

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

Filipe Emanuel Carvalho da Silva, Énio Chambel
Academia Militar
Lisboa, Portugal

silva.fec@exercito.pt, enio.chambel@academiamilitar.pt

Virgínia Infante

Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa
Lisboa, Portugal

virginia.infante@tecnico.ulisboa.pt

Resumo — A evolução do paradigma da manutenção ao longo do tempo originou várias mudanças, tanto nas tarefas de manutenção realizadas como nos objetivos da manutenção e gestão de ativos, assumindo-se como uma área de interesse fundamental para as organizações. No caso específico do Exército Português, o processo de modernização gradual que atravessa, resultou no aumento da complexidade dos equipamentos à sua disposição, colocando novos desafios à manutenção, sempre com o objetivo de atingir a prontidão e o nível de custos adequado.

Neste estudo, a metodologia de manutenção RCM3 foi aplicada ao sistema de arrefecimento das Pandur II 8x8. Esta metodologia centra-se na fiabilidade do equipamento e permite identificar e avaliar os riscos associados aos modos de falha apresentados, bem como desenvolver estratégias para gerir e minimizar estes riscos. Foi efetuada uma análise funcional do sistema estudado, seguida de uma análise dos modos de falha e efeitos, e de uma análise de risco. As respetivas ações de mitigação foram propostas de acordo com o processo de decisão RCM3 e foram comparadas com o plano de manutenção existente, retirando ilações acerca da sua adequação, da robustez do sistema estudado, e das lacunas existentes no processo de gestão de manutenção das Pandur II.

I. INTRODUÇÃO

A exigência associada às missões do Exército, quer em território nacional, quer no estrangeiro em forças nacionais destacadas, combinada com o grau de prontidão necessário, exige uma grande disponibilidade dos recursos humanos, e do equipamento à sua disposição. Desta forma, a manutenção desempenha sem dúvida um papel essencial no bom funcionamento e fiabilidade do equipamento, sendo responsável por assegurar que este cumpra a sua tarefa quando solicitado. O sistema de armas Pandur II 8x8 é um equipamento moderno e versátil da maior importância para o Exército Português (EP) e para o cumprimento da sua missão. Esta aquisição marcou uma nova fase na modernização do EP, tendo sido amplamente utilizado tanto a nível nacional como no estrangeiro, tendo

participado em exercícios na Lituânia e, mais recentemente, utilizado no teatro de operações da República Centro-Africana.

Por ser um dos equipamentos mais recentes ao serviço do EP, e sendo utilizado por poucos países da Organização do Tratado do Atlântico Norte (OTAN), afigura-se ainda como um equipamento um pouco desconhecido, relativamente a requisitos e necessidades de manutenção. Desta forma, Portugal efetua o plano de manutenção proposto pelo fabricante, havendo assim espaço para uma análise crítica e adaptação às necessidades decorrentes da utilização operacional das Pandur II ao serviço do EP. O sistema de arrefecimento foi escolhido para ser analisado neste estudo porque é um dos sistemas com maior incidência de falhas, e com maior potencial de melhoria. Do total de 2038 ordens de trabalho corretivas analisadas, 126 estão relacionadas com o sistema de arrefecimento, o que corresponde a cerca de 6,2% das falhas registadas para todo o sistema de armas. Este artigo descreve a aplicação da metodologia “Reliability Centered Maintenance 3” (RCM3) ao sistema de arrefecimento das Pandur II, para rever a adequação do plano de manutenção atual e propor possíveis melhorias.

II. METODOLOGIA

A. Metodologia RCM3

A origem da metodologia RCM está relacionada com a indústria da aviação comercial e surgiu da necessidade de aumentar a fiabilidade das aeronaves e diminuir os custos associados às suas ações de manutenção. Em 1978, Nowlan e Howard Heap da United Airlines, prepararam um relatório para o Departamento de Defesa dos EUA [1] onde a designação RCM foi utilizada pela primeira vez. O processo RCM espalhou-se rapidamente por outras áreas fora da aviação, e desde 1978 surgiram várias versões do trabalho de Nowlan e Heap, que também foram chamadas RCM, no entanto, e embora algumas destas versões apresentassem melhorias e otimizações do processo original, muitas outras surgiram, menos rigorosas e com tentativas de acelerar algumas das etapas do procedimento

original, que se revelariam imprecisas e com resultados diferentes de uma metodologia RCM "verdadeira".

