

Periodicidade óptima de inspecções na procura de falhas ocultas

Rui Assis

Faculdade de Engenharia da Universidade Católica Portuguesa
Rio de Mouro, Portugal
rassis@rassis.com
www.rassis.com

Resumo

Propõe-se um método baseado em técnicas de simulação para a determinação da periodicidade económica de inspecção de órgãos de protecção sujeitos a falhas ocultas (*failure hunting*) – válvulas de segurança e sensores, por exemplo.

Nestes casos, as entidades a ter em conta são 1) o componente cuja função crítica se pretende proteger e 2) o dispositivo de protecção que poderá também falhar. A estratégia a adoptar consistirá na inspecção periódica do bom funcionamento do dispositivo de protecção. Duas circunstâncias poderão ocorrer quando a função protegida falha:

- O dispositivo de protecção encontra-se operacional e actua, avisando e/ou iniciando uma retroacção. A função é recuperada com consequências menores traduzidas por um tempo de recuperação curto T_{fs} e por um custo reduzido C_{fs} – ambos muitas vezes desprezáveis;
- O dispositivo de protecção encontra-se falhado (falhou após a última inspecção). A função protegida falha também. Uma vez ocorrendo o estado “função protegida falhada + dispositivo de protecção falhado”, as consequências são plenas, traduzindo-se por um tempo de recuperação longo T_{fs} e por um custo elevado C_{fs} .

A probabilidade de detecção de uma falha do dispositivo de protecção será tanto maior quanto maior for a frequência de inspecções (ou menor o intervalo de tempo entre elas T) e, logo, tanto menor será o custo esperado das consequências de uma falha não detectada a tempo num horizonte temporal longo, mas, em contrapartida, tanto maior será o custo das inspecções realizadas nesse mesmo horizonte. É de supor, então, que existirá um intervalo de tempo óptimo T^* entre inspecções, ao qual corresponderá um custo total mínimo (€/hora). É este valor de T^* que se pretende determinar.

Propõe-se um modelo de simulação numérica de eventos discretos implementado no MS-Excel como forma resolutive. Arbitram-se os dados e simulam-se aleatoriamente, pelo método de *Monte-Carlo*, os momentos de falha da função protegida e os momentos de falha do dispositivo de protecção. A sua interacção permite determinar os momentos em que se verifica a falha da função protegida quando o dispositivo de protecção i) se encontra bom e actua; ii) se encontra falhado ou iii) se encontra em curso de reparação. A contagem dos eventos de falha da função protegida, de falha do dispositivo de protecção e da sua coincidência temporal (falha múltipla), permitem construir as estatísticas descritoras do desempenho previsionial do sistema assim constituído (custo de manutenção + disponibilidade da protecção + tempo médio entre falhas do sistema). A análise dos custos é realizada a preços constantes e com base em custos uniformizados.

Em resumo, enfatiza-se a vantagem de utilização do método de simulação do funcionamento de sistemas complexos para encontrar soluções facilmente dedutíveis de problemas no seu funcionamento, em alternativa aos métodos analíticos. Estes, quando existem, encerram muitas vezes pressupostos simplificadores irrealistas.

Palavras-chave

Failure hunting, Falha oculta, Falha múltipla, Fiabilidade, Função protegida, Periodicidade de inspecção

1. Introdução

Em manutenção preventiva sistemática um órgão crítico é substituído (recuperado, beneficiado ou afinado) com regularidade após ter acumulado um certo tempo de funcionamento ou periodicamente em conjunto com outros componentes críticos (substituição em grupo). Esta política de manutenção preventiva tem vindo progressivamente a ser substituída pela política de manutenção preditiva (ou preventiva condicionada), a qual se vem revelando mais eficaz e económica. No caso particular de equipamentos de processo, nos quais uma paragem para manutenção tem grandes implicações, esta política é preferida.

A política preditiva consiste basicamente em inspecionar o estado de condição de cada órgão crítico e decidir após cada inspeção sobre se prosseguir até à próxima inspeção ou parar imediatamente, tendo em conta o resultado obtido. Este resultado, muitas vezes, não é inteiramente fiável, podendo colocar-se a questão de se estar perante falsos positivos ou falsos negativos. Esta questão tem que ver com a adequabilidade/qualidade do método de inspeção empregue, mas também com a confiança depositada no inspector.

Em muitos casos, a falha não se declara imediatamente; antes, dá sinais de si (falha potencial), evolui durante algum tempo e manifesta-se finalmente com todas as consequências negativas (falha funcional). As falhas funcionais, por sua vez, podem ser de natureza evidente, isto é, quando se declaram, os seus efeitos são imediatamente noticiados (*evident failures*). As falhas podem também ser de natureza oculta (*hidden failures*), isto é, quando se declaram, os seus efeitos não são imediatamente noticiados; apenas mais tarde, quando ocorrer uma falha da função protegida e a função protectora (falhada) for solicitada, verificando-se uma falha múltipla (*multiple failure*), Moubrey (1999).

Realizar inspeções pode representar um custo elevado, sobretudo quando se torna necessário parar o equipamento, pelo que o seu número ao longo do ciclo de vida útil do órgão crítico em questão, deve ser fixado com base em princípios de racionalidade económica. Com efeito, a paragem voluntária do equipamento que integra o órgão crítico pode ser decidida em qualquer momento, mas isso implica um custo que interessa “diluir” por um período longo. Porém, ao fazê-lo, a probabilidade de ocorrência de uma falha em curso não detectada aumenta e, logo, o custo esperado das suas consequências, pelo que é razoável supor que seja possível encontrar um compromisso entre todos os custos pertinentes a que corresponda um custo global mínimo.

