Manutenção de oportunidade de um componente reparável

Rui Assis
rassis@rassis.com
www.rassis.com

Faculdade de Engenharia da Universidade Lusófona
Associação Portuguesa de Manutenção Industrial

Resumo

Analisa-se neste artigo um caso típico em manutenção de oportunidade: O caso de um componente reparável (um número finito de vezes) que deve ser substituído preventiva e obrigatoriamente (imposto por uma norma legal) quando tiver acumulado um determinado tempo de funcionamento e que se confronta com a oportunidade de o ser um pouco antes, aproveitando uma falha sua acabada de ocorrer. O componente já acumulou algumas horas após a última reparação. Para análise dos dados, recorre-se ao método estatístico de regressão e a um algoritmo de optimização não linear e para a resolução do caso recorre-se ao método de simulação numérica de Monte-Carlo e ao cálculo financeiro. Pretende-se determinar o período óptimo económico de antecipação de substituição do componente – se tal existir – ou, determinar, num qualquer momento da vida do componente, se será economicamente viável antecipar a sua substituição.

Complementarmente, comenta-se a relativismo destas análises quando não têm em conta os custos dos impactos ambientais, quase sempre externalizados para a sociedade, contrariando o espírito de uma economia circular (sem desperdícios).

Introdução

Suponha-se o caso genérico de um componente caro reparável que tolera um número limitado de reparações seguidas de períodos de vida útil decrescentes e que deve ser substituído obrigatoriamente uma vez esgotado um determinado período em serviço; período este imposto por normas de segurança ou imposto pela boa prática de gestão. Se ocorrer uma falha num momento em que já pouco tempo falta para a sua substituição obrigatória, coloca-se a questão de saber se valerá a pena repará-lo uma vez mais ou se será mais económico substituí-lo antecipadamente nesse mesmo momento. Trata-se de um problema de natureza técnica – equacionável com ferramentas da fiabilidade – e económica – equacionável com factores de conversão financeira, tendo em conta que o "dinheiro custa dinheiro". Com efeito, antecipando a sua substituição por outro novo, estar-se-á evitando um aumento da frequência de falhas e consequente custo económico com reparações; aumento este que se verificará à medida que se aproxima o fim da sua vida útil (obrigatória pela legislação ou imposta pela boa prática de gestão).

Este problema pode ser resolvido construindo um modelo matemático de simulação discreta de Monte-Carlo, de modo a avaliar várias alternativas da variável de decisão – o intervalo de tempo de antecipação. Este método permite encontrar o valor óptimo económico daquele intervalo de tempo de antecipação ou, pelo menos responder à pergunta: Neste preciso momento em que se verifica uma falha e o componente tem de ser reparado (desde que o número limite de reparações e o seu limite de idade não tenham sido ainda atingidos), valerá a pena, na perspectiva económica, repará-lo mais uma vez, ou, substituí-lo simplesmente?

Uma outra situação semelhante à descrita consiste em saber se, na perspectiva económica, valerá a pena aproveitar a paragem de um equipamento para reparação de um componente falhado, para substituir um outro componente programado para sê-lo preventivamente dentro de mais algum tempo. Mais uma vez, o método de simulação numérica de Monte-Carlo permite encontrar a melhor solução.

Ou seja, no primeiro caso, verifica-se a paragem do equipamento ao qual o componente pertence, devida a uma falha deste mesmo componente, enquanto no segundo caso, a paragem é devida à falha de outro componente pertencente ao mesmo equipamento. E a questão é a mesma nos dois casos: Aproveitar esta paragem para substituir o componente em causa por outro novo ou deixá-lo continuar (reparando-o uma vez mais no primeiro caso)?

O problema é praticamente impossível de ser equacionado algebricamente. Um modelo de simulação à medida permite ter em conta todas as variáveis consideradas pertinentes e proporciona uma solução facilmente compreensível por todos. É este o objectivo deste artigo.

1. Dados de um caso e enquadramento teórico

A exemplo de qualquer outro problema de fiabilidade e de manutibilidade, ou, genericamente, de economia operacional, a primeira questão a que se tem de responder é "Qual é o objectivo?", ou seja, qual a grande questão para a qual se pretende encontrar uma resposta.

A segunda questão é "Quais são as variáveis pertinentes?", isto é, quais são as variáveis – umas determinísticas e outras probabilísticas – que se julga dever ser tidas em conta e que irão interactuar de modo a proporcionar a resposta à primeira questão.

A terceira questão é "Qual a natureza do modelo matemático a construir?", isto é, tendo em conta que a interligação entre as várias variáveis é extremamente complexa e de natureza aleatória, a melhor solução consiste em construir um modelo de simulação discreta de Monte-Carlo, recorrendo ao MS-EXCEL ou a outro *software* genérico desta especialidade. São também necessários conhecimentos de análise estatística e de análise económica de projectos.

A quarta e última questão a que se tem de responder é a seguinte "Quais os valores a atribuir às várias variáveis do modelo?". Em muitos casos esta fase na resolução de um problema é a mais demorada, pois implica, por um lado, o conhecimento da existência e localização das fontes dos dados pertinentes[1] e, por outro, o tratamento intermédio de alguns dos dados de natureza aleatória de forma a caracterizar o seu comportamento probabilístico.

[1] A existência de codificação baseada na ISO 14224 ou outra será de enorme ajuda.

As naturezas de modelos usados para determinar a fiabilidade de um componente são as seguintes:

- Modelos determinísticos[2]: Baseiam-se nas leis de degradação física dos componentes (ou sistemas) sujeitos a falhas e em dados empíricos obtidos em experiências laboratoriais. Condições ambientais e de carga que iniciam o processo de falha e que conduzem ao seu desenvolvimento. Com base no conhecimento do processo dominante de deterioração e na taxa de progressão, podemos prever a vida restante.
- Modelos estatísticos: Baseiam-se em observações de falhas no passado para extrapolar a vida esperada restante ou a probabilidade de atingir uma qualquer idade.
- Modelos funcionais: Baseiam-se nas condições de funcionamento dos equipamentos, incluindo a acção dos operadores, e nos mecanismos que conduzem à falha (modelos determinísticos). É o caso da RBI RP 581.

O caso descrito neste documento assenta num modelo estatístico. Com efeito, o histórico de falhas do componente que se pretende estudar (se existir) é a melhor fonte de informação possível de obter. Na sua ausência, a segunda melhor fonte é o histórico de falhas de um componente parecido a funcionar de modo semelhante (de ambiente e de carga) num outro equipamento. Na ausência de ambas as fontes, ter-se-á de consultar bases de dados especializadas.

Enquanto a quantificação das variáveis determinísticas implica apenas alguma investigação e/ou questionamento de especialistas, a quantificação das variáveis probabilísticas (ou estocásticas) obriga a um tratamento estatístico intermédio. Mais adiante nos pontos 1.2.1 e 1.2.2. mostra-se como fazê-lo.