A fim de obter um procedimento credível que pudesse ser utilizado sem mal-entendidos, a primeira norma relacionada com este tema, a SAE JA1011 [2], foi publicada juntamente com o guia SAE JA1012 [3], em 1999. Uma das tarefas mais notáveis na área foi, como anteriormente mencionado, a metodologia proposta por John Moubray (RCM 2) que se tornaria uma obra de referência na definição das normas anteriores e amplamente utilizada por várias organizações em diferentes áreas da indústria [4].

A metodologia RCM 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, tais como redução do tempo de paragem, diminuição dos custos associados, aumento da segurança e produtividade. Também permite obter programas de manutenção com uma quantidade de trabalho programado muito inferior aos métodos tradicionais e, quando utilizada para a revisão de programas de manutenção existentes, permite obter uma diminuição na quantidade de manutenção programada, normalmente na ordem dos 40% a 70%. A norma SAE JA1011 define "RCM como 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 qualquer bem físico num determinado contexto operacional" [2]. Por fim, para definir a RCM3 de forma concreta, o seu autor, Marius Basson, refere que corresponde a "um processo utilizado para definir o número mínimo necessário e seguro de ações de manutenção, engenharia e outras estratégias de gestão de risco para garantir um nível tolerável de segurança, integridade ambiental e capacidade operacional lucrativa, tal como especificado pelas normas de gestão de ativos da organização em que está inserida" [5].

Em geral, o processo RCM está dividido em 5 fases (tal como se apresenta na figura 1), que representam de forma genérica uma síntese da sequência lógica do trabalho que deve ser realizado durante a implementação desta análise [6]:

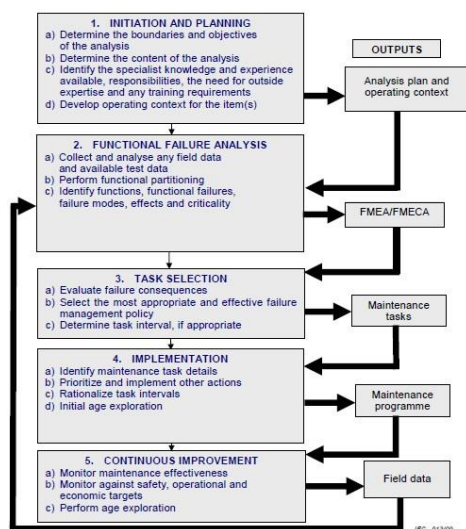


Figura 1. Visão Geral da RCM [6]

O processo RCM3, requer 8 perguntas a serem respondidas durante toda a sua aplicação [3], [5]:

- Quais são as condições operacionais?
- Quais são as funções e normas de desempenho associadas ao activo no seu contexto operacional actual?
- Como é que o activo não cumpre as suas funções?
- O que causa cada estado de falha (modos de falha)?
- O que acontece quando cada falha ocorre?
- Quais são os riscos associados a cada falha (quantificação do risco inerente)?
- O que deve ser feito para reduzir os riscos intoleráveis a um nível tolerável (utilização de estratégias proactivas de gestão do risco)?
- O que pode ser feito para reduzir ou gerir os riscos toleráveis de uma forma economicamente viável?

III. CASO DE ESTUDO

O caso de estudo consiste na aplicação de todas as etapas definidas pela metodologia RCM3 ao sistema de refrigeração das Pandur II, para obtenção de um plano de manutenção proposto. O EP possui uma frota de 188 Pandur II, divididas em 9 versões diferentes, todas com o mesmo sistema de refrigeração.

A. Contexto Operacional

A primeira tarefa a fazer após a definição do sistema a ser estudado na análise RCM3 é a definição do contexto operacional (CO) [5]. Nesta análise, o CO das Pandur II ao serviço do EP, foi definido tendo em consideração o clima e as condições do terreno das regiões do país onde estas são utilizadas (nomeadamente as regiões onde se encontram as unidades da Brigada de Intervenção). Foi também tida em consideração a tipologia de uso das viaturas (exercícios, treino das forças, etc.) bem como o seu nível de utilização médio por ano (medido em Horas de Motor).

