Determinação do número óptimo de equipamentos de reserva e período óptimo de revisão para um conjunto de equipamentos

Isabel da Silva Lopes * Armando Luís Ferreira Leitão †

* Universidade do Minho – Escola de Engenharia
Departamento de Produção e Sistemas
ilopes@dps.uminho.pt

† Universidade do Porto – Faculdade de Engenharia
Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial
afleitao@fe.up.pt

Abstract

Any equipment during operation can fail or degrade with time. Therefore, it's necessary to act on them to make repair when failure eventually occurs or, to avoid failure occurrence and their consequences.

The objective of preventive maintenance is to reduce the probability of failure in time period after maintenance has been applied. Concerning corrective maintenance, the objective is to reduce the severity of occurrence of breakdowns and to restore systems to normal operating conditions in short time interval.

This paper, entitled "Optimal number of spare and optimal interval between overhauls for equipment group", seeks a model that allows determining a maintenance policy, which combines preventive and corrective maintenance in order to minimise maintenance costs. The proposed maintenance policy will allow to avoid or reduce the consequences of equipment breakdowns on production, trough spare availability; and additionally, to decrease failure occurrence through regular equipment maintenance.

In many cases, optimisation models are not applied due to lack of data. To enable the application of the proposed model, a computational application has been developed to calculate model unknown variables, and moreover it will allow to record data which will be used for further analysis and, to estimate equipment lifetime failure distribution.

Resumo

Qualquer equipamento em funcionamento pode avariar ou se degradar com o tempo. É portanto necessário actuar sobre eles para proceder à reparação quando a avaria ocorre ou para evitar a sua ocorrência e os prejuízos que daí decorrem.

Apdio © 2003 *Associação Portuguesa de Investigação Operacional*

O objectivo da manutenção preventiva é de reduzir a probabilidade de falha no período de tempo após a realização da manutenção. Quanto à manutenção correctiva, o seu objectivo é de reduzir a severidade da ocorrência das avarias e repor os sistemas nas suas condições normais de funcionamento no menor intervalo de tempo possível.

O Artigo intitulado "Determinação do Número Óptimo de Equipamentos de Reserva e do Período óptimo de Revisão para um Conjunto de Equipamentos", visa encontrar um modelo que permita determinar uma política de manutenção que alie manutenção preventiva e correctiva, com o objectivo de minimizar os custos de manutenção. A política de manutenção proposta permitirá, por um lado, evitar ou diminuir as consequências das quebras de produção originadas por avarias, pela existência de equipamentos de reserva; e por outro lado, reduzir a ocorrência de avarias através da revisão periódica do equipamento.

Em muitos casos, os modelos de optimização não são aplicados devido à falta de dados. Para facilitar a aplicação do modelo proposto, procedeu-se ao desenvolvimento de uma aplicação informática que para além de encontrar a solução para as variáveis de decisão do modelo, permite registar os dados que serão úteis para análise e determinação da lei de probabilidade de falha dos equipamentos.

Keywords: Reliability, Preventive maintenance, Overhaul, Replacement

Title: Optimal number of spare and optimal interval between overhauls for equipment group

---

1 Introdução

A ocorrência de avarias provoca a paragem dos equipamentos para um período pelo menos igual ao tempo necessário para proceder à reparação e compromete a execução das tarefas em curso ou a realizar pelo equipamento avariado, acarretando custos elevados. Quando uma operação é executada por um conjunto de equipamentos idênticos, isto é, um conjunto de equipamentos que executam a mesma função, o recurso a máquinas de reserva é geralmente justificável economicamente. A finalidade destas máquinas é a de substituir equipamentos avariados, permitindo prosseguir com as tarefas deixadas em curso.

No entanto, possuir máquinas de reserva origina, na maior parte das vezes, custos elevados tendo de ser ponderados o custo de posse destes equipamentos e a economia resultante da não diminuição da capacidade de produção do sistema constituído pelo conjunto activo de equipamentos.

Neste trabalho considera-se ainda a possibilidade de se proceder a revisões periódicas do equipamento de forma a diminuir a probabilidade de ocorrência de avarias, diminuído assim a necessidade de máquinas de reserva. O objectivo é de propor uma política de manutenção que minimize os custos de manutenção. Foi desenvolvido um modelo que permite determinar em simultâneo o número óptimo de equipamentos de reserva e o período óptimo de revisão.

