

Caso “CARRETO¹”

Manter em *stock* peças de substituição ou rotáveis?

Este caso retrata um problema que se coloca com alguma frequência e que consiste na necessidade de definir quais os componentes de um equipamento que devem ser mantidos em *stock*. Esta definição depende do lugar que cada componente ocupa na estrutura do equipamento a que pertence.

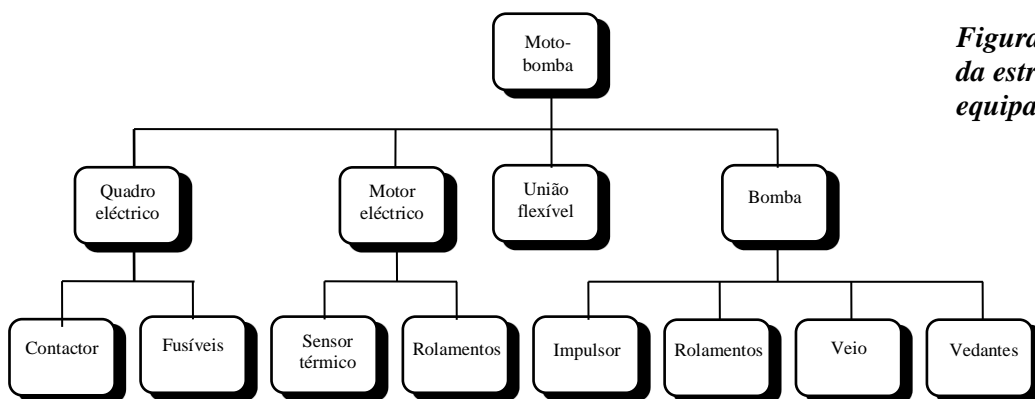


Figura 1 - Exemplo da estrutura de um equipamento

No exemplo da Figura 1 podemos ver alguns dos órgãos sujeitos a falha progressiva ou catastrófica, que compõem uma moto-bomba. Neste caso, coloca-se a questão de saber quais os componentes a manter em *stock*. Por exemplo, justificar-se-á manter um motor eléctrico completo em *stock* em lugar, por exemplo, dos sensores térmicos e dos rolamentos que o compõem?

Vejamos como lidar com esta natureza de questões, reportando-nos ao seguinte caso:

Suponhamos que existem dois carretos – carreto A e carreto B – em cada uma das caixas de velocidades de dez escavadoras. Os dentes destes carretos quebram, por vezes, em resultado de manobras particularmente severas. Quando ocorre um acidente com um destes carretos, a escavadora recolhe à oficina. A caixa de velocidades é desmontada e o carreto danificado é substituído (actualmente, a empresa mantém em *stock* algumas unidades de cada um daqueles carretos). Esta operação é relativamente morosa, ocasionando custos de oportunidade. Nestas circunstâncias, o Eng.º Rocha suspeita que seria, eventualmente, mais económico, adquirir e manter em *stock* uma caixa de velocidades completa e eliminar o *stock* dos carretos – o tempo de imobilização de uma escavadora seria menor e os carretos só seriam adquiridos o mais tarde possível (*just-in-time* de acordo com o algoritmo de planeamento de necessidades de materiais MRP², no caso de intervenções de manutenção preventiva) ou após a substituição de uma caixa.

¹ Caso alterado constante no livro “Manutenção Centrada na Fiabilidade – Economia das Decisões”, Rui Assis, LIDEL, 1997, esgotado.

² MRP – *Materials Requirements Planning* (ver o Capítulo 6 do livro “Apoio à Decisão em Manutenção na Gestão de Activos Físicos, Rui Assis, LIDEL, 2014.

Neste último caso, a caixa de velocidades designa-se por “rotável”, pois sendo reparável, percorre o ciclo “máquina”, “oficina de reparação”, “armazém” e, novamente, “máquina”, conforme a Figura 2 mostra esquematicamente.