B. Análise Funcional

Para poder realizar uma análise funcional do sistema de refrigeração, foi necessário identificar os limites do sistema, o que significa identificar claramente quais os componentes que o constituem. De seguida, as funções dos componentes identificados foram definidas e registadas nas fichas de informação (folhas onde se registou toda a informação gerada ao longo do processo) definidas para esta análise.

C. Análise de Modos de Falha

Após a realização da análise funcional, foram identificados os modos de falha de cada um dos componentes analisados. Tal foi conseguido através da análise do registo de todas as falhas ocorridas neste sistema entre janeiro de 2014 e abril de 2020, o que corresponde a um total de 126 ordens de trabalho analisadas. Para além dos modos de falha identificados através da análise das falhas ocorridas, foi também uma análise de engenharia com o objetivo de identificar outros modos de falha possíveis e prováveis de ocorrer.

D. Efeitos de Falha

A descrição dos efeitos da falha é uma fase muito importante, pois fornece as informações necessárias para a análise de risco que é realizada para cada modo de falha identificado. Nesta descrição, como o nome indica, foram definidas as consequências resultantes dos modos de falha (tanto as consequências operacionais como os sinais de alerta das ocorrências) e a sua frequência estimada (utilizada para definir a probabilidade de ocorrência do modo de falha ao realizar a análise de risco), que foi determinada estimando o seu “Mean Time Between Failures” (MTBF).

Por sua vez o MTBF de cada modo de falha foi estimado com recurso à distribuição de Weibull [7]:

$$MTBF = \eta \Gamma\left(\frac{1}{\beta} + 1\right). \tag{1}$$

Em que β e η correspondem aos parâmetros da distribuição, e Γ é a função Gama da distribuição estatística. O parâmetro de escala ou “vida característica” η , corresponde ao intervalo de tempo no qual ocorrem 62,3% das falhas, e apresenta as mesmas dimensões que a variável t (seja horas, quilómetros, ciclos, etc.). Por sua vez, o parâmetro de forma β é um valor adimensional, responsável pela forma da distribuição, e traduz o mecanismo de degradação, permitindo relacionar a distribuição com as fases de vida do equipamento. 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 [8]:

- $\beta=1$: a distribuição de Weibull assume a forma da distribuição exponencial, o que permite representar a fase de vida útil;
- $\beta<1$: a distribuição de Weibull assume a forma da distribuição gama, o que permite representar o período de mortalidade infantil.
- $\beta>1$: a distribuição de Weibull assume a forma da distribuição normal (se $\beta = 3,5$) ou da distribuição log-normal (se $\beta = 2$), o que se adequa ao período de desgaste.

Existem na literatura diversas formas de determinar estes parâmetros da distribuição, sendo que neste artigo se utilizou o método da máxima verosimilhança com censura de dados à direita (em virtude do conjunto de dados de falha não ser completo, isto é, não serem conhecidos os tempos de falha dos componentes de todas as viaturas da frota), que consiste na maximização da função de verosimilhança (para a distribuição de Weibull), que se representa a seguir [9]:

$$L(\eta, \beta) = \prod_{i=1}^n \left[\frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t_i}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t_i}{\eta}\right)^\beta} \right]^{\delta_i} \left[e^{-\left(\frac{t_i}{\eta}\right)^\beta} \right]^{\delta_i} \tag{2}$$

Esta equação requer a utilização de métodos numéricos para que se possa obter uma aproximação da sua maximização, tendo sido para tal utilizado o Solver predefinido do Excell. Os resultados obtidos encontram-se na tabela 1.