1.1 Variáveis determinísticas

Nesta natureza de problema, as variáveis que se consideram pertinentes encontram-se na maior parte dos casos no CMMS[3] das empresas cujos serviços de manutenção se encontram bem organizados e são as seguintes:

- Vida útil limite (imposta legalmente): 15.000 horas
- Vida já acumulada: 1.300 horas
- Número limite de reparações autorizadas: 6
- Número de reparações já sofridas: 2
- Tempo médio de reparação: 30 horas (calculado a partir dos dados do CMMS)
- Custo de uma reparação: 120 €
- Custo de oportunidade[4]: 550 € (eventualmente do CMMS)
- Custo de um novo componente: 1.350 €
- Taxa de actualização[5]: 20% ano
- Regime médio do equipamento[6]: 340 dias/ano
- Regime médio do equipamento: 21 horas úteis/dia
- Simultaneidade[7] do componente: 0,85

1.2 Variáveis probabilísticas

As variáveis probabilísticas (de natureza aleatória ou estocástica) a considerar neste caso são os tempos entre falhas (TTF *Time To Failure*), os quais, sendo o componente reparável, devem ser divididos em dois conjuntos: um conjunto referente às primeiras falhas após novo (TTFF *Time To First Failure*) e outro grupo referente às falhas que se seguem cronologicamente, seguidas das respectivas reparações, até ao limite considerado aceitável (tolerado). Neste último conjunto, é natural que os TTF sejam progressivamente mais curtos, redução esta que pode ser caracterizada por um factor denominado "Factor de Restauro" (FR). Ambos os conjuntos

---

[2] Ver a referência bibliográfica [5]
[3] CMMS – *Computer Maintenance Management System*
[4] Ver o seu cálculo no ponto 7.1.2 da referência [1]
[5] Taxa de referência ou de oportunidade do capital investido na empresa, informada pela Direcção Financeira (real se a análise for realizada a preços constantes ou nominal se for realizada a preços correntes). No caso presente, será a taxa real.
[6] …ao qual o componente pertence.
[7] Coeficiente de simultaneidade = Proporção do tempo em que o componente funciona quando o equipamento funciona. Pode ser determinado por contadores ou por amostragem pelo método das observações instantâneas (ver o Anexo VIII da referência [1])

podem ser lidos na BD do CMMS. Porém, a codificação do componente como reparável deve permitir distinguir entre o tempo até à primeira falha (TTFF) e os restantes tempos entre falhas (ou reparações); após a primeira, após a segunda, após a terceira, etc.

O primeiro conjunto, constituído pelos TTFF, terá de ser tratado estatisticamente com o objectivo de determinar os parâmetros da distribuição teórica que melhor adere àquele conjunto. Este cálculo pode ser realizado através de dois métodos alternativos: o método da máxima verosimilhança[8] e o método de regressão[9]. O método de regressão é preferível ao método da máxima verosimilhança quando o número de dados é pequeno e completo (falhas verdadeiras). Quando o número de dados é grande ou existem muitos dados censurados, é preferível usar o método da máxima verosimilhança. Quando o número de dados é grande e poucos são censurados, qualquer um destes métodos serve.

No exemplo aqui tratado será usado apenas o método de regressão – preferido pela Engenharia devido à possibilidade de interpretação gráfica – com o apoio da aplicação MS-EXCEL "Ajustamento *Weibull Bernard*"[10], o qual usa um método de regressão particular para o caso da distribuição de probabilidade *Weibull*.

No caso da distribuição de *Weibull*, a infiabilidade *F* (ou probabilidade de falha) de um componente para uma determinada missão *t* é dada por (1).

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

Nesta Expressão, os parâmetros α, β e t_0 possuem o seguinte significado [1] e [3]:

- t_0 – Parâmetro de localização: corresponde ao menor valor assumido por *t* (por exemplo, no caso de modos de falha que tenham como causa o desgaste ou a fadiga, a falha só poderá ocorrer após algum tempo de funcionamento; caso de um rolamento, por exemplo);
- α – Parâmetro de forma: traduz o mecanismo de degradação (física da falha) – quanto maior for o seu valor, mais a moda da função se desloca para a direita;
- β – Parâmetro de escala: corresponde ao valor característico ou vida característica. O parâmetro β inicia-se onde t_0 termina.

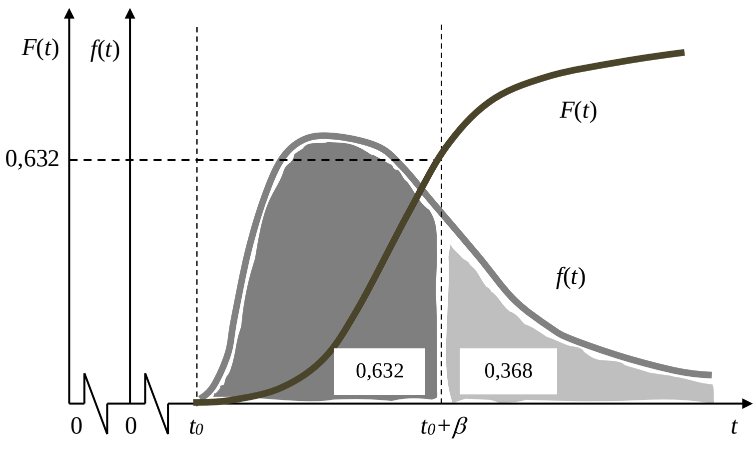

Figura 1 – Função densidade e acumulada de probabilidade de Weibull

Quando um componente já acumulou um determinado tempo de vida *T*, a probabilidade de falha para uma missão Δt, é dada pela Expressão (2), a qual é válida no caso de qualquer distribuição (empírica ou teórica) de probabilidade.

---

[8] Ver a aplicação MS-EXCEL "Ajustamento máxima verosimilhança" no tema "Análise de Manutenção de Sistemas" no *website*: www.rassis.com

[9] Ver a aplicação MS-EXCEL "Regressão linear" no tema "Métodos Estatísticos Aplicados" no *website*: www.rassis.com

[10] Esta aplicação acompanha a referência bibliográfica [1]

$$F(\Delta t \mid T) = 1 - \frac{R(T+\Delta t)}{R(T)} = \frac{F(T+\Delta t) - F(T)}{1 - F(T)} \qquad (2)$$

O significado de uma probabilidade condicionada pode ser melhor compreendido se se atentar no gráfico auto-explicativo da Figura 2. Nesta pode ver-se a área cinza-claro que representa a probabilidade de o componente falhar até ao momento *T*, representada por *F*(*T*). Porém, se este componente sobreviveu até este momento *T*, a probabilidade de ele falhar durante a missão Δt é representada na Figura pela proporção da área cinza-escuro em relação à área [1 – *F*(*T*)] (contornada a tracejado).

