  |  | <b>Efeito potencial de pior cenário</b>  | As fugas podem levar à inoperacionalidade do permutador de calor e sobreaquecimento do óleo.   |  |   |   |       |
| <b>Mangueiras e tubagens do líquido de refrigeração</b> |   |   |  |   |                         |                                  |  |  |  |  |   |   |       |
| 1   | Transportar sem fugas o líquido refrigerante pelo circuito de refrigeração pequeno no casco | A | Existência de fugas no circuito de refrigeração pequeno no casco | 1 | Abraçadeira em falta    | Erro humano                      |  | <b>Efeito de falha local</b>             | A ausência de abraçadeira provoca folgas nas uniões dos tubos, que levam à fuga de líquido refrigerante. Este modo de falha apresenta um MTTF estimado de 733 Horas de motor.  |  | 4 | 3 | 17(S) |
|   |   |   |  |   |                         | Desgaste do parafuso de fixação  |  | <b>Efeito de nível superior seguinte</b> | A fuga de líquido refrigerante pode provocar danos em outros tubos, mangueiras e componentes da viatura. Não há indicadores de aviso da fuga.  |  |   |   |       |
|   |   |   |  |   |                         |                                  |  | <b>Efeito final</b>                      | O custo de reposição de uma abraçadeira é de cerca de 1 euro e o tempo médio de reparação é de 2H.   |  |   |   |       |
|   |   |   |  |   |                         |                                  |  | <b>Efeito potencial de pior cenário</b>  | No caso de a fuga não ser detetada pode levar à inoperacionalidade do sistema de refrigeração por falta de líquido refrigerante. Neste caso é emitido um aviso, através da luz de emergência de fluido.  |  |   |   |       |
|   |   |   |  | 2 | Abraçadeira desapertada | Erro humano                      |  | <b>Efeito de falha local</b>             | Uma abraçadeira desapertada provoca folgas nas uniões dos tubos, que levam à fuga de líquido refrigerante. Este modo de falha apresenta um MTTF estimado de 815 Horas de motor.  |  | 4 | 3 | 17(S) |
|   |   |   |  |   |                         |                                  |  | <b>Efeito de nível superior seguinte</b> | A fuga de líquido refrigerante pode provocar danos em outros tubos, mangueiras e componentes da viatura. Não há indicadores de aviso da fuga.  |  |   |   |       |

|   |   |   |  |   |                                  |   |  |  |  |  |   |  |  |   |   |       |  |  |  |
|---|---|---|--|---|----------------------------------|---|--|--|--|--|---|--|--|---|---|-------|--|--|--|
|   |   |   |  |   | Desgaste do parafuso de fixação  |   |  |  |  |  |   |  |  |   |   |       |  |  |  |
|   |   |   |  |   |                                  |   |  |  |  | <b>Efeito final</b>                      | O custo de reaperto de uma abraçadeira é praticamente nulo. O custo associado a uma eventual substituição da abraçadeira é de cerca de 1 euro e o tempo de reparação é de 40 minutos.   |  |  |   |   |       |  |  |  |
|   |   |   |  |   |                                  |   |  |  |  | <b>Efeito potencial de pior cenário</b>  | No caso de a fuga não ser detetada pode levar à inoperacionalidade do sistema de refrigeração por falta de líquido refrigerante. Neste caso é emitido um aviso, através da luz de emergência de fluido.   |  |  |   |   |       |  |  |  |
|   |   |   | 3  | Degradação dos vedantes da ligação MK e das válvulas de interrupção | Líquido refrigerante contaminado |   |  |  |  | <b>Efeito de falha local</b>             | A degradação da borracha dos vedantes das ligações MK e das válvulas de interrupção do circuito vai provocar fugas de líquido refrigerante. Esta falha apresenta uma probabilidade de ocorrência muito elevada, com um MTTF de cerca de 1827 Horas de motor.    |  |  | 3 | 3 | 13(S) |  |  |  |
|   |   |   |  |   | Montagem incorreta dos vedantes  |   |  |  |  | <b>Efeito de nível superior seguinte</b> | A fuga de líquido refrigerante pode provocar danos em outros tubos, manguueiras e componentes da viatura. Não há indicadores de aviso da fuga.  |  |  |   |   |       |  |  |  |
|   |   |   |  |   |                                  |   |  |  |  | <b>Efeito final</b>                      | O custo de substituição de um vedante das torneiras pode variar entre 1,35 e 9,9 euros, consoante o tipo de vedante e o tempo médio de reparação é de 1h45.   |  |  |   |   |       |  |  |  |
|   |   |   |  |   |                                  |   |  |  |  | <b>Efeito potencial de pior cenário</b>  | No caso de a fuga não ser detetada pode levar à inoperacionalidade do sistema de refrigeração por falta de líquido refrigerante. Neste caso é emitido um aviso, através da luz de emergência de fluido.   |  |  |   |   |       |  |  |  |
| 1 | Transportar sem fugas o líquido refrigerante pelo circuito de refrigeração pequeno no casco | A | Existência de fugas no circuito de refrigeração pequeno no casco | 4   | Ligação MK desapertada           | Desgaste do trancador                                 |  |  |  | <b>Efeito de falha local</b>             | A montagem incorreta ou o a incapacidade do trancador das ligações rápidas em fechar completamente vai originar fugas de líquido refrigerante. Esta falha apresenta uma probabilidade de ocorrência muito elevada, com um MTTF de cerca de 1827 Horas de motor. |  |  | 3 | 3 | 13(S) |  |  |  |
|   |   |   |  |   |                                  | Erro humano   |  |  |  | <b>Efeito de nível superior seguinte</b> | A fuga de líquido refrigerante pode provocar danos em outros tubos, manguueiras e componentes da viatura. Não há indicadores de aviso da fuga.  |  |  |   |   |       |  |  |  |
|   |   |   |  |   |                                  |   |  |  |  | <b>Efeito final</b>                      | O custo de substituição de uma ligação MK varia dos 28,17 euros (no caso da torneira apenas) até aos 94,44 euros (no caso da substituição do Quick coupling set completo) e o tempo médio de reparação é de uma 1H45.   |  |  |   |   |       |  |  |  |
|   |   |   |  |   |                                  |   |  |  |  | <b>Efeito potencial de pior cenário</b>  | No caso de a fuga não ser detetada pode levar à inoperacionalidade do sistema de refrigeração por falta de líquido refrigerante. Neste caso é emitido um aviso, através da luz de emergência de fluido.   |  |  |   |   |       |  |  |  |
|   |   |   |  | 5   | Tubagem solta                    | Rosca de aperto dos adaptadores de fixação danificada |  |  |  | <b>Efeito de falha local</b>             | A incorreta fixação (ou a perda da capacidade de fixação) dos tubos e manguueiras pode levar a que estes se soltem e que o líquido refrigerante saia do circuito de refrigeração. Esta falha apresenta um MTTF de 868 Horas de motor.                           |  |  | 4 | 3 | 17(S) |  |  |  |
|   |   |   |  |   |                                  | Montagem incorreta                                    |  |  |  | <b>Efeito de nível superior seguinte</b> | A fuga de líquido refrigerante pode provocar danos em outros tubos, manguueiras e componentes da viatura. Não há indicadores de aviso da fuga.  |  |  |   |   |       |  |  |  |
|   |   |   |  |   |                                  |   |  |  |  | <b>Efeito final</b>                      | O custo da fixação de uma tubagem é baixo e o seu tempo médio de reparação é de 1H.   |  |  |   |   |       |  |  |  |
|   |   |   |  |   |                                  |   |  |  |  | <b>Efeito potencial de pior cenário</b>  | No caso de a fuga não ser detetada pode levar à inoperacionalidade do sistema de refrigeração por falta de líquido refrigerante. Neste caso é emitido um aviso, através da luz de emergência de fluido.   |  |  |   |   |       |  |  |  |