2. Desenvolvimento de um modelo de calendário de inspeções de falhas ocultas

No caso deste tipo de falhas, as entidades a ter em conta são 1) o componente cuja função crítica se pretende proteger e 2) o dispositivo de protecção que poderá também falhar. A estratégia a adoptar consistirá na inspeção periódica do bom funcionamento do dispositivo de protecção. Duas circunstâncias poderão ocorrer quando a função protegida falha:

- O dispositivo de protecção encontra-se operacional e actua, avisando e/ou iniciando uma retroacção. A função é recuperada com consequências menores traduzidas por um tempo de recuperação curto T_{fs} e por um custo reduzido C_{fs} – ambos muitas vezes desprezáveis;
- O dispositivo de protecção encontra-se falhado (falhou após a última inspeção). A função protegida falha também. Uma vez ocorrendo o estado “função protegida falhada + dispositivo de protecção falhado”, as consequências são graves, traduzindo-se por um tempo de recuperação longo T_{fs} e por um custo elevado C_{fs} .

A probabilidade de detecção de uma falha do dispositivo de protecção será tanto maior quanto maior for a frequência de inspeções (ou menor o intervalo de tempo entre elas T) e, logo, tanto menor será o custo esperado das consequências de uma falha não detectada a tempo num horizonte temporal longo, mas, em contrapartida, tanto maior será o custo das inspeções realizadas nesse mesmo horizonte. É de supor, então, que existirá um intervalo de tempo óptimo T^* entre inspeções a que corresponderá um custo total mínimo. É este valor de T^* que se pretende determinar.

Como método resolutivo, propõe-se um modelo de simulação numérica de eventos discretos Law (2000) e Raiffa (1961). Para tal, construiu-se um modelo no MS-Excel. Arbitraram-se os dados e simularam-se aleatoriamente, pelo método de *Monte-Carlo*, os momentos de falha da função protegida e os momentos de falha do dispositivo de protecção. A sua interacção permitiu determinar os momentos em que se verifica a falha da função protegida quando o dispositivo de protecção i) se encontra bom e actua; ii) se encontra falhado ou ii) se encontra em curso de reparação. A contagem dos eventos de falha da função protegida, de falha do dispositivo de protecção e da sua coincidência temporal (falha múltipla), permitem construir as estatísticas descritoras do desempenho do sistema assim constituído (custo de manutenção + disponibilidade da protecção + tempo médio entre falhas do sistema).

O modelo pode ser construído de dois modos equivalentes:

- Considerando um horizonte temporal fixo, no qual a contagem de todos os eventos pertinentes se faz dentro do período correspondente à vida útil estimada do sistema (a exemplo do caso das falhas evidentes tratado nos pontos anteriores);
- Considerando um horizonte temporal variável, no qual a contagem de todos os eventos pertinentes se faz dentro do intervalo de tempo decorrido até à primeira falha do sistema (falha múltipla).

Selecionou-se o segundo modo, pois o modelo torna-se menos complexo, proporcionando contudo um mesmo nível de precisão. Em consequência, os custos gerados tiveram de ser uniformizados. Selecionou-se como variável de decisão a unidade €/100 horas.

2.1 Pressupostos na construção do simulador

Na construção do modelo de simulação foram considerados os seguintes pressupostos:

- O comportamento em falha do dispositivo de protecção é descrito por uma distribuição de probabilidade de *Weibull* de três parâmetros. Admite-se que este dispositivo possa falhar por modos de degradação. Se se quiser conhecer o comportamento do modelo a falhas casuais, bastará atribuir ao parâmetro de forma o valor 1;
- O comportamento em falha da função protegida é descrito por uma distribuição de probabilidade de *Weibull* de três parâmetros. Com efeito, o modelo desenvolvido, permite considerar qualquer modo de falha, embora as falhas devidas ao acaso sejam as únicas, cuja detecção automática faz sentido, já que as falhas devidas a degradação devem ser evitadas adoptando-se, complementarmente, uma política de manutenção preventiva sistemática ou condicionada;
- As inspecções realizam-se com uma periodicidade fixa ditada pelo tempo calendário e não pelo tempo acumulado de funcionamento do sistema, embora possam coincidir em muitos casos. O seu custo é C_{in} . A sua duração não influencia a função protegida, pelo que não é tida em conta no modelo de simulação;
- Quando uma falha do dispositivo de protecção é detectada durante uma inspecção, o dispositivo é prontamente reparado ou substituído por um custo C_{fp} e ao fim de um tempo T_{fp} ;
- Quando se verifica uma falha da função protegida e o dispositivo de protecção o assinala, a função é prontamente reposta pelo operador no seu valor normal por um custo C_{ff} e ao fim de um tempo T_{ff} , desprezáveis na prática, mas considerados no modelo de simulação;
- Quando se verifica uma falha da função protegida e o dispositivo de protecção não o assinala por se encontrar falhado, verifica-se uma falha múltipla com consequências mais ou menos graves. A função é reposta no seu valor normal por um custo C_{fm} e ao fim de um tempo T_{fm} ;
- Considera-se o efeito da desvalorização temporal do dinheiro. Como o horizonte temporal da análise variará em cada corrida do simulador, o *cash-flow* de custos de manutenção gerado em cada corrida (inspecções + reparação da falha da protecção + reparação da falha da função + consequências da falha múltipla) será actualizado e, depois, uniformizado em €/100 horas. A taxa anual do custo de oportunidade dos capitais permanentemente investidos na empresa é conhecida e, como a unidade de tempo em que decorre a análise é a hora, aquela taxa é recalculada também para a hora;
- Nas condições de inicialização do modelo, considera-se que, quer o dispositivo de protecção, quer o órgão cuja função se pretende proteger, já têm alguma idade. Em consequência, a probabilidade da primeira falha será condicionada a essa idade no momento da análise.

