

## Quantidade ideal de componentes (ou órgãos) rotáveis a manter em *stock*

Rui Assis (Eng.º Mec. Ph.D. IST)

[rassis@rassis.com](mailto:rassis@rassis.com)

[www.rassis.com](http://www.rassis.com)

13.º Congresso Nacional de Manutenção  
3.º Encontro de Manutenção dos Países de Língua Oficial Portuguesa  
Centro Cultural e de Congressos de Aveiro  
19 e 20 de Novembro de 2015

### Resumo

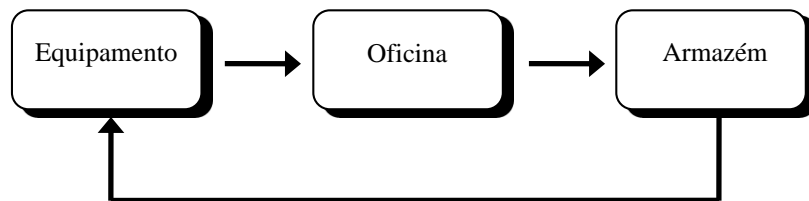
Muitas empresas, sobretudo as que dispõem de muitos equipamentos iguais ou semelhantes dispersos geograficamente (permanentemente no caso, por exemplo, do transporte e distribuição de energia eléctrica, do gás natural, da água potável, etc. ou temporariamente no caso, por exemplo, dos transportes de pessoas e de mercadorias, rodoviários, ferroviários, etc.), têm interesse em possuir em *stock* algumas unidades de determinados órgãos críticos, os quais são reparados todas as vezes que falham (normalmente um número limitado de vezes) e voltam ao *stock*. Este interesse advém do facto de um qualquer destes equipamentos, após uma falha deste órgão crítico (rotável), receber um órgão reconicionado e ser repostado rapidamente em serviço. Esta circunstância permite reduzir radicalmente o tempo de imobilização, caso tivesse de aguardar em oficina pela reparação do órgão falhado e, conseqüentemente, reduzir o custo de oportunidade associado. Este artigo demonstra, através de um caso exemplificativo, qual a quantidade ideal de rotáveis a manter em *stock*, quer na perspectiva económica, quer na perspectiva do nível de serviço desejado. O caso é modelado em EXCEL e resolvido pelo método de simulação de Monte Carlo, tendo em conta a quantidade e natureza das variáveis envolvidas e a incerteza na estimativa dos valores de algumas destas.

**Palavras-chave:** Weibull, LogNormal, TAT (*Turn Around Time*), Rotável, FR (Factor de Restauo), Coeficiente de simultaneidade, Custo de oportunidade, Custo de posse, Simulação de Monte-Carlo.

O autor adopta o anterior acordo ortográfico.

## I – Introdução

Designamos por “rotável” um componente (ou órgão) reparável (um pneu que é recauchutado, uma roda de comboio que é rectificável, o veio de uma bomba que é cheio e rectificado,...) ou um órgão reparável (uma caixa de velocidades, uma bomba de água de arrefecimento de um motor, um injector de combustível de um motor diesel,...), o qual percorre o ciclo “equipamento”, “oficina de reparação”, “armazém” e, novamente, “equipamento”, sempre que falha. Trata-se de um procedimento corrente para diminuir o tempo de imobilização de um equipamento ao qual aquele componente (ou órgão) reparável pertence. Assim, quando um órgão falha, é prontamente substituído por outro existente recondicionado, voltando rapidamente ao serviço. O órgão falhado prossegue para reparação em oficina e, uma vez reparado, é guardado em armazém até ao dia em que se torna, por sua vez, necessário para substituir um órgão seu igual, no mesmo ou noutra equipamento semelhante. O somatório de todos estes tempos (calendário) é conhecido vulgarmente pela expressão inglesa “*Turn Around Time*” ou pelo acrónimo TAT.



