

Determinação do Factor de Restauro

Rui Assis
rassis46@gmail.com
www.rassis.com

Resumo

Analisa-se neste artigo o caso relativamente comum de componentes que são recuperados/reparados após falharem por um modo de degradação, até um determinado número limite de vezes sob pena de o seu desempenho ser comprometido. É o caso comum de pneus recauchutados numa frota de veículos. Com efeito, verifica-se na prática, que a vida útil de um componente reparado de uma falha anterior, após sofrer uma nova falha e consequente reparação, diminui segundo uma taxa aproximadamente constante ou progressivamente crescente que interessa ser calculada, de modo a estimar quando o componente terá de ser substituído por outro novo. Este período total de vida deve ser considerado no plano de actividades e orçamento dos custos previsionais de manutenção. Para este efeito, parte-se do conhecimento dos parâmetros da distribuição teórica de probabilidade de falha, determinados por um método estatístico de aderência/ajustamento, e do histórico de períodos de vida útil após cada reparação de componentes anteriores iguais e sucessivamente substituídos. O EXCEL permite calcular o Factor de Restauro (FR) e o gradiente g através de um método iterativo exemplificado neste artigo. Os resultados podem ser comprovados com o recurso a duas aplicações EXCEL residentes no *website* do autor.

Palavras-chave: Vida útil, Distribuição Weibull, Teste de ajustamento, *Goal-Seek*, Optimização matemática, *Solver*, GRG *Nonlinear*,

O autor adopta o anterior acordo ortográfico.

Introdução

Alguns componentes de sistemas podem ser reparados, embora um número limitado de vezes, devido a deterioração progressiva das suas características intrínsecas – casos da recauchutagem de pneus e do revestimento de veios – ou da alteração dimensional para valores fora dos limites da tolerância, como no caso das rodas de um *bogie*, em resultado da rectificação do rasto e correspondente diminuição do diâmetro. Na prática, as empresas que lidam frequentemente com esta questão fixam um número limite de vezes de restauro/reparação.

Para quantificar esta situação, define-se um Factor de Restauro (FR). Este factor exprime a percentagem da vida útil anterior da qual o componente poderá beneficiar na vida útil posterior após cada reparação. O FR é 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, conseqüentemente, 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” ($0 \leq FR < 1$).

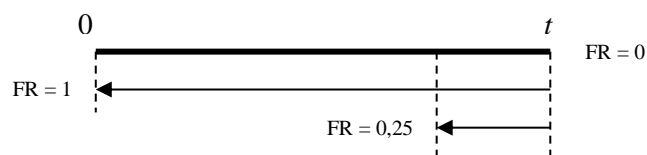


Figura 1 – Um exemplo do conceito “Factor de Restauro” FR

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 1):

- 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.

Pode ainda acontecer que, cada vez que um componente é reparado, o FR seja decrementado segundo uma taxa de progressão geométrica 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 $g = 5\%$, 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:

$$FR_n = FR_{n-1} \cdot (1 - g) \quad (1)$$

A determinação dos parâmetros FR e g , embora fácil de realizar e sistematizar com uma rotina de programação computacional, requer uma grande disciplina da Organização de forma a assegurar que todos os dados pertinentes, ilustrados seguidamente neste exemplo, sejam recolhidos e mantidos num repositório¹. O tratamento estatístico destes dados permite encontrar os valores de FR e de 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 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.

¹ Os TTF terão necessariamente de ser codificados como “após primeira falha (reparação)”, após segunda falha (reparação), etc.

Exemplo de aplicação

No cadastro de um equipamento, foram registadas as vidas úteis de um determinado 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 1 mostra os dados recolhidos de uma amostra de 12 componentes. A partir deste Quadro, ter-se-á de determinar os valores daqueles dois parâmetros FR e g de modo a tê-los em conta em cálculos posteriores ou, simplesmente, para determinar a data na qual o componente terá de ser substituído por outro novo igual/equivalente.

Quadro 1 – 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 1, pode-se constatar 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.

Pretende-se agora 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 restauo” e “Distribuição Weibull” servirão de apoio. Poderão, todavia, ser usadas as novas versões destas duas aplicações, as quais se encontram residentes no *website* do autor sob as designações: “Factor restauo_nv” e “Distribuição Weibull_nv” em “Manutenção de Sistemas”.

O tratamento estatístico, pelo método de regressão, dos tempos observados até à 1ª falha deste mesmo componente, permitiu deduzir os parâmetros da distribuição de probabilidade de Weibull de melhor aderência àqueles dados empíricos. Foram eles os seguintes: $\alpha = 2,47$, $\beta = 4.760$ horas e $t_0 = 0$ horas, com um coeficiente de determinação $r^2 = 0,9372$.

Na aplicação “Factor restauo” introduzem-se os parâmetros da distribuição Weibull nas células B4, B5 e B6: $t_0 = 0$ horas, $\alpha = 2,47$ e $\beta = 4.760$ horas, respectivamente. Introduzem-se depois os sete valores de vida média após cada reparação (última coluna do Quadro 1) 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 2.

