

## Caso "ESCAVADORA"<sup>1</sup>

### Dimensionamento de uma equipa de manutenção

Em muitas empresas, existem equipas de manutenção local, as quais, para além de intervirem em acções de manutenção preventiva, realizam também a manutenção correctiva dos equipamentos que avariaram. Nestas circunstâncias, coloca-se à empresa um problema de natureza económica, relacionado com o dimensionamento mais adequado de cada equipa. Com efeito,

**Manutenção local**

- Se a equipa for composta por poucos elementos, o custo dos salários é reduzido mas, em contrapartida, o número de horas perdidas de produção é elevado, o que representa um custo de oportunidade (produção e, logo, vendas perdidas) significativo;
- Se a equipa for composta por muitos elementos, pode verificar-se exactamente o oposto.

**Custos de evolução contrária**

### Apresentação do caso

Uma empresa mineira possui 8 escavadoras semelhantes que funcionam 16 horas por dia. Cada vez que uma escavadora avaria, tem de aguardar pela disponibilidade de um técnico de manutenção para ser reparada e voltar ao seu estado operacional.

O Eng<sup>o</sup> Rocha, que é Director de Exploração, anda preocupado, pois parece-lhe que o número de técnicos não é suficiente, dado o tempo que as escavadoras frequentemente esperam antes de serem assistidas. Em consequência, perdem-se muitas horas de produção que vão originar custos de oportunidade. Contudo, o Eng<sup>o</sup> Rocha sabe que cada técnico custa à empresa alguns milhares de unidades monetárias (u.m.) anuais, pelo que a hipótese de admissão de mais técnicos deve ser devidamente ponderada. Concretamente, parece-lhe que deve existir um número ideal de técnicos que constitua um compromisso entre aquelas duas naturezas de custos (produção perdida e salários dos técnicos). Perante esta situação, o Eng<sup>o</sup> Rocha resolveu pedir-nos que estudássemos o problema e lhe apresentássemos uma recomendação.

---

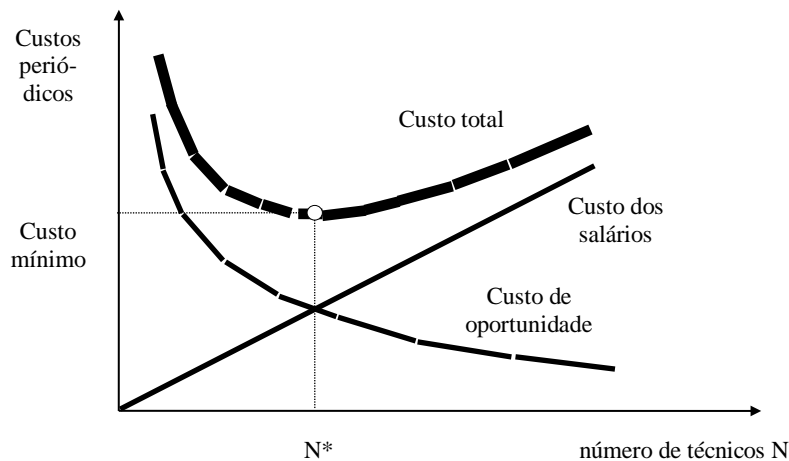
<sup>1 1</sup> Caso alterado constante no livro "Manutenção Centrada na Fiabilidade – Economia das Decisões", Rui Assis, LIDEL, 1997, esgotado.

## Recolha de dados

O problema consiste em determinar qual o número óptimo económico de técnicos de manutenção  $N^*$ , a integrar na equipa, de forma a minimizar os custos combinados de oportunidade (produção perdida e, conseqüentemente, vendas perdidas) e dos salários daqueles técnicos. Estes custos bem como a sua soma (custo total) encontram-se representados na Figura III.13 seguinte.

**Número óptimo económico**

Nesta Figura podemos observar que, quanto maior for o número de técnicos de manutenção  $N$ , menor será o custo correspondente ao tempo durante o qual as máquinas, uma vez avariadas, ficam sem produzir aguardando a disponibilidade de algum dos técnicos. Em contrapartida, quanto maior for o número de técnicos de manutenção maior será o custo correspondente dos seus salários. A situação óptima corresponde a um compromisso entre aqueles dois custos.



**Figura III.13 - Variação dos custos periódicos de salários e de oportunidade com o número de técnicos**

Para resolver este problema é necessário conhecermos:

1. A distribuição em frequência do tempo entre avarias de cada escavadora, de forma a podermos construir a distribuição em frequência do tempo entre avarias do conjunto das escavadoras;
2. A distribuição em frequência dos tempos de cada reparação;
3. O custo de oportunidade da produção perdida;
4. Salário médio de um técnico de manutenção.