Tabela 1. Resultados obtidos com censura de dados

	<i>MTBF</i> (Horas de Motor)	<i>Parâmetros obtidos</i>
Sensor de nível	4134.37	$\eta = 4330.66$ $\beta = 1.14$
Válvula Descompressão	3696.19	$\eta = 3267.94$ $\beta = 0.8$
Sujidade no Radiador	3478.83	$\eta = 3742.36$ $\beta = 1.26$
Fugas	1827.43	$\eta = 1514.86$ $\beta = 0.74$

Foi considerado, em virtude dos registos de falha analisados que todos os modos de falha associados aos componentes Sensor de nível e Válvula de descompressão apresentam a mesma probabilidade de falha e consequentemente o mesmo *MTBF*. Para além destes 2 componentes foram ainda determinados os *MTBF* para os modos de falha relacionados com a acumulação de sujidade no radiador e as fugas de líquido de refrigeração (tal como se apresenta na Tabela 1). Para os componentes ou modos de falha cujos registos de falhas ocorridos são inexistentes ou insuficientes para aplicar estes modelos matemáticos foi considerado que a sua probabilidade de ocorrência é baixa.

E. Análise de Risco

O risco associado a cada modo de falha previamente identificado, foi determinado de acordo com a metodologia proposta por Marius Basson [5] que define o risco como a combinação da severidade do modo de falha com a sua probabilidade de ocorrência.

$$Risco = Severidade \times Probabilidade de Ocorrência \tag{3}$$

Para esta análise RCM3 foi criada uma matriz de risco específica com 5 níveis de severidade e 5 níveis de probabilidade de ocorrência. A severidade foi classificada em 4 parâmetros de consequências: Segurança e Saúde, Ambiental, Operacional e Económica. A combinação de ambos os parâmetros permite classificar o risco em 25 níveis diferentes divididos em 4 categorias (baixo, médio, grave e alto). Se a classificação de risco corresponder a uma classificação grave ou alta, então é inaceitável e algo deve ser feito para reduzir o risco associado.

F. Estratégias de Mitigação de Risco

Após a análise de risco, as estratégias de mitigação de risco foram definidas com base no diagrama de decisão RCM3.

IV. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

O novo plano de manutenção propõe a realização de 4 novas tarefas (não contempladas no plano do fabricante) e a alteração da periodicidade de realização de 2 tarefas já existentes, o que não é uma grande diferença face ao plano de manutenção existente. As novas ações propostas consistem na alteração da frequência de inspeção de 2 componentes, na inclusão da inspeção periódica de um componente que anteriormente não era efetuada, um teste de funcionamento (que também não era efetuada) e na substituição programada de um componente (que também não se encontrava planeada).

O plano de manutenção obtido prevê a realização de ações de manutenção programada (nomeadamente inspeções e substituições) para alguns dos componentes e corretiva (pós avaria) para a grande maioria dos componentes, e nenhuma tarefa de manutenção preditiva ou sob-condição. Os valores obtidos para os *MTBF* com os dados disponíveis (Tabela 1) são valores elevados e que são reveladores de um período de vida elevado (muito mais elevado do que a utilização média das viaturas) para os componentes a que se referem. Não obstante, os parâmetros obtidos para a distribuição de Weibull mostram que as falhas apresentam um carácter aleatório ($\beta \approx 1$) o que as torna impossíveis de prever. Recorrendo a bases de dados de vida de componentes, é possível confirmar que para a grande maioria dos componentes que constituem um sistema de refrigeração típico, os seus valores de *MTBF* são também geralmente elevados, o que suporta esta decisão de não efetuar manutenção sob-condição para estes componentes. Também na literatura é possível encontrar informação que confirma a pouca ou nenhuma utilização deste tipo de procedimentos de manutenção em sistemas de refrigeração, tal como refere James [10] que efetua uma revisão de literatura focada nos temas da fiabilidade, manutibilidade e disponibilidade cobrindo os aspetos mecânicos, elétricos e tribológicos de automóveis e que conclui que existem vários trabalhos relacionados com fiabilidade e análise de óleo de motor mas nenhum identificado que se relacionasse com a análise do óleo da transmissão ou com o líquido de refrigeração, apesar da sua importância para o desempenho geral do motor e das viaturas.