A função objectivo deste modelo é a minimização dos custos e é aplicável apenas a sistemas no estado estacionário, estado em que as avarias seguem um Processo Homogéneo de Poisson (Harold Ascher e Harry Feingold (1984)).

Este documento está organizado da seguinte forma. Na secção 2 apresentam-se algumas definições e mostra-se a forma como a fiabilidade dos sistemas pode ser aumentada através

da substituição de componentes. Na secção 3 define-se o estado estacionário dos sistemas e apresentam-se dois testes de tendência que permitem averiguar se os sistemas se encontram ou não no estado estacionário. Na secção 4 apresentam-se os pressupostos do modelo, os custos que constituem a função objectivo, os parâmetros e expressão do modelo. Na secção 5 faz-se uma breve descrição de uma aplicação informática desenvolvida para encontrar os valores das variáveis de decisão do modelo. Na secção 6 apresenta-se um exemplo numérico. A secção 7 apresenta as conclusões e a secção 8 indica os trabalhos a desenvolver futuramente.

2 A fiabilidade de sistemas sujeitos a revisões periódicas

Designa-se por sistemas ou equipamentos reparáveis, os equipamentos cuja avaria não implica o fim da vida; é lhes devolvida a capacidade de funcionamento através de uma reparação que poderá envolver a substituição de um ou vários componentes. Por sua vez, designa-se por componentes, os equipamentos não reparáveis economicamente, sendo que a primeira e única avaria tem por consequência a perda definitiva do componente.

A fiabilidade de um componente pode ser caracterizada pela função de risco h(t). a função de risco é a probabilidade condicionada do equipamento avariar no intervalo (t, t+Δt] dado que ainda não avariou até ao instante t (Nancy R. Mann, Ray. E. Schafer e Nozer D. Singpurwalla (1974)).

Quanto à fiabilidade de um sistema, ela é geralmente caracterizada pela taxa de ocorrência de falhas. A taxa de ocorrência de falhas ou taxa de avarias de um sistema, denominada por v(t), é definida como sendo a derivada em ordem ao tempo do número esperado de falhas até ao instante t. Se N(t) for o número de avarias ocorridas até ao instante t, v(t) será dada pela seguinte expressão (Harold Ascher e Harry Feingold (1984)):

$$\mathrm{v(t)} = \frac{d\,E[N(t)]}{dt}$$

Pode-se considerar que um equipamento reparável é composto por vários componentes que são substituídos quando avariam. A falha de um componente provoca a falha do sistema. O número esperado de falhas do sistema é assim dependente da frequência das avarias dos componentes que o compõem, que depende, por sua vez, da função de risco de cada componente, tal como ilustra a figura 1.

A função de risco de um componente pode ser decrescente, componente 2, constante, componentes 3 e n, ou crescente, componente 1 e 4. A figura ilustra a ocorrência de avarias originadas pela falha de diferentes componentes pertencentes a um sistema. Quando um componente avaria ele é substituído por outro componente idêntico, com a mesma função de risco.

Se um componente com função de risco crescente for substituído antes de ocorrer a avaria, a taxa de avarias do sistema diminuí. Os componentes mecânicos são exemplos típicos de componentes com função de risco crescente sendo o aumento da função de risco provocado pelo desgaste do equipamento ocorrido ao longo do tempo.

A taxa de avarias dos sistemas não depende da forma da função de risco dos seus componentes mas sim do seu valor num determinado instante. Dessa forma, a substituição antes de