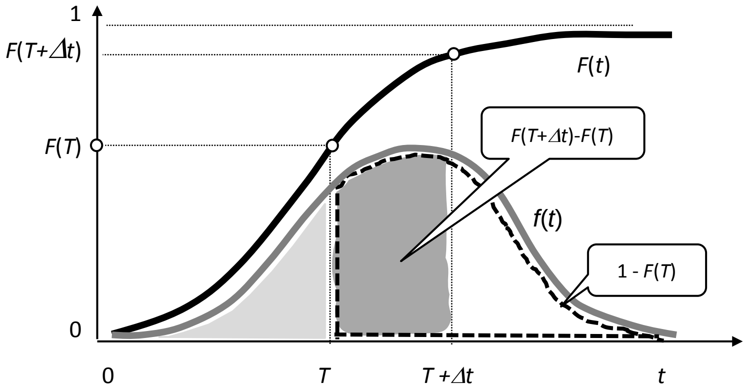

***Figura** 2 – Probabilidade condicionada de falha durante a missão Δt tendo sobrevivido até T*

Para determinar então os parâmetros da distribuição *Weibull* de melhor aderência aos TTFF existentes, o método mais expedito consiste em transformar (logaritmizando) a função de *Weibull* numa recta através de regressão linear. Assim, a partir de (1) e tendo em conta que *R*(*t*) + *F*(*t*) = 1, ter-se-á, sucessivamente:

$$\frac{1}{R(t)} = \exp\left(\frac{t-t_0}{\beta}\right)^{\alpha} \;\rightarrow\; \ln\left[\frac{1}{R(t)}\right] = \left(\frac{t-t_0}{\beta}\right)^{\alpha} \;\rightarrow\; \ln\left\{\ln\left[\frac{1}{R(t)}\right]\right\} = \alpha\left[\ln(t-t_0) - \ln .\beta\right] \;\rightarrow$$

$$\ln\left\{\ln\left[\frac{1}{R(t)}\right]\right\} = -\alpha.\ln(\beta) + \alpha.\ln(t-t_0) \qquad (3)$$

Esta equação possui a forma geral de uma recta (*y = a + b.x)*. No segundo membro desta equação podem identificar-se as seguintes equivalências:

- O termo $-\alpha.\ln(\beta)$ corresponde a *a* (ponto de intercepção das ordenadas);
- O termo α corresponde a *b* (declividade da recta);
- O termo $\ln(t - t_0)$ corresponde a *x* (eixo das abcissas).

A recta de regressão encontra-se tanto mais ajustada aos dados observados quanto maior for o coeficiente de determinação r^2, o qual pode assumir valores entre 0 e 1.

1.2.1 Cálculo dos parâmetros da distribuição de *Weibull*

Do cadastro do equipamento ao qual o componente em análise pertence, recolheram-se os TTFF (*Time To First Failure* ou tempos até à primeira falha) das últimas 20 unidades substituídas, os quais são mostrados no Quadro 1 (os tempos entre as restantes falhas seguidas de reparação (TTF *Time To Failure*) serão tratados no ponto 1.2.2).

Quadro 1 – TTFF históricos por ordem crescente

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
TTFF	1.253	1.368	2.356	2.590	3.412	3.511	3.669	3.801 **s**	3.832	4.057
n	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
TTFF	4.136	4.182	4.222	4.333	4.371 **s**	4.699	5.091	5.251 **s**	5.987	6.348

Recorrendo à aplicação EXCEL "Ajustamento *Weibull-Bernard*", construímos o Quadro 2. Neste Quadro, os TTFF seguidos da letra "s" significa que são censurados[11]. As duas últimas colunas resultaram de (2).

Quadro 2 – Linearização dos dados

Ordem	**TTFF-t_0 (tj)**	***Median rank* (Bernard) $F(tj)$**	***Median rank* corrigido $F(tj)c$**	**ln{ln[1/$R(tj)$]}**	**ln(tj)**
1	1.253	0,034313725	0,034313725	-3,354803	7,133296
2	1.368	0,083333333	0,083333333	-2,441716	7,221105
3	2.356	0,132352941	0,132352941	-1,952138	7,764721
4	2.590	0,181372549	0,181372549	-1,608807	7,859413
5	3.412	0,230392157	0,230392157	-1,339891	8,135054
6	3.511	0,279411765	0,279411765	-1,115695	8,163656
7	3.669	0,328431373	0,328431373	-0,920954	8,207674
8	3.801 s	0,37745098			
9	3.832	0,426470588	0,381221719	-0,733952	8,251142
10	4.057	0,475490196	0,434012066	-0,563554	8,308199
11	4.136	0,524509804	0,486802413	-0,404824	8,327484
12	4.182	0,573529412	0,53959276	-0,254062	8,338545
13	4.222	0,62254902	0,592383107	-0,108223	8,348064
14	4.333	0,671568627	0,645173454	0,035489	8,374015
15	4.371 s	0,720588235			
16	4.699	0,769607843	0,706762192	0,204386	8,455105
17	5.091	0,818627451	0,76835093	0,380169	8,535230
18	5.251 s	0,867647059			
19	5.987	0,916666667	0,850469248	0,641987	8,697346
20	6.348	0,965686275	0,932587565	0,992113	8,755895

Do Quadro 2 deduz-se, pelo método de regressão: α = 2,47, β = 4.760 horas e t_0 = 0 horas, para r^2 = 0,9372.

Estes resultados podem agora ser introduzidos no modelo de simulação.

A determinação dos parâmetros da distribuição de *Weibull* que melhor descreve o comportamento em falha de um componente requer grande disciplina da Organização, de forma a assegurar que todos os dados pertinentes sejam recolhidos e mantidos num repositório. O seu tratamento estatístico permite encontrar os valores dos parâmetros da distribuição de melhor ajustamento até esse momento. Se o sistema não for alterado, na perspectiva da fiabilidade (carga e ambiente), novos dados juntar-se-ão aos históricos e o recálculo destes parâmetros beneficiará de maior precisão. Se o sistema for alterado, os dados históricos devem ser abandonados, já que não representam o novo sistema, e deve reiniciar-se um novo cálculo dos parâmetros.

1.2.2 Cálculo do Factor de Restauro

Este factor é também de natureza probabilística, pois irá condicionar os valores aleatórios dos TTF que se seguem após a primeira falha seguida de reparação, até à última falha, momento em que é descartado.

Frequentemente considera-se que um componente quando é reparado volta ao estado de novo (*as good as new*). Este pressuposto é sempre verdadeiro quando o componente não é reparável e, consequentemente, após falhar é substituído por um componente novo. Porém, este pode não ser o caso, adoptando-se então um factor de restauro *FR* (entre 0 e 1 ou 100%) para traduzir o conceito de "reparação perfeita" (*FR* = 1) ou de "reparação imperfeita" (0 ≤ *FR* < 1).

