

Substituição em grupo de componentes de desgaste rápido sujeitos às políticas alternativas de manutenção correctiva, preventiva sistemática e preventiva preditiva

Rui Assis ⁽¹⁾, José Sobral ⁽²⁾, João Ribeiro ⁽³⁾
rassis@rassis.com (www.rassis.com), jsobral@dem.isel.ipl.pt, jpr@tdgi.pt

⁽¹⁾ *Faculdade de Engenharia da Universidade Lusófona e Associação Portuguesa de Manutenção Industrial, Portugal*

⁽²⁾ *Instituto Superior de Engenharia de Lisboa (ISEL) e Centro de Engenharia e Tecnologia Naval e Oceânica (CENTEC), Portugal*

⁽³⁾ *Instituto Superior de Engenharia de Lisboa (ISEL) e Tecnologia de Gestão de Imóveis (TDGI S.A.)*

Resumo

Diversos prestadores de serviços de manutenção de equipamentos de Tomografia Computorizada (TC) da especialidade de imagiologia, efetuam cada vez mais serviços de manutenção em equipamentos multimarca. Têm como objetivo “concorrer” com as empresas fabricantes e/ou representantes de marcas desses equipamentos, propondo serviços de manutenção mais eficientes aos seus clientes.

Estes equipamentos possuem um grupo de escovas cuja função consiste em transferir energia elétrica e sinais de comando da parte fixa da *Gantry* para a sua parte móvel através do contacto com os anéis (*slip-rings*), as quais se degradam por efeito conjunto de atrito e fadiga. Os fabricantes e representantes locais deste tipo de equipamentos adotam a prática de efetuar a substituição preventiva deste grupo de escovas com a periodicidade anual. Entretanto, se uma escova é causa de um defeito, todas as escovas são substituídas correctivamente.

O presente trabalho mostra como determinar os principais indicadores (sobretudo disponibilidade e custos) resultantes da prática simulada das políticas alternativas de manutenção correctiva (MC) e preditiva (MP), com base no conhecimento previsional do desgaste das escovas ao longo do tempo de funcionamento.

Com base numa amostra de 5 escovas pertencentes a um bloco contendo 20 unidades e recorrendo a uma análise estatística, deduz-se o comportamento em falha do conjunto e prevê-se quando o desgaste limite tolerado será atingido.

Um modelo de simulação numérica de Monte-Carlo construído no EXCEL permite depois deduzir os valores esperados daqueles indicadores, tendo em conta a natureza estocástica dos momentos de falha. Este caso constitui mais um exemplo de construção de modelos de sistemas complexos, com os quais a Engenharia de Manutenção se defronta, usando apenas programação de lógica operacional.

Palavras-chave: Tomografia computadorizada, *Gantry*, Distribuição Normal, Manutenção preditiva, Simulação de Monte-Carlo, Custos de manutenção, teste de aderência de KS, Algoritmo GRG do EXCEL.

Os autores adoptam o anterior acordo ortográfico.

1. Introdução à Tomografia Computorizada (TC)

Em 1973, Godfrey Hounsfield ganhou o Prémio Nobel de Física pela participação no desenvolvimento da TC. Há vários tipos de aparelhos e de gerações de TC, as suas diferenças estão relacionadas com a emissão dos raios X devido às características tecnológicas das ampolas, dos detetores devido à disposição e quantidade, do movimento da mesa devido à sua versatilidade, rapidez e precisão de movimentos e do conjunto ampola-detector que possibilita a utilização da dupla energia [1].

Existem alguns equipamentos com diferentes tecnologias de dupla energia. Nomeadamente as TC *dual source, fast switching e spectral detector*, conforme a Figura 1 documenta.

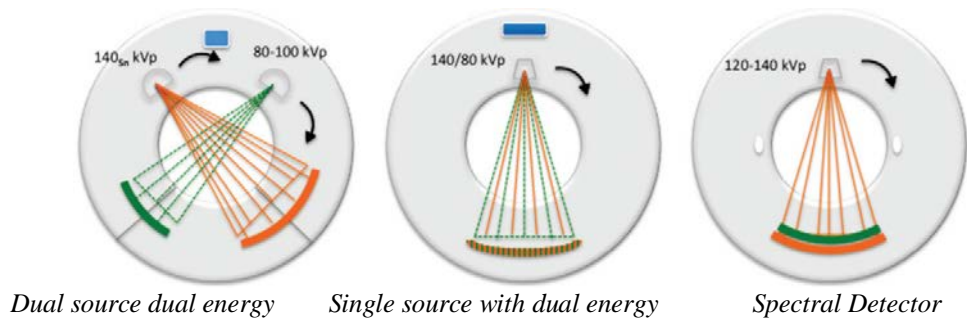


Figura 1 – Representação de três modelos de TC de dupla energia disponíveis comercialmente [2]