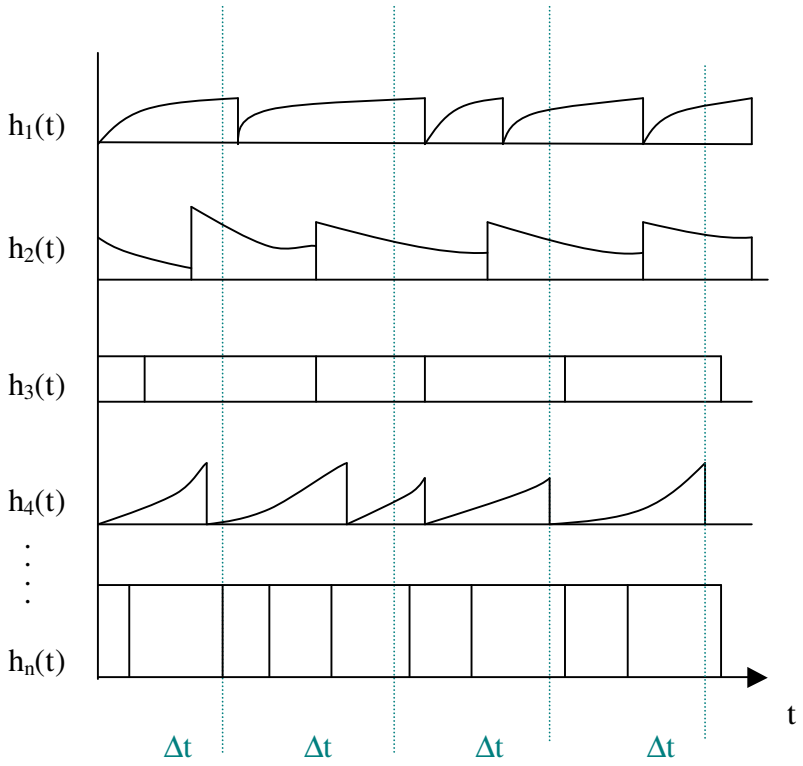


Figura 1: Função de risco e número esperado de falhas de um sistema.

ocorrer a avaria de componentes com função de risco constante, não altera a taxa de avarias dos sistemas uma vez que, o componente substituto tem uma função de risco com o mesmo valor do que a do componente substituído. Para os componentes com função de risco crescente, o novo componente apresenta um valor inferior para a função de risco (ver componente 4 da figura).

O objectivo das revisões periódicas é substituir componentes com função de risco crescente antes que ocorra a avaria, provocando assim uma diminuição na taxa de avarias e uma melhoria na fiabilidade dos sistemas.

3 O estado estacionário dos sistemas

3.1 Definição

Segundo Ascher e Feingold , um sistema está no estado estacionário se para qualquer dois pontos $t > s \geq 0$ e qualquer $\Delta > 0$, as variáveis aleatórias [N(t) - N(s)] e [N(t + Δ) - N(s + Δ)] são identicamente distribuídas.

No estado estacionário, a taxa de avarias dos sistemas é constante e o número de falhas do sistema é modelado por um Processo Homogéneo de Poisson. Segundo o teorema de Drenick (Harold Ascher e Harry Feingold (1984)), os sistemas encontram-se no estado estacionário após um longo período de funcionamento.

Os sistemas submetidos a revisões realizadas a intervalos constantes, mantêm uma taxa de avaria constante independentemente de apresentarem inicialmente tendência crescente na taxa de avarias; a realização de revisões periódicas elimina praticamente a possibilidade dos sistemas entrarem na fase de desgaste, fase em que a taxa de avarias aumenta rapidamente. Os sistemas submetidos a revisões periódicas mantêm-se assim no estado estacionário (M. Xie; H. Kong e T. N. Goh (2000)).

3.2 Testes de tendência

Para averiguar se um sistema apresenta ou não tendência na taxa de avarias, podem ser utilizados testes de tendência tal como o teste de Laplace (equação 1) e o teste MIL-HDBK-189 (equação 2) (Harold Ascher e Harry Feingold (1984)).

A hipótese nula de ambos os testes consiste em considerar a taxa de ocorrência de avarias constante, isto é, considerar o processo observado como um processo Homogéneo de Poisson. Se for rejeitada a hipótese nula com uma determinada margem de erro poderemos afirmar que a taxa não é constante, isto é, o processo observado não é um processo Homogéneo de Poisson, e que existe tendência nos dados observados.

$$\mathrm{U} = \frac{\frac{\sum_{i=1}^{m-1} T_i}{m-1} - \frac{Tm}{2}}{Tm.\sqrt{\frac{1}{12.(m-1)}}} \qquad (1)$$

Nas expressões (1) e (2), T1, T2, ..., Tm-1 são os tempos ordenados de falha (ou tempos cumulados de funcionamento até à avaria) do sistema no intervalo (o, Tm]. A estatística do teste de Laplace aproxima-se de uma distribuição Normal estandardizada; a aproximação é adequada para um nível de significância de 5% e para m $\geq$ 4.

$$\mathrm{U} = 2. \sum_{i=1}^{m-1} \ln\left(\frac{Tm}{Ti}\right) \qquad (2)$$

A estatística do teste MIL-HDBK-189 é distribuída segundo a distribuição do Qui-quadrado com 2(m-1) graus de liberdade.