2.1.1 Função de *Weibull* usada na construção do modelo

A função de *Weibull* é largamente usada na prática de Engenharia devido à sua versatilidade na descrição do tempo de vida até à falha de componentes sujeitos a fenómenos de degradação (desgaste, corrosão, fadiga, fluência ou simultaneidade de alguns destes). Foi esta a função usada na construção do modelo de simulação seguidamente descrito. A função densidade de probabilidade da distribuição de *Weibull* de três parâmetros tem a seguinte forma:

$$f(t) = \frac{\alpha}{\beta} \cdot \left[\frac{t-t_0}{\beta} \right]^{\alpha-1} \cdot e^{-\left(\frac{t-t_0}{\beta} \right)^\alpha} \quad (1)$$

Nesta função, t representa o tempo, ciclos de funcionamento ou qualquer outra medida descritiva de duração de vida, e representa a base dos logaritmos neperianos ($e = 2,7183$). Os parâmetros α , β e t_0 possuem o seguinte significado:

- t_0 – Parâmetro de localização: corresponde ao menor valor que t poderá assumir;
- α – Parâmetro de forma: traduz o mecanismo de degradação (física da falha);
- β – Parâmetro de escala: corresponde ao valor característico ou vida característica

A Expressão (1), uma vez integrada entre t_0 e t , devolve a função acumulada de probabilidade de falhas $F(t)$:

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-t_0}{\beta}\right)^\alpha} \quad (2)$$

A representação gráfica de $f(t)$ e de $F(t)$, pode ser vista na Figura 1.

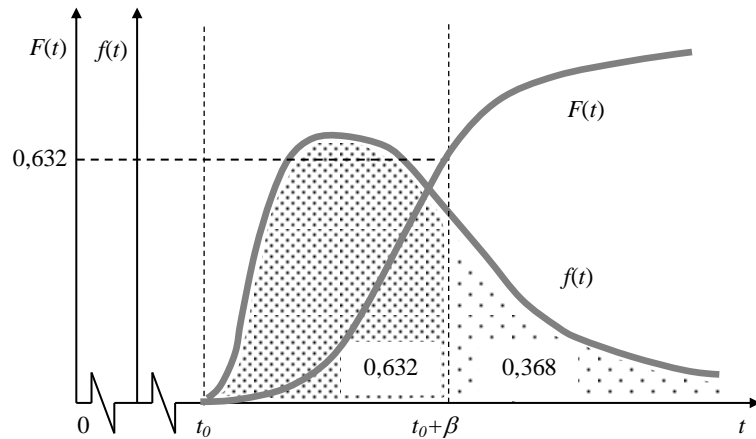


Figura 1 – Função densidade de probabilidade $f(t)$ e função acumulada de probabilidade acumulada $F(t)$ de Weibull (β divide a área sob a curva de $f(t)$ em duas partes sempre na proporção: $0,632 + 0,368$)

O valor de t pode ser deduzido da Expressão (2), resultando:

$$t = t_0 + \beta \cdot \left[\ln\left(\frac{1}{1-F(t)}\right) \right]^{1/\alpha} \quad (3)$$

Para gerar valores aleatórios de t , a partir de novo, substituí-se nesta Expressão $F(t)$ por r ($0 \leq r \leq 1$).

A probabilidade condicionada de falha de um componente para a missão Δt dado ter já acumulado o tempo T de serviço é dada pela Expressão (4).

$$F(\Delta t | T) = \frac{F(T + \Delta t) - F(T)}{1 - F(T)} \quad (4)$$

O seu significado gráfico pode ser visto na Figura 2.

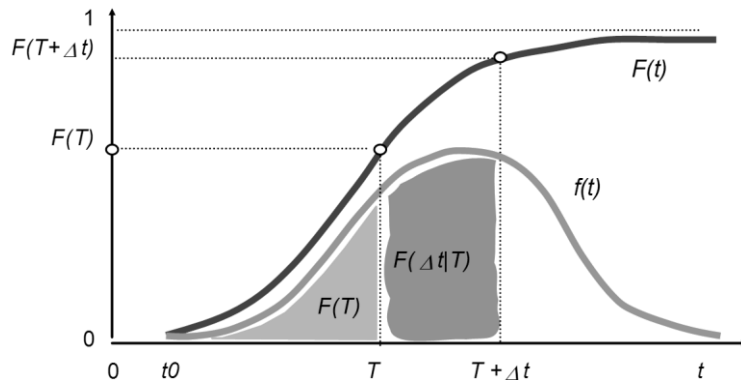


Figura 2 – Probabilidade condicionada de falha durante a missão Δt tendo sobrevivido até T

Para gerar valores aleatórios de t , a partir de usado, a Expressão (3) é modificada e toma a forma seguinte, onde $0 \leq r \leq 1$.

$$t = t_0 + \beta \cdot \left[\ln \left(\frac{1}{1 - [F(T) + r \cdot [1 - F(T)]]} \right) \right]^{1/\alpha} - T \quad (5)$$

2.1.2 Conversão financeira usados na construção do modelo

Nas fórmulas de conversão, utilizam-se os seguintes símbolos:

- i – Taxa de juro por período;
- n – Número de períodos de capitalização;
- P – Valor presente (ou actual) do capital;
- A – Renda no fim de cada período;
- F – Valor futuro no fim de qualquer período.