A TC é uma técnica de imagem que combina os fundamentos de radiologia convencional (raios X) com um sistema sofisticado de computadores, que permitem formar uma imagem a partir dos sinais obtidos num conjunto de detetores sobre os quais incidem os raios X depois de atravessarem o paciente. Os raios X são produzidos por uma ampola localizada no interior do equipamento e que roda em torno do paciente, emitindo radiação na forma de um feixe colimado. Na Figura 2 têm-se uma visão geral de uma sala de exames de TC.



Figura 2 – Visão geral de uma sala de exames de TC [3]

Legenda da **Figura 2**: 1– Acessórios; 2– TC; 3– Permutador de calor; 4– Armário de alimentação eléctrica; 5– Sistema de reconstrução de imagem; 6– Mesa; 7– Consola (computadores, teclado, rato, caixa de controlo, monitor, discos de armazenamento).

Para realização do exame, a mesa movimenta-se na horizontal no interior do túnel, os detetores (dispostos em círculo e colocados diametralmente opostos à ampola) recolhem a informação resultante das diferenças de absorção da radiação pelos tecidos do corpo humano, conforme se exemplifica na Figura 3.

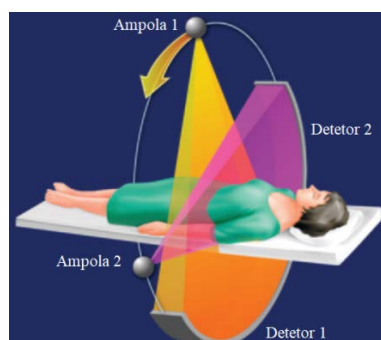


Figura 3 – Exemplo de aquisição de imagem [4]

O propósito da TC é calcular os coeficientes de atenuação linear do feixe de raios X em cada ponto de uma secção do corpo, a partir do conjunto de projeções obtidas, sob diferentes ângulos, à volta do doente. A imagem é reconstruída matematicamente a partir da intensidade do feixe emergente por um sistema computadorizado, que processa os dados obtidos criando uma imagem em corte axial, conforme se pode ver na Figura 4. A informação adquirida pode ser posteriormente processada de forma a apresentar imagens com características específicas e orientadas para um determinado objetivo de diagnóstico. As reconstruções a três dimensões são um exemplo [5].

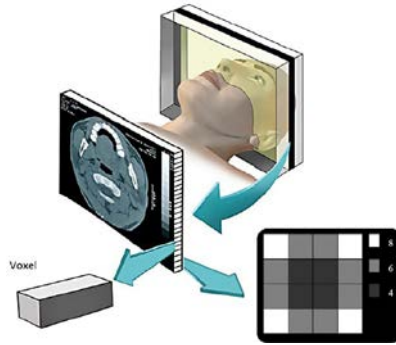


Figura 4 – Formação da imagem após aquisição [3].

No início da década de 90 deu-se um “salto” tecnológico, ao ser desenvolvida a tecnologia *Slip-ring*. Esta inovação possibilitou a transferência de energia e sinais entre as partes fixa e rotativa da *Gantry* (conjunto ampola-detector) através de escovas de grafite, fixadas num bloco, conforme mostram as Figuras 5 e 6.



Figura 5 – Escovas de grafite

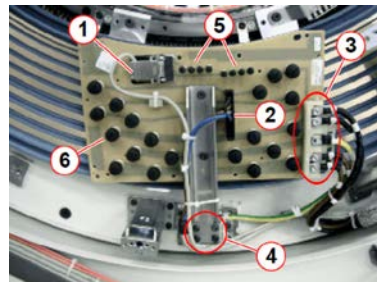


Figura 6 – Bloco com escovas de grafite

Legenda da **Figura 6**: **1** – Cabo de sinal; **2** – Cabo de potência; **3** – Cabo de média tensão; **4** – Parafusos de fixação; **5** – Escovas de sinal; **6** – Escovas de potência

Actualmente, alguns fabricantes iniciaram a adopção de escovas de liga de prata em detrimento das de grafite. A Figuras 7 é exemplo disso.