4 O modelo

4.1 Pressupostos do modelo

O modelo assume alguns pressupostos descritos a seguir.

i) O conjunto de equipamentos em serviço e de reserva são equivalentes. Consideram-se equivalentes, equipamentos que, por um lado, executam a mesma tarefa com a mesma produtividade e qualidade, e por outro, têm a mesma oportunidade para avariar.

ii) A capacidade de manutenção é ilimitada. Quando o equipamento avaria, ele é reparado de imediato. Não se considera a eventual fila de espera que se pode gerar quando a equipa de manutenção não está disponível.

iii) Os materiais para reparação e revisão estão disponíveis quando requeridos.

iv) Procede-se à substituição de um equipamento activo por um equipamento de reserva numa das seguintes situações: o equipamento avariou ou o equipamento completou o período de revisão sem avaria e precisa ser revisto.

v) As revisões ao equipamento, se existirem, são executadas a intervalos constantes, depois de decorrido um determinado tempo de funcionamento sem avarias, e durante o período de operação do sistema.

vi) As reparações são executadas durante o período de operação do sistema.

vii) O tempo gasto na reparação de uma avaria é determinístico.

viii) O período de tempo para execução da revisão é igual ao período de tempo gasto na reparação de uma avaria.

ix) O tempo durante o qual o número de equipamentos em funcionamento se altera não é suficientemente elevado para que se verifique uma alteração na taxa de avarias.

x) As reparações repõem o sistema num estado equivalente ao imediatamente anterior à avaria.

4.2 Os custos de Manutenção

Os custos considerados decisivos para escolha da melhor política de manutenção foram agrupados em quatro categorias por uma questão de simplificação da expressão do modelo: custos de perda de produção, custos de reparação e de quebra de produção devido à avaria, custos de revisão e custo de posse relativo aos equipamentos de reserva.

Todos os outros tais como gastos gerais, custo de posse das máquinas em funcionamento e das ferramentas de trabalho não são considerados por serem independentes da política de manutenção.

– Custos de Perda de Produção devido à falta de equipamento

O custo de perda de produção considera-se relacionado com a falta de equipamento para substituição durante a reparação de um equipamento que se torne inoperacional devido a uma avaria.

A falta de uma máquina provoca perdas devido à não produção de produtos, à imobilização de material em curso de fabricação, à ocupação ineficiente da mão de obra, assim como outras perdas induzidas tal como, eventualmente, a perda do cliente devido ao não cumprimento do prazo de entrega.

– Custos de reparação e de quebra de produção devido à avaria

São considerados custos de quebra de produção devido à avaria, os custos originados pelo

decréscimo de produção e/ou a rejeição de produto por falta de qualidade, situações que geralmente ocorrem na iminência da avaria.

No momento da avaria, o material ou peça em processamento pode, em certos casos, não ser recuperável. Dependendo da fase de processamento e do valor acrescentado ao material ou peça, os custos podem ser elevados. Estes custos são também incluídos nesta categoria.

A paragem do equipamento quando ocorre a avaria obriga a que seja efectuado arranque da máquina de reserva, ou novo arranque da máquina avariada após a reparação. O custo de arranque é, em muitos casos, bastante elevado e é considerado como um custo de quebra devido à avaria.

Os custos incorridos para restabelecer a capacidade de funcionamento do sistema, são os chamados custos de reparação. Incluem-se nestes custos, os custos de aquisição e de posse de peças de reserva, os custos de aquisição e posse de materiais para reparação e o custo da mão-de-obra.

– **Custos de revisão**

Os custos de manutenção ou revisão da máquina são muito semelhantes aos custos de reparação, envolvendo o custo de materiais, de peças e de mão-de-obra.

Considera-se que as revisões aos sistemas são realizadas durante o tempo de operação e obrigam à paragem do sistema ao qual se pretende efectuar a revisão. O sistema é substituído por outro que é imediatamente posto a funcionar. O custo de arranque do novo sistema é incluído no custo de revisão.

– **Custos de Posse**

O custo de posse é o custo de manter os sistemas de reserva num determinado espaço e de eventualmente, proceder a operações de conservação.