|                         |  |   |   |   |                             |                                    |            |  |   |   |   |      |
|-------------------------|--|---|---|---|-----------------------------|------------------------------------|------------|--|---|---|---|------|
| 1                       | Armazenar de forma estanque 64 litros de líquido refrigerante                | B | Existência de fugas no depósito   | 2 | Oxidação                    | Líquido refrigerante contaminado   | Intempérie | <b>Efeito de falha local</b>             | A oxidação da superfície do depósito leva ao se desgaste prematuro e pode originar fissuras. Esta falha apresenta uma <b>probabilidade de ocorrência muito baixa</b> .  | 2 | 3 | 9(M) |
|                         |  |   |   |   |                             |                                    |            | <b>Efeito de nível superior seguinte</b> | O desgaste do depósito pode originar fugas de líquido refrigerante, que podem afetar a sua capacidade de compensar as perdas e expansão de líquido durante o seu funcionamento, bem como degradar componentes com os quais entre em contacto. Não há sinais de aviso da ocorrência desta falha. |   |   |      |
|                         |  |   |   |   |                             |                                    |            | <b>Efeito final</b>                      | A substituição do depósito de expansão tem um custo de cerca de 50 euros e um tempo estimado de reparação de <b>cerca de 1H30</b> .   |   |   |      |
|                         |  |   |   |   |                             |                                    |            | <b>Efeito potencial de pior cenário</b>  | A perda da totalidade de líquido refrigerante faz com que o sistema opere sem líquido refrigerante não sendo capaz de cumprir a sua função. Neste caso é dado um aviso através da luz indicadora de emergência de fluido.   |   |   |      |
| 1                       | Armazenar de forma estanque 64 litros de líquido refrigerante                | B | Existência de fugas no depósito   | 3 | Depósito com fissuras       | Degradação do material do depósito |            | <b>Efeito de falha local</b>             | A existência de fissuras na superfície do depósito faz com que este perca líquido refrigerante através delas. Esta falha apresenta uma probabilidade de ocorrência muito baixa.   | 1 | 3 | 6(M) |
|                         |  |   |   |   |                             |                                    |            | <b>Efeito de nível superior seguinte</b> | O circuito de refrigeração vai perder líquido, o que pode afetar a sua capacidade de compensar as perdas e expansão de líquido durante o seu funcionamento, bem como danificar e degradar componentes com os quais entre em contacto. Não há sinais de aviso da ocorrência desta falha.         |   |   |      |
|                         |  |   |   |   |                             |                                    |            | <b>Efeito final</b>                      | A substituição do depósito de expansão tem um custo de cerca de 50 euros e um tempo estimado de reparação de <b>cerca de 1H30</b> .   |   |   |      |
|                         |  |   |   |   |                             |                                    |            | <b>Efeito potencial de pior cenário</b>  | A perda da totalidade de líquido refrigerante faz com que o sistema opere sem líquido refrigerante não sendo capaz de cumprir a sua função. Neste caso é dado um aviso através da luz indicadora de emergência de fluido.   |   |   |      |
| Sensor de nível de água |  |   |   |   |                             |                                    |            |  |   |   |   |      |
| 1                       | Medir a quantidade de líquido refrigerante existente no depósito de expansão | A | Incapaz de medir a quantidade de líquido refrigerante existente no depósito de expansão | 1 | Ficha de ligação danificada | Utilização incorreta               | Desgaste   | <b>Efeito de falha local</b>             | O funcionamento incorreto da ficha de ligação impede a correta ligação do sensor à placa de controlo do sistema elétrico e ao painel de instrumentos do condutor. Esta falha apresenta uma probabilidade de ocorrência média, com um MTTF de 4134 Horas de motor.                               | 2 | 3 | 9(M) |
|                         |  |   |   |   |                             |                                    |            | <b>Efeito de nível superior seguinte</b> | Se o sensor não for alimentado de corrente elétrica não vai funcionar, e se não transmitir o sinal à placa de controlo não é transmitida a informação resultante da sua medição do nível de líquido refrigerante. Não há sinal da ocorrência desta avaria.                                      |   |   |      |
|                         |  |   |   |   |                             |                                    |            | <b>Efeito final</b>                      | A substituição do sensor de nível tem um custo associado de 175,66 euros e um tempo estimado de reparação de 1H20.  |   |   |      |
|                         |  |   |   |   |                             |                                    |            | <b>Efeito potencial de pior cenário</b>  | No caso de o sensor não funcionar e ocorrer diminuição do nível de líquido refrigerante este só vai ser detetado quando atingir um nível inferior ao recomendado e resultar no consequente sobreaquecimento do motor e dos óleos <b>arrefecidos pelo sistema de refrigeração</b> .              |   |   |      |

|                          |  |   |   |   |                                    |  |                                  |   |                                   |   |  |   |   |      |
|--------------------------|--|---|---|---|------------------------------------|--|----------------------------------|---|-----------------------------------|---|--|---|---|------|
| 1                        | Medir a quantidade de líquido refrigerante existente no depósito de expansão | A | Incapaz de medir a quantidade de líquido refrigerante existente no depósito de expansão         | 2 | Fios elétricos danificados         | Desgaste do material dos fios                                      | Contacto com outros componentes  | Contacto com líquido refrigerante contaminado | Efeito de falha local             | Fios elétricos danificados impedem a passagem de corrente para o sensor, resultando no seu não funcionamento. Esta falha apresenta uma probabilidade de ocorrência média, com um MTTF de 4134 Horas de motor.   |  | 2 | 3 | 9(M) |
|                          |  |   |   |   |                                    |  |                                  |   | Efeito de nível superior seguinte | Se o sensor não funcionar, não vai ser efetuada a medição do nível de líquido refrigerante. Não há sinal da ocorrência desta avaria   |  |   |   |      |
|                          |  |   |   |   |                                    |  |                                  |   | Efeito final                      | A substituição do sensor de nível tem um custo associado de 175,66 euros e um tempo estimado de reparação de 1H20.  |  |   |   |      |
|                          |  |   |   |   |                                    |  |                                  |   | Efeito potencial de pior cenário  | No caso de o sensor não funcionar e ocorrer diminuição do nível de líquido refrigerante este só vai ser detetado quando atingir um nível inferior ao recomendado e resultar no consequente sobreaquecimento do motor e dos óleos arrefecidos pelo sistema de refrigeração.  |  |   |   |      |
| 1                        | Medir a quantidade de líquido refrigerante existente no depósito de expansão | B | Medir de forma incorreta a quantidade de líquido refrigerante existente no depósito de expansão | 1 | Desgaste dos componentes do sensor | Número elevado de horas em serviço                                 |                                  |   | Efeito de falha local             | O desgaste da boia de medição do sensor pode levar a que esta fique presa e consequentemente que seja emitido um sinal elétrico com informação incorreta sobre a medição do nível de líquido. Esta falha apresenta uma probabilidade de ocorrência média, com um MTTF de 4134 Horas de motor.                                   |  | 2 | 3 | 9(M) |
|                          |  |   |   |   |                                    |  |                                  |   | Efeito de nível superior seguinte | Vai ser emitida uma informação para o condutor da viatura de que o nível de líquido refrigerante se encontra abaixo do recomendado (acende a luz de emergência de fluido) de forma constante, mesmo que o nível esteja dentro dos valores recomendados.   |  |   |   |      |
|                          |  |   |   |   |                                    |  |                                  |   | Efeito final                      | A substituição do sensor de nível tem um custo associado de 175,66 euros e um tempo estimado de reparação de 1H20.  |  |   |   |      |
|                          |  |   |   |   |                                    |  |                                  |   | Efeito potencial de pior cenário  | No caso de se verificar que os níveis de líquido refrigerante estão corretos e a falha não for reparada, há o risco que haver um abaixamento do nível de líquido que não vai ser detetado.  |  |   |   |      |
| Válvula de descompressão |  |   |   |   |                                    |  |                                  |   |                                   |   |  |   |   |      |
| 1                        | Permitir a entrada e saída de ar no depósito de expansão, de maneira a       | A | A pressão no interior do sistema de refrigeração não é adequada ao seu funcionamento            | 1 | Degradação dos vedantes            | Número elevado de horas em serviço sujeito a elevadas temperaturas | Líquido refrigerante contaminado |   | Efeito de falha local             | A degradação dos vedantes da válvula de descompressão pode levar a fugas de líquido refrigerante e à perda de pressão no sistema de arrefecimento. Esta falha apresenta uma probabilidade de ocorrência média, com um MTTF de 3696 Horas de motor.  |  | 2 | 3 | 9(M) |
|                          |  |   |   |   |                                    |  |                                  |   | Efeito de nível superior seguinte | A existência de fugas pode levar a despressurização do sistema, que por sua vez pode levar o líquido refrigerante a evaporar, criando bolhas de ar no interior do circuito de refrigeração, o que diminui a circulação de líquido refrigerante e o consequente sobreaquecimento do motor e dos óleos refrigerados pelo sistema. |  |   |   |      |
|                          |  |   |   |   |                                    |  |                                  |   | Efeito final                      | A substituição da válvula de descompressão do depósito de expansão tem um custo associado de 653,05 euros e um tempo estimado de reparação de 30 minutos.   |  |   |   |      |
|                          |  |   |   |   |                                    |  |                                  |   | Efeito potencial de pior cenário  | Esta falha apenas é detetada quando se dá o sobreaquecimento da viatura ou quando o nível de líquido refrigerante perdido pela fuga é de tal importância que o nível no depósito atinge o seu valor mínimo. Ambos os casos acarretam consequências já descritas.  |  |   |   |      |



|   |   |   |   |   |                       |  |  |  |   |   |       |
|---|---|---|---|---|-----------------------|--|--|--|---|---|-------|
|   |   |   |   | 2 | Parafusos danificados | Erro de montagem<br><br>Circulação em terreno acidentado<br><br>Corrosão | <p><b>Efeito de falha local</b></p> <p>Os parafusos danificados levam a que o radiador se solte ou adquira um posicionamento incorreto. Este modo de falha apresenta uma probabilidade de ocorrência muito baixa.</p> <p><b>Efeito de nível superior seguinte</b></p> <p>Pode levar a fugas originadas pelo posicionamento/montagem incorreta do radiador e poderá prejudicar também o seu funcionamento e levar ao sobreaquecimento do líquido refrigerante.</p> <p><b>Efeito final</b></p> <p>O custo de substituição dos parafusos é muito baixo e um tempo de reparação de cerca de uma hora.</p> <p><b>Efeito potencial de pior cenário</b></p> <p>O radiador poder-se-á soltar inoperacionalizando todo o sistema de refrigeração e possivelmente outros componentes.</p>  |  | 2 | 3 | 9(M)  |
|   |   |   |   | 3 | Corrosão              | Líquido refrigerante contaminado<br><br>Intempérie                       | <p><b>Efeito de falha local</b></p> <p>A formação de corrosão na superfície do radiador pode originar fendas e afetar a capacidade do radiador de arrefecer o líquido refrigerante. Este modo de falha apresenta uma probabilidade de ocorrência muito baixa.</p> <p><b>Efeito de nível superior seguinte</b></p> <p>As fendas podem originar fugas de líquido refrigerante e a diminuição da capacidade de trocar calor do radiador pode resultar num sobreaquecimento do líquido refrigerante. Não nenhum sinal da ocorrência da falha.</p> <p><b>Efeito final</b></p> <p>O custo de substituição do radiador é da ordem dos 100 euros e tem um tempo médio de execução de cerca de 1H20.</p> <p><b>Efeito potencial de pior cenário</b></p> <p>O sobreaquecimento do líquido refrigerante pode levar ao conseqüente sobreaquecimento do motor e dos óleos arrefecidos pelo sistema de refrigeração.</p>   |  | 1 | 3 | 6(M)  |
| 1 | Arrefecer o líquido refrigerante garantindo que a sua temperatura é inferior a 105 °C | A | O líquido refrigerante atinge uma temperatura superior a 105 °C | 4 | Alhetas danificadas   | Circulação em terreno acidentado   | <p><b>Efeito de falha local</b></p> <p>Com a circulação em terreno acidentado fruto da utilização operacional da viatura podem existir choques com pedras e objetos que podem danificar a superfície das alhetas do radiador, diminuindo a superfície útil capaz de trocar calor. Este modo de falha apresenta uma probabilidade de ocorrência muito baixa.</p> <p><b>Efeito de nível superior seguinte</b></p> <p>O radiador vai perder capacidade de arrefecer o líquido refrigerante, podendo levar ao seu sobreaquecimento. Não há indicação da ocorrência desta falha.</p> <p><b>Efeito final</b></p> <p>O custo de substituição do radiador é da ordem dos 100 euros e tem um tempo médio de execução de cerca de 1H20.</p> <p><b>Efeito potencial de pior cenário</b></p> <p>Os danos são de tal extensão que não permitem ao radiador arrefecer de forma conveniente o líquido refrigerante originando o sobreaquecimento do motor e dos óleos arrefecidos pelo sistema de refrigeração.</p> |  | 1 | 3 | 6(M)  |
|   |   |   |   | 5 | Fixador partido       | Circulação em terreno acidentado<br><br>Corrosão                         | <p><b>Efeito de falha local</b></p> <p>O fixador partido pode levar a que o radiador se solte ou adquira um posicionamento incorreto. Este modo de falha apresenta um tempo médio até à falha de cerca de 852 Horas de motor.</p> <p><b>Efeito de nível superior seguinte</b></p> <p>Pode levar a fugas originadas pelo posicionamento/montagem incorreta do radiador e poderá prejudicar também o seu funcionamento e levar ao sobreaquecimento do líquido refrigerante.</p> <p><b>Efeito final</b></p> <p>O custo de substituição do fixador é da ordem dos 20 euros e demora cerca de 1H30 a executar.</p> <p><b>Efeito potencial de pior cenário</b></p> <p>O radiador poder-se-á soltar inoperacionalizando todo o sistema de refrigeração e possivelmente outros componentes.</p>  |  | 4 | 3 | 17(S) |