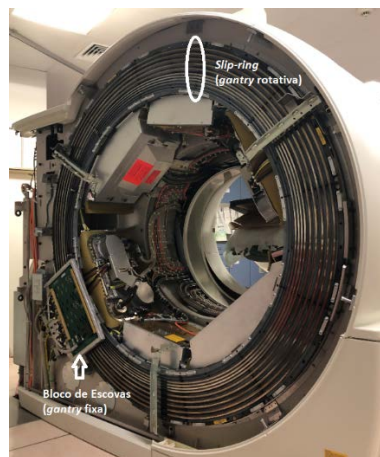


Figura 7 – Slip-ring e bloco com escovas de prata

2. Políticas alternativas de manutenção

Os fabricantes e representantes locais deste tipo de equipamentos adotam a prática de efetuar a substituição preventiva deste grupo de escovas com a periodicidade anual. Entretanto, se uma escova é causa de um defeito, todas as escovas são substituídas correctivamente. Com efeito, uma escova gasta para além de um certo limite, provoca o aparecimento de “artefactos” (zonas de indefinição de imagem), podendo dar origem a falsos diagnósticos positivos ou negativos. Ocorrendo esta situação, o equipamento é parado e a manutenção é solicitada.

Neste tipo de equipamentos a manutenção é contratada ao exterior, pois trata-se de equipamentos muito especializados e que evoluem tecnologicamente de modo muito rápido. De outra forma, as equipas de manutenção local dos vários utilizadores-clientes enfrentariam sérias dificuldades para se manterem actualizadas. Do exterior porém, surgem cada vez mais empresas prestadoras de serviços de manutenção de equipamentos de imagiologia – TC incluída – em lugar das empresas fabricantes ou dos seus representantes locais. Foi precisamente por se ter constatado a prática de uma operação de manutenção – a substituição anual do conjunto de escovas – independentemente do seu estado de condição, sobretudo tendo em conta o seu custo rondando alguns milhares de euros, que foi proposto realizar o estudo cujo *modus operandi* e conclusões se apresentam neste artigo.

3. Metodologia usada no trabalho

Aproveitando a oportunidade de um trabalho de mestrado em Engenharia Biomédica em curso, foi decidido começar por coligir dados do desgaste de uma amostra de escovas de um bloco com 20 unidades de potência (todas iguais) acabado de montar novo, pertencente a uma máquina em plena operação. O comprimento inicial de cada escova era 20 mm e o comprimento mínimo tolerado era 11 mm – um desgaste expectável portanto de 9 mm. Foram seleccionadas 5 escovas fixadas nos anéis (*slip-rings*) mais exteriores e que, por este facto, percorreriam maior comprimento durante a sua vida útil, logo, mais rapidamente desgastáveis. A recolha dos dados foi realizada durante aproximadamente 10 meses, aproveitando momentos de paragens várias para outras rotinas, tomando nota do número de rotações acumuladas da *Gantry*.

Os dados obtidos de desgaste das cinco escovas foram trabalhados, recorrendo ao EXCEL como apoio para o cálculo, tendo sido constatado que o desgaste não era linear, como seria de supor se o mecanismo de degradação presente fosse apenas o atrito. Talvez devido à simultaneidade de fadiga mecânica e também de pequeníssimas disrupções eléctricas, a função de desgaste apresentou a forma de uma potência positiva, facto que foi evidenciado quer gráfica, quer analiticamente, pela opção “*Trendline Options*”.

De cada uma das funções representativas do desgaste das cinco escovas em função do número acumulado de rotações, determinou-se o número destas ao fim das quais cada uma das escovas atingiria os 9 mm de desgaste, ou seja, teria atingido o ponto F de falha funcional. Submeteram-se depois estes resultados a um teste de hipótese de aderência de K-S (Kolmogorov-Smirnov) e confirmou-se uma aderência a uma distribuição de frequência Normal para um nível de significância de 5% com um valor de prova elevado.

Recorreu-se novamente ao EXCEL para criar um modelo de simulação pelo método numérico de MC (Monte Carlo) no qual foram ensaiadas as práticas alternativas das políticas de manutenção correctiva (MC), manutenção preventiva sistemática (MPS) e manutenção preventiva condicionada (MPC). Esta última *off-line*, já que não se identificou qualquer sinal resultante do funcionamento do equipamento que se correlacionasse com o desgaste das escovas – o que viabilizaria a monitorização preferencial *on-line*.