Inclui-se também neste grupo, o chamado custo de oportunidade originado pela imobilização do capital e a amortização da máquina.

4.3 Parâmetros e notações

n - número de equipamentos de reserva

L - periodicidade de revisão ou tempo entre revisões sucessivas de um equipamento

$\mathbf{n}_f$- número de equipamentos em funcionamento activo

λ - taxa de avarias dos equipamentos activos (nf).

λ_2 - taxa de revisão do sistema constituído por nf equipamentos

λ_1 - taxa de avarias dos equipamentos activos quando são realizadas revisões periódicas ao equipamento

T - tempo de reparação/ revisão

$\mathbf{y}_1$- número de equipamentos avariados no período de reparação/revisão

$\mathbf{y_2}$- número de equipamentos em revisão no período de reparação/revisão

H - custo de posse por equipamento de reserva e por unidade de tempo

R - Custo de reparação e de quebra de produção por avaria

Rv - Custo de revisão por equipamento

Cp(x) - Custo de perda de produção devido aos equipamentos em falta (x), por unidade de tempo. Este custo é definido como uma função em x

x - número de equipamentos em falta no período de reparação/revisão

P($\mathbf{y_1}$, λ .T) - probabilidade de existir y_1 equipamentos avariados no período T

P($\mathbf{y_1}$, λ_1 .T) - probabilidade de existir y_1 equipamentos avariados no período T, quando são realizadas revisões periódicas

P($\mathbf{y_2}$, λ_2 .T) - probabilidade de existir y_2 equipamentos em revisão no período T

4.4 Expressão do modelo

A função objectivo do modelo é a minimização do custo total cuja expressão foi encontrada para um período equivalente ao período de reparação/revisão. O custo total é função do número de equipamentos de reserva e da taxa de revisão do sistema.

$$\text{Min C(n,}\lambda_2) = \sum_{y_1}\sum_{y_2}[\,Cp(x).T.P\,(y_1,\lambda_1.T)\,.P\,(y_2,\lambda_2.T)\,] + \text{H.T.n} + \sum_{y_1}[R.y_1.P\,(y_1,\lambda_1.T)\,] + \sum_{y_2}[\,R_v.y_2.P\,(y_2,\lambda_2.T)\,]$$

Sujeito a

$$\lambda_1 + \lambda_2 = \lambda \qquad 1)$$

$$y_2 \leq n \qquad 2)$$

$$x = 0, \qquad \text{se } y_1 + y_2 \leq n \qquad 3)$$

$$\vee$$

$$x = (\,y_1 + y_2) - n, \qquad \text{se } y_1 + y_2 > n \qquad 4)$$

A periodicidade de revisão de um equipamento pertencente ao sistema em análise será dada pela seguinte expressão:

$$L = -\frac{\ln\left(1-\frac{\lambda_1}{\lambda}\right)}{\lambda_1}.nf$$

A primeira parcela da função objectivo diz respeito ao custo de perda de produção. Cp(x) é o custo de perda de produção por unidade de tempo para **x** equipamentos em falta. O número de equipamentos em falta depende do número de equipamentos em reparação (y_1) e do número de equipamentos em revisão (y_2) no período T, consoante apresentado nas restrições 3) e 4).

O modelo considera que o número de equipamentos avariados (ou número de avarias) segue um processo homogéneo de Poisson com parâmetro dado por λ_1.T; considera ainda que o número de equipamentos em revisão é também uma variável poissoniana cujo parâmetro da distribuição é dado por λ_2.T.

A segunda parcela da função objectivo consiste no custo de posse, a terceira no custo de reparação e a quarta e última, no custo de revisão. H, R e Rv são respectivamente o custo de posse por equipamento de reserva, o custo de reparação e o custo de revisão por equipamento, por unidade de tempo.

O modelo não permite que sejam realizadas mais do que **n** revisões em simultâneo (ver restrição 2) do modelo), sendo **n** o número de equipamentos de reserva.