**Figura 1 – Ciclo de um órgão rotável**

Este procedimento enquadra-se no mesmo conceito de componentes (ou órgãos) em redundância passiva (*ou standby*), com a particularidade de os rotáveis existirem em número limitado e serem reparáveis.

Um problema que se coloca em gestão de activos é o de decidir qual o número adequado de rotáveis de cada referência a manter ou, mesmo, se algum se justificará.

Este número pode ser encontrado com base em dois critérios alternativos:

- 1) Economia, ponderando os custos de oportunidade decorrentes da paragem de um ou mais equipamentos quando, na sequência de uma falha do órgão, um rotável não se encontra imediatamente disponível (um ou mais de um encontra-se ainda em reparação) e o custo de posse dos rotáveis em armazém;
- 2) Nível de serviço (fiabilidade), probabilidade de dispor de um órgão rotável em qualquer momento em que este se torne necessário;

Obviamente que podemos imaginar uma terceira alternativa que consistiria em “ignorar” na alternativa “Economia” a região de soluções que proporcionassem níveis de serviço inferiores a um limite mínimo desejado.

Para decidir, precisamos então de conhecer para cada componente (ou órgão):

- O seu comportamento em falha (frequentemente descrito pelos parâmetros de uma distribuição de probabilidade *Weibull*);
- O tempo de reparação de uma falha (frequentemente descrito por uma distribuição de probabilidade *LogNormal*);
- O seu FR (Factor de Restauro<sup>1</sup>) e a respectiva (eventual) taxa de progressão;
- O número máximo tolerado de reparações;
- Os regimes de funcionamento (diário e anual) dos equipamentos que os integram;
- O regime diário de prestação dos serviços de manutenção;

<sup>1</sup> A existência de um FR contribui para a progressiva diminuição da vida média útil do componente após cada reparação. O Factor de Restauro FR = 0, significa que o componente ficou no estado em que se encontrava antes da reparação (*as bad as old*); ou seja, a sua vida recomeça com a mesma idade que tinha no momento da falha. O Factor de Restauro FR = 1, significa que o componente voltou ao estado de novo após a reparação (ou foi substituído por outro novo) (*as good as new*); ou seja, a sua vida recomeça de zero. O FR pode ser constante após cada reparação, ou pode diminuir em progressão geométrica quando se lhe atribui uma taxa de progressão.

- O CS (Coeficiente de Simultaneidade), ou seja, a fracção do tempo em que cada componente (ou órgão) funciona durante o tempo de funcionamento do equipamento no qual se encontra montado;
- Os custos de oportunidade eventualmente incorridos por cada equipamento quando pára devido a uma falha do componente (ou órgão), o qual será eventual e rapidamente substituído por um rotável ou, na sua inexistência, terá de aguardar até ficar reparado;
- O custo de aquisição de um componente (ou órgão) no estado de novo;
- O custo de posse de materiais em armazém (soma do custo de oportunidade do capital imobilizado com o custo de armazenagem);
- O TAT (*Turn Around Time*), ou seja, o tempo de reparação (intervalo de tempo que medeia entre o momento da falha do componente (ou órgão) e o momento em que se encontra reparado e disponível em armazém pronto para substituir outro componente (ou órgão) que falhe entretanto);
- O TTR (*Time To Replace*), ou seja, o tempo de substituição (intervalo de tempo que medeia entre o momento da falha do componente (ou órgão) e o momento em que é substituído por outra unidade nova ou recuperada).

O cálculo da quantidade que deve existir permanentemente em *stock* torna-se bastante mais complexo do que quando o componente (ou órgão) não é reparável. Os métodos existentes para resolução desta natureza de problemas são na sua maioria analíticos, os quais pecam por serem limitados no que diz respeito à diversidade da natureza das variáveis consideradas e pelos pressupostos teóricos de que enfermam. Os métodos de simulação discreta de Monte-Carlo constituem uma alternativa mais confiável. É esta a abordagem aqui adoptada.