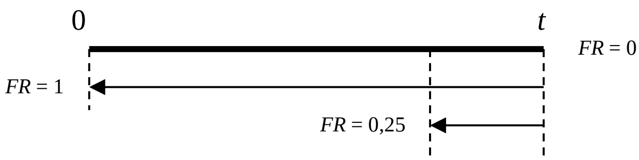

Figura 3 – Um exemplo do conceito "Factor de Restauro" FR

A melhor forma de classificar um componente como não sendo novo (*not as good as new*) consiste em atribuir-lhe já alguma idade. Assim (ver a Figura 3):

---
[11] O ponto 3.2 da referência [1] desenvolve este tema

- Um factor de restauro $FR = 1$ significa que o componente voltou ao estado de novo após a reparação (*as good as new*); a sua vida recomeça de 0;
- Um $FR = 0$ significa que o componente ficou no mesmo estado em que se encontrava antes da reparação (*as bad as old*); a sua vida recomeça com a mesma idade que tinha no momento da falha;
- Um factor de restauro de, por exemplo, $FR = 0{,}25$ significa que a sua vida recomeça com uma idade igual a 75% da idade que tinha no momento da falha.

Na prática, um componente reparável não o será indefinidamente, mas sim um número finito de vezes antes de ser descartado.

Pode ainda acontecer que, cada vez que um componente é reparado, o *FR* seja decrementado por uma taxa de progressão geométrica $\boldsymbol{g}$. Assim, por exemplo, no caso de um componente que recebe um número máximo de reparações igual a 3, para um $FR = 1$ e uma taxa de progressão geométrica $\boldsymbol{g} = 5\%$, ter-se-á como factores de restauro:

Após a 1ª reparação: $FR = 1$; Após a 2ª reparação: $FR = 1 \times (1 - 0{,}05) = 0{,}95$; Após a 3ª reparação: $FR = 0{,}95 \times (1 - 0{,}05) = 0{,}9025$; Após a 4ª reparação: $FR = 0{,}9025 \times (1 - 0{,}05) = 0{,}8574$, e assim sucessivamente até esgotar o número de reparações admissíveis ou até se revelar técnica e/ou economicamente inviável a sua continuidade. A Expressão a empregar é pois a seguinte:

$$FR_n = FR_{n-1}.(1 - \boldsymbol{g}) \qquad (4)$$

Uma achega ao que já foi dito no ponto 1.2.1: A determinação dos parâmetros, desta vez, FR e $\boldsymbol{g}$; embora fácil de realizar e sistematizar com uma rotina de programação em computador, requer uma grande disciplina da Organização de forma a assegurar que todos os dados pertinentes, ilustrados seguidamente neste exemplo, sejam recolhidos e mantidos num repositório[12]. O tratamento estatístico destes dados permite encontrar os valores de FR e de $\boldsymbol{g}$ até esse momento. Se o sistema não for alterado na perspectiva da fiabilidade (carga e ambiente), novos dados juntar-se-ão aos históricos e o cálculo dos parâmetros FR e $\boldsymbol{g}$ beneficiará de maior precisão. Se o sistema for alterado os dados históricos devem ser abandonados, já que não representam o novo sistema, e deve iniciar-se uma nova colheita.

Do cadastro do equipamento ao qual o componente em análise pertence, foi possível recolher as vidas úteis de cada componente após cada falha seguida de reparação, até ao limite permitido de 6 reparações. Quando a 7ª falha ocorreu, o componente foi substituído por outro novo e igual. Será portanto pertinente o conhecimento das vidas após a 1ª, 2ª, 3ª, 4ª, 5ª e 6ª falha. O Quadro 3 mostra os dados recolhidos de uma amostra de 12 componentes. A partir deste Quadro 3, ter-se-á agora de determinar os valores daqueles dois parâmetros FR e $\boldsymbol{g}$ de modo a introduzi-los sob a forma de variáveis de entrada (*inputs*) no modelo de simulação a construir.

Quadro 3 – Vidas após falha e reparação de uma amostra de 12 componentes

	Comp. 1	Comp. 2	Comp. 3	Comp. 4	Comp. 5	Comp. 6
Vida de novo até à 1ª falha	3.913	4.385	4.156	4.622	4.175	3.830
Vida após a 1ª falha e reparação	3.857	3.559	4.068	4.164	3.980	3.806
Vida após a 2ª falha e reparação	3.752	3.453	3.439	3.802	3.321	3.964
Vida após a 3ª falha e reparação	3.453	2.877	2.916	3.301	3.281	2.902
Vida após a 4ª falha e reparação	3.036	2.856	3.087	3.118	3.077	-
Vida após a 5ª falha e reparação	2.501	2.792	2.534	2.832	2.772	-
Vida após a 6ª falha e reparação	2.573	2.438	-	2.471	2.416	-

Comp. 7	Comp. 8	Comp. 9	Comp. 10	Comp. 11	Comp. 12	Médias
3.816	4.471	4.618	4.423	3.819	4.315	4.212
3.595	4.117	3.761	4.152	4.146	3.813	3.918
3.616	3.468	3.813	3.801	3.269	3.604	3.609
3.045	3.218	3.398	3.043	3.208	3.094	3.145
3.069	2.864	2.827	2.735	2.988	2.800	2.951
2.758	2.874	-	2.528	2.638	2.807	2.704
2.610	2.508	-	-	2.679	2.478	2.522

Ainda neste Quadro 3, pode constatar-se que os componentes 3, 6, 9 e 10 não suportaram, respectivamente, uma 6ª reparação, uma 4ª reparação, uma 5ª reparação e uma 6ª reparação e foram descartados.

[12] Os TTF terão necessariamente de ser codificados como “após primeira falha (reparação)”, após segunda falha (reparação), etc.

É agora necessário conhecer os parâmetros FR e ***g*** que melhor "expliquem" as durações de vida após a primeira, a segunda e assim sucessivamente até à sexta e última reparação tolerada. Para tal, as duas aplicações EXCEL da referência [1] "Factor restauro" e "Distribuição *Weibull*" servirão de apoio.

Na primeira aplicação introduzem-se os parâmetros da distribuição *Weibull* calculados anteriormente no ponto 1.2.1 nas células B4, B5 e B6: t_0 = 0 horas, α = 2,47 e β = 4.760 horas, respectivamente. Introduzem-se depois os sete valores de vida média após cada reparação (última coluna do Quadro 3) na coluna I (Vida média após reparação) entre as linhas 4 e 10. Todas as restantes linhas das colunas F, I e J podem ser apagadas. Poderão também ser apagadas na totalidade as colunas G e H, pois não participarão nos cálculos posteriores. Os valores dos parâmetros FR e ***g*** podem ser quaisquer nesta fase. A aplicação surgirá conforme mostra o Quadro 4.