5 Aplicação informática

Desenvolveu-se uma aplicação informática que permite registar as datas de avarias de conjuntos de equipamentos idênticos e, a partir dessas datas, pode verificar se a distribuição de falhas de qualquer dos conjuntos segue um Processo de Poisson Homogéneo, condição verificada através dos testes de tendência já referidos: teste de Laplace e teste MIL-HDBK-189. Se a condição se verificar poderá ser aplicado o modelo desenvolvido, e a taxa de avarias do conjunto será estimada com base no registo das datas de avarias. É necessário o registo de pelo menos quatro datas de avarias, caso contrário o segundo teste não poderá ser levado a cabo (ver capítulo 3.2). Logicamente quanto maior for o número de avarias registadas melhor será a aproximação dos estatísticos de teste à respectiva distribuição. O período necessário de observação irá depender, por um lado, da fiabilidade de cada equipamento e, por outro, do número de equipamentos em observação.

A aplicação procura a solução óptima para cada caso depois de serem introduzidos, pelo utilizador, os custos de manutenção. A figura 2 mostra duas das janelas de interface da aplicação: a primeira consiste no formulário para entrada e consulta de dados sobre períodos de funcionamento e datas de avarias dos equipamentos, a segunda consiste no formulário que permite a aplicação do modelo e apresentação dos resultados.

O modelo desenvolvido trata de um conjunto de equipamentos que executam a mesma tarefa com o mesmo desempenho. Este conjunto de equipamentos foi designado de grupo. A primeira janela apresentada permite fazer o registo de cada máquina pertencente a um determinado grupo através da sua referência e designação, indicar as datas de início e fim dos períodos de funcionamento e, registar as datas e descrição das avarias assim como a duração da reparação do equipamento. O registo dos períodos de funcionamentos, datas de avarias e duração da reparação vão permitir levar a cabo os testes estatísticos sendo necessário, para a sua realização, contabilizar o tempo efectivo de funcionamento entre duas datas. A aplicação procede ao cálculo do tempo efectivo em dias, tendo em consideração os dias feriados, sábados e domingos.

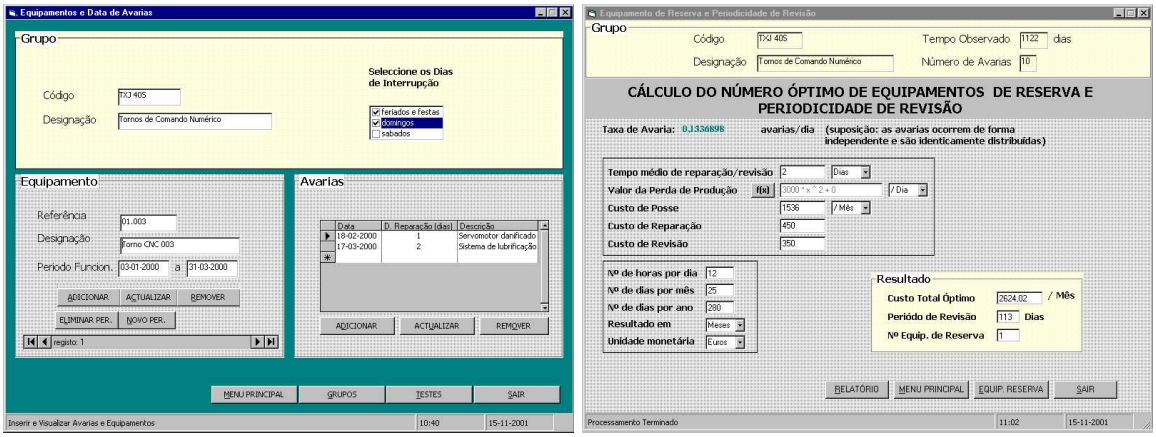


Figura 2: Janelas de interface para entrada e consulta de dados sobre avarias a) e para aplicação do modelo e apresentação de resultados b).

O cálculo do número de equipamentos de reserva e periodicidade de revisão requer, em primeiro lugar, a introdução do período médio de reparação designado por T. Requer ainda o custo de reparação e o custo de revisão, o custo de perda de produção e o custo de posse por unidade de tempo (ver segunda janela apresentada).

O utilizador tem a possibilidade de escolher a unidade de tempo para cada um dos custos introduzidos: dia, mês ou ano. Tem ainda a possibilidade de escolher a unidade de tempo em que lhe será apresentada a solução.

Para que as conversões se façam devidamente e de acordo com os períodos de trabalho da organização onde se insere o sistema, é pedido ao utilizador que introduza: o número de horas de trabalho por dia e, o número de dias de trabalho por mês e por ano.

A aplicação devolve o período óptimo de revisão, o número óptimo de equipamentos de reserva e o custo total da solução proposta.