Tendo em conta que as condições de carga e de ambiente em que cada máquina funciona, podem alterar-se por razões várias, incluindo as sazonais, será prudente substituir a política tradicional de preventiva sistemática pela política de manutenção condicionada (preditiva). Neste caso, dever-se-á proceder a medições do desgaste das escovas ao longo do tempo de funcionamento, ajustar uma linha de tendência aos pontos no gráfico “mm de desgaste = f(Mrot)”, de modo a prever quando, de facto, o bloco de escovas irá falhar (quando pelo menos uma das escovas irá exceder 9 mm de desgaste) e substituir o bloco preventivamente. Conhecida a função descritora do desgaste do conjunto das escovas, conforme descrito no próximo ponto, poder-se-á encomendar um novo bloco com alguns dias de antecipação ao momento em que o bloco irá falhar. Com efeito, adoptar uma política de manutenção preventiva predictiva permite explorar o bloco até ao limite da sua vida útil, a qual depende das condições de carga e de ambiente específicas em que cada máquina irá funcionar. O fabricante que desconhece aquelas condições específicas

de cada cliente, recomenda a substituição preventiva sistemática, com uma periodicidade frequentemente inferior à vida útil possível do bloco.

Um teste de hipótese de aderência ao conjunto dos novos dados de desgaste colhidos numa amostra de escovas – conforme descrito no exemplo do próximo ponto – poderá ser aplicado em qualquer momento, de modo a prever quando o desgaste limite será atingido, permitindo planejar a substituição do bloco de escovas com bastante antecedência. O método é universal e poderá ser usado em muitos outros equipamentos, como sejam, a corrosão de uma chapa [8], a incrustação nos tubos circulados com água de um permutador de calor [9], a colmatagem de um filtro, etc.

Procedeu-se depois ao cálculo dos custos horários de manutenção segundo cada uma daquelas políticas e concluímos que o custo da política de manutenção condicionada preditiva é o menor dos custos das três políticas.

4. Exemplo de aplicação ¹

Um equipamento de Tomografia Computorizada (TC) funciona no regime de 336 dias/ano e 15 horas/dia e realiza em média 4 exames/hora. Quando falha (apresenta artefactos), o seu funcionamento é suspenso e é chamada a manutenção do exterior. O tempo de imobilização consequente da máquina é em média 30 horas. Quando a intervenção é preventiva (planeada), o tempo de imobilização é em média 15 horas – este intervalo de tempo é aproveitado para proceder a algumas outras intervenções depois de justificadas economicamente [10].

O custo de um bloco de escovas é 3.000 €e o custo de oportunidade de máquina imobilizada é calculada em 150 €/exame não realizado, ou seja, 150 €/exame x 4 exames/hora = 600 €/hora de máquina imobilizada.

Notar que não se teve em conta os custos de mão-de-obra, quase sempre irrisórios face aos custos de oportunidade e/ou dos materiais substituídos. Por outro lado, tratando-se de técnicos da empresa cliente, não faz sentido considerar o seu custo, na medida em que se trata de um custo fixo na perspectiva económica.

Os custos de uma intervenção correctiva será pois, igual a 30 horas/intervenção x 600 €/hora + 3.000 € = 21.000 €intervenção, e o custo de uma intervenção preventiva igual a 15 horas/intervenção x 600 €/hora + 3.000 € = 12.000 €intervenção.

O Quadro 1 mostra todos os dados considerados.

Ritmo de serviço =	4	exames/hora f
Média de rotações/exame =	700	rot/exame
Regime de funcionamento =	336	dias f/ano
Regime de funcionamento =	15	horas f/dia c
MDT (correctiva) =	30	horas f
MDT (preventiva) =	15	horas f
Custo do grupo de escovas =	3.000	€
Custo de uma MC =	21.000	€
Custo de uma MP =	12.000	€
Custo de oportunidade =	150	€/exame
Custo de oportunidade =	600	€/hora f

Quadro 1 – Dados considerados

Ao longo de pouco mais de 10 meses tomou-se nota em seis ocasiões do desgaste sofrido por cinco das escovas do bloco – as que foram supostas estarem sujeitas a condições de funcionamento mais severas. O Quadro 2 mostra na primeira coluna os momentos em que as leituras foram colhidas, em milhões de rotações lidas num contador existente na máquina, após um bloco novo ter sido colocado. A segunda coluna

¹ Os dados deste exemplo são diferentes dos do caso estudado

mostra as horas acumuladas de funcionamento obtidas a partir do ritmo de serviço e do número médio de rotações por exame. A terceira coluna mostra as horas acumuladas calendário obtidas a partir do conhecimento do regime de funcionamento diário e anual. Obviamente que estas duas últimas colunas devolvem valores aproximados aos que se obteriam se existissem contadores específicos para este fim.