Quadro 4 – Aplicação "Factor restauro" após o procedimento descrito no último parágrafo

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1										
2					Ordem	Idade Inicial		Rand()	Vida média	Idade Final
3				FR	reparação	II	*F*(II)	ajustado	após reparação	IF
4	t_0 =	0			1	0			4.212	4.212
5	α =	2,47		1	2	0			3.918	8.130
6	β =	4760		0,95	3	406			3.609	11.739
7	MTTF =	4222,167457		0,9025	4	1.145			3.145	14.883
8				0,857375	5	2.123			2.951	17.834
9	FR inicial =	1		0,81450625	6	3.308			2.704	20.538
10	Taxa progressão =	5,00%		0,773780938	7	4.646			2.522	23.060
11										

A idade inicial com que o componente é suposto ficar após cada reparação (coluna F do Quadro 4), precisa agora de ser determinada. A aplicação "Distribuição *Weibull*", fundamentada na Expressão (2), poderá apoiar este cálculo da forma seguidamente descrita.

Introduzem-se os parâmetros da distribuição *Weibull* calculados anteriormente no ponto 1.2.1 nas células N6, N7 e N8: t_0 = 0 horas, α = 2,47 e β = 4.760 horas, respectivamente. O incremento (célula N12) deve assumir um valor suficientemente alto para que a célula I24 mostre um valor igual à média da distribuição (célula H26 – MTTF = 4.222). O valor 600 satisfaz este requisito.

Segue-se um cálculo iterativo com o apoio do *Goal-Seek* para cada uma das 6 possíveis falhas. Assim, após a primeira falha a partir de novo – a qual ocorrerá em média às 4.212 horas –, qual será a vida equivalente com que o componente é suposto ficar após a correspondente reparação? Para encontrar a resposta, seguem-se os seguintes passos:

1. Na aplicação "Distribuição *Weibull*", invoca-se sucessivamente: *Data*, *What-If Analysis*, *Goal Seek*;
2. Na janela de diálogo do *Goal Seek* introduz-se: *Set cell*: K24, *To value*: 3.918, *By changing cell*: N2;
3. Na célula N2 surge o valor 309 que deve ser anotado.

Repetem-se os mesmos passos; de cada vez para um valor diferente da vida média (coluna I do Quadro 4) e obtém-se a coluna "Idade Inicial II" do Quadro 5.

Quadro 5 – Idade inicial equivalente, vida média e idade final

Vida	Idade Inicial II	Vida média após reparação	Idade Final IF
Vida de novo até à 1ª falha	0	4.212	4.212
Vida após a 1ª falha e reparação	309	3.918	8.130
Vida após a 2ª falha e reparação	642	3.609	11.739
Vida após a 3ª falha e reparação	1.196	3.145	14.883
Vida após a 4ª falha e reparação	1.454	2.951	17.834
Vida após a 5ª falha e reparação	1.812	2.704	20.538
Vida após a 6ª falha e reparação	2.103	2.522	23.060

Para determinar finalmente os valores dos parâmetros FR e ***g*** que melhor descrevem estas vidas médias após cada reparação, há que confrontar a coluna F da aplicação "Factor restauro" com os valores de Idade Inicial (II), acabados de obter através do *Goal-Seek* (segunda coluna do Quadro 5). Como a coluna F da aplicação "Factor restauro" depende dos valores de FR e ***g*** inscritos, respectivamente, nas células B9 e B10, é preciso saber quais deverão ser afinal estes valores – e não os mostrados na segunda coluna do Quadro 5 –, de modo a que as diferenças entre as várias linhas das duas colunas seja mínima[13].

Para prosseguir, introduzem-se os valores de "Idade inicial" constantes na segunda coluna do Quadro 5 num qualquer lugar na aplicação "Factor restauro". Calculam-se os desvios (ou erros) absolutos linha a linha $|\varepsilon_i|$ entre aquelas duas colunas e somam-se, obtendo-se assim um erro global absoluto $\varepsilon_g = \Sigma|\varepsilon_i|$ que deve ser minimizado (Expressão 5). Obter os valores de FR e $\boldsymbol{g}$ que minimizam este erro global, constitui um objectivo de um problema de optimização matemática, o qual pode ser resolvido recorrendo ao algoritmo GRG *Nonlinear* residente no EXCEL, fazendo sucessivamente *Data* e *Solver*[14].

$$\text{Min } [\varepsilon_g = f(\text{FR}, \boldsymbol{g})] \qquad (5)$$

Após o acrescento de mais duas colunas à direita do Quadro 4 e o cálculo do SOLVER, obtém-se o Quadro 6. O erro global absoluto ε_g figura na célula L11. Ver também a janela de diálogo do SOLVER na Figura 4 e, em particular, a programação introduzida.

Quadro 6 – FR e g após a minimização do desvio absoluto global usando o SOLVER na aplicação "Factor restauro"

	A	B	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1											
2–3			FR	Ordem reparação	Idade Inicial II	F(II)	Rand() ajustado	Vida média após reparação	Idade Final IF	Weibull	Desvios
4	t_0 =	0		1	0			4.212	4.212	0	0,0000
5	α =	2,47	0,909485693	2	381			3.918	8.130	309	72,2616
6	β =	4760	0,907086364	3	755			3.609	11.739	642	113,3796
7	MTTF =	4222,167457	0,904693365	4	1.119			3.145	14.883	1.196	77,2303
8			0,902306679	5	1.454			2.951	17.834	1.454	0,0032
9	FR inicial =	0,909485693	0,89992629	6	1.785			2.704	20.538	1.812	27,2584
10	Taxa progressão =	0,26%	0,89755218	7	2.104			2.522	23.060	2.103	1,1224
11			0,895184333	8							291,2554

Pode-se constatar que, para um erro global absoluto ε_g = 291,2554, o valor de FR resultou aproximadamente igual a 0,91 e que a degradação deste factor é desprezável, pois $\boldsymbol{g} \cong 0\%$.

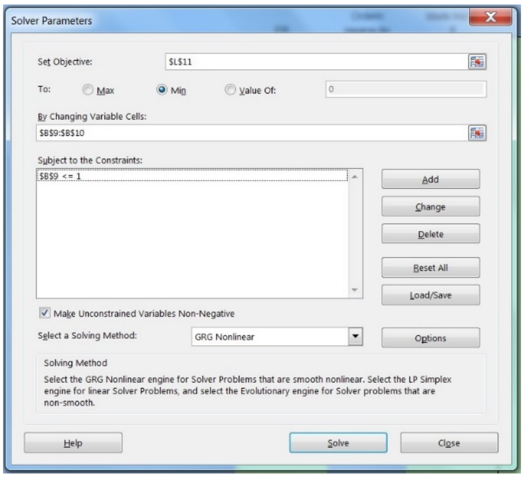

***Figura 4** – Janela de diálogo do **SOLVER** com o algoritmo de optimização matemática não linear **GRG** selecionado para cálculo dos parâmetros **FR** e g*

[13] Idealmente estas diferenças deveriam ser nulas. Porém, está-se, no domínio da estatística, estudando uma amostra colhida aleatoriamente, pelo que não se pode pretender a obtenção de um tal grau de precisão.