**Informação necessária**

Ao fim de alguns dias, conseguimos a seguinte informação:

1. No cadastro das escavadoras encontramos registos de alguns anos, com as datas em que cada uma delas tinha avariado e voltado ao serviço, as causas de cada avaria e a descrição dos trabalhos realizados bem como a respectiva duração. Com aquelas datas calculámos os intervalos de tempo entre avarias do conjunto das dez escavadoras. Procedemos depois ao tratamento estatístico destes resultados que se encontram resumidos no Quadro III.14, adiante;

**Informação recolhida**

<b>Tempo entre avarias (TBF) no conjunto das 8 escavadoras (horas)</b>	<b>Frequências relativas (%)</b>	<b>Frequências relativas acumuladas (%)</b>
≤ 10	18	18
20	15	33
30	12	45
40	10	55
50	8	63
60	7	70
70	5	75
80	4	79
90	4	83
100	3	86
110	3	89
≥ 120	11	100

**Quadro III.14 - Distribuição de frequências dos tempos entre avarias (TBF) do conjunto das 8 escavadoras**

2. As durações de reparação foram também tratadas em frequência tendo resultado o Quadro III.15 a seguir;

<b>Tempo de reparação (TTR) (horas)</b>	<b>Frequências relativas (%)</b>	<b>Frequências relativas acumuladas (%)</b>
≤ 1	39	39
2	24	63
3	15	78
4	8	86
5	5	91
≥ 6	9	100

**Quadro III.15 - Distribuição de frequências dos tempos de reparação (TTR)**

3. O custo de oportunidade foi avaliado em aproximadamente 100 u.m./hora.escavadora;  
 4. Cada novo técnico de manutenção custa à empresa 1 u.m./hora.

## Resolução do caso

O problema será mais simples de resolver se as distribuições de TBF e de TTR puderem ser descritas por funções teóricas. Assim, começamos por proceder a testes de aderência. Similarmente ao que fizemos na variante 1 do caso QUARTZO, recorreremos ao teste de *Kolmogorov-Smirnov* e, facilmente, concluímos o seguinte:

- A distribuição de TBF pode ser representada por uma lei exponencial negativa com  $\lambda = 0,02$  avarias/hora, ou MTBF = 50 horas;
- A distribuição de TTR pode ser representada por uma lei exponencial negativa com  $\lambda = 0,5$  reparações/hora, ou MTTR = 2 horas.

O leitor poderá confirmá-lo, realizando o teste.

A forma de abordagem consistirá em calcular, para cada alternativa de dimensão da equipa, a soma do custo dos salários com o custo de oportunidade. Enquanto o cálculo do custo dos salários não oferece quaisquer dificuldades, o mesmo já não se aplica ao cálculo do custo de oportunidade. Com efeito, este depende do número de horas perdidas em cada dia e este depende, por sua vez, do número de técnicos disponíveis para assistência.

Um problema desta natureza pode ser formulado como uma fila de espera, para o caso particular: multicanal, população finita. Com efeito, podemos considerar este caso como tratando-se de um sistema composto por  $M$  máquinas (população finita) que avariam aleatoriamente segundo uma lei exponencial negativa e  $N$  técnicos de manutenção (multicanal) que reparam as máquinas à medida que elas avariam e cujos tempos seguem também uma lei exponencial negativa. A teoria das filas de espera (descrita em qualquer bom livro de Investigação Operacional; ver a Bibliografia) fornece as fórmulas aplicáveis neste e noutros casos. Vejamos, então, como calcular o tempo perdido pelas máquinas em filas de espera e sendo assistidas.

As fórmulas aplicáveis são muito complexas e são descritas no Anexo VI. Estas fórmulas consideram implícitas algumas regras:

1. A disciplina da fila é *FIRST-IN-FIRST-OUT*, isto é, a máquina que estiver há mais tempo avariada aguardando assistência é aquela que será assistida logo que o primeiro técnico fique liberto;
2. Cada avaria ocorre de forma totalmente aleatória e independentemente entre si;
3. O tempo entre avarias e o tempo de reparação apresentam médias constantes ao longo de todo o período de estudo;
4. Duas ou mais avarias nunca ocorrem simultaneamente.