6 Exemplo numérico

Considera-se um conjunto de 15 tornos de comando numérico idênticos em funcionamento, cujo código é TXJ 40S. Dispõe-se do registo das datas de avaria dos tornos para o primeiro trimestre de 2000, assim como a respectiva duração da reparação e modos de avaria. A figura 3 apresenta um relatório das avarias do grupo em questão, devolvido pela aplicação informática.

Ambos os testes estatísticos não revelaram a existência de uma tendência na ocorrência de avarias para o grupo TXJ 40S.

Teste de Laplace:

Estatístico do teste $\Rightarrow$ ET = -0,477

Valor de Z da distribuição Normal $\Rightarrow$ $Z_{0.025}$ = -1,96

Sendo |ET| < |Z| , a hipótese nula não é rejeitada.

LISTA DE AVARIAS DA MÁQUINA: TXJ 40S

REF. MÁQUINA	DATA	TEMPO DE REPARAÇÃO (dias)	DESCRIÇÃO DA AVARIA
01.013	04-01-2000	1	Avaria do motoredutor
01.102	10-01-2000	3	Sistema de lubrificação inoperacional
01.010	17-01-2000	2,5	Problema no Comando Numérico
01.114	28-01-2000	1,5	Servomotor danificado
01.088	07-02-2000	2	Problema no Comando Numérico
01.003	18-02-2000	1	Servomotor danificado
01.009	23-02-2000	2	Problema no Comando Numérico
01.013	14-03-2000	1,5	Servomotor danificado
01.003	17-03-2000	2	Sistema de lubrificação inoperacional
01.010	21-03-2000	2	Sistema de lubrificação inoperacional

Figura 3: Avarias do grupo TXJ 40S.

Teste MIL-HDBK-189:

Estatístico do teste $\Rightarrow$ ET = 25,163

Valor do Qui-quadrado com 20 graus de liberdade $\Rightarrow$ $\chi^2_{\ 20,0.025}$= 34,17

Sendo $|\mathrm{ET}| < |\chi^2|$, a hipótese nula não é rejeitada.

A não rejeição de ambas as hipótese permite considerar que o sistema está no estado estacionário. Isto possibilita a obtenção de resultados para o número óptimo de equipamentos de reserva e periodicidade de revisão através dos modelos.

A figura 4 apresenta um relatório dos resultados obtidos para o grupo TXJ 40S, nomeadamente: a taxa de avarias do grupo e os valores obtidos para as variáveis de decisão do modelo (ver campo denominado por "número de equipamentos de reserva (com revisão)").

O tempo total observado para o grupo TXJ 40S foi de 1 122 dias (ver topo do formulário do relatório). Sendo 10, o número de avarias verificadas nesse intervalo de tempo, a taxa de avaria foi estimada da seguinte forma:

$\hat{\lambda} = \frac{10}{1122}.15 = 0,1337$ avarias/dia

Segundo o modelo proposto, será necessário uma máquina de reserva, e proceder a revisões sempre que um torno funcionar 113 dias sem avariar. O custo total associado a esta política de manutenção é de 2.624,02 euros / mês.

No campo denominado por "número de equipamentos de reserva (sem revisão)" da figura 4 encontram ainda os valores para o número óptimo de equipamentos de reserva e custo total para uma situação que não prevê a realização de revisões periódicas. Os resultados revelam a necessidade de se adquirir 2 máquinas de reserva para alcançar o custo mínimo de 4 814 euros /mês, valor muito superior ao encontrado com o modelo proposto.

RELATÓRIO quarta-feira, 7 de Novembro de 2001

CÓDIGO DO GRUPO: **TXJ 40S**

DESIGNAÇÃO DO GRUPO: **Tornos de Comando Numérico**

Tempo Observado: 1122 dias

Número de Avarias: 10

Nº de equip. em funcionamento: 15

Taxa de Avaria: 0,1336898 avarias/dias

NÚMERO DE EQUIPAMENTOS DE RESERVA (SEM REVISÃO)

Tempo Médio de Reparação: 2 Dias

Custos	***Resultados encontrados***
Custo de Posse por Equipamento: 1.536,00 Euros / Mês	Número Óptimo de Equipamentos: 2
Custo de Reparação: 450,00 Euros	Custo Total: 4.814,14 Euros / Mês
Custo de Perda de Produção*: 3000 * x ^ 2 + 0 Euros / Dia	