Rotável

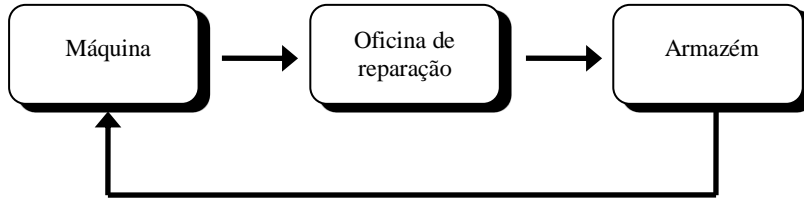


Figura 2 - Ciclo de um componente rotável

O Eng.º Rocha está pois confrontado com duas alternativas de decisão:

- Alternativa 1 – Manter o actual estado de coisas (*status quo*), ou seja, quando um carreto falha, a caixa é desmontada, o carreto falhado é encomendado e montado logo que chegar, a caixa é remontada e a escavadora volta ao serviço;
- Alternativa 2 – Adquirir e manter em *stock* uma caixa de velocidades completa; ou seja, quando um carreto falha, a caixa é substituída por outra restaurada que se encontrava em armazém e a escavadora volta imediatamente ao serviço. A caixa desmontada é restaurada logo que um novo carreto, entretanto encomendado, chegar.

Alternativas de decisão

Mas, qual das alternativas será a mais económica? Vamos ajudar?

Recolha de dados

A melhor alternativa, na óptica económica, será, obviamente, aquela que proporcionar o menor custo anual equivalente. Para calcularmos estes custos recolhemos a informação que descrevemos no Quadro 1.

	Carreto A	Carreto B	Caixa completa
Taxa de falhas (falhas/hora)	$1,25 \cdot 10^{-4}$	$1,50 \cdot 10^{-4}$?
Custo unitário (u.m./unidade)	9	13	300
Stock médio (unidades)	3	3	?
MTTR (horas)	5	3	0,5 + 0,5

Quadro 1 – Dados da caixa e dos carretos

A última linha do Quadro tem o seguinte significado:

- Na primeira coluna, MTTR (*Mean Time To Replace*) representa o tempo médio de substituição de um carreto, isto é, o tempo que decorre entre o momento da falha de um carreto e o momento em que a escavadora é reposta em marcha;
- Na segunda coluna, o tempo de 5 horas corresponde ao tempo médio de reparação de uma falha na caixa originada pelo carreto A: desmontagem da caixa, substituição do carreto A e montagem da caixa;
- Na terceira coluna, o tempo de 3 horas corresponde ao tempo médio de reparação de uma falha na caixa originada pelo carreto B: desmontagem da caixa, substituição do carreto B e montagem da caixa;
- Na quarta coluna, o tempo de 0,5 hora corresponde ao tempo de desmontagem da caixa falhada e outra 0,5 hora corresponde ao tempo de montagem da caixa restaurada que se encontrava em armazém.

Outros dados igualmente pertinentes são:

- Prazo de aprovisionamento de qualquer quantidade de carretos, equivalente a 5 dias x 16 horas/dia = 80 horas de serviço/escavadora
- Regime médio de trabalho das escavadoras: 4.400 horas/ano
- Custo de posse: 15% .ano
- Custo de oportunidade: 20 u.m./hora
- Custo da Manutenção: 3 u.m./hora

Resolução do caso

Admitindo que as falhas dos carretos são independentes entre si, isto é, que uma falha no carreto A não induz falhas no carreto B e *vice-versa*, a taxa de falhas da caixa de velocidades devida aos carretos é:

$$\lambda_C = \lambda_A + \lambda_B = 1,25 \cdot 10^{-4} + 1,50 \cdot 10^{-4} = 2,75 \cdot 10^{-4} \text{ falhas/hora}$$

Os níveis médios de *stock* de cada carreto (3 unidades/referência) são exageradamente altos. O nível de serviço é praticamente 100% (o leitor pode confirmar pela expressão de *Poisson* ou recorrendo à “Distribuição *Poisson.XLSX*”³).