M rotações	horas f	horas c	mm desgaste				
			Escova 1	Escova 2	Escova 3	Escova 4	Escova 5
x			y	y	y	y	y
6,783	2 423	4 211	1,2	0,82	1,66	2,2	2,4
8,62967	3 082	5 357	2,5	2,3	2,8	3,5	3,6
9,553	3 412	5 930	4,1	3,5	3,7	4,3	4,2
10,4763	3 742	6 503	4,9	5,9	4,9	5,5	6
11,3997	4 071	7 076	6,8	7,3	6,4	7,1	7
12,323	4 401	7 649	9,3	9,1	8,6	9,1	8,8

Quadro 2 – Desgaste das 5 escovas ao longo do tempo

As restantes colunas mostram o desgaste medido em cada uma das cinco escovas em cada um daqueles momentos. Recorrendo à opção *Trendline Options* do EXCEL, obteve-se a função de melhor aderência aos dados de desgaste de cada escova. A Figura 12 mostra o resultado obtido das cinco escovas.

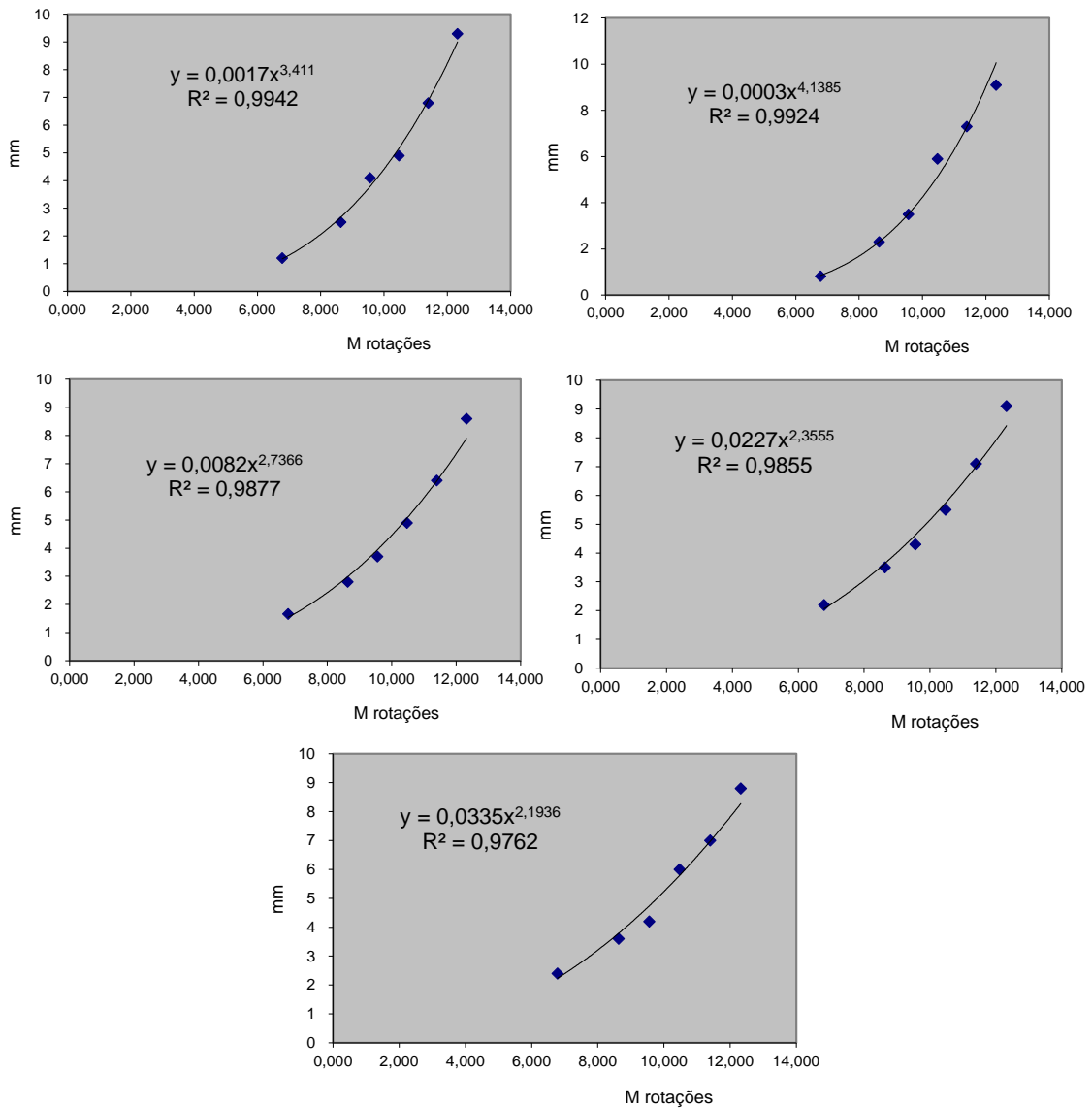


Figura 12 – Gráficos das funções de desgaste das cinco escovas obtidas através da Trendline Options do EXCEL

A função obtida é da forma $y = k_1 \cdot x^{k_2}$. Os factores k_1 e k_2 da função de cada escova foram deduzidos após a logaritmização do eixo das ordenadas (y) e dos eixos das abcissas (x) de cada uma delas, de modo a se obter uma função linear muito mais fácil de operar.