NÚMERO DE EQUIPAMENTOS DE RESERVA (COM REVISÃO)

Tempo Médio de Reparação/Revisão: 2 Dias

Número Máximo de Equipamentos de Reserva: 4

Custos	***Resultados encontrados***
Custo de Posse por Equipamento: 1.536,00 Euros / Mês	Número Óptimo de Equipamento: 1
Custo de Reparação: 450,00 Euros	Período Óptimo de Revisões: 113 dias
Custo de Revisão: 350,00 Euros	Custo Total: 2.624,02 Euros / Mês
Custo de Perda de Produção*: 3000 * x ^ 2 + 0 Euros / Dia	

* x representa o número de equipamentos em falta

Figura 4: Ficha de resultados do grupo TXJ 40S.

7 Conclusão

O modelo proposto permite encontrar uma política de manutenção que, por um lado, minimiza os efeitos da ocorrência de avarias através da existência dos equipamentos de reserva e, por outro lado, reduz a probabilidade de ocorrência das avarias através da revisão periódica do equipamento.

O modelo desenvolvido é apenas aplicável a sistemas no estado estacionário; sistemas com tendência crescente ou decrescente na ocorrência de avarias não são contemplados. No entanto, se um sistema apresentar uma tendência crescente no número de avarias, os modelos para cálculo de equipamentos de reserva têm pouco interesse uma vez que, nesses casos a acção a tomar é a de actuar sobre as causas do aumento da taxa e não sobre as consequências. Nas situações em que a taxa de falhas diminui com o tempo, seria importante determinar o efeito que essa diminuição provoca no número óptimo de equipamentos de reserva.

Alguns pressupostos do modelo poderiam ser ultrapassados, nomeadamente:

- Capacidade ilimitada da equipa de manutenção.

  Se puder ser assegurado um tempo médio de reparação inferior ao tempo médio entre avarias, não se irá formar fila de espera e o resultado encontrado com o modelo será perfeitamente aceitável. O tempo médio de reparação pode ser reduzido de forma a ser inferior ao tempo médio entre avarias, através do aumento da capacidade da equipa de manutenção.

- Revisões realizadas durante o tempo de serviço do equipamento.

  Se existir a possibilidade de realizar as revisões durante o tempo de paragem do equipamento, as máquinas de reserva só serão utilizadas quando se verificar a falha do equipamento. Não haverá perda devido à paragem, nem perda devido ao arranque do equipamento depois das revisões.

  Esta situação implica uma pequena modificação no modelo proposto. O número de equipamentos em falta passa a ser apenas função do número de equipamentos avariados, o que leva às seguintes alterações no modelo:

  - as restrições 3) e 4) alteram-se para:

  $x = 0, \quad$ se $y_1 \leq n$

  $\vee$

  $x = y_1 - n, \quad$ se $y_1 > n$

  - o custo de perda de produção altera-se para:

$$\sum_{y_1} [Cp(x).T.P\,(y_1, \lambda_1.T\,)\,]$$

8 Trabalhos futuros

Como foi salientado, a aplicação do modelo proposto é limitada a certos sistemas em determinadas condições de funcionamento, seria útil o cálculo do número de equipamentos de reserva e periodicidade de revisão, nas seguintes situações:

- para sistemas com tendência na taxa de avaria;
- considerando limitação na capacidade da equipa de manutenção;
- considerando o tempo médio de reparação de um equipamento diferente do tempo médio de revisão.

O(s) modelo(s) que permitiria(m) calcular tais incógnitas antevê-se que seja(m) dum grau de complexidade muito superior ao do modelo aqui apresentado. Prevê-se que este trabalho venha a ser desenvolvido futuramente.

9 Referências bibliográficas

[1] Harold Ascher; Harry Feingold - Reparable Systems Reliability: modeling, Inference, Misconceptions and their causes - Vol. 7, ed. Dekker, 1984.

[2] M. Xie; H. Kong; T. N. Goh - Exponencial approximation for maintained Weibull distributed component - Journal of Quality in Maintenance Engineering, Vol. 6 Issue 4, 2000.

[3] Nancy R. Mann; Ray. E. Schafer; Nozer D. Singpurwalla - Methods for Statistical Analysis of Reliability and Life Data (cap 4) - ed. Wiley , 1974