São duas as operações de conversão financeira usadas na construção do modelo:

1. Um capital futuro F a despendido dentro de n períodos actualizado à taxa i , resulta no valor P :

$$P = F \cdot \left[\frac{1}{(1+i)^n} \right] \quad (6)$$

2. Um capital presente P capitalizado uniformemente durante n períodos à taxa i , resulta em rendas iguais A no fim de cada período:

$$A = P \cdot \left[\frac{i \cdot (1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \right] \quad (7)$$

2.2 Aplicação numérica

Na construção do modelo de simulação, consideraram-se os seguintes dados e simbologia:

Inputs

- Falha do dispositivo de protecção segundo uma *Weibull* com os parâmetros: $t_0 = 0$; $\alpha = 2$; $\beta = 750$ horas;
- Tempo de reparação do dispositivo de protecção: $T_{fp} = 10$ horas;
- Custo de reparação do dispositivo de protecção: $C_{fp} = 500$ €;
- Falha da função protegida segundo uma *Weibull* com os parâmetros: $t_0 = 0$; $\alpha = 1$; $\beta = 500$ horas;
- Tempo de reparação do órgão cuja função é protegida: $T_{ff} = 1$ hora;
- Custo de reparação do órgão cuja função é protegida: $C_{ff} = 10$ €;
- Custo de uma inspecção: $C_{in} = 300$ €;
- Custo de reactivação do sistema após a falha múltipla: $C_{fm} = 10.000$ €;
- Tempo de reactivação do sistema após a falha múltipla: $T_{fm} = 150$ horas;
- Custo de oportunidade dos capitais permanentemente investidos na empresa: $i = 20\%$ ano, ou $(1 + 0,20)^{[1/(365 \times 24)]} - 1 = 0,002081\%$.hora;
- Tempo até à próxima inspecção $T =$ múltiplos de 24 horas.

Outputs

- P – Período simulado (até à primeira falha múltipla);
- I – Número de inspecções realizadas durante o período P ;
- n – Número de vezes que a protecção falhou durante o período P ;
- N – Número de vezes que a função falhou durante o período P ;
- m – Número de vezes que o sistema falhou (falha múltipla) durante o período P ;
- D_{prt} – Disponibilidade do dispositivo de protecção $(1 - m/N)$;
- D_{sist} – Disponibilidade do sistema $[1 - T_{fm} / (P + T_{fm})]$.

2.3 Logigrama

As falhas do dispositivo de protecção e da função protegida são independentes entre si, pelo que o modelo de simulação criado começa por gerar falhas de ambos e relaciona-os depois, de modo a detectar a ocorrência de uma falha da função protegida quando o dispositivo de protecção se encontra falhado (ainda não detectado ou em fase de reparação). Nesta circunstância, verificar-se-ia a falha do sistema, ou seja, uma falha múltipla.

Os momentos da primeira falha, quer do dispositivo de protecção quer da função protegida são gerados aleatoriamente, não como partindo de novos, mas considerando terem já acumulado algum tempo de serviço.

O logigrama da Figura 3 permite entender a lógica por detrás do modelo de simulação criado.