[14] O Solver talvez necessite ser activado. Para o conseguir, fazer: *File, Options, Add-Ins, Go, Solver Add-in* (seleccionar)

2. Modelo de simulação

Um modelo de simulação não é mais do que uma forma simplificada de representação da realidade de um sistema – muitas vezes praticamente impossível de conseguir –, de modo a evitar detalhes que pouco ou nada pesam no objectivo do estudo e só acrescentam complexidade e custo económico [2]. Um modelo é pois uma representação simplificada das relações de dependência entre as variáveis de um sistema.

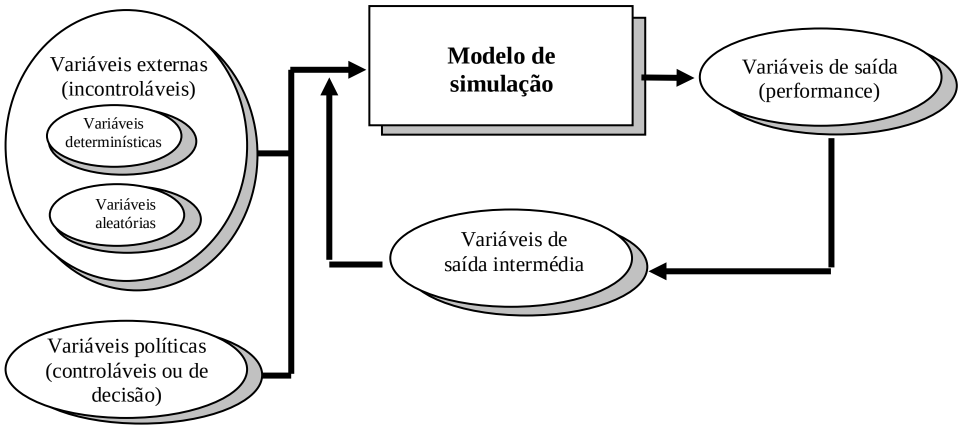

Figura* 5 – *Variáveis num modelo de simulação

Um modelo é descrito por equações matemáticas que representam relações existentes entre as variáveis do sistema. Resolvendo numericamente estas equações "simula-se" o funcionamento do sistema e pode-se, de forma rápida, segura e económica, encontrar as respostas à questão: "O que é que acontece se...?". A Figura 5 ilustra o papel desempenhado por cada variável num modelo de simulação[15].

2.1 Lógica do modelo construído

O segmento de recta da Figura 6 representa o horizonte temporal ao longo do qual decorrerá a vida restante simulada do componente sob estudo. Assim, e de acordo com os dados, o componente acumulou já duas reparações (restam-lhe quatro), possui a idade de 1.300 horas e deve ser removido de serviço quando a sua idade atingir 15.000 horas. Restam-lhe pois 15.000 – 1.300 = 13.700 horas. O intervalo ΔT é o período de antecipação, cujo valor se pretende ensaiar, de forma a encontrar aquele que minimiza a soma dos custos pertinentes.

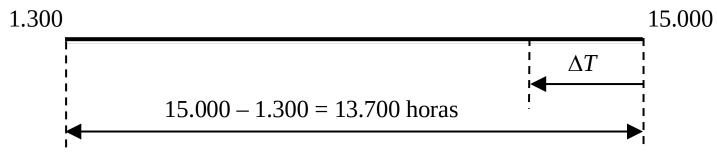

Figura* 6 – *Horizonte temporal de simulação de falhas do componente

Em cada corrida do simulador, poderão observar-se três padrões de sequência aleatórias das 5 ou menos falhas restantes (as primeiras, possivelmente até 4, serão ainda reparáveis):

1. Todas as falhas restantes ocorreram entre 1.300 horas e 15.000 - ΔT horas. Nesta circunstância, o componente é removido imediatamente após a 5ª falha (1.300 < Idade de substituição < 15.000 - ΔT);
2. Nem todas as falhas restantes ocorreram até às 15.000 horas (algumas ocorreriam depois deste limite) e nenhuma ocorreu no intervalo ΔT horas. Nesta circunstância, o componente é removido obrigatoriamente logo que acumula as 15.000 horas (Idade de substituição = 15.000);

[15] A descrição deste tema bem como numerosos modelos aplicados em gestão operacional encontram-se na referência bibliográfica [2]

3. Uma ou mais falhas ocorreram dentro do intervalo ΔT horas. Nesta circunstância, o componente é removido logo que ocorre a primeira falha dentro deste intervalo ΔT horas (15.000 - ΔT < Idade de substituição < 15.000).

Em cada corrida do simulador, calcula-se o custo total actualizado à taxa de 20% ano, igual à soma de três naturezas de custos:

1) Os custos das reparações das falhas que terão eventualmente ocorrido;
2) Os custos de oportunidade consequentes;
3) O custo de investimento num novo componente quando o componente actual atinge o fim da sua vida útil acumulada (15.000 horas) ou o número de reparações ainda toleradas (faltam 4).

Em cada corrida do simulador verifica-se que o momento fim da análise é variável – apenas o seu início é comum (1.300 horas) – ou seja, os custos são gerados durante períodos diferentes em cada corrida. Nesta circunstância, os custos actualizados e somados em cada corrida (€) têm de ser uniformizados no período em que são gerados de forma a serem comparáveis [1], [4]. As Expressões (6) e (7) permitem dar estes passos.

$$P = F.(1+i)^{-n} \qquad (6)$$

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

De modo a obter-se uma leitura dos custos em unidades mais comuns – optou-se por €/dia – a taxa anual i foi transformada para a sua equivalente diária i_d, tendo em conta que o regime médio do equipamento ao qual o componente em análise pertence é de 340 dias/ano.

$i_d = (1 + 0{,}2)^{(1/340)} - 1 = 0{,}0536\%$ dia calendário

Por outro lado, as actualizações têm de ter em conta não só esta taxa diária como a conversão de horas acumuladas de funcionamento em dias de calendário. Assim, como o regime médio do equipamento ao qual o componente em análise pertence é de 21 horas úteis/dia e o coeficiente de simultaneidade deste é 0,85, o regime médio de funcionamento do componente é pois 21 x 0,85 = 17,85 horas úteis/dia calendário. Todos os cálculos dos custos no modelo de simulação tiveram pois em conta estas conversões.

2.2 Resultados do modelo construído

O modelo construído simula pois em cada corrida a "história" de falhas geradas aleatoriamente seguidas das consequentes reparações e calcula, após centenas de repetições, o custo total esperado de cada alternativa do período de antecipação ΔT.

Os Quadros 7 e 8 mostram imagens de parte do modelo numérico construído no EXCEL, no qual as variáveis determinísticas e aleatórias vão interagir. Este modelo é seguida e brevemente descrito.