| Intercooler (refrigerador de ar de sobrealimentação) |   |   |  |   |                         |                                  |  |  |  |  |   |   |      |       |   |      |
|--|---|---|--|---|-------------------------|----------------------------------|--|--|--|--|---|---|------|-------|---|------|
| 1  | Arrefecer o ar de admissão proveniente do turbo | A | O ar de admissão proveniente do turbo não é arrefecido | 1 | Sujidade no intercooler | Circulação em terreno com pó     |  | <b>Efeito de falha local</b>   | A acumulação de sujidade e resíduos no intercooler vai diminuir a sua capacidade de trocar calor e de arrefecer o ar de sobrealimentação. Esta falha apresenta uma probabilidade de ocorrência média, com um MTTF de 2500 Horas de motor.  |  | 3 | 2 | 8(M) |       |   |      |
|  |   |   |  |   |                         |                                  |  | <b>Efeito de nível superior seguinte</b>   | O intercooler perde capacidade de arrefecer o ar de sobrealimentação proveniente do turbo. O ar comprimido pelo turbo se não for arrefecido vai tornar-se menos denso (e como tal menos rico em oxigénio), o que diminui a sua capacidade de combustão. O sinal da ocorrência desta falha relaciona-se com a perda de potência por parte da viatura. |  |   |   |      |       |   |      |
|  |   |   |  |   |                         |                                  |  | <b>Efeito final</b>  | A limpeza do intercooler tem um baixo custo, associado apenas a mão-de-obra.   |  |   |   |      |       |   |      |
|  |   |   |  |   |                         |                                  |  | <b>Efeito potencial de pior cenário</b>  | Se esta falha não for corrigida a perda de potência da viatura pode ser de tal ordem que permite apenas a sua utilização a baixa velocidade e põe em causa a sua utilização operacional e o cumprimento da sua missão.   |  |   |   |      |       |   |      |
| 1  | Arrefecer o ar de admissão proveniente do turbo | A | O ar de admissão proveniente do turbo não é arrefecido | 2 | Parafusos danificados   | Erro de montagem                 | Circulação em terreno acidentado         | Corrosão   | <b>Efeito de falha local</b>   | Os parafusos danificados levam a que o intercooler se solte ou adquira um posicionamento incorreto. Este modo de falha apresenta um MTTF de cerca de 768 Horas de motor. |   | 4 | 3    | 17(S) |   |      |
|  |   |   |  |   |                         |                                  |  |  | <b>Efeito de nível superior seguinte</b>   | O posicionamento/montagem incorreto vai prejudicar o seu funcionamento e levar ao não arrefecimento do ar de sobrealimentação. Não há sinais da ocorrência desta falha.  |   |   |      |       |   |      |
|  |   |   |  |   |                         |                                  |  |  | <b>Efeito final</b>  | O custo de substituição dos parafusos é muito baixo e tem um tempo médio de duração de cerca de 1h30.  |   |   |      |       |   |      |
|  |   |   |  |   |                         |                                  |  |  | <b>Efeito potencial de pior cenário</b>  | O intercooler poder-se-á soltar inoperacionalizando a admissão de ar para o motor e possivelmente outros componentes do sistema de refrigeração.                         |   |   |      |       |   |      |
|  |   |   |  | 3 | Alhetas danificadas     | Circulação em terreno acidentado | <b>Efeito de falha local</b>             | Com a circulação em terreno acidentado fruto da utilização operacional da viatura podem existir choques com pedras e objetos que podem danificar a superfície das alhetas do intercooler, diminuindo a superfície útil capaz de trocar calor. Este modo de falha apresenta uma probabilidade de ocorrência muito baixa.                              |  | 1  |   |   |      |       | 3 | 6(M) |
|  |   |   |  |   |                         |                                  | <b>Efeito de nível superior seguinte</b> | O intercooler perde capacidade de arrefecer o ar de sobrealimentação proveniente do turbo. O ar comprimido pelo turbo se não for arrefecido vai tornar-se menos denso (e como tal menos rico em oxigénio), o que diminui a sua capacidade de combustão. O sinal da ocorrência desta falha relaciona-se com a perda de potência por parte da viatura. |  |  |   |   |      |       |   |      |
|  |   |   |  |   |                         |                                  | <b>Efeito final</b>                      | O custo de substituição do intercooler é da ordem dos 100 euros e o tempo de execução médio de cerca de 1H30.  |  |  |   |   |      |       |   |      |
|  |   |   |  |   |                         |                                  | <b>Efeito potencial de pior cenário</b>  | Se os danos atingirem uma grande extensão da superfície do intercooler, de tal forma que impeçam o adequado arrefecimento do ar de sobrealimentação, a perda de potência da viatura pode ser de tal ordem que permite apenas a sua utilização a baixa velocidade e põe em causa a sua utilização operacional e o cumprimento da sua missão.          |  |  |   |   |      |       |   |      |

|           |   |   |  |   |                                    |  |  |  |  |  |   |   |       |
|-----------|---|---|--|---|------------------------------------|--|--|--|--|--|---|---|-------|
|           |   |   |  | 4 | Corrosão                           | Existência de fugas no sistema de refrigeração   |  | <b>Efeito de falha local</b>             | A formação de corrosão na superfície do intercooler pode originar fendas e afetar a capacidade do radiador de arrefecer o ar de sobrealimentação. Este modo de falha apresenta uma probabilidade de ocorrência muito baixa.  |  | 1 | 3 | 6(M)  |
|           |   |   |  |   |                                    | Intempérie                                       |  | <b>Efeito de nível superior seguinte</b> | As fendas podem originar fugas de ar e a diminuição da capacidade de trocar calor do intercooler, impossibilitando o correto arrefecimento do ar proveniente do turbo. O ar comprimido pelo turbo se não for arrefecido vai tornar-se menos denso (e como tal menos rico em oxigénio), o que diminui a sua capacidade de combustão. O sinal da ocorrência desta falha relaciona-se com a perda de potência <u>por parte da viatura</u> . |  |   |   |       |
|           |   |   |  |   |                                    |  |  | <b>Efeito final</b>                      | O custo de substituição do intercooler é da ordem dos 100 euros e o tempo de execução médio de cerca de 1H30.  |  |   |   |       |
|           |   |   |  |   |                                    |  |  | <b>Efeito potencial de pior cenário</b>  | A perda de potência da viatura pode ser de tal ordem que permite apenas a sua utilização a baixa velocidade e põe em causa a sua utilização operacional e o cumprimento da sua missão.   |  |   |   |       |
| Ventoinha |   |   |  |   |                                    |  |  |  |  |  |   |   |       |
| 1         | Fornecer ar fresco ao radiador e ao intercooler | A | O radiador e o intercooler não recebem ar fresco | 1 | Ventoinha não liga                 | Falha motor hidráulico                           |  | <b>Efeito de falha local</b>             | Falhas ao nível do motor ou do comando do sistema hidráulico fazem com que a ventoinha não ligue e não arranque com a sua rotação. Este modo de falha apresenta um <u>MTTF de 868 Horas de motor</u> .   |  | 4 | 3 | 17(S) |
|           |   |   |  |   |                                    | Falha no bloco de válvulas do sistema hidráulico |  | <b>Efeito de nível superior seguinte</b> | Se a ventoinha não funcionar, não é fornecido ar ao radiador nem ao intercooler, e por sua vez não é arrefecido o ar de sobrealimentação nem o líquido refrigerante. Os sinais da ocorrência desta falha estão relacionados com o <u>sobreaquecimento e perda de potência da viatura</u> .   |  |   |   |       |
|           |   |   |  |   |                                    |  |  | <b>Efeito final</b>                      | O custo de reparação do bloco de válvulas do sistema hidráulico é de cerca de 2000 euros e o custo de substituição do motor hidráulico é da ordem dos 4700 euros.  |  |   |   |       |
|           |   |   |  |   |                                    |  |  | <b>Efeito potencial de pior cenário</b>  | No caso desta falha não ser detetada pode levar a inoperacionalidade do sistema de refrigeração com as consequências para a viatura já mencionadas e também levar a sua incapacidade para o cumprimento da missão provocada pela perda de potência associada ao não arrefecimento do ar <u>de sobrealimentação</u> .   |  |   |   |       |
|           |   |   |  | 2 | Ventoinha com rotação insuficiente | Pressão no sistema hidráulico baixa              |  | <b>Efeito de falha local</b>             | O funcionamento da ventoinha com uma velocidade de rotação mais baixa do que o recomendado leva a que seja fornecida uma quantidade de ar insuficiente ao radiador e ao intercooler. Este modo de falha apresenta um <u>MTTF de 874 Horas de motor</u> .   |  | 4 | 3 | 17(S) |
|           |   |   |  |   |                                    | Acumulação de sujidade na ventoinha              |  | <b>Efeito de nível superior seguinte</b> | Se não for fornecida uma quantidade de ar adequada ao radiador e ao intercooler não são arrefecidos de forma adequada o ar de sobrealimentação e o líquido refrigerante. Os sinais da ocorrência desta falha estão relacionados com o <u>sobreaquecimento e perda de potência da viatura</u> .   |  |   |   |       |
|           |   |   |  |   |                                    |  |  | <b>Efeito final</b>                      | A limpeza da ventoinha tem um baixo custo, associado apenas a mão-de-obra e um tempo de execução de cerca de 1H30.   |  |   |   |       |