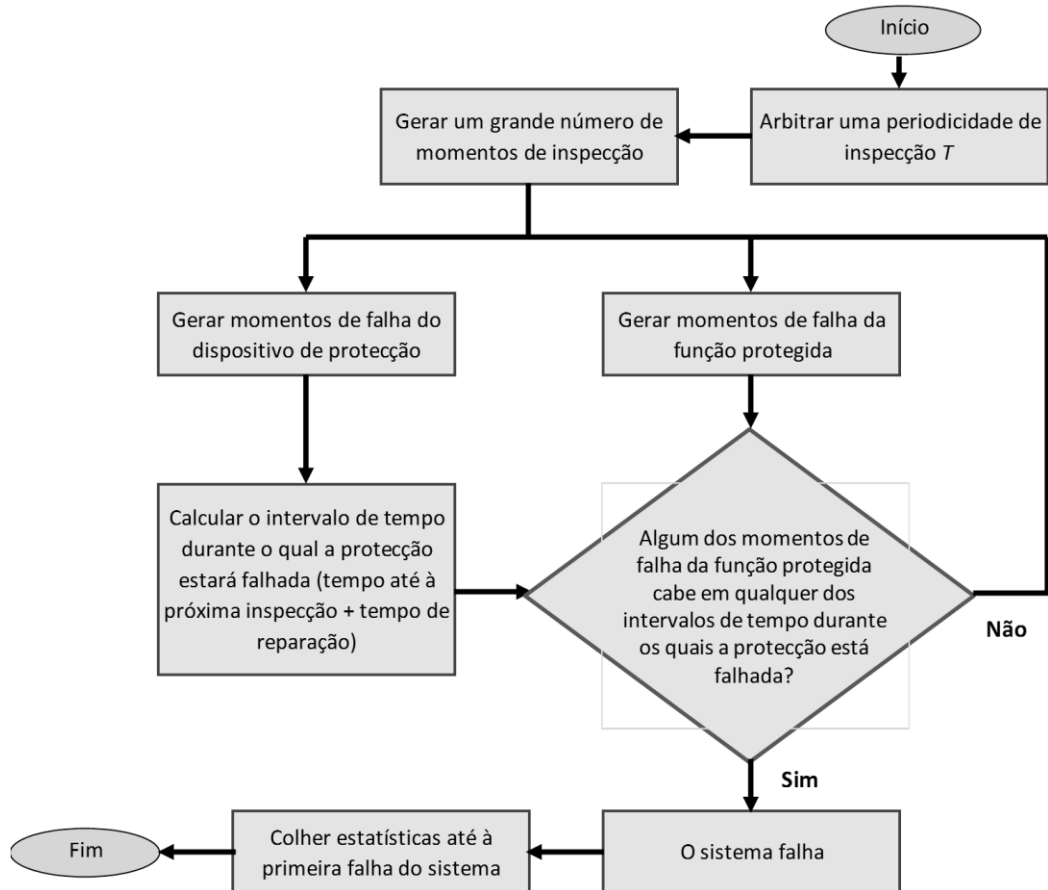


Figura 3 – Logigrama do modelo de simulação construído para determinar o comportamento de um sistema composto por uma função protegida e por um dispositivo protector inspecionado com a periodicidade T

2.4 Dispositivo de protecção

No Quadro 1 podem ver-se os dados do dispositivo de protecção (parâmetros da distribuição de *Weibull* e o tempo de vida acumulado) e a “história” das primeiras 20 inspecções com uma periodicidade de 120 horas (todos os 5 dias), resultante de uma das corridas do simulador.

Quadro 1 – Dados do dispositivo de protecção e “história” das primeiras 20 inspecções

Dispositivo de protecção protective device				Dados gerais			
$t_0 =$	0	horas		Custo de uma inspecção (Ci) =	300	€	
$\alpha =$	2			Custo de uma falha múltipla (Cf) =	10.000	€	
$\beta =$	750	horas		Tempo de reactivação =	150	horas	
MTTF =	665	horas		Tempo entre inspecções (T) =	120	horas	
λ média =	1,50E-03	falhas/hora		Tempo reparação protecção =	10	horas	
				Custo reparação protecção =	500	€	
		Falhado					
	Rand() para $t_0 =$	0,4963605		Falhado		Falhado	
	Rand() para $t-t_0 =$	0,7192173		0,8887797		0,314768	
	Inspeção	431	Reparado	748	Reparado	1.656	Reparado
1	0	120	0	0	0	0	0
2	120	240	0	0	0	0	0
3	240	360	0	0	0	0	0
4	360	480	431	490	0	0	0
5	480	600	0	0	0	0	0
6	600	720	0	0	0	0	0
7	720	840	0	0	748	850	0
8	840	960	0	0	0	0	0
9	960	1.080	0	0	0	0	0
10	1.080	1.200	0	0	0	0	0
11	1.200	1.320	0	0	0	0	0
12	1.320	1.440	0	0	0	0	0
13	1.440	1.560	0	0	0	0	0
14	1.560	1.680	0	0	0	0	1.656
15	1.680	1.800	0	0	0	0	1.690
16	1.800	1.920	0	0	0	0	0
17	1.920	2.040	0	0	0	0	0
18	2.040	2.160	0	0	0	0	0
19	2.160	2.280	0	0	0	0	0
20	2.280	2.400	0	0	0	0	0

Neste Quadro constata-se que a primeira falha do dispositivo de protecção ocorreu às 431 horas, foi detectada durante a quarta inspecção realizada às 480 horas e ficou reparada às $480 + 10 = 490$ horas. A segunda falha ocorreu às 748 horas, foi detectada às 840 horas e ficou reparada às $840 + 10 = 850$ horas. A mesma lógica foi seguida para todas as outras falhas.

2.5 Função protegida

No Quadro 2 podem ver-se os dados da função protegida (parâmetros da distribuição de *Weibull* e o tempo de vida acumulado) e a “história” das primeiras 20 inspecções com uma periodicidade de 120 horas, resultante de uma das corridas do simulador. Conforme se pode ver, a primeira falha da função protegida ocorrerá às 181 horas. Se este momento não cair dentro de um intervalo de tempo em que o dispositivo de protecção se encontra falhado – circunstância na qual, verificar-se-ia a falha do sistema (falha múltipla) –, a função é reposta ao fim de $181 + 1 = 182$ horas. Nos momentos 706, 1.017 e 1.225 horas ocorrem a segunda, terceira e quarta falha da função protegida. Nos momentos 1.982 e 2.008 horas ocorrem a quinta e a sexta falha da função protegida. Estas duas falhas ocorreram no mesmo intervalo entre inspecções, ou seja, entre as 1.920 e 2.040 horas.

Quadro 2 – Dados da função protegida e “história” das primeiras 20 inspecções

Função protegida							
$t_0 =$	0	horas	Tempo reparação =	1	horas		
$\alpha =$	1		Custo reparação função =	10	€		
$\beta =$	500	horas					
MTTF =	500	horas					
λ média =	2,00E-03	falhas/hora					
	Falhado						
Rand() para $t_0 =$	0,856223	Falhado	Falhado	Falhado	Falhado	Falhado	Falhado
Rand() para $t-t_0 =$	0,696815	0,350484	0,537857	0,661379	0,220661	0,950976	0,222482
	181	706	1.017	1.225	1.982	2.008	2.760
1	0	0	0	0	0	0	0
2	181	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0
6	0	706	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	1.017	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	1.225	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	1.982	2.008	0
18	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0

2.6 Interação entre o dispositivo de protecção e a função protegida

No Quadro 3 pode ver-se a “história” do resultado da interacção entre o dispositivo de protecção e a função protegida durante as primeiras 20 inspecções com uma periodicidade de 120 horas, resultante de uma outra corrida do simulador. Neste Quadro pode observar-se a seguinte sucessão de acontecimentos e de cálculos:

- **Intervalo 1:** A protecção falhou no momento 71 horas, foi detectada na inspecção das 120 horas e encontrava-se reparada no momento 130 horas. Durante este intervalo de tempo, o dispositivo de protecção não poderia ter detectado uma eventual falha da função protegida, mas tal não se verificou. O custo desta falha foi 500 €. A taxa de actualização é 20%.ano e deve ser ajustada para a hora: 0,002081%.hora. Aquele custo é então actualizado (6), resultando $C_{fp} = 500 / (1 + 0,00002081)^{130} \cong 499$ €;
- **Intervalo 2:** A função protegida falhou às 196 horas e logo a seguir às 220 horas, dentro do intervalo 120-240 horas. O dispositivo de protecção encontrava-se operacional e detectou ambas as falhas que foram prontamente corrigidas; $C_{ff} = (2 \times 10) / (1 + 0,00002081)^{220} \cong 10$ €;
- **Intervalo 5:** A protecção falhou às 498 horas, foi detectada na inspecção das 600 horas e encontrava-se reparada no momento 610 horas. Durante este intervalo de tempo, o dispositivo de protecção não poderia ter detectado uma eventual falha da função protegida, mas tal não se verificou. O custo desta falha foi 500 €. Este custo é então actualizado (6), resultando $C_{fp} = 500 / (1 + 0,00002081)^{610} \cong 494$ €;
- **Intervalo 7:** A função protegida falhou apenas uma vez às 838 horas, dentro do intervalo 720-840 horas. O dispositivo de protecção encontrava-se operacional e detectou a falha que foi prontamente corrigida. Custo $C_{ff} = 10 / (1 + 0,00002081)^{838} \cong 10$ €;
- **Intervalo 9:** A função protegida falhou apenas uma vez às 1.044 horas, dentro do intervalo 960-1.080 horas. O dispositivo de protecção encontrava-se operacional e detectou a falha que foi prontamente corrigida. Custo $C_{ff} = 10 / (1 + 0,00002081)^{1.080} \cong 10$ €;
- **Intervalo 12:** A protecção falhou no momento 1.377 horas, foi detectada na inspecção das 1.440 horas e encontrava-se reparada no momento 1.450 horas. Durante este intervalo de tempo, o dispositivo de protecção não poderia ter detectado uma eventual falha da função protegida, mas tal não se verificou. O custo desta falha foi 500 €. Este custo é então actualizado (6), resultando $C_{fp} = 500 / (1 + 0,00002081)^{1.450} \cong 485$ €;
- **Intervalo 15:** A protecção falhou no momento 1.690 horas, seria detectada na inspecção das 1.800 horas e encontrar-se-ia reparada no momento 1.810 horas. Porém, ocorreu uma falha da função protegida às 1.712 horas, ou seja, dentro do intervalo de tempo em que o dispositivo de protecção se encontrava falhado, pelo que esta falha da função não é detectada e evolui até consequências plenas. O custo da falha do dispositivo

de protecção foi 500 € e o custo da falha múltipla foi 10.000 €. Estes custos são então actualizados (6): $C_{fp} = 500 / (1 + 0,00002081)^{(1,712 + 10)} \cong 482$ € e $C_{fm} = 10.000 / (1 + 0,00002081)^{1,712} \cong 9.650$ €.

Todos este custos actualizados serão posteriormente uniformizados por (7).

Quadro 3 – História dos resultados da interacção entre o dispositivo de protecção e a função protegida durante as primeiras 20 inspecções com uma periodicidade de 120 horas

	P		N	m	n	l	Cfs	Cfp	Cff	
	1.712		5	1	4	15	9.650	1.959	40	
	Protecção		Última falha da função	Nº vezes função falhada	Nº vezes sistema falhado	Nº vezes protecção falhada	Nº de inspecções	Custo actual das falhas do sistema	Custo actual das falhas da protecção	Custo actual das falhas da função
	Falhado	Reparado								
1	71	130	0	0	0	1	1	0	499	0
2	0	0	220	2	0	0	1	0	0	20
3	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
5	498	610	0	0	0	1	1	0	494	0
6	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
7	0	0	838	1	0	0	1	0	0	10
8	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
9	0	0	1.044	1	0	0	1	0	0	10
10	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
12	1.377	1.450	0	0	0	1	1	0	485	0
13	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
15	1.690	1.810	1.712	1	1	1	1	9.650	482	0
16										
17										
18										
19										
20										

2.7 Conclusões de uma das corridas do simulador

A Figura 4 mostra as estatísticas e os vários indicadores de performance resultantes da corrida do simulador descrito nos três pontos anteriores. Nesta Figura pode ver-se que o período simulado nesta corrida totalizou 1.789 horas, durante o qual foram realizadas 15 inspecções e se verificaram duas falhas do dispositivo de protecção e 6 falhas da função protegida. Este período, conforme referido anteriormente, é variável em cada corrida e corresponde ao momento em que o sistema falhou pela primeira vez (primeira falha múltipla). A disponibilidade do sistema foi 92,26% e o custo total da manutenção foi 858,31 €/100 horas. Os valores 298 e 895 horas são os MTTF da função protegida e do dispositivo de protecção, respectivamente.