Distribuição Poisson.XLSX

Quanto à pretensão de se manter uma única caixa de velocidades em *stock*, vejamos se é correcta:

Quando a caixa em *stock* é montada numa escavadora cuja caixa falhou, iniciamos imediatamente o processo de restauro da caixa falhada. Abrimos e caixa, identificamos qual o carreto que originou a falha e encomendamo-lo. Este processo irá demorar 5 dias (cerca de 80 horas equivalentes de serviço da escavadora inoperacional). Quando o carreto chega, vai imediatamente substituir o seu homólogo na caixa falhada, o que demora em média $(5 \times 1,25 + 3 \times 1,5)/(1,25 + 1,5) = 3,91$ horas. Como desmontar a caixa falhada demora 0,5 hora e remontar a caixa demora outra 0,5 hora, o tempo total de imobilização de uma escavadora será: $0,5 + 80 + 3,91 + 0,5 \cong 85$ horas.

Calculemos, então, a probabilidade de ocorrência de uma falha na frota das dez escavadoras enquanto decorre a reparação da última caixa de velocidades falhada (85 horas). Tendo em conta que o prazo de aprovisionamento foi estimado, necessariamente, com um grau de precisão grosseiro, parece desejável adoptar alguma folga e aproximarmos o resultado à dezena imediatamente superior. A missão é, então, fixada em 90 horas.

Tempo de missão

Teremos, assim, para as 10 escavadoras e uma missão 90 horas:

$$\begin{aligned} k\lambda t &= 10 \times 2,75 \cdot 10^{-4} \times 90 = 0,2475 \\ P(x \leq 1) &= p(0) + p(1) \\ P(x \leq 1) &= e^{-0,2475} [1 + (0,2475)^1/1!] \\ P(x \leq 1) &= 0,9740 \end{aligned}$$

Isto é, se mantivermos uma única caixa de velocidades restaurada em *stock*, o nível de serviço resultará igual a 0,9740. Apresentámos este resultado ao Eng.º Rocha que o considerou aceitável, pelo que, prosseguimos.

³ Aplicação incluída no livro “Apoio à Decisão em Manutenção na Gestão de Activos Físicos”, Rui Assis, LIDEL, 2014

Calculemos agora os diversos custos para cada uma das alternativas de decisão.

Alternativa 1 (*status quo*)

Custo de posse

Manter permanentemente e em média 3 carretos A e 3 carretos B em armazém, custa:

Carreto A:	$3 \times 9 \times 0,15 =$	4,05 u.m./ano
Carreto B:	$3 \times 13 \times 0,15 =$	<u>5,85</u> u.m./ano
		9,90 ⁴ u.m./ano

Custo de oportunidade

Enquanto se substitui um carreto, cada escavadora encontra-se parada, originando custos de oportunidade. As 10 escavadoras originam, então, os custos de oportunidade seguintes:

Carreto A:	$10 \times 1,25 \cdot 10^{-4} \times 4.400 \times 5 \times 20 =$	550,0 u.m./ano
Carreto B:	$10 \times 1,50 \cdot 10^{-4} \times 4.400 \times 3 \times 20 =$	<u>396,0</u> u.m./ano
		946,0 u.m./ano

Custo de substituição

O pessoal da Manutenção intervém para substituir os carretos sempre que ocorre uma falha. O custo deste serviço é:

Carreto A:	$10 \times 1,25 \cdot 10^{-4} \times 4.400 \times 5 \times 3 =$	82,5 u.m./ano
Carreto B:	$10 \times 1,50 \cdot 10^{-4} \times 4.400 \times 3 \times 3 =$	<u>59,4</u> u.m./ano
		141,9 u.m./ano