|   |   |                       |   |                   |                                  |   |  |  |              |                         |          |          |          |
|---|---|-----------------------|---|-------------------|----------------------------------|---|--|--|--------------|-------------------------|----------|----------|----------|
|   |   |                       |   |                   |                                  |   | <b>Efeito potencial de pior cenário</b>  | No caso de um período de funcionamento alargado nestas condições, pode dar-se a o sobreaquecimento do líquido refrigerante, com as consequências para a viatura já mencionadas e também levar a sua incapacidade para o cumprimento da missão provocada pela perda de potência associada ao não arrefecimento do ar de sobrealimentação. |              |                         |          |          |          |
|   |   |                       | 3   | Ventoinha partida | Circulação em terreno acidentado |   | <b>Efeito de falha local</b>             | No caso de a ventoinha apresentar componentes partidos (como pás) não vai ser capaz de garantir um fornecimento adequado de ar ao radiador e ao intercooler. Este modo de falha apresenta uma probabilidade de ocorrência muito baixa.   |              | 1                       | 3        | 6(M)     |          |
|   |   |                       |   |                   |                                  |   | <b>Efeito de nível superior seguinte</b> | Se não for fornecida uma quantidade de ar adequada ao radiador e ao intercooler não são arrefecidos de forma adequada o ar de sobrealimentação e o líquido refrigerante. Os sinais da ocorrência desta falha estão relacionados com o sobreaquecimento e perda de potência da viatura.   |              |                         |          |          |          |
|   |   |                       |   |                   |                                  |   | <b>Efeito final</b>                      | O tempo médio de substituição da ventoinha é de cerca de 9 horas.  |              |                         |          |          |          |
|   |   |                       |   |                   |                                  |   | <b>Efeito potencial de pior cenário</b>  | No caso de um período de funcionamento alargado nestas condições, pode dar-se a o sobreaquecimento do líquido refrigerante, com as consequências para a viatura já mencionadas e também levar a sua incapacidade para o cumprimento da missão provocada pela perda de potência associada ao não arrefecimento do ar de sobrealimentação. |              |                         |          |          |          |
| <b>Ficha de informação RCM3</b>           | <b>Sistema:</b> Refrigeração  |                       | <b>Autor:</b> Filipe Silva                    |                   |                                  | <b>Referência:</b> Sistema de armas Pandur II 8x8 |  |  | <b>Data:</b> |                         |          |          |          |
|   | <b>Subsistema:</b> Refrigeração por circulação de líquido no grupo de alimentação |                       |   |                   |                                  |   |  |  |              |                         |          |          |          |
| <b>Função</b>                             | <b>Falha Funcional</b>  | <b>Modos de falha</b> |   |                   |                                  | <b>Efeito da Falha</b>                            |  |  |              | <b>Análise do Risco</b> |          |          |          |
|   |   | <b>Causa</b>          | <b>Mecanismo</b>                              |                   |                                  |   |  |  |              | <b>Pted</b>             | <b>P</b> | <b>C</b> | <b>R</b> |
| Permutador de calor da central hidráulica |   |                       |   |                   |                                  |   |  |  |              |                         |          |          |          |
| 1   | Arrefecer o óleo do sistema hidráulico  | A                     | O óleo do sistema hidráulico não é arrefecido | 1                 | Sujidade no permutador           | Circulação em terreno com pó                      | <b>Efeito de falha local</b>             | O permutador de calor fica coberto de pó (ou outra sujidade) o que diminui a sua capacidade de trocar calor. Este modo de falha apresenta uma probabilidade de ocorrência muito baixa.   |              | 1                       | 3        | 6(M)     |          |
|   |   |                       |   |                   |                                  |   | <b>Efeito de nível superior seguinte</b> | O óleo do sistema hidráulico vai então sobreaquecer e atingir uma temperatura superior à temperatura de funcionamento recomendada. Acende a luz de emergência de fluido.   |              |                         |          |          |          |
|   |   |                       |   |                   |                                  |   | <b>Efeito final</b>                      | A limpeza do permutador de calor tem um baixo custo associado apenas a mão-de-obra e uma duração de cerca de 4H40.   |              |                         |          |          |          |
|   |   |                       |   |                   |                                  |   | <b>Efeito potencial de pior cenário</b>  | Um óleo com temperatura acima do valor de funcionamento recomendado provoca a inoperacionalidade do sistema hidráulico.  |              |                         |          |          |          |

|   |   |   |   |   |                        |                                  |  |  |  |  |   |   |       |
|---|---|---|---|---|------------------------|----------------------------------|--|--|--|--|---|---|-------|
|   |   |   |   | 2 | Corrosão               | Líquido refrigerante contaminado |  | <b>Efeito de falha local</b>             | A contaminação dos fluidos que circulam no permutador pode levar à corrosão do metal que constitui o permutador. Este modo de falha apresenta uma probabilidade de ocorrência <i> muito baixa</i> .  |  | 1 | 3 | 6(M)  |
|   |   |   |   |   |                        | Óleo contaminado                 |  | <b>Efeito de nível superior seguinte</b> | A existência de corrosão afeta a capacidade do permutador de trocar calor, o que vai sobreaquecer o óleo do sistema hidráulico Acende a luz de emergência de fluido.   |  |   |   |       |
|   |   |   |   |   |                        |                                  |  | <b>Efeito final</b>                      | A substituição do permutador de calor tem uma duração de cerca de 1H30.  |  |   |   |       |
|   |   |   |   |   |                        |                                  |  | <b>Efeito potencial de pior cenário</b>  | Um óleo com temperatura acima do valor de funcionamento recomendado provoca a inoperacionalidade do sistema hidráulico.  |  |   |   |       |
|   |   |   |   | 3 | Fuga                   | Vedantes degradados              |  | <b>Efeito de falha local</b>             | A existência de fluidos contaminados, de uma pressão excessiva no sistema ou a utilização de vedantes inadequados podem originar a degradação acelerada dos mesmos e conseqüente fuga de fluidos. Este modo de falha apresenta tem um MTTF de cerca de 963 Horas de motor. |  | 4 | 3 | 17(S) |
|   |   |   |   |   |                        | Vedantes inadequados             |  | <b>Efeito de nível superior seguinte</b> | A fuga dos fluidos pode originar desgaste de outros componentes ou corrosão do próprio permutador de calor. Não há indicadores desta falha.  |  |   |   |       |
|   |   |   |   |   |                        |                                  |  | <b>Efeito final</b>                      | Esta falha tem um tempo médio de reparação de 1H30.  |  |   |   |       |
|   |   |   |   |   |                        |                                  |  | <b>Efeito potencial de pior cenário</b>  | As fugas podem levar à inoperacionalidade do permutador de calor e sobreaquecimento do óleo.   |  |   |   |       |
| Permutador de calor da transmissão automática |   |   |   |   |                        |                                  |  |  |  |  |   |   |       |
| 1   | Arrefecer o óleo da transmissão automática garantindo que a | A | O óleo da transmissão automática atinge uma temperatura superior a 105 °C | 1 | Sujidade no permutador | Circulação em terreno com pó     |  | <b>Efeito de falha local</b>             | O permutador de calor fica coberto de pó (ou outra sujidade) o que diminui a sua capacidade de trocar calor. Este modo de falha apresenta um MTTF de 1841 Horas de motor.  |  | 3 | 3 | 13(S) |
|   |   |   |   |   |                        |                                  |  | <b>Efeito de nível superior seguinte</b> | O óleo da transmissão automática vai então sobreaquecer e atingir uma temperatura superior a 105°C. Acende a luz de emergência de transmissão.   |  |   |   |       |
|   |   |   |   |   |                        |                                  |  | <b>Efeito final</b>                      | A limpeza do permutador de calor tem um baixo custo associado apenas a mão-de-obra e um tempo médio de duração de 4 horas.   |  |   |   |       |
|   |   |   |   |   |                        |                                  |  | <b>Efeito potencial de pior cenário</b>  | Um óleo com temperatura acima de 105 °C pode originar problemas relacionados com o desgaste de componentes da transmissão automática e levar à sua inoperacionalidade.   |  |   |   |       |
|   |   |   |   | 2 | Corrosão               | Líquido refrigerante contaminado |  | <b>Efeito de falha local</b>             | A contaminação dos fluidos que circulam no permutador pode levar à corrosão do metal que constitui o permutador. Este modo de falha apresenta uma probabilidade de ocorrência <i> muito baixa</i> .  |  | 1 | 3 | 6(M)  |
|   |   |   |   |   |                        | Óleo contaminado                 |  | <b>Efeito de nível superior seguinte</b> | A existência de corrosão afeta a capacidade do permutador de trocar calor, o que vai sobreaquecer o óleo da transmissão automática Acende a luz de emergência de transmissão.  |  |   |   |       |
|   |   |   |   |   |                        |                                  |  | <b>Efeito final</b>                      | A substituição do permutador de calor tem uma duração de cerca de 8H40.  |  |   |   |       |
|   |   |   |   |   |                        |                                  |  | <b>Efeito potencial de pior cenário</b>  | Um óleo com temperatura acima de 105 °C pode originar problemas relacionados com o desgaste de componentes da transmissão automática e levar à sua inoperacionalidade.   |  |   |   |       |