Uma vez conhecidas as funções de desgaste, foi possível calcular os momentos previsionais nos quais as escovas atingirão o limite de 9 mm de desgaste, sendo assim consideradas falhadas. Estes momentos em milhões de rotações (Mrot) encontram-se descritos no Quadro 3.

Resumo	
Escovas	Mrot
Escova 1	12,3217
Escova 2	11,9958
Escova 3	12,9212
Escova 4	12,6761
Escova 5	12,8028

Quadro 3 – Momentos em que previsionalmente cada escova atingirá o limite de 9 mm de desgaste

Pelo teorema do limite central em Estatística, o comportamento em falha do conjunto das escovas pode ser descrito por uma distribuição Normal de probabilidade. Calculou-se a média aritmética e o desvio padrão dos resultados mostrados na segunda coluna do Quadro 3, obtendo-se, respectivamente:

Média = 12,5435 Mrot e Desvio Padrão = 0,3797 Mrot.

Para um melhor julgamento dos parâmetros da população (conjunto de todas as escovas), foi usado o algoritmo de otimização não linear GRG do EXCEL e obteve-se preferencialmente (para $D_0 = 0,0681 < D_\alpha = 0,56328$):

Média = 12,5937 Mrot. e Desvio Padrão = 0,5271 Mrot.

Construiu-se um modelo contemplando todas as 20 escovas do bloco e simularam-se 200 momentos de falha de cada uma delas segundo uma distribuição Normal de probabilidade com os parâmetros deduzidos anteriormente. O Quadro 4 mostra um exemplo de 10 momentos de falha de cada uma de 10 das 20 escovas resultante de uma das iterações do modelo.

Ordem de falha	Escova 1	Escova 2	Escova 3	Escova 4	Escova 5	Escova 6	Escova 7	Escova 8	Escova 9	Escova 10
1	11,867047	11,801334	12,165416	12,285242	12,433837	12,453457	11,911912	12,946738	12,119406	11,971352
2	12,129874	13,066563	12,340539	12,33825	12,180601	12,415599	12,756365	12,174118	12,487372	12,344626
3	11,960109	12,861094	11,62085	12,29597	12,615741	12,552407	12,006002	11,848967	12,603048	12,291327
4	12,483097	12,334882	11,725516	12,062441	12,530236	12,494141	11,388002	12,573606	12,512424	11,887354
5	12,182733	12,002226	12,441772	12,33506	12,013239	12,198077	12,37966	12,023138	12,853852	12,421178
6	12,091824	12,194722	12,135571	12,311441	11,609321	12,48386	11,439651	11,865925	12,623004	12,769344
7	12,801152	11,287323	12,846582	12,817789	12,151855	12,084007	11,229768	12,266453	12,275108	12,698836
8	12,553407	12,353687	12,205387	12,143533	12,113551	12,288898	12,197561	11,826706	12,922559	11,696183
9	12,219475	12,461536	12,6292	12,481386	13,30154	12,144909	12,011152	12,36638	11,857158	12,31988
10	12,591805	11,948566	11,777472	12,433709	13,033879	12,094028	12,451591	11,939114	12,710389	12,351958

Quadro 4 – 10 momentos simulados de falha de 10 das escovas do bloco

Assume-se que a falha do bloco se verifica sempre no momento de menor duração de qualquer das 20 escovas. Este facto torna inevitável o recurso à simulação numérica de modo a obterem-se aqueles momentos e avaliarem-se depois as suas consequências operacionais em termos de performance e de economia.

Os Quadros 5 e 6 mostram um exemplo de 10 iterações de uma das corridas do simulador no caso das políticas de MC e MPS. As colunas de vida acumulada em horas f (funcionamento) tiveram em conta o tempo médio de paragem (MDT) para substituição do bloco – 30 horas no caso da MC e 15 horas no caso da MPC (ver o Quadro 1).

Os valores médios mostrados no topo destes dois Quadros foram depois repetidos de modo a determinar os seus valores esperados, os quais foram, por sua vez, operados de forma a se obterem os indicadores de desempenho (disponibilidade e custo horário de manutenção) das políticas de manutenção correctiva (MC) e sistemática (MPS).