Após umas centenas ou mesmo milhares de corridas, aquele comportamento é tratado estatisticamente permitindo determinar quantos componentes (ou órgãos) rotáveis deverão existir em *stock*, prontos a tomar o lugar de um qualquer componente (ou órgão) que falhe, de modo a satisfazer um de dois objectivos alternativos:

- 1) Garantir um determinado nível mínimo de serviço;
- 2) Avaliar, na perspectiva económica (ponderando os custos de posse e os custos de oportunidade), se é viável, ou não, optar e manter os rotáveis necessários.

## II – Exemplo de aplicação

Num parque de máquinas existem 6 órgãos reparáveis (C1 até C6) iguais embora sujeitos a condições de carga e de ambiente um pouco diferentes. Depois de analisado o seu histórico, foi possível confirmar que o seu comportamento em falha pode ser descrito por distribuições de probabilidade de *Weibull* com os parâmetros descritos no Quadro 1. Estes parâmetros foram obtidos recorrendo a um dos métodos estatísticos<sup>2</sup> de melhor ajustamento (ou aderência) a partir dos dados históricos observados. Notar que o parâmetro de forma é igual em todos os órgãos, pois depende apenas da natureza do modo de falha considerado (normalmente o predominante entre todos os modos de falha de todos os componentes críticos, assim considerados, que compõem cada órgão), e que apenas o parâmetro de escala difere pois depende das condições reais de carga e de ambiente a que cada órgão se encontra sujeito.

Parâmetros	C1	C2	C3	C4	C5	C6
Localização =	0	0	0	0	0	0
Forma =	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
Escala =	1340	1120	1220	1540	1600	1390

Apurou-se também que o Factor de Restauro (FR) inicial de todos eles é 0,5, decrementando depois à taxa de 5%, conforme mostra o Quadro 2. O número máximo aceitável de reparações é 3.

FR inicial =	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Taxa progressão =	5%	5%	5%	5%	5%	5%

<sup>2</sup> Os métodos usados comumente em fiabilidade são os dois seguintes: 1) *Median-ranking* (ou de *Bernard*); 2) Máxima verosimilhança. Porém, os testes de hipótese 3) Qui-quadrado ou 4) *Kolmogorov Smirnov* podem também usar-se. Os dois primeiros permitem tratar dados censurados, enquanto os dois últimos não.

Os regimes de funcionamento diário e anual dos equipamentos, nos quais estes órgãos se encontram incorporados, são os descritos no Quadro 3 e no Quadro 4.

Quadro 3 - Regimes de funcionamento diário dos equipamentos que incorporam estes componentes						
Início =	0	8	12	14	0	8
Fim =	24	18	18	20	24	18

Quadro 4 - Regimes de funcionamento anual dos equipamentos que incorporam estes componentes						
	336	336	365	365	230	230

Os Coeficientes de simultaneidade<sup>3</sup> (CS) – ou fracção de tempo em funcionamento simultâneo com o equipamento – são os mostrados no Quadro 5.

Quadro 5 - Coeficientes de Simultaneidade						
	0,8	0,7	1	0,5	0,65	0,8

Os custos de oportunidade incorridos durante o tempo em que os diversos equipamentos ficam parados aguardando a reparação dos órgãos falhados, ou a sua substituição por novos ou recuperados, são os mostrados no Quadro 6.

Quadro 6 - Custos de oportunidade (€/hora máquina parada)						
	800	30	40	30	650	30

O regime diário de prestação dos serviços de manutenção é das 08.00 às 18.00 horas.

Cada órgão custa novo 1.600 €, o custo de posse (custo de oportunidade do capital empatado + custo de armazenagem) é estimado em 25%.ano (25 € por cada 100 € imobilizados em *stock* durante 1 ano).

O prazo de aprovisionamento é igual a 45 dias calendário e o nível de serviço desejado (probabilidade de dispormos de um componente novo de cada vez que um componente tenha atingido o seu número limite de reparações) é 95%.