|  |  |   |   |   |   |                                  |  |  |  |  |   |   |       |
|--|--|---|---|---|---|----------------------------------|--|--|--|--|---|---|-------|
|  |  |   |   | 3 | Fuga  | Vedantes degradados              |  | <b>Efeito de falha local</b>             | A existência de fluidos contaminados, de uma pressão excessiva no sistema ou a utilização de vedantes inadequados podem originar a degradação acelerada dos mesmos e consequente fuga de fluidos. Este modo de falha apresenta uma probabilidade de ocorrência muito baixa |  | 1 | 3 | 6(M)  |
|  |  |   |   |   |   | Vedantes inadequados             |  | <b>Efeito de nível superior seguinte</b> | A fuga dos fluidos pode originar desgaste de outros componentes ou corrosão do próprio permutador de calor. Não há indicadores desta falha.  |  |   |   |       |
|  |  |   |   |   |   |                                  |  | <b>Efeito final</b>                      | A substituição dos vedantes do permutador de calor tem uma duração de cerca de 8H40.   |  |   |   |       |
|  |  |   |   |   |   |                                  |  | <b>Efeito potencial de pior cenário</b>  | As fugas podem levar à inoperacionalidade do permutador de calor e sobreaquecimento do óleo.   |  |   |   |       |
| Mangueiras e tubagens do líquido de refrigeração |  |   |   |   |   |                                  |  |  |  |  |   |   |       |
| 1  | Transportar sem fugas o líquido refrigerante pelo circuito de refrigeração no grupo de alimentação | A | Existência de fugas no circuito de refrigeração no grupo de alimentação | 1 | Abraçadeira em falta  | Erro humano                      |  | <b>Efeito de falha local</b>             | A ausência de abraçadeira provoca folgas nas uniões dos tubos, que levam à fuga de líquido refrigerante. Este modo de falha apresenta uma probabilidade de ocorrência estimada de 733 Horas de motor.  |  | 4 | 3 | 17(S) |
|  |  |   |   |   |   | Desgaste do parafuso de fixação  |  | <b>Efeito de nível superior seguinte</b> | A fuga de líquido refrigerante pode provocar danos em outros tubos, mangueiras e componentes da viatura. Não há indicadores de aviso da fuga.  |  |   |   |       |
|  |  |   |   |   |   |                                  |  | <b>Efeito final</b>                      | O custo de reposição de uma abraçadeira é de cerca de 1 euro e o tempo médio de reparação é de 2H.   |  |   |   |       |
|  |  |   |   |   |   |                                  |  | <b>Efeito potencial de pior cenário</b>  | No caso de a fuga não ser detetada pode levar à inoperacionalidade do sistema de refrigeração por falta de líquido refrigerante. Neste caso é emitido um aviso, através da luz de emergência de fluido.  |  |   |   |       |
| 1  | Transportar sem fugas o líquido refrigerante pelo circuito de refrigeração no grupo de alimentação | A | Existência de fugas no circuito de refrigeração no grupo de alimentação | 2 | Abraçadeira desapertada   | Erro humano                      |  | <b>Efeito de falha local</b>             | Uma abraçadeira desapertada provoca folgas nas uniões dos tubos, que levam à fuga de líquido refrigerante. Este modo de falha apresenta um MTTF de 815 Horas de motor.   |  | 4 | 3 | 17(S) |
|  |  |   |   |   |   | Desgaste do parafuso de fixação  |  | <b>Efeito de nível superior seguinte</b> | A fuga de líquido refrigerante pode provocar danos em outros tubos, mangueiras e componentes da viatura. Não há indicadores de aviso da fuga.  |  |   |   |       |
|  |  |   |   |   |   |                                  |  | <b>Efeito final</b>                      | O custo de reaperto de uma abraçadeira é praticamente nulo. O custo associado a uma eventual substituição da abraçadeira é de cerca de 1 euro e o tempo de reparação é de 40 minutos.  |  |   |   |       |
|  |  |   |   |   |   |                                  |  | <b>Efeito potencial de pior cenário</b>  | No caso de a fuga não ser detetada pode levar à inoperacionalidade do sistema de refrigeração por falta de líquido refrigerante. Neste caso é emitido um aviso, através da luz de emergência de fluido.  |  |   |   |       |
|  |  |   |   | 3 | Degradação dos vedantes da ligação MK e das válvulas de interrupção | Líquido refrigerante contaminado |  | <b>Efeito de falha local</b>             | A degradação da borracha dos vedantes das ligações MK e das válvulas de interrupção do circuito vai provocar fugas de líquido refrigerante. Esta falha apresenta uma probabilidade de ocorrência muito elevada, com um MTTF de cerca de 1827 Horas de motor.               |  | 3 | 3 | 13(S) |
|  |  |   |   |   |   | Montagem incorreta dos vedantes  |  | <b>Efeito de nível superior seguinte</b> | A fuga de líquido refrigerante pode provocar danos em outros tubos, mangueiras e componentes da viatura. Não há indicadores de aviso da fuga.  |  |   |   |       |
|  |  |   |   |   |   |                                  |  | <b>Efeito final</b>                      | O custo de substituição de um vedante das torneiras pode variar entre 1,35 e 9,9 euros, consoante o tipo de vedante e o tempo médio de reparação é de 1h45.  |  |   |   |       |

|   |  |   |   |   |                        |   |   |   |   |  |   |   |       |
|---|--|---|---|---|------------------------|---|---|---|---|--|---|---|-------|
|   |  |   |   |   |                        |   | <b>Efeito potencial de pior cenário</b> | No caso de a fuga não ser detetada pode levar à inoperacionalidade do sistema de refrigeração por falta de líquido refrigerante. Neste caso é emitido um aviso, através da luz de emergência de fluido. |   |  |   |   |       |
|   |  |   |   | 4 | Ligação MK desapertada | Desgaste do trancador   |   | <b>Efeito de falha local</b>  | A montagem incorreta ou o a incapacidade do trancador das ligações rápidas em fechar completamente vai originar fugas de líquido refrigerante. Esta falha apresenta uma probabilidade de ocorrência muito elevada, com um MTTF de cerca de 1827 Horas de motor. |  | 3 | 3 | 13(S) |
|   |  |   |   |   |                        | Erro humano   |   | <b>Efeito de nível superior seguinte</b>  | A fuga de líquido refrigerante pode provocar danos em outros tubos, mangueiras e componentes da viatura. Não há indicadores de aviso da fuga.   |  |   |   |       |
|   |  |   |   |   |                        |   |   | <b>Efeito final</b>   | O custo de substituição de uma ligação MK varia dos 28,17 euros (no caso da torneira apenas) até aos 94,44 euros (no caso da substituição do Quick coupling set completo) e o tempo médio de reparação é de uma 1H45.   |  |   |   |       |
|   |  |   |   |   |                        |   |   | <b>Efeito potencial de pior cenário</b>   | No caso de a fuga não ser detetada pode levar à inoperacionalidade do sistema de refrigeração por falta de líquido refrigerante. Neste caso é emitido um aviso, através da luz de emergência de fluido.   |  |   |   |       |
| 1 | Transportar sem fugas o líquido refrigerante pelo circuito de refrigeração no grupo de alimentação | A | Existência de fugas no circuito de refrigeração no grupo de alimentação | 5 | Tubo solto             | Rosca de aperto dos adaptadores de fixação danificada           |   | <b>Efeito de falha local</b>  | A incorreta fixação (ou a perda da capacidade de fixação) dos tubos e mangueiras pode levar a que estes se soltem e que o líquido refrigerante saia do circuito de refrigeração. Esta falha apresenta um MTTF de 868 Horas de motor.                            |  | 4 | 3 | 17(S) |
|   |  |   |   |   |                        | Montagem incorreta  |   | <b>Efeito de nível superior seguinte</b>  | A fuga de líquido refrigerante pode provocar danos em outros tubos, mangueiras e componentes da viatura. Não há indicadores de aviso da fuga.   |  |   |   |       |
|   |  |   |   |   |                        |   |   | <b>Efeito final</b>   | O custo da fixação de uma tubagem é baixo e o seu tempo médio de reparação é de 1H.   |  |   |   |       |
|   |  |   |   |   |                        |   |   | <b>Efeito potencial de pior cenário</b>   | No caso de a fuga não ser detetada pode levar à inoperacionalidade do sistema de refrigeração por falta de líquido refrigerante. Neste caso é emitido um aviso, através da luz de emergência de fluido.   |  |   |   |       |
|   |  |   |   | 6 | Tubo com fissura       | Abrasão por contacto com outros componentes                     |   | <b>Efeito de falha local</b>  | O desgaste do material dos tubos e mangueiras pode levar à sua degradação e ao conseqüente aparecimento de fissuras pelas quais se vai dar a fuga de líquido refrigerante. Esta falha apresenta um MTTF de 1419 Horas de motor.                                 |  | 3 | 3 | 13(S) |
|   |  |   |   |   |                        | Líquido refrigerante contaminado                                |   | <b>Efeito de nível superior seguinte</b>  | A fuga de líquido refrigerante pode provocar danos em outros tubos, mangueiras e componentes da viatura. Não há indicadores de aviso da fuga.   |  |   |   |       |
|   |  |   |   |   |                        | Elevado número de horas em serviço sujeito a altas temperaturas |   | <b>Efeito final</b>   | O custo de substituição de uma mangueira é de 27,14 euros e o seu tempo médio de reparação é de 3H40.   |  |   |   |       |
|   |  |   |   |   |                        |   |   | <b>Efeito potencial de pior cenário</b>   | No caso de a fuga não ser detetada pode levar à inoperacionalidade do sistema de refrigeração por falta de líquido refrigerante. Neste caso é emitido um aviso, através da luz de emergência de fluido.   |  |   |   |       |