O leitor tem à sua disposição uma aplicação do EXCEL com o nome ESCAVA.XLS no *software*, que o “poupará” à dificuldade da manipulação das fórmulas.

**Teste de *Kolmogorov-Smirnov***

**Leis das distribuições TBF e TTR**

**Forma de abordagem**

**Filas de espera: Caso multicanal, população finita**

**Anexo VI**

**Regras da fila de espera**

### Exercício em computador III.6

No EXCEL carregar o ficheiro ESCAVA.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.

Na zona de dados introduza todos os valores conhecidos:

Número de máquinas ( $M$ ) (máx. 9):	8
Número de técnicos/turno ( $k$ ):	?
MTTR (horas/reparação):	2
MTBF (horas entre avarias):	50
Regime de trabalho (turnos/dia):	2
Regime de trabalho (horas/turno):	8
Salário (u.m./hora.técnico):	1
Custo oportunidade (u.m./hora.máq.):	100



**Quadro III.16 - Dados a introduzir no ESCAVA.XLS**

Seguidamente, iniciamos um processo iterativo. Começamos por introduzir na 2ª linha do Quadro anterior o valor  $k = 1$ , isto é, vamos conhecer quantas horas (em média) as máquinas se encontram paradas por dia (aguardando assistência e sendo assistidas) quando existe apenas um técnico de manutenção/turno. Dos cálculos resulta o seguinte:

$k = 1$	Tempo perdido (horas/dia)	Custo salários (u.m./dia)	Custo oportunidade (u.m./dia)	Custo total (u.m./dia)
Aguardando assistência:	1,66	16	166	182
Recebendo assistência:	4,86	16	486	486
Total:	6,52	16	652	668

**Quadro III.17 - Equipa formada por 1 técnico/turno**

Notemos que as máquinas passam 1,66 horas a aguardar assistência e 4,86 horas a ser assistidas, o que perfaz 6,52 horas/dia de tempo perdido. O custo dos salários é 1 técnico/turno x 2 turnos/dia x 8 horas/turno x 1 u.m./hora = 16 u.m./dia e o custo de oportunidade é 2 turnos/dia x 8 horas/turno x 0,4073 máquinas paradas x 100 u.m./hora.máquina parada = 652 u.m./dia. O custo total será então 16 + 652 = 668 u.m./dia. Reforcemos agora a equipa com mais um técnico/turno. Tere-mos assim  $k = 2$ , obtendo:

$k = 2$	Tempo perdido (horas/dia)	Custo salários (u.m./dia)	Custo oportunid. (u.m./dia)	Custo total (u.m./dia)
Aguardando assistência:	0,08	32	8	40
Recebendo assistência:	4,92	32	492	492
Total:	5,00	32	500	532

**Quadro III.18 - Equipa formada por 2 técnicos/turno**

O tempo perdido total diminuiu (como era de esperar), passando para 5,00 horas/dia e o custo de oportunidade diminuiu correspondentemente, passando para 500 u.m./dia. O custo total diminuiu também, passando para 532 u.m./dia. Reforcemos a equipa mais uma vez. Fazendo  $k = 3$  técnicos/turno, obtemos:

$k = 3$	Tempo perdido (horas/dia)	Custo salários (u.m./dia)	Custo oportunidade (u.m./dia)	Custo total (u.m./dia)
Aguardando assistência:	0,00	48	0	48
Recebendo assistência:	4,92	48	493	493
Total:	4,93	48	493	541

**Quadro III.19 - Equipa formada por 3 técnicos/turno**

Notemos que, com três técnicos, as máquinas deixam de aguardar em fila de espera e que o custo total começa a subir, passando de 532 para 541 u.m./dia. Confirmemos esta tendência, simulando a existência de mais um técnico/turno. Fazendo  $k = 4$ , obtemos:

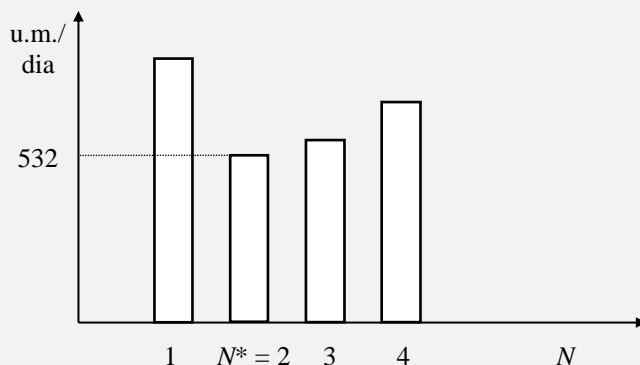
$k = 4$	Tempo perdido (horas/dia)	Custo salários (u.m./dia)	Custo oportunidade (u.m./dia)	Custo total (u.m./dia)
Aguardando assistência:	0,00	64	0	64
Recebendo assistência:	4,92	64	492	492
Total:	4,92	64	492	556