Quadro 7 – Idades iniciais e finais após reparações do componente

		Idade Inicial		Rand()		Idade Final
FR	Nº ciclos	II	*F*(II)	ajustado	Vida	IF
	0	0	0	0,583329934	4.510	4.510
0,91	1	406	0,002284121	0,437195341	3.398	7.909
0,91	2	1.300	0,039717342	0,155809343	1.020	8.928
0,91	3	804	0,012274204	0,283796048	2.249	11.177
0,91	4	1.006	0,021282371	0,861117168	5.263	16.440
0,91	5	1.480	0,054265659	0,707067646	3.693	20.133
0,91	6	1.812	0,087925461	0,703868323	3.342	23.475

Neste Quadro 7 – obtido recorrendo à programação da aplicação EXCEL "Factor restauro" que acompanha a referência [1] – mostra-se o resultado de uma iteração no qual se pode observar: na terceira coluna 1.300 horas já decorridas após a segunda reparação (segunda coluna) e próximas idades iniciais (fictícias, ou seja, que o componente é suposto possuir após cada reparação); na sexta coluna as durações de vida restante após cada falha/reparação e na sétima coluna as idades às quais ocorre cada falha (o componente teria sido descartado às 23.475 horas se não fosse o limite imposto de 15.000 horas).

Quadro 8 – Resultado de uma corrida do modelo construído

	Filtro nº reparações		Filtro intervalo tempo						
		Tempo funcionamento acumulado	Tempo funcionamento acumulado	Tempo funcionamento acumulado	Tempo funcionamento + Tempo reparação		Custos actualizados		
Ordem	TTF	Σ TTF	Σ TTF	Σ TTF	Pára	Arranca	Reparações	Oportunidade	Investimento
							€	€	€
1	1.020	8.928	8.928	8.928	8.928	8.958	92	421	-
2	2.249	11.177	11.177	11.177	11.207	11.237	86	393	-
3	5.263	16.440	16.440	15.000	16.500	-	-	-	822
4	3.693	20.133	-	-	-	-	-	-	-
5	3.342	23.475	-	-	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12	-	-	-	-	-	-	-	-	-

O Quadro 8 mostra o resultado de uma corrida do simulador tendo como *inputs*, para além de outros, a segunda e a terceira colunas com os resultados sombreados do Quadro 7.

- A quarta coluna "filtra" a terceira coluna, de modo a garantir que a análise posterior não tem em conta senão somente os três padrões de sequências aleatórias descritas anteriormente;
- A quinta coluna "filtra" a quarta coluna de modo a garantir que a vida útil limite não exceda as 15.000 horas – pode ver-se na quarta coluna que o componente falharia às 16.440 horas de funcionamento, porém, na quinta coluna esta duração é impedida e imposta em 15.000 horas;
- A sexta coluna mostra os momentos de falha seguidas de reparação;
- A sétima coluna mostra a soma dos momentos de falha (sexta coluna) com os tempos de reparação (30 horas);
- A oitava coluna calcula os custos das reparações (120 €/reparação) resultantes das falhas originadas na sexta coluna e actualiza-os;
- A nona coluna calcula os custos de oportunidade (550 €/paragem) originados durante as paragens para reparação e actualiza-os;
- A décima coluna actualiza o custo do investimento num novo componente (1.350 €) quando o componente actual atinge 6 + 1 falhas a partir de novo ou 15.000 horas de vida útil – o que acontecer primeiro.

O simulador está pronto e pode agora ser corrido, para diferentes valores do período de antecipação ΔT, o número de vezes que se pretender, de forma a conseguir-se significância estatística suficiente, o que passa normalmente por conseguir um erro amostral ε inferior a um valor limite considerado aceitável pelo analista.

O simulador foi completado com uma macro que permite correr 10 alternativas seguidas de valores ΔT, começando com um valor à escolha e intervalados depois de um incremento também à escolha. O Quadro 9 mostra o Quadro deste método numérico programado com a macro e após 500 corridas de cada ΔT alternativo. Este Quadro resultou obviamente de uma série de tentativas (alterando o incremento e o valor da primeira linha da primeira coluna) na busca de um eventual custo mínimo, o qual, embora pouco significativo/sensível a variações de ΔT, conforme se pode constatar na terceira coluna do Quadro 9, foi conseguido aproximadamente às 3.000 horas.

***Quadro 9 – Resultado após 500 corridas de cada ΔT* alternativo**

		Período de antecipação ΔT	Custo de manutenção	Acréscimo ao custo mínimo (%)
Incremento =	200			
	Começando com:	2.000	2,20	4,81%
		2.200	2,18	3,95%
		2.400	2,19	4,23%
		2.600	2,18	3,99%
		2.800	2,17	3,45%
		3.000	2,10	0,00%
		3.200	2,11	0,56%
		3.400	2,16	2,74%
		3.600	2,15	2,61%
		3.800	2,17	3,30%

Ou seja, a acção mais económica quando o componente tem 1.300 horas de funcionamento acumulado após a segunda reparação, é substituí-lo quando tiver acumulado uma vida em serviço de 15.000 – 3.000 = 12.000

horas e não esperar até ao limite de 15.000 horas. Ou seja, o período óptimo de antecipação ΔT (correspondente ao custo económico mínimo) é $\Delta T \cong 3.000$ horas.

É interessante notar que à medida que o custo de compra do componente vai aumentando, o período óptimo de antecipação ΔT vai diminuindo, o que confirma o raciocínio lógico e intuitivo de que o custo elevado de compra deve ser adiado, tanto quanto for possível. Em sentido contrário, pode notar-se que o período óptimo de antecipação ΔT cresce tanto mais quanto maior for o custo de uma intervenção (reparação + oportunidade), pois interessa evitar períodos médios de vida útil progressivamente menores após cada reparação.

Outra abordagem que poderia ser seguida em alternativa à optimização por tentativas, consistiria, simplesmente, em comparar o custo total uniforme fazendo $\Delta T = 0$, com o custo obtido assumindo um valor específico de ΔT, de modo a apurar se seria economicamente vantajoso antecipar a substituição do componente de ΔT.

3. Conclusão

O caso aqui tratado admite uma variante mais simples: Caso de um ou mais componentes não reparáveis que deverão ser substituídos preventivamente quando tiverem acumulado diferentes tempos de funcionamento e que se confrontam com a oportunidade de o serem um pouco antes, aproveitando a paragem do equipamento ao qual pertencem, causada pela falha de um outro componente. Ou seja, qual ou quais os componentes que, sendo substituídos antecipadamente, originariam um custo económico inferior ao que se verificaria se as datas previstas de substituição preventiva de cada um deles fossem cumpridas?