Gantry MC				
Vidas médias				
	12	4 146	4 176	7 258
	Vida (Mrot)	Vida (horas f)	Vida acumulada (horas f)	Vida acumulada (horas c)
1	12,01	4 289	4 319	7 507
2	11,56	4 129	8 478	14 736
3	11,14	3 979	12 487	21 704
4	11,82	4 221	16 738	29 093
5	11,78	4 209	20 977	36 460
6	11,73	4 191	25 198	43 796
7	11,86	4 237	29 465	51 213
8	11,30	4 036	33 531	58 280
9	11,41	4 074	37 635	65 413
10	12,09	4 318	41 983	72 970

Periodicidade de MPS	Nº de MC =	15	
4000	Nº de MPS =	185	
	F(tp) =	0,075	
Gantry MPS			
Vidas médias			
	3 995	4 011	6 971
	Vida (horas f)	Vida acumulada (horas f)	Vida acumulada (horas c)
	4 000	4 015	6 978
	4 000	8 030	13 957
	3 979	12 039	20 925
	4 000	16 054	27 904
	4 000	20 069	34 882
	4 000	24 084	41 861
	4 000	28 099	48 839
	4 000	32 114	55 818
	4 000	36 129	62 796
	4 000	40 144	69 775

Quadros 5 e 6 – Dez resultados de uma das iterações do simulador no caso das políticas de MC e MPS (horas f – horas de funcionamento; horas c – horas de calendário)

No Quadro 6 pode ver-se que, na hipótese de se aguardar até às 4.000 horas f para se substituir o bloco de escovas, haverá uma ocasião em que uma escova terá falhado mais cedo (às 3.979 horas f) e a sua substituição será realizada correctivamente. Pode ver-se também que, em 200 substituições simuladas, 15 foram realizadas correctivamente e 185 preventivamente, ou seja uma proporção de $15/200 \times 100 = 7,5\%$.

A periodicidade óptima económica para substituir preventiva e sistematicamente o bloco de escovas pode agora ser obtida por tentativa erro. Após terem sido ensaiados vários valores múltiplos de 50 horas de funcionamento (fixados arbitrariamente), encontrou-se o custo mínimo esperado de 1,783 €/hora de calendário, uma disponibilidade esperada de 0,9962 para a substituição do bloco ao fim de 10,92 Mrot ou aproximadamente 3.900 horas de funcionamento ou, ainda, 6.780 horas ou 283 dias de calendário. O Quadro 7 e a Figura 13 documentam os resultados deste procedimento.

Momento de substituição (horas f)	Custo da política MPC (€/hora)
3 750	1,835
3 800	1,812
3 850	1,793
3 900	1,783
3 950	1,785
4 000	1,822

Quadro 7 – Resultados da análise de sensibilidade do custo de manutenção da política MPS a variações da vida acumulada até à substituição

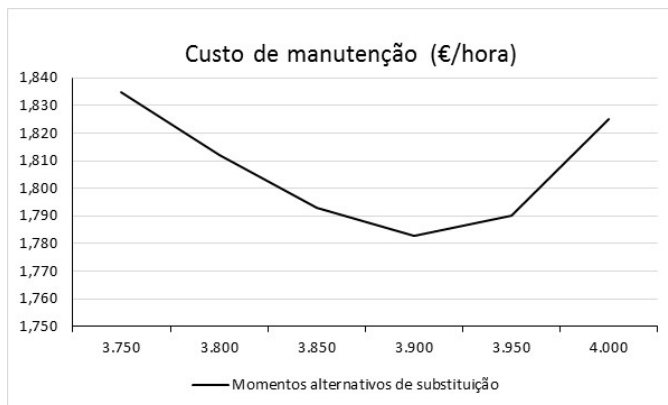


Figura 13 – O custo da política de MPS resulta mínimo e igual a 1,783 €/hora se a vida acumulada até à substituição for 3.900 horas

A política de MC foi também ensaiada, tendo resultado um custo esperado de 2,874 €/hora de calendário, uma disponibilidade esperada de 0,9928 e uma vida média de 303 dias de calendário. Enquanto a disponibilidade e a vida média pouco diferiram, tal já não aconteceu com o custo horário, cerca de 61% superior ao conseguido com a política de MPS.

Porém, o custo da política de manutenção condicionada preditiva resultou menor. Após algumas centenas de corridas do simulador, o custo esperado desta política resultou igual a 1,653 €/hora c, ou seja $(1,783 - 1,653) / 1,653 \times 100 \approx 8\%$ menor do que o da política de MPS.