A análise estatística do histórico das intervenções permitiu constatar que o tempo de reparação (*Turn Around Time* – TAT ou intervalo de tempo entre o momento em que o componente/órgão falha e o momento em que se encontra restaurado e pronto a ser montado em qualquer dos equipamentos) pode ser descrito por uma distribuição de probabilidade Logarítmica Normal de parâmetros Média = 180 horas e Desvio padrão = 30 horas. A mesma análise permitiu também constatar que o tempo de substituição (*Time To Replace* – TTR ou intervalo de tempo entre o momento em que o componente/órgão falha e o momento em que este é substituído por outro novo ou recondicionado) pode ser descrito também por uma distribuição de probabilidade Logarítmica Normal de parâmetros Média = 3 horas e Desvio padrão = 0,5 horas.

Suponhamos que pretendemos conhecer as respostas às seguintes questões:

- Para um Nível de Serviço de 90%, qual o número adequado de rotáveis que deverão ser mantidos permanentemente em *stock*?
- Na perspectiva económica, vale a pena manter unidades rotáveis? E se afirmativo, em que quantidade?
- As mesmas questões das alíneas a) e b), supondo que FR = 0 (*as bad as old*) – a taxa de progressão não se aplica nesta circunstância, pelo que os valores iniciais podem permanecer;
- As mesmas questões das alíneas a) e b), supondo que, para além das circunstâncias da alínea c), todas as máquinas funcionam no regime diário de 24 horas (entre as 0 e as 24 horas) e que todos os órgãos funcionam em simultâneo (os Coeficientes de Simultaneidade são todos iguais a 1);
- As mesmas questões das alíneas a) e b), supondo válidas as circunstâncias das alíneas c) e d). O TAT é descrito por uma Média de 120 horas e um Desvio Padrão de 20 horas;
- Nas condições iniciais, se desejarmos um nível de serviço de 95% na gestão do aprovisionamento de novos órgãos, qual deverá ser o ponto de encomenda?

Uma vez construído o modelo de simulação e corrido este umas centenas de vezes até se conseguir a precisão estatística desejada, obtemos os seguintes resultados:

<sup>3</sup> Recorrendo ao método estatístico das Observações Instantâneas, no caso de não existirem contadores específicos.

- Obtém-se 1 unidade para um Nível de Serviço de aproximadamente 94%.
- A conclusão é afirmativa e o número necessário de rotáveis é igual a 2 unidades.
- Obtém-se o mesmo valor de 2 unidades para ambas as perspectivas (quer a económica quer a do nível de serviço).
- Obtém-se 5 unidades na perspectiva do nível de serviço com aproximadamente 93% e 6 unidades na perspectiva económica.
- Obtém-se o mesmo valor de 6 unidades para ambas as perspectivas (quer a económica quer a do nível de serviço).
- Obtém-se 3 unidades como ponto de encomenda.

### III – Lógica de construção do modelo

O modelo construído no EXCEL não é descrito em detalhe neste artigo por ser demasiado complexo. Limita-se assim a sua descrição ao ecrã de *inputs-outputs* uma vez completadas 1.500 corridas (ver o Quadro 7) e à lógica adoptada, seguida e brevemente descrita.