Outra variante da prática da manutenção de oportunidade consiste na chamada "substituição em grupo". Tendo em conta os comportamentos em falha, os tempos e os custos das intervenções correctivas e preventivas de cada um dos componentes de um grupo e, em alternativa, o tempo e o custo de uma substituição colectiva, será interessante conhecer qual deverá ser a periodicidade óptima de substituição de todo o grupo, isto é, a periodicidade que minimiza a soma de todos os custos – da intervenção global e das intervenções individuais correctivas que se verificarão entretanto. O custo resultante da periodicidade óptima deve seguidamente ser comparado com a soma de todos custos resultantes da prática da manutenção preventiva individual. Invariavelmente, confirma-se um princípio básico da teoria de sistemas: "o óptimo do todo nem sempre é igual à soma dos óptimos das partes".

Será interessante notar que as conclusões poderão alterar-se, à medida que o tempo vai passando e as variáveis que integraram a análise deste caso são actualizadas com novos valores. Hoje (passadas 1.300 horas de funcionamento do componente), concluímos que será mais económico substituir o componente quando acumular 12.000 horas em lugar de o substituir quando atingir 15.000 horas. Mas, dentro de mais umas centenas ou milhares de horas, talvez que esta conclusão, ao refazer-se o cálculo, não se mantenha.

O caso aqui analisado, embora fictício, foi propositadamente "enriquecido" com muitas variáveis – umas mais influenciadoras do resultado final do que outras e serve para contrastar com o *deficit* generalizado de uso de métodos quantitativos de análise fiabilística e financeira, por parte da comunidade dos gestores da Manutenção. *Deficit* este, do âmbito misto da Engenharia e da Gestão, que urge ultrapassar na progressão da gestão da Manutenção para a gestão de Activos.

A falta de informação sobre o comportamento em falha de componentes continuará a constituir uma razão para que a gestão de activos se veja comprometida. Os CMMS permitem acumular imensa informação devidamente escrutinada a começar por um sistema de codificação que inclua os modos de falha e, também como este artigo mostra, a ordem das reparações dos componentes reparáveis.

Para além de um CMMS e de uma organização detentora de um sistema de codificação adequado – a ISO 14224 poderá constituir uma base – convirá aproveitar os enormes avanços conseguidos nos últimos anos ao nível dos dispositivos de sensorização inteligente, do *software* de redes e dos protocolos de comunicação que contrariam a "babilonização" quando equipamentos e dispositivos muito diferentes devem desejavelmente interactuar, de modo a cumprir os objectivos da 4ª revolução industrial (Indústria 4.0) em curso.

Uma vez mais o autor desejou demonstrar até que ponto é possível modelar sistemas complexos, contendo muitas variáveis que interagem, sob a forma de modelos matemáticos e resolvê-los por métodos numéricos em lugar de métodos analíticos (algébricos) muitas vezes insuficientes e carentes de pressupostos simplificadores. Acresce que, conforme o que se passa comummente em fiabilidade e manutibilidade, algumas das variáveis são aleatórias, obrigando ao cálculo de probabilidades, às técnicas de simulação numérica e ao recurso a ferramentas da estatística para apurar resultados intermédios e finais. Acresce ainda que, em Gestão de Activos, não basta chegar até este ponto de análise com recurso às ferramentas e boas práticas da Engenharia; é preciso também traduzir as vantagens técnicas em "linguagem" de Gestor, isto é "dinheiro". O cálculo financeiro satisfaz esta necessidade, porém e infelizmente, só é ensinado nas Escolas de Gestão – deveria estar presente nos programas de todos os cursos de Engenharia (excepção honrosa no caso dos mestrados de Engenharia e Gestão Industrial). Valor e custo traduzidos em dinheiro é o que a Gestão de topo verdadeiramente entende e o Engenheiro deve possuir a competência de os saber calcular e transmitir, de forma a evitar o "diálogo de surdos" que de outra forma se estabelece.

Um ativo tem de ser gerido numa óptica integrada de Eficácia e Eficiência, isto é, não é suficiente cumprir os objectivos (ser-se eficaz); há que fazê-lo utilizando os recursos de uma forma optimizada (ser-se eficiente), isto é, procurando continuamente gerir os activos para a vida económica. Com efeito, um activo deve ser substituído quando for mais económico[16] e não somente quando entra numa fase de degradação crescente. Uma decisão de substituição deve sempre basear-se na economia das condições operacionais futuras – apenas os custos presentes e futuros interessam (será expectável assistir a um progressivo aumento dos custos dos produtos industriais e de consumo, à medida que muitos custos resultantes do impacto negativo no ambiente e que actualmente são externalizados – a Comunidade paga! – passarem a ser internalizados na origem); os custos passados são irrecuperáveis (*sunk costs*) e, como tal, irrelevantes para a análise. Em consequência, os custos passados devem ser desprezados. Foi esta uma regra seguida neste artigo.

Isto não significa que a atitude do Gestor de Activos deva ser passiva – antes pelo contrário –, deve promover continuamente o aumento dos proveitos (redução de custos de O&M e de oportunidade, pela via de uma boa organização e de uma actualização tecnológica esclarecida). Deste modo, estará contribuindo para o aumento da vida útil dos activos e, assim, para um dos desígnios da Economia Circular – se a obsolescência de mercado, entretanto, não se sobrepuser.

Uma última palavra sobre o momento de substituição: Contrariar a "obsolescência física planeada" constitui uma das responsabilidades éticas do Engenheiro empenhado em contribuir para a sustentabilidade da espécie humana no planeta Terra. Para cumprir com essa responsabilidade, o Engenheiro encarregue da GESTÃO DA MANUTENÇÃO, ou da GESTÃO DE ACTIVOS (cometido de mais responsabilidades) deve impor características de efectiva manutibilidade nos equipamentos industriais e domésticos, ainda na fase de projecto. Contrariar a "obsolescência tecnológica" não fará sentido. Porém, contrariar a "obsolescência de mercado" (moda) estará sempre ao seu alcance como cidadão ética e ambientalmente responsável.

Referências bibliográficas

[1] ASSIS, Rui, "Apoio à Decisão em Manutenção na Gestão de Activos Físicos", Lisboa, LIDEL, 2ª edição, 2014

[2] ASSIS, Rui "EXCEL na Simulação de Sistemas e Análise de Risco", AMAZON, 2014

[3] EBELING, Charles E., "*Reliability and Maintainability Engineering*", Boston, Massachusetts, McGraw-Hill, 1997

[4] CANADA, John R. Canada, William G. Sullivan, *Capital Investment Analysis for Engineering and Management*, Pearson, Ltd., 3ª edition, U.K., 2004

[5] "*Handbook of Reliability Prediction Procedures for Mechanical Equipment*", *Naval Surface Warfare Center, Carderock Division*, 2011

[16] …isto é, quando o somatório dos custos de Operação e Manutenção (O&M), do custo do investimento e do custo de oportunidade (eventual proveito com a venda para o mercado de usados ou sucata). Ver o ponto 7.3.1 da referência [1].