**Quadro III.20 - Equipa formada por 4 técnicos/turno**

Notemos que o tempo perdido mantém-se; o mesmo acontecendo com o custo de oportunidade e que o custo total continua a crescer. Esta conclusão é óbvia, pois já não se verificam quaisquer economias; pelo contrário, o custo dos salários continua a crescer.



Podemos então concluir que o número óptimo económico de técnicos de manutenção para assistir este conjunto de 8 máquinas, é 2, pois corresponde-lhe o menor custo diário total. Podemos ver o resumo dos custos das quatro alternativas analisadas no gráfico da Figura seguinte.



**Figura III.14 - Custos diários totais em função do número de técnicos**

O leitor poderá agora investigar qual a dimensão óptima económica da equipa de manutenção nas seguintes situações:

**Questões**

1. O regime de trabalho passa para 3 turnos/dia;

2. O mesmo do ponto 1., mas considerando o número de escavadoras como sendo de 9 unidades e o custo de oportunidade de 300 u.m./hora.máquina;
3. O mesmo de 2., mas considerando o MTBF como sendo de 25 horas.

---

1. 2 técn./798 u.m./dia; 2. 3 técn./2.567 u.m./dia; 3. 4 técn. 4.898 u.m./dia

## Conclusões do caso “ESCAVADORA”

Deste caso, podemos tirar as seguintes ilações práticas:

1. É possível calcular o número ideal de técnicos de uma equipa de manutenção. A este número corresponderá o melhor compromisso económico entre o custo dos seus salários e o custo da produção perdida (devida ao tempo de imobilização do parque de máquinas);
2. A solução analítica deste caso é bastante complexa e trabalhosa se utilizarmos métodos manuais de cálculo. Pode, contudo, valer a pena proceder ao cálculo automático construindo um modelo em folha de cálculo (como o EXCEL). Em qualquer ocasião futura (sempre que as variáveis se alterem significativamente) voltamos à aplicação e alteramos os dados, obtendo novos resultados. O ficheiro ESCAVA.XLS constitui um bom exemplo que o leitor pode eventualmente expandir para comportar casos com  $M > 9$ ;
3. Outra vantagem em dispormos de uma aplicação em *software* reside na possibilidade de podermos fácil e rapidamente testar diferentes hipóteses. A este exercício os anglo-saxónicos chamam “*What-if...?*”, o qual podemos traduzir por “O que é que acontece se...?”;
4. Este caso foi possível solucionar analiticamente, porque os tempos históricos recolhidos seguiam (de facto) distribuições de frequência teóricas conhecidas; as fórmulas aplicáveis podem ser encontradas na literatura de Investigação Operacional. Se tal não fosse verdade, o problema só seria resolúvel construindo um modelo de simulação e recorrendo ao método de *Monte-Carlo*. Neste modelo, simularíamos aleatoriamente os momentos de cada avaria e investigaríamos se existia (ou não) um técnico imediatamente disponível. Existindo, simularíamos aleatoriamente uma duração da reparação. Não existindo, a escavadora teria de esperar até que o primeiro técnico ficasse disponível. Após várias dezenas (ou centenas) de avarias simuladas (desprezando as primeiras para reduzir a influência das condições de inicialização do modelo) poderíamos contar as horas perdidas em fila de espera e em assistência. Os custos seriam logicamente decorrentes. Este “histórico” simulado seria então repetido (“corrido” em linguagem de simulação) milhares de vezes. Os resultados de cada “corrida” seriam tratados em frequência e, em lugar de uma única resposta, obteríamos uma distribuição de probabilidades do número óptimo económico de técnicos; à semelhança do que fizemos na variante 2 do caso RESISTÊNCIA para a periodicidade de substituição em grupo;
5. Os métodos empíricos fundamentados na intuição e experiência do decisor são falíveis. Em contrapartida, a força da convicção nos resultados a que chegámos releva do facto de se fundamentarem em métodos científicos. Todavia, conforme o leitor bem se apercebeu, estes métodos requerem a existência de informação histórica verdadeira e exaustiva (própria ou de construtores) guardada em bases de dados multidimensionais e disciplina da organização.