Custo total da Alternativa 1 \cong 1.098 u.m./ano

Alternativa 2

Custo de posse

Manter permanentemente uma caixa de velocidades em armazém, comportará um custo de posse de:

$$1 \times 300 \times 0,15 = 45,00 \text{ u.m./ano}$$

Custo de oportunidade

Enquanto se substitui uma caixa, cada escavadora encontrar-se-á inoperacional (1 hora em média), originando custos de oportunidade. As 10 escavadoras originarão, então, os custos de oportunidade seguintes:

$$10 \times 2,75 \cdot 10^{-4} \times 4.400 \times 1 \times 20 = 242,0 \text{ u.m./ano}$$

⁴ Mesmo que a quantidade de carretos em *stock* fosse reduzida, o impacto no custo total seria insignificante.

Custo de substituição da caixa

O pessoal da Manutenção intervém para substituir a caixa sempre que ocorre uma falha. O custo deste serviço para as 10 escavadoras é:

$$10 \times 2,75 \cdot 10^{-4} \times 4.400 \times 1 \times 3 = 36,3 \text{ u.m./ano}$$

Custo de substituição dos carretos (máquina operacional)

O pessoal da Manutenção intervirá mais tarde para substituir os carretos falhados da caixa retirada da escavadora e preparar esta para entrar em armazém como um rotável. O custo deste serviço será:

$$\text{Carreto A: } 10 \times 1,25 \cdot 10^{-4} \times 4.400 \times (5 - 1) \times 3 = 66,0 \text{ u.m./ano}$$

$$\text{Carreto B: } 10 \times 1,50 \cdot 10^{-4} \times 4.400 \times (3 - 1) \times 3 = \underline{39,6} \text{ u.m./ano}$$

$$105,6 \text{ u.m. /ano}$$

Neste passo, só consideramos o tempo de reparação dos carretos, pelo que, subtraímos o tempo de montagem/desmontagem da caixa ($0,5 + 0,5 = 1$ hora) do tempo total.

$$\text{Custo total da Alternativa 2} \cong 429 \text{ u.m./ano}$$

Notar que não considerámos o custo de compra de novos carretos, pois sendo este igual em ambas as alternativas, proceder de forma contrária não influenciaria os resultados e só contribuiria para a complexidade dos cálculos.



Como o custo anual da Alternativa 2 é inferior ao da Alternativa 1, optamos pela Alternativa 2. Ou seja, passamos a manter uma caixa de velocidades em *stock* e adquirimos os carretos à medida que se tornam necessários para intervenções planeadas. A caixa de velocidades transforma-se, assim, num rotável, isto é, sempre que a caixa de velocidades de uma das dez escavadoras se falha, é substituída pela caixa em *stock*. A caixa falhada, após ter sido reparada, é, por sua vez, colocada em *stock* e, na próxima falha, o ciclo repete-se.



Exercício em computador V.5

No EXCEL carregar o ficheiro CARRETO.XLS. A aplicação desenvolve-se a partir da célula A1 no sentido descendente. As células apresentam diferentes cores:

- Caracteres a preto sobre fundo violeta claro para texto;
- Caracteres a azul sobre fundo azul claro para introdução de dados;
- Caracteres a magenta sobre fundo verde-claro para cálculos intermédios;
- Caracteres a vermelho sobre fundo amarelo para resultados.



Confirme os resultados obtidos no caso CARRETO e responda às seguintes questões:

1. Se o *stock* de cada carreto for reduzido para apenas uma unidade, a conclusão altera-se?
2. Qual o custo de oportunidade que torna as duas alternativas indiferentes?
3. O mesmo do ponto 2, mas supondo o custo de posse igual a 30%.ano.
4. Será que a alternativa de manter uma caixa de velocidades em *stock* ainda compensa se existir apenas uma escavadora?

Questões

1. Não, pois o nível de serviço proporcionado continua muito elevado (99,5% para o carreto A e 99,3% para o carreto B); 2. 1 u.m./hora; 3. 2 u.m./hora; 4. Sim, pois o custo de manter uma caixa seria de 83 u.m./ano contra 119 u.m./ano de manter os carretos.