		Factor conversão		Período simulado = 24.797 horas	
j = r	ano	(A/P;i;n)		Nº de inspecções simuladas =	207
j = 0,00208%	hora	0,00056945			
Custo das inspecções (Cin) =	251,54	€/100 horas			
Custo da falha protecção (Cfp) =	55,33	€/100 horas			
Custo da falha função (Cff) =	2,81	€/100 horas			
Custo falha sistema (Cfs) =	548,64	€/100 horas			
Custo total (CT) =	858,31	€/100 horas			
			Período (P) =	1.789	
			Nº de inspecções (l) =	15	MTTF = 298 P/N
			Nº de vezes que a protecção falhou (n) =	2	MTTF = 895 P/n
			Nº de vezes que a função falhou (N) =	6	MTTF = 1.789 P/m
			Nº de vezes que o sistema falhou (m) =	1	
			Disponibilidade da protecção (1-m/N) =	83,33%	
			Disponibilidade do sistema =	92,26%	

Figura 4 – Estatísticas e performance resultantes de uma das corridas do simulador

Após 500 corridas e para um nível de confiança de 95%, obtiveram-se os valores esperados, erros amostrais e correspondentes semi-intervalos de confiança de todas as estatísticas usadas no simulador, as quais se mostram no Quadro 4.

Quadro 4 – Valores esperados e semi-intervalos de confiança das estatísticas para T = 120 horas

	Período	l	N	n	m	Dprt%	Dsist%	MTTF	Cin	Cfp	Cff	Cfs	CT
Valor esperado =	6.635	55,61	13,31	9,08	1,00	82,98%	94,80%	6.635	254	73	2	392	721
Valor instantâneo =	17940	150	28	23	1	0,96429	99,17%	17940	250,836	63,1673	1,46087	45,981	361,45
Erro amostral =	8%	8%	7%	7%	0%	2%	1%	8%	0%	3%	4%	13%	7%
1/2 amplitude do IC =	506	4,22175	0,94795	0,67444	0	1,95%	0,57%	506	1	2	0	52	54

2.8 Determinação do intervalo óptimo entre inspeções

Para determinar o intervalo de tempo entre inspeções T que cumpra com um qualquer critério, ter-se-á de realizar uma análise da sensibilidade das variações de cada variável a variações daquele intervalo. Admitindo múltiplos de 24 horas para T , obtiveram-se os resultados que se mostram no Quadro 5.

No Quadro 5 pode observar-se o seguinte:

- As disponibilidades máximas (do dispositivo de protecção 87,83% na coluna 7 e do sistema 95,91% na coluna 8) bem como a fiabilidade máxima do sistema (medida pelo MTTF = 9.448 horas na coluna 9) conseguem-se obter se o intervalo entre inspeções adoptado for $T = 48$ horas (de 2 em 2 dias);
- A curva do custo total CT mínimo (coluna 14) é muito plana na região entre $T = 72$ horas e $T = 120$ horas, pelo que, na perspectiva económica, é indiferente adoptar qualquer um destes valores de T ;
- O custo da falha da protecção C_{fp} (coluna 11) decresce muito suavemente, pelo que é pouco sensível a variações de T ;
- O custo da falha da função C_{ff} (coluna 12) é constante e independente do valor de T ;
- O custo das inspeções C_{in} (coluna 10) decresce progressivamente com o aumento de T ;
- O custo das falhas do sistema C_{fs} (coluna 13) cresce progressivamente quando T aumenta;
- O custo total CT (coluna 14) decresce acentuadamente, atinge um mínimo e torna a crescer – moderadamente primeiro e acelerando depois – conforme T cresce;
- A coluna 15 mostra os resultados da divisão do período simulado P pelo número de inspeções I . O resultado deve ser aproximadamente igual a cada valor do intervalo de tempo entre inspeções T ;
- A coluna 16 mostra os resultados da divisão do período simulado P pelo número de vezes que a função falhou N . O resultado deve ser aproximadamente igual a 500 horas, ou seja o MTTF da função protegida.

A Figura 5 mostra graficamente a forma de variação dos custos do dispositivo de protecção e do sistema, respectivamente, com o intervalo de tempo entre inspeções T .

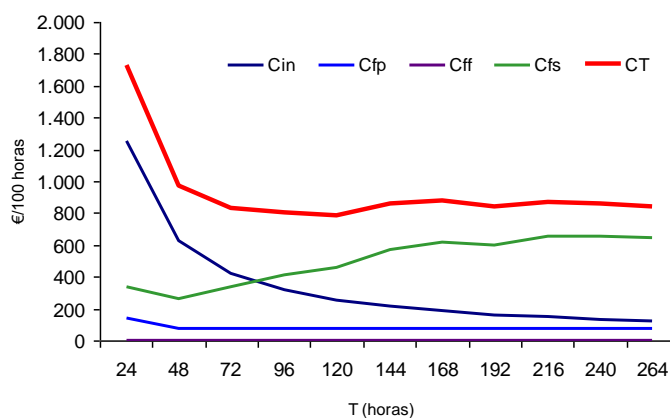


Figura 5 – Variação dos custos (€/100 horas) em função do intervalo de tempo entre inspeções T (horas). As irregularidades das curvas devem-se à discretização dos dados.