|   |  |   |   |   |                              |                                  |  |   |  |   |   |      |
|---|--|---|---|---|------------------------------|----------------------------------|--|---|--|---|---|------|
|   |  | B | Incapaz de transportar o líquido refrigerante pelo circuito de refrigeração no grupo de alimentação | 1 | Tubos e mangueiras entupidos | Líquido refrigerante contaminado |  | <p><b>Efeito de falha local</b></p> <p>A acumulação de resíduos no interior das mangueiras e tubos do circuito de refrigeração pode levar à obstrução da passagem do líquido refrigerante. Esta falha apresenta uma <u>probabilidade de ocorrência baixa</u>.</p>   |  | 1 | 3 | 6(M) |
|   |  |   |   |   |                              |                                  |  | <p><b>Efeito de nível superior seguinte</b></p> <p>O líquido refrigerante não circula e consequentemente não cumpre a sua função de arrefecimento. Nenhum sinal é emitido que permita detetar o entupimento.</p>  |  |   |   |      |
|   |  |   |   |   |                              |                                  |  | <p><b>Efeito final</b></p> <p>A reparação desta falha tem um custo baixo e um tempo médio de reparação de 3H40.</p>   |  |   |   |      |
|   |  |   |   |   |                              |                                  |  | <p><b>Efeito potencial de pior cenário</b></p> <p>No caso de o entupimento não ser detetado e o líquido refrigerante não circular vai ocorrer o sobreaquecimento do bloco motor, dos óleos da caixa de transferência, da transmissão automática e hidráulico, com as respetivas consequências para a viatura. Neste caso é dado o aviso através da luz de emergência de fluido e da luz de emergência de transmissão bem como é registado o aumento <u>da temperatura do motor</u>.</p> |  |   |   |      |
| 2 | Interromper a passagem de líquido refrigerante no circuito | A | Incapaz de interromper ou restabelecer a passagem de líquido refrigerante no grupo de alimentação   | 1 | Válvula de interrupção presa | Desgaste                         |  | <p><b>Efeito de falha local</b></p> <p>A incapacidade da válvula em abrir ou fechar resulta na incapacidade em interromper e reabrir a passagem de líquido de refrigeração no circuito. Esta falha apresenta uma <u>probabilidade de ocorrência baixa</u>.</p>  |  | 2 | 3 | 9(M) |
|   |  |   |   |   |                              | Erro de montagem                 |  | <p><b>Efeito de nível superior seguinte</b></p> <p>Torna-se impossível efetuar a purga de líquido refrigerante. Não há qualquer sinal da ocorrência da falha.</p>   |  |   |   |      |
|   |  |   |   |   |                              | Corrosão                         |  | <p><b>Efeito final</b></p> <p>O custo de substituição de uma válvula de interrupção é da ordem dos 20 euros e um tempo médio de reparação de 1H40.</p>  |  |   |   |      |
|   |  |   |   |   |                              |                                  |  | <p><b>Efeito potencial de pior cenário</b></p> <p>No caso de ser impossível efetuar a purga torna-se impossível efetuar uma análise ao líquido de refrigeração.</p>   |  |   |   |      |

**Anexo IV - Fichas de Decisão RCM3**

| Ficha de decisão RCM3 |    | Sistema: Refrigeração                                       |   |       |  |    |                     |                     |                     |     |     |     |     |     |     | Referência: Sistema de armas Pandur II 8x8   |  |                   |           | Autor: Filipe Silva  |               |              |      | Data: |   |                                   |      |  |  |
|-----------------------|----|---|---|-------|--|----|---------------------|---------------------|---------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--|--|-------------------|-----------|----------------------|---------------|--------------|------|-------|---|-----------------------------------|------|--|--|
| Ficha de decisão RCM3 |    | Subsistema: Conjunto da bomba de água                       |   |       |  |    |                     |                     |                     |     |     |     |     |     |     | Referência: Sistema de armas Pandur II 8x8   |  |                   |           | Autor: Filipe Silva  |               |              |      | Data: |   |                                   |      |  |  |
| Referência            |    | Avaliação da categoria do risco                             |   |       | Avaliação da estratégia de gestão do risco |    |                     |                     |                     |     |     |     |     |     |     | Descrição da estratégia de gestão do risco   |  |                   |           | Descrição de tarefas |               |              |      |       |   | Revisão da classificação do risco |      |  |  |
| F                     | FS | FM  | 1 | ES HS | EE HE                                      | EO | HP1 HO1 EP1 EO1 ET1 | HP2 HO2 EP2 EO2 ET2 | HP3 HO3 EP3 EO3 ET3 | HP4 | HP5 | HO4 | EP4 | EP5 | EO4 | Descrição da estratégia de gestão do risco   | Int. Inicial de tarefas  | UM                | Id. Pess. | Qtd.                 | Duração (Hrs) | Tipo de Mod. | Pted | P     | C | R                                 |      |  |  |
| <b>Bomba de água</b>  |    |   |   |       |  |    |                     |                     |                     |     |     |     |     |     |     |  |  |                   |           |                      |               |              |      |       |   |                                   |      |  |  |
| 1                     | A  | 1   | S | N     | N  | N  | N                   | S                   |                     |     |     |     |     |     |     | Troca programada da correia da bomba de água. Verificações periódicas ao estado de conservação da correia (identificando a existência de fissuras cruzadas e faltas de material).              | 1500/6 e 250/1   | HM/Ano            | Mec.      | 1                    | 0,75          | P            |      | 2     | 3 | 9(M)                              |      |  |  |
| 1                     | A  | 2   | S | N     | N  | S  | N                   | N                   | N                   |     |     |     |     |     |     | S  | Substituir quando avariar. Efetuar testes de funcionamento aos sistemas de aviso da falha (luzes de emergência de fluido e de transmissão e sensor de temperatura do líquido de refrigeração). | A cada utilização |           | Mec.                 | 1             | 1,5          | P    |       | 1 | 3                                 | 6(M) |  |  |
| 1                     | A  | 3   | S | N     | N  | S  | N                   | N                   | N                   |     |     |     |     |     | S   | "  | A cada utilização  |                   | Mec.      | 1                    | 1,5           | P            |      | 1     | 3 | 6(M)                              |      |  |  |
| 1                     | A  | 4   | S | N     | N  | S  | N                   | N                   | N                   |     |     |     |     |     | S   | "  | A cada utilização  |                   | Mec.      | 1                    | 1,5           | P            |      | 1     | 3 | 6(M)                              |      |  |  |
| 1                     | A  | 5   | S | N     | N  | S  | N                   | N                   | N                   |     |     |     |     |     | S   | "  | A cada utilização  |                   | Mec.      | 1                    | 1,5           | P            |      | 1     | 3 | 6(M)                              |      |  |  |
| 1                     | B  | 1   | S | N     | N  | N  | N                   | N                   | N                   |     |     |     |     |     |     | Substituir quando avariar. Verificações periódicas à existência de fugas.  | Mensal   |                   | Mec.      | 1                    | 1,5           | P            |      | 1     | 3 | 6(M)                              |      |  |  |
| <b>Termóstato</b>     |    |   |   |       |  |    |                     |                     |                     |     |     |     |     |     |     |  |  |                   |           |                      |               |              |      |       |   |                                   |      |  |  |
| 1                     | A  | 1   | S | N     | N  | S  | N                   | N                   | N                   |     |     |     |     |     | S   | Substituir quando avariar. Efetuar testes de funcionamento aos sistemas de aviso da falha (luzes de emergência de fluido e de transmissão e sensor de temperatura do líquido de refrigeração). | A cada utilização  |                   | Mec.      | 1                    | 1,5           | P            |      | 1     | 3 | 6(M)                              |      |  |  |
| 1                     | A  | 2   | S | N     | N  | S  | N                   | N                   | N                   |     |     |     |     |     | S   | "  | A cada utilização  |                   | Mec.      | 1                    | 1,5           | P            |      | 1     | 3 | 6(M)                              |      |  |  |
| 1                     | A  | 3   | S | N     | N  | S  | N                   | N                   | N                   |     |     |     |     |     | S   | "  | A cada utilização  |                   | Mec.      | 1                    | 1,5           | P            |      | 1     | 3 | 6(M)                              |      |  |  |
| 1                     | B  | 1   | S | N     | N  | N  | N                   | N                   | N                   |     |     |     |     |     |     | Substituir quando avariar.   |  |                   | Mec.      | 1                    | 1,5           | P            |      | 1     | 3 | 6(M)                              |      |  |  |
| 1                     | B  | 2   | S | N     | N  | N  | N                   | N                   | N                   |     |     |     |     |     |     | Substituir quando avariar.   |  |                   | Mec.      | 1                    | 1,5           | P            |      | 1     | 3 | 6(M)                              |      |  |  |
| Ficha de decisão RCM3 |    | Sistema: Refrigeração                                       |   |       |  |    |                     |                     |                     |     |     |     |     |     |     | Referência: Sistema de armas Pandur II 8x8   |  |                   |           | Autor: Filipe Silva  |               |              |      | Data: |   |                                   |      |  |  |
| Ficha de decisão RCM3 |    | Subsistema: Refrigeração por circulação de líquido no casco |   |       |  |    |                     |                     |                     |     |     |     |     |     |     | Referência: Sistema de armas Pandur II 8x8   |  |                   |           | Autor: Filipe Silva  |               |              |      | Data: |   |                                   |      |  |  |
| Referência            |    | Avaliação da categoria do risco                             |   |       | Avaliação da estratégia de gestão do risco |    |                     |                     |                     |     |     |     |     |     |     | Descrição da estratégia de gestão do risco   |  |                   |           | Descrição de tarefas |               |              |      |       |   | Revisão da classificação do risco |      |  |  |