5. Conclusões

Foi demonstrado neste artigo que a substituição preditiva com base na observação regular do desgaste de uma amostra de escovas consegue ser mais económica do que as políticas alternativas de MC e de MPS. No caso desta última, a periodicidade recomendada pelo fabricante do equipamento pode verificar-se ser falível nos casos em que o equipamento funcione em condições de carga e/ou de ambiente que se afastem das condições consideradas normais pelo fabricante. Se estas condições forem mais severas, as substituições correctivas serão frequentes, se pelo contrário, as condições forem menos severas, as substituições preventivas serão precoces. Num caso ou noutro, o custo de manutenção não será mínimo.

O custo mínimo (ou óptimo económico) será conseguido se, aproveitando episódios de paragem do equipamento para outras intervenções, for medido o desgaste de uma amostra constituída por algumas escovas. Assim procedendo, pode-se deduzir a função de desgaste da forma exemplificada no corpo deste artigo e decidir criteriosamente quando substituir o bloco de escovas conducente ao menor custo possível. Isto, obviamente, se cada inspecção/medição puder ser realizada preferencialmente por técnicos do cliente competentes para o efeito, ou por técnicos do fabricante aproveitando a realização de outros trabalhos na máquina.

Mais uma vez se comprovou que as técnicas de simulação permitem modelar casos muito complexos recorrendo à lógica pura e evitando modelos analíticos, por vezes, enfermando de pressupostos teóricos nem sempre aceitáveis na prática. Outros exemplos de utilização das técnicas de simulação em Gestão da Manutenção podem ser vistos na referência [11].

Referências bibliográficas

- [1]. Ribeiro, João. *Aplicação da Metodologia RCM em Equipamentos de Tomografia Computorizada e da Especialidade da Imagiologia*. Dissertação de Mestrado. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa. Fevereiro 2019. <https://repositorio.ipl.pt/handle/10400.21/10474>
- [2]. Patino, Manuel. Prochowski, Andrea. Agrawal, Mukta. Simeone, Frank J. Gupta, Rajiv. Hahn, Peter. Sahani, Dushyant. *Material Separation Using Dual-Energy CT: Current and Emerging Applications*. Radio Graphics 2016; 36:1087–1105. Julho 2016.
- [3]. Siemens Healthineers (2018), *Tomografia Computorizada*. Documentação técnica de formação. Maio 2018.
- [4]. Silva, Alvin. Morse, Brian. Hara, Amy. Paden, Robert. Hongo, Norio & Pavlicek, William. *Dual-Energy (Spectral) CT: Applications in Abdominal Imaging*. RadioGraphics 2011; 31:1031–1046. Julho 2016.
- [5]. Penedo, J., Madahil, A., Ferreira, A., Nunes, A., Pereira, J., Venâncio, J., Maia, M. G. & Alves, P. *Carta de Equipamentos Médicos Pesados*. Diário Da República nº 45. 2ª Série. pp.1–323. Março 2013.
- [6]. Platten, David. Basic Principles of CT Scanning. http://www.impactscan.org/slides/impactcourse/basic_principles_of_ct/img38.html. Acedido a 23 de Agosto de 2019.
- [7]. MOOG. Large Diameter Slip Rings. <https://www.moog.com/markets/medical-oem/ct-scan-slip-rings.html>. Acedido a 23 de Agosto de 2019.
- [8]. Assis, Rui, “Momento óptimo de substituição de uma chapa sujeita a degradação” / Comunicação ao Congresso Ibero-Americano de Manutenção – Lisboa, Setembro 1998 / Publicação revista Ingenium/Ordem dos Engenheiros – Setembro 1999, <http://www.rassis.com/artigos/Chapa.pdf>

- [9]. Assis, Rui, “Periodicidade óptima de limpeza do feixe tubular de um permutador de calor” / comunicação às Jornadas de Manutenção, APMI, 2014 / Porto, Novembro 2014, [http://www.rassis.com/artigos/Manutencao/Slides%20Permutador APMI 2014.pdf](http://www.rassis.com/artigos/Manutencao/Slides%20Permutador%20APMI%202014.pdf)
- [10]. Assis, Rui, “Manutenção de oportunidade de um componente reparável”, Comunicação ao 14º Congresso Nacional de Manutenção, APMI, Novembro 2017, “http://www.rassis.com/artigos/Manutencao/Artigo_Rui%20Assis_Congresso_APMI_2017.pdf”
- [11]. Assis, Rui, “Apoio à Decisão em Manutenção na Gestão de Activos Físicos”, LIDEL, 2014, http://www.rassis.com/livro_ADMGAF.html