V. CONCLUSÕES

Fazendo um balanço do trabalho realizado, é possível tirar uma série de lições a respeito da manutenção do Sistema de refrigeração das Pandur II, quer ao nível do procedimento relativo ao registo e tratamento da informação respeitante às avarias, quer ao nível das tarefas de manutenção efetuadas, das quais resultaram um conjunto de propostas que se acredita trazerem melhorias para EP em termos da execução e gestão da manutenção do sistema de armas Pandur II e que pode ser estendido a todos os equipamentos do Exército. Tendo isto em consideração, para além do plano de manutenção proposto, este trabalho identificou a necessidade de melhorar o registo de falhas no Exército Português:

- Recomendação de obrigatoriedade de incluir informações relativas ao modo de falha nos registos de falha. Podem ser utilizados, por exemplo, os modos de falha identificados nesta dissertação;
- Recomendação de obrigatoriedade de incluir informações sobre Horas de Motor, Quilómetros e Horas do Trem de Potência nos registos de falha;
- Definição de um procedimento generalizado a ser utilizado na abertura e no encerramento das ordens de trabalho, de forma que o tempo de abertura corresponda efetivamente ao tempo desde a deteção da falha até a sua reparação;

Após a análise efetuada ao longo deste trabalho, é possível concluir que se trata de um sistema robusto, com vários componentes com poucas ou nenhuma falha, e no caso dos componentes com modos de falha mais recorrentes, apresentam

valores elevados de *MTBF*. No caso destes últimos modos de falha, a determinação da distribuição de Weibull associada revelou valores do parâmetro β 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.

O plano de manutenção do fabricante também se mostrou adequado, necessitando apenas de alguns ajustes para mitigar os riscos associados aos modos de falha mais recorrentes, porém a impossibilidade de obtenção de valores de taxa de falha (ou *MTBF*) que forçaram a utilização de bases de dados, torna-se uma limitação, pois impede que sejam definidas ações de manutenção para esses componentes, com maior precisão e mais adequadas à realidade de utilização operacional desse sistema específico. Outra mais-valia desta dissertação reside no facto de ter mostrado que é possível realizar uma análise deste tipo, sem a necessidade de grandes investimentos e com recursos em ferramentas disponíveis no EP.

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

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

Como trabalhos futuros, propõe-se na sequência deste artigo, a realização dos seguintes trabalhos:

- Estender a análise RCM3 a todo o sistema de armas Pandur II, tratando-o como um único sistema;
- Adotar esta metodologia para outros sistemas de armas do Exército Português;
- Sensibilização de todos os envolvidos na gestão e execução da manutenção de sistemas de armas para a importância de um registo mais preciso e objetivo das ordens de trabalho relativas às falhas, de forma a facilitar e permitir a recolha e tratamento de dados de fiabilidade;
- Analisar a viabilidade da aplicação de estratégias de manutenção preditiva relacionadas com a aplicação de modelos matemáticos e computacionais, envolvendo

modelos de inteligência artificial, ao sistema de refrigeração da Pandur II.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Capitão de Material André Graça, gestor da frota de Pandur II, à data da realização deste trabalho, pela disponibilidade em colaborar e fornecer os dados necessários acerca das falhas da Pandur. Agradecem também ao 1º Sargento Carlos Simões pela disponibilidade em colaborar na previsão dos tempos de reparação estimados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA

- [1] F.S.Nowlan and Howard Heap, "Reliability centred maintenance," 1978.
- [2] SAE, *SAE JA1011 - Evaluation Criteria for Reliability-Centered Maintenance (RCM) Process*, vol. 4970. United States of America, 2009.
- [3] SAE, *SAE JA1012- A Guide to the Reliability-Centered Maintenance (RCM) Standard*. Warrendale, Pennsylvania, United States of America, 2002.
- [4] J. Moubray, *RCM II - Reliability Centered Maintenance*, 2nd Edition. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1999.
- [5] M. Basson, *RCM 3: Risk-Based Reliability Centered Maintenance*. South Norwalk: Industrial Press, INC., 2018.
- [6] BSI, *BS EN 60300-3-11 : 2009 Dependability Management — Reliability Centered Maintenance*. United Kingdom, 2009.
- [7] R. Gondim and M. Duarte, "Aplicação da estatística na manutenção preditiva," *FAMAT em Rev.*, vol. 05, pp. 211–223, 2005.
- [8] ReliaWiki, "The Weibull Distribution." [Online]. Available: http://reliawiki.org/index.php/The_Weibull_Distribution. [Accessed: 15-Sep-2020].
- [9] D. N. Murthy, M. Xie, and R. Jiang, *Weibull Models*. New Jersey: John Wiley and Sons, Inc., 2004.
- [10] 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.