| F  | FS | FM                              | 1 | ES HS | EE HE | EO | HP1 HO1 EP1 EO1 ET1                        | HP2 HO2 EP2 EO2 ET2 | HP3 HO3 EP3 EO3 ET3 | HP4 | HP5 | HO4  | EP4 | EP5 | EO4 | Int. Inicial de tarefas   | UM   | Id. Pess. | Qtd. | Duração (Hrs) | Tipo de Mod. | Pted                 | P | C | R    |      |                                   |  |  |  |  |
|--|----|---------------------------------|---|-------|-------|----|--|---------------------|---------------------|-----|-----|--|-----|-----|-----|---|--|-----------|------|---------------|--------------|----------------------|---|---|------|------|-----------------------------------|--|--|--|--|
| <b>Permutador de calor dos eixos da caixa de transferência</b> |    |                                 |   |       |       |    |  |                     |                     |     |     |  |     |     |     |   |  |           |      |               |              |                      |   |   |      |      |                                   |  |  |  |  |
| 1  | A  | 1                               | S | N     | N     | N  | N  | N                   | N                   |     |     |  |     |     |     | Reparar (aspirar) quando falhar.  |  | Mec.      | 1    | 4,75          | P            |                      | 1 | 3 | 6(M) |      |                                   |  |  |  |  |
| 1  | A  | 2                               | S | N     | N     | N  | N  | N                   | N                   |     |     |  |     |     |     | Substituir quando falhar.   |  | Mec.      | 1    | 4,75          | P            |                      | 1 | 3 | 6(M) |      |                                   |  |  |  |  |
| 1  | A  | 3                               | S | N     | N     | N  | N  | N                   | N                   |     |     |  |     |     |     | Reparar quando falhar.  |  | Mec.      | 1    | 4,75          | P            |                      | 1 | 3 | 6(M) |      |                                   |  |  |  |  |
| <b>Mangueiras e tubagens de líquido de refrigeração</b>        |    |                                 |   |       |       |    |  |                     |                     |     |     |  |     |     |     |   |  |           |      |               |              |                      |   |   |      |      |                                   |  |  |  |  |
| 1  | A  | 1                               | S | N     | N     | N  | S  |                     |                     |     |     |  |     |     |     | Manter as inspeções Bienais com remoção do PowerPack e reforçar com verificações periódicas com câmara. | 500/2 e 250/1                              | HM/Ano    | Mec. | 1             | 0,5          | P                    |   | 2 | 3    | 9(M) |                                   |  |  |  |  |
| 1  | A  | 2                               | S | N     | N     | N  | S  |                     |                     |     |     |  |     |     |     | "   | 500/2 e 250/1                              | HM/Ano    | Mec. | 1             | 0,5          | P                    |   | 2 | 3    | 9(M) |                                   |  |  |  |  |
| 1  | A  | 3                               | S | N     | N     | N  | N  | N                   | S                   |     |     |  |     |     |     | Substituição programada. Eretuar vermicões periódicas com câmara.                                       | 1750/7 e 250/1                             | HM/Ano    | Mec. | 1             | 1,75         | P                    |   | 2 | 3    | 9(M) |                                   |  |  |  |  |
| 1  | A  | 4                               | S | N     | N     | N  | N  | N                   | S                   |     |     |  |     |     |     | "   | 1750/7 e 250/1                             | HM/Ano    | Mec. | 1             | 1,75         | P                    |   | 2 | 3    | 9(M) |                                   |  |  |  |  |
| 1  | A  | 5                               | S | N     | N     | N  | N  | N                   | N                   |     |     |  |     |     |     | Reparar quando falhar.  |  | Mec.      | 1    | 3,75          | P            |                      | 2 | 3 | 9(M) |      |                                   |  |  |  |  |
| 1  | A  | 6                               | S | N     | N     | N  | S  |                     |                     |     |     |  |     |     |     | substituir quando detetadas fissuras/fendas nas tubagens.   | 250/1                                      | HM/Ano    | Mec. | 1             | 0,5          | P                    |   | 2 | 3    | 9(M) |                                   |  |  |  |  |
| 1  | B  | 1                               | S | N     | N     | S  | N  | N                   | N                   |     |     |  |     | S   |     | Reparar quando falhar.  |  | Mec.      | 1    | 4             | P            |                      | 1 | 3 | 6(M) |      |                                   |  |  |  |  |
| 2  | A  | 1                               | S | N     | N     | N  | N  | N                   | N                   |     |     |  |     |     |     | Substituir quando falhar.   |  | Mec.      | 1    | 2             | P            |                      | 2 | 3 | 9(M) |      |                                   |  |  |  |  |
| Ficha de decisão RCM3  |    | Sistema: Refrigeração           |   |       |       |    |  |                     |                     |     |     | Referência: Sistema de armas Pandur II 8x8 |     |     |     |   | Autor: Filipe Silva                        |           |      |               |              | Data:                |   |   |      |      |                                   |  |  |  |  |
| Referência   |    | Avaliação da categoria do risco |   |       |       |    | Avaliação da estratégia de gestão do risco |                     |                     |     |     |  |     |     |     |   | Descrição da estratégia de gestão do risco |           |      |               |              | Descrição de tarefas |   |   |      |      | Revisão da classificação do risco |  |  |  |  |
| F  | FS | FM                              | 1 | ES HS | EE HE | EO | HP1 HO1 EP1 EO1 ET1                        | HP2 HO2 EP2 EO2 ET2 | HP3 HO3 EP3 EO3 ET3 | HP4 | HP5 | HO4  | EP4 | EP5 | EO4 | Int. Inicial de tarefas   | UM   | Id. Pess. | Qtd. | Duração (Hrs) | Tipo de Mod. | Pted                 | P | C | R    |      |                                   |  |  |  |  |
| <b>Depósito de Expansão</b>                                    |    |                                 |   |       |       |    |  |                     |                     |     |     |  |     |     |     |   |  |           |      |               |              |                      |   |   |      |      |                                   |  |  |  |  |
| 1  | A  | 1                               | S | N     | N     | N  | N  | N                   | N                   |     |     |  |     |     |     | Aspirar quando ocorrer a falha.   |  | Mec.      | 1    | 0,25          | P            |                      | 1 | 2 | 3(L) |      |                                   |  |  |  |  |
| 1  | B  | 1                               | S | N     | N     | N  | N  | N                   | N                   |     |     |  |     |     |     | Substituir quando ocorrer a falha.  |  | Mec.      | 1    | 0,2           | P            |                      | 1 | 2 | 3(L) |      |                                   |  |  |  |  |
| 1  | B  | 2                               | S | N     | N     | N  | S  |                     |                     |     |     |  |     |     |     | Inspeccionar periodicamente o depósito de expansão. Reparar/substituir se for detetada oxidação.        | 500/2                                      | HM/Ano    | Mec. | 1             | 0,5          | P                    |   | 2 | 3    | 9(M) |                                   |  |  |  |  |
| 1  | B  | 3                               | S | N     | N     | N  | N  | N                   | N                   |     |     |  |     |     |     | Substituir quando ocorrer a falha.  |  | Mec.      | 1    | 1,5           | P            |                      | 1 | 3 | 6(M) |      |                                   |  |  |  |  |
| <b>Sensor de nível</b>   |    |                                 |   |       |       |    |  |                     |                     |     |     |  |     |     |     |   |  |           |      |               |              |                      |   |   |      |      |                                   |  |  |  |  |
| 1  | A  | 1                               | S | N     | N     | N  | N  | N                   | N                   |     |     |  |     |     |     | Substituir quando ocorrer a falha.  |  | Mec.      | 1    |               | P            |                      | 2 | 3 | 9(M) |      |                                   |  |  |  |  |
| 1  | A  | 2                               | S | N     | N     | N  | N  | N                   | N                   |     |     |  |     |     |     | Substituir quando ocorrer a falha.  |  | Mec.      | 1    |               | P            |                      | 2 | 3 | 9(M) |      |                                   |  |  |  |  |
| 1  | B  | 1                               | S | N     | N     | N  | N  | N                   | N                   |     |     |  |     |     |     | Substituir quando ocorrer a falha.  |  | Mec.      | 1    |               | P            |                      | 2 | 3 | 9(M) |      |                                   |  |  |  |  |