Quadro 2 – Aplicação “Factor restauo” após o procedimento descrito no último parágrafo

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

A idade inicial com que o componente é suposto ficar após cada reparação (coluna F do Quadro 2), precisa agora de ser determinada. A aplicação “Distribuição Weibull”, apoia este cálculo da forma seguidamente descrita: Introduzem-se os parâmetros da distribuição Weibull calculados anteriormente nas células N6, N7 e

N8: $t_0 = 0$ horas, $\alpha = 2,47$ e $\beta = 4.760$ 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 2) e obtém-se a coluna “Idade Inicial II” do Quadro 3.

Quadro 3 – 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 3). 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 2 –, de modo a que as diferenças entre as várias linhas das duas colunas seja mínima².

Para prosseguir, apaga-se a programação das colunas G e H de modo a não interferirem nos cálculos posteriores. Seguidamente, introduzem-se os valores de “Idade inicial” constantes na segunda coluna do Quadro 3 num qualquer lugar na aplicação “Factor restauro” (coluna K, por exemplo). Calculam-se (na coluna L, por exemplo) os desvios/erros absolutos linha a linha $|\varepsilon_i|$ entre aquelas duas colunas (F e K) e somam-se, obtendo-se assim um erro global absoluto $\varepsilon_g = \sum |\varepsilon_i|$ que deve ser minimizado (Expressão 2). Obter os valores de FR e 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*³.

$$\text{Min } [\varepsilon_g = f(\text{FR}, g)] \quad (2)$$

Após a adição das duas colunas K e L à direita do Quadro 3 e uma vez “corrido” o SOLVER, obtém-se o Quadro 4. O erro global absoluto ε_g figura na célula L11. Ver também a janela de diálogo do SOLVER na Figura 1 e, em particular, a programação introduzida.

² 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.

³ O Solver talvez necessite ser activado. Para o conseguir, fazer: *File*, *Options*, *Add-Ins*, *Go*, *Solver Add-in* (seleccionar)

Quadro 4 – FR e g após a minimização do desvio absoluto global usando o SOLVER na aplicação “Factor restauro”

	A	B	C	D	E	F	G
1							
2							
3				FR	Ordem reparação	Idade Inicial	F(I)
4	$t_0 =$	0		0,909485693	1	0	
5	$\alpha =$	2,47		0,907086364	2	381	
6	$\beta =$	4760		0,904693365	3	755	
7	MTTF =	4222,167457		0,902306679	4	1.119	
8				0,89992629	5	1.454	
9	FR inicial =	0,909485693		0,89755218	6	1.785	
10	Taxa progressão =	0,26%		0,895184333	7	2.104	
11					8		

	H	I	J	K	L
	Rand() ajustado	Vida média após reparação	Idade Final IF	Weibull	Desvios
		4.212	4.212	0	0,0000
		3.918	8.130	309	72,2616
		3.609	11.739	642	113,3796
		3.145	14.883	1.196	77,2303
		2.951	17.834	1.454	0,0032
		2.704	20.538	1.812	27,2584
		2.522	23.060	2.103	1,1224
					291,2554

Pode-se constatar que, para um erro global absoluto $\varepsilon_g = 291,2554$, o valor de FR resultou aproximadamente igual a 0,91 e que a taxa de progressão deste factor é desprezável, pois $g = 0,26 \cong 0\%$.

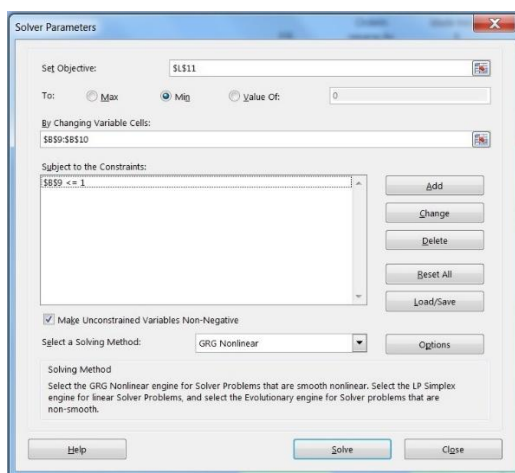


Figura 1 – Janela de diálogo do SOLVER com o algoritmo de optimização matemática não linear GRG selecionado para cálculo dos parâmetros FR e g

1. Conclusão

No caso de um orçamento de actividades, poder-se-ia tomar aproximadamente 23.000 horas como vida útil total deste componente, durante a qual teriam ocorrido 6 falhas seguidas de outras tantas reparações, cada qual com um determinado custo estimado da operação de recuperação.

O caso aqui tratado admite uma variante. 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 conseqüente custo económico com reparações.

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.

Referências bibliográficas

- [1] ASSIS, Rui, “Apoio à Decisão em Manutenção na Gestão de Activos Físicos”, Lisboa, LIDEL, 2ª edição, 2014 http://www.rassis.com/livro_ADMGAF.html
- [2] ASSIS, Rui “EXCEL na Simulação de Sistemas e Análise de Risco”, AMAZON, 2014 http://www.rassis.com/livro_SSAR.html
- [3] ASSIS; Rui, “Engenharia Económica com o EXCEL – Casos de Apoio à Decisão”, LIDEL, 2021 http://www.rassis.com/livro_EEE_CAD.html
- [4] EBELING, Charles E., “*Reliability and Maintainability Engineering*”, Boston, Massachusetts, McGraw-Hill, 1997
- [5] “*Handbook of Reliability Prediction Procedures for Mechanical Equipment*”, Naval Surface Warfare Center, Carderock Division, 2011