Quadro 5 – Estatísticas em função do intervalo de tempo entre inspeções (T)

T	Período	I	N	n	m	Dprt%	Dsist%	MTTF	Cin	Cfp	Cff	Cfs	CT	Validação	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
24	7.321	305,38	14,97	19,65	1,00	83,78%	94,83%	7.321	1.253	139	2	337	1.732	24	489
48	9.448	197,18	18,89	13,69	1,00	87,83%	95,91%	9.448	628	76	2	264	970	48	500
72	8.151	113,52	16,36	11,64	1,00	85,02%	94,83%	8.151	420	75	2	337	833	72	498
96	7.029	73,53	14,19	9,78	1,00	82,39%	93,77%	7.029	317	74	2	408	800	96	495
120	6.253	52,42	12,47	8,63	1,00	81,38%	93,05%	6.253	254	74	2	457	787	119	502
144	5.164	36,19	10,48	7,07	1,00	77,60%	91,44%	5.164	214	77	2	566	859	143	493
168	4.548	27,38	9,24	6,04	1,00	74,56%	90,73%	4.548	184	74	2	615	874	166	492
192	4.271	22,55	8,31	5,62	1,00	74,25%	90,95%	4.271	162	73	2	600	838	189	514
216	4.064	19,12	8,26	5,35	1,00	74,21%	90,22%	4.064	145	75	2	650	872	213	492
240	3.757	15,97	7,49	4,84	1,00	72,63%	90,23%	3.757	131	73	2	651	857	235	502
264	3.545	13,73	7,00	4,48	1,00	73,60%	90,33%	3.545	119	71	2	645	837	258	507
408	2.663	6,84	5,38	3,21	1,00	66,78%	87,83%	2.663	82	69	2	801	955	389	495
504	2.361	4,98	4,87	2,75	1,00	64,54%	87,33%	2.361	67	67	2	834	970	474	485
528	2.153	4,36	4,31	2,46	1,00	59,97%	88,78%	2.153	67	70	2	953	1.092	493	500

Notas:

1. As colunas 15 e 16 mostram as validações:
 - 1.1. A coluna 15 mostra o período simulado P a dividir pelo número de inspeções I . O resultado deve ser aproximadamente igual a cada valor do intervalo de tempo entre inspeções T ;
 - 1.2. A coluna 16 mostra o período simulado P a dividir pelo número de vezes que a função falhou N . O resultado deve ser aproximadamente igual a 500 horas, ou seja o MTTF da função protegida.

A Figura 6 mostra graficamente a forma de variação das disponibilidades do dispositivo de protecção e do sistema com o intervalo de tempo entre inspecções T .

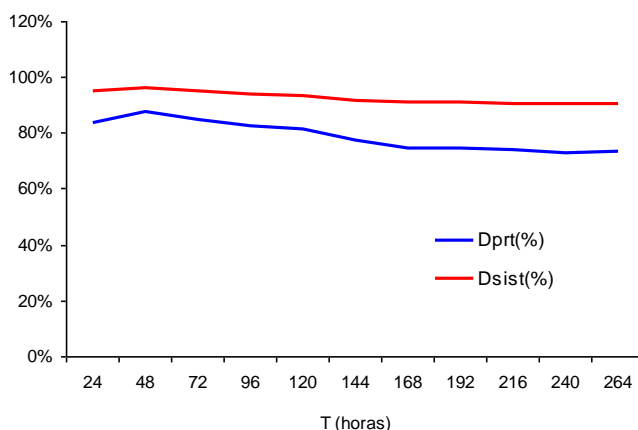


Figura 6 – Variação da disponibilidade da protecção $Dprt(\%)$ e da disponibilidade do sistema $Dsist(\%)$ em função do intervalo de tempo entre inspecções T (horas). As irregularidades das curvas devem-se à discretização dos dados.

3. Conclusões

- Os resultados conseguidos são sólidos e permitem dispensar duas fórmulas empíricas defendidas por alguns autores:

$$T = -\ln(2D_{sist} - 1) \cdot MTTF_{fp} \quad \text{ou} \quad T = 2(MTTF_{dp} \times MTTF_{fp}) / MTTF_{sist}$$

Estas não consideram os custos envolvidos e apresentam ainda a desvantagem de limitarem a análise a modos de falha de natureza casual, quer para o dispositivo de protecção, quer para a função protegida. Ao contrário, no modelo conceptual descrito anteriormente, teve-se em conta a dimensão económica e a possibilidade de tratar-se de falhas devidas a degradação, em ambos os casos, quer do dispositivo de protecção, quer da função protegida;

- Em presença de cada caso concreto e quando o critério de decisão é o custo, a disponibilidade ou a fiabilidade do sistema, o método de simulação de eventos discretos de Monte-Carlo permite equacionar o caso e encontrar, por tentativa-erro, os intervalos de inspecção que satisfazem, respectivamente, o mínimo ou os máximos daqueles critérios;
- O resultado obtido, sob a forma de um intervalo de tempo entre inspecções, é previsional, pelo que se torna necessário reformulá-lo regularmente no futuro próximo, tendo em conta novos pressupostos ou simplesmente alterações das variáveis que tenham eventualmente ocorrido entretanto;
- Mais uma vez se constata a vantagem de utilização de modelos de simulação em situações muito complexas, para estudo das quais, ou não existem métodos analíticos alternativos, ou se existem, enfermam de pressupostos simplificadores, os quais não permitem, em muitos casos, obter a precisão exigida necessária;
- Mais uma vez se demonstrou que uma folha de cálculo como o EXCEL permite criar modelos de simulação de eventos discretos envolvendo uma complexidade razoável e que passam a constituir ferramentas usáveis frequentemente para apoio à decisão.

Referências

- Assis, Rui, *Apoio à Decisão em Manutenção na Gestão de Activos Físicos*, Lidel, 2010
- LAW, Averill M. e Kelton, W. David, *Simulation Modelling and Analysis*, McGraw-Hill Internat. Series, 2000
- MOUBRAY J.M., *Reliability Centred Maintenance*. Butterworth - Heinemann, Oxford, 2nd edition, 1999
- RAIFFA, H., Schlaifer, R., *Applied Statistical Decision Theory*, Cambridge University Press, Cambridge, Massachusetts, 1961