| Válvula de descompressão |    |                                 |  |       |  |    |                     |                     |                     |     |     |     |  |     |     |  |  |                      |  |                                    |  |   |                                   |           |      |               |              |      |   |      |      |
|--------------------------|----|---------------------------------|--|-------|--|----|---------------------|---------------------|---------------------|-----|-----|-----|--|-----|-----|--|--|----------------------|--|------------------------------------|--|---|-----------------------------------|-----------|------|---------------|--------------|------|---|------|------|
| 1                        | A  | 1                               | S  | N     | N  | N  | N                   | N                   | N                   |     |     |     |  |     |     |  |  |                      |  | Substituir quando ocorrer a falha. |  |   | Mec.                              | 1         |      | P             |              | 2    | 3 | 9(M) |      |
| 1                        | A  | 2                               | S  | N     | N  | N  | N                   | N                   | N                   |     |     |     |  |     |     |  |  |                      |  |                                    | Substituir quando ocorrer a falha.   |   |                                   | Mec.      | 1    |               | P            |      | 2 | 3    | 9(M) |
| Ficha de decisão RCM3    |    |                                 | Sistema: Refrigeração  |       |  |    |                     |                     |                     |     |     |     | Referência: Sistema de armas Pandur II 8x8 |     |     |  |  | Autor: Filipe Silva  |  |                                    |  |   | Data:                             |           |      |               |              |      |   |      |      |
|                          |    |                                 | Subsistema: Refrigeração por circulação de líquido no grupo de alimentação |       |  |    |                     |                     |                     |     |     |     |  |     |     |  |  |                      |  |                                    |  |   |                                   |           |      |               |              |      |   |      |      |
| Referência               |    | Avaliação da categoria do risco |  |       | Avaliação da estratégia de gestão do risco |    |                     |                     |                     |     |     |     | Descrição da estratégia de gestão do risco |     |     |  |  | Descrição de tarefas |  |                                    |  |   | Revisão da classificação do risco |           |      |               |              |      |   |      |      |
| F                        | FS | FM                              | 1  | ES HS | EE HE                                      | EO | HP1 HO1 EP1 EO1 ET1 | HP2 HO2 EP2 EO2 ET2 | HP3 HO3 EP3 EO3 ET3 | HP4 | HP5 | HO4 | EP4  | EP5 | EO4 |  |  |                      |  |                                    |  | Int. Inicial de tarefas                 | UM                                | Id. Pess. | Qtd. | Duração (Hrs) | Tipo de Mod. | Pted | P | C    | R    |
| Radiador                 |    |                                 |  |       |  |    |                     |                     |                     |     |     |     |  |     |     |  |  |                      |  |                                    |  |   |                                   |           |      |               |              |      |   |      |      |
| 1                        | A  | 1                               | S  | N     | N  | S  | N                   | S                   |                     |     |     |     |  |     |     |  |  |                      |  |                                    | Aspirar periodicamente. Efetuar limpeza periódica.   | 250/1 e 2500/10                         | HM/Ano                            | Mec.      | 1    | 0,5           | P            |      | 2 | 2    | 5(L) |
| 1                        | A  | 2                               | S  | N     | N  | N  | N                   | N                   | N                   |     |     |     |  |     |     |  |  |                      |  |                                    |  | Substituir quando ocorrer a falha.      |                                   | Mec.      | 1    | 1             | P            |      | 2 | 3    | 9(M) |
| 1                        | A  | 3                               | S  | N     | N  | S  | N                   | N                   | N                   |     |     |     |  |     |     |  |  |                      |  | S                                  | Reparar a falha quando ocorrer. Efetuar testes de funcionamento aos sistemas de aviso da falha.    | A cada utilização                       | Mec.                              | 1         | 1,33 | P             |              | 1    | 3 | 6(M) |      |
| 1                        | A  | 4                               | S  | N     | N  | S  | N                   | N                   | N                   |     |     |     |  |     |     |  |  |                      |  | S                                  | Substituir quando ocorrer a falha. Efetuar testes de funcionamento aos sistemas de aviso da falha. | A cada utilização                       | Mec.                              | 1         | 1,33 | P             |              | 1    | 3 | 6(M) |      |
| 1                        | A  | 5                               | S  | N     | N  | N  | N                   | N                   | N                   |     |     |     |  |     |     |  |  |                      |  |                                    |  | Substituir quando ocorrer a falha.      |                                   | Mec.      | 1    | 1,5           | P            |      | 2 | 3    | 9(M) |
| Intercooler              |    |                                 |  |       |  |    |                     |                     |                     |     |     |     |  |     |     |  |  |                      |  |                                    |  |   |                                   |           |      |               |              |      |   |      |      |
| 1                        | A  | 1                               | S  | N     | N  | N  | N                   | S                   |                     |     |     |     |  |     |     |  |  |                      |  |                                    | Aspirar periodicamente. Efetuar limpeza periódica.   | 250/1 e 2500/10                         | HM/Ano                            | Mec.      | 1    | 0,5           | P            |      | 2 | 2    | 5(L) |
| 1                        | A  | 2                               | S  | N     | N  | N  | N                   | N                   | N                   |     |     |     |  |     |     |  |  |                      |  |                                    |  | Substituir quando ocorrer a falha.      |                                   | Mec.      | 1    | 1             | P            |      | 2 | 3    | 9(M) |
| 1                        | A  | 3                               | S  | N     | N  | N  | N                   | N                   | N                   |     |     |     |  |     |     |  |  |                      |  |                                    |  | Reparar a falha quando ocorrer.         |                                   | Mec.      | 1    | 1,33          | P            |      | 1 | 3    | 6(M) |
| 1                        | A  | 4                               | S  | N     | N  | N  | N                   | N                   | N                   |     |     |     |  |     |     |  |  |                      |  |                                    |  | Substituir quando ocorrer a falha.      |                                   | Mec.      | 1    | 1,33          | P            |      | 1 | 3    | 6(M) |
| Ventoinha                |    |                                 |  |       |  |    |                     |                     |                     |     |     |     |  |     |     |  |  |                      |  |                                    |  |   |                                   |           |      |               |              |      |   |      |      |
| 1                        | A  | 1                               | S  | N     | N  | S  | N                   | N                   | N                   |     |     |     |  |     |     |  |  |                      |  |                                    |  | Falha com origem no sistema hidráulico. |                                   |           |      |               |              |      |   |      |      |
| 1                        | A  | 2                               | S  | N     | N  | S  | N                   | N                   | N                   |     |     |     |  |     |     |  |  |                      |  | S                                  | Reparar a falha quando ocorrer. Efetuar testes de funcionamento aos sistemas de aviso da falha.    | A cada utilização                       | Mec.                              | 1         | 1,5  | P             |              | 2    | 3 | 9(M) |      |
| 1                        | A  | 3                               | S  | N     | N  | S  | N                   | N                   | N                   |     |     |     |  |     |     |  |  |                      |  | S                                  | Substituir quando ocorrer a falha. Efetuar testes de funcionamento aos sistemas de aviso da falha. | A cada utilização                       | Mec.                              | 1         | 9    | P             |              | 1    | 3 | 6(M) |      |

| Ficha de decisão RCM3                                      |    | Sistema: Refrigeração           |   |       |  |    |                     |                     |                     |     |     | Referência: Sistema de armas Pandur II 8x8 |     |     |  |                         | Autor: Filipe Silva |           |      |                      |              | Data: |   |      |                                   |  |  |  |
|--|----|---------------------------------|---|-------|--|----|---------------------|---------------------|---------------------|-----|-----|--|-----|-----|--|-------------------------|---------------------|-----------|------|----------------------|--------------|-------|---|------|-----------------------------------|--|--|--|
| Referência   |    | Avaliação da categoria do risco |   |       | Avaliação da estratégia de gestão do risco |    |                     |                     |                     |     |     |  |     |     | Descrição da estratégia de gestão do risco |                         |                     |           |      | Descrição de tarefas |              |       |   |      | Revisão da classificação do risco |  |  |  |
| F  | FS | FM                              | 1 | ES HS | EE HE                                      | EO | HP1 HO1 EP1 EO1 ET1 | HP2 HO2 EP2 EO2 ET2 | HP3 HO3 EP3 EO3 ET3 | HP4 | HP5 | HO4  | EP4 | EP5 | EO4  | Int. Inicial de tarefas | UM                  | Id. Pess. | Qtd. | Duração (Hrs)        | Tipo de Mod. | Pted  | P | C    | R                                 |  |  |  |
| <b>Permutador de calor dos eixos da central hidráulica</b> |    |                                 |   |       |  |    |                     |                     |                     |     |     |  |     |     |  |                         |                     |           |      |                      |              |       |   |      |                                   |  |  |  |
| 1  | A  | 1                               | S | N     | N  | N  | N                   | N                   | N                   |     |     |  |     |     |  |                         |                     | Mec.      | 1    | 4,75                 | P            |       | 1 | 3    | 6(M)                              |  |  |  |
| 1  | A  | 2                               | S | N     | N  | N  | N                   | N                   | N                   |     |     |  |     |     |  |                         |                     | Mec.      | 1    | 1,5                  | P            |       | 1 | 3    | 6(M)                              |  |  |  |
| 1  | A  | 3                               | S | N     | N  | N  | N                   | N                   | N                   |     |     |  |     |     |  |                         |                     | Mec.      | 1    | 1,5                  | P            |       | 2 | 3    | 9(M)                              |  |  |  |
| <b>Permutador de calor da transmissão automática</b>       |    |                                 |   |       |  |    |                     |                     |                     |     |     |  |     |     |  |                         |                     |           |      |                      |              |       |   |      |                                   |  |  |  |
| 1  | A  | 1                               | S | N     | N  | N  | N                   | S                   |                     |     |     |  |     |     | 2000/8                                     | HM/Ano                  | Mec.                | 1         | 4,75 | P                    |              | 2     | 3 | 9(M) |                                   |  |  |  |
| 1  | A  | 2                               | S | N     | N  | N  | N                   | N                   | N                   |     |     |  |     |     |  |                         |                     | Mec.      | 1    | 8,75                 | P            |       | 1 | 3    | 6(M)                              |  |  |  |
| 1  | A  | 3                               | S | N     | N  | N  | N                   | N                   | N                   |     |     |  |     |     |  |                         |                     | Mec.      | 1    | 8,75                 | P            |       | 1 | 3    | 6(M)                              |  |  |  |
| <b>Mangueiras e tubagens de líquido de refrigeração</b>    |    |                                 |   |       |  |    |                     |                     |                     |     |     |  |     |     |  |                         |                     |           |      |                      |              |       |   |      |                                   |  |  |  |
| 1  | A  | 1                               | S | N     | N  | N  | S                   |                     |                     |     |     |  |     |     |  | 500/2 e 250/1           | HM/Ano              | Mec.      | 1    | 0,5                  | P            |       | 2 | 3    | 9(M)                              |  |  |  |
| 1  | A  | 2                               | S | N     | N  | N  | S                   |                     |                     |     |     |  |     |     |  | 500/2 e 250/1           | HM/Ano              | Mec.      | 1    | 0,5                  | P            |       | 2 | 3    | 9(M)                              |  |  |  |
| 1  | A  | 3                               | S | N     | N  | N  | N                   | N                   | S                   |     |     |  |     |     |  | 1500/6 e 250/1          | HM/Ano              | Mec.      | 1    | 1,75                 | P            |       | 2 | 3    | 9(M)                              |  |  |  |
| 1  | A  | 4                               | S | N     | N  | N  | N                   | N                   | S                   |     |     |  |     |     |  | 1500/6 e 250/1          | HM/Ano              | Mec.      | 1    | 1,75                 | P            |       | 2 | 3    | 9(M)                              |  |  |  |
| 1  | A  | 5                               | S | N     | N  | N  | N                   | N                   | N                   |     |     |  |     |     |  |                         |                     | Mec.      | 1    | 3,75                 | P            |       | 2 | 3    | 9(M)                              |  |  |  |
| 1  | A  | 6                               | S | N     | N  | N  | S                   |                     |                     |     |     |  |     |     |  | 250/1                   | HM/Ano              | Mec.      | 1    | 0,5                  | P            |       | 2 | 3    | 9(M)                              |  |  |  |
| 1  | B  | 1                               | S | N     | N  | S  | N                   | N                   | N                   |     |     |  |     | S   |  |                         |                     | Mec.      | 1    | 4                    | P            |       | 1 | 3    | 6(M)                              |  |  |  |
| 2  | A  | 1                               | S | N     | N  | N  | N                   | N                   | N                   |     |     |  |     |     |  |                         |                     | Mec.      | 1    | 2                    | P            |       | 2 | 3    | 9(M)                              |  |  |  |

**Legenda:** HM: Horas de motor; MEC: Mecânico; P: Procedimento.