- Simulam-se dois cenários, tendo em conta os Factores de Restauro e as taxas de progressão: um considerando a existência de rotáveis e outro considerando a sua inexistência.
- Sendo  $n$  o número limite de reparações, simulam-se em ambos os cenários os momentos de  $n+1$  falhas até cada componente, pertencente ao mesmo e/ou a outros equipamentos, ser rejeitado.
- De cada vez que se verifica uma falha de ordem  $\leq n$ , o componente (ou órgão) é recuperado num intervalo de tempo TAT no caso do cenário sem rotáveis, pois o equipamento tem de aguardar pela reparação do componente falhado, ou num intervalo de tempo TTR  $\ll$  TAT, no caso do cenário com rotáveis, pois um rotável toma prontamente o lugar do componente falhado.
- O número necessário de rotáveis é, pelo menos 1, pois sempre que um componente (ou órgão) falha tem de ser reparado – o que demorará o tempo TAT. Para reduzir este tempo e demorar apenas TTR, tem de existir um rotável pronto a substituí-lo.
- Converte-se a escala de tempo de funcionamento dos componentes (ou órgãos) na escala de tempo calendário, tendo em conta os horários de funcionamento diário, os coeficientes de simultaneidade e os regimes de funcionamento anual dos equipamentos aos quais os componentes (ou órgãos) pertencem.
- No cenário sem rotáveis, conta-se em momentos aleatórios quantos componentes (ou órgãos) se encontram simultaneamente no estado de reparação. Após algumas centenas ou mesmo milhares de corridas, calcula-se o percentil (nível de serviço) desejado. É este o número de rotáveis procurado.
- No caso do critério de decisão ser o económico e tendo em conta o regime de funcionamento do Serviço de Manutenção, calculam-se os custos de oportunidade em ambos os cenários, resultantes dos tempos de inactividade (superiores no caso do cenário sem rotáveis), e calcula-se o custo de posse dos rotáveis no caso do cenário com rotáveis, o qual é somado ao correspondente custo de oportunidade.

Quadro 7 – Inputs e outputs

Referência: RF302003										Unidades existentes = 6		Nº máximo reparações = 3		Simulação							
Componentes/Órgãos										Nível de confiança = 95%		Nº rotáveis = 2		Unidades							
Parâmetros	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	Nº de corridas = 500	Faltam = 0	Correr o modelo								
Localização	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Conclusões do critério "Nível de Serviço (NS)"										
Forma	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	NS desejado = 90%	Unidades recomendadas = 1		Desvio amostral (+/-) = 7,84%							
Escala	1340	1120	1220	1540	1600	1390					Nível de serviço conseguido = 95,83%		Conclusões do critério "Economia de custos"								
Factores de restauro										Com rotáveis		Sem rotáveis									
FR inicial	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	Nível de alerta = 3	Unidades		Nível de alerta = 3		Unidades					
a progressão	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	Custo de posse = 800	€/ano		Custo de alerta = 3		€/ano					
Regimes de funcionamento diário dos equipamentos que incorporam estes componentes										Custo oportunidade = 38.817		€/ano		Custo oportunidade = 442.931		€/ano					
Início	0	0	12	14	0	0	0	0	0	0	Desvio amostral (+/-) = 3,29%		Desvio amostral (+/-) = 3,19%								
Fim	24	18	18	20	24	18					É mais económico manter rotáveis na quantidade de 2 unidades										
Regimes de funcionamento anual dos equipamentos que incorporam estes componentes										Nº de rotáveis = 2											
Coeficientes de Simultaneidade										Custo de oportunidade (€/hora máquina parada)											
	0,8	0,7	1	0,5	0,65	0,8															
	336	336	365	365	230	230															
Dados de gestão										Tempo de reparação		Tempo de substituição		Regime da Manutenção							
Costo de posse	25%	€/ano	Medida = 35	horas	Medida = 3	horas	Início = 8	horas	Fim = 18	horas											
componente	1600	Unidade	Desv. Padr. = 5	horas	Desv. Padr. = 0,5	horas															
Aprovisionamento										Prazo de aprovisionamento = 45		dias									
										NS desejado = 95%											
										Apagar todos os dados		Importar um Exemplo									

### IV – Conclusões

Mais uma vez se constata a necessidade de recorrer às técnicas de simulação em computador para conseguir ultrapassar as limitações dos métodos analíticos na modelação de problemas complexos, como os que se nos deparam em actividades da manutenção de equipamentos e instalações.

**Referências bibliográficas:**

1. Assis, Rui, “Apoio à Decisão em Manutenção na Gestão de Activos Físicos”, LIDEL, 2014
2. Assis, Rui, “EXCEL na Simulação de Sistemas e Análise de Risco”, AMAZON, 2014