

Comparação de Políticas Alternativas de Manutenção na perspectiva dos Custos e da Disponibilidade

Rui Assis
rassis@rassis.com

Instituto de Soldadura e Qualidade

Resumo

O ISQ vem prosseguindo um esforço consistente ao longo dos últimos cinco anos no sentido de divulgar novos métodos de análise junto da indústria que apoiem os gestores operacionais nas suas decisões visando a melhoria permanente da fiabilidade e da disponibilidade dos equipamentos sob sua responsabilidade e consequente diminuição de custos. Este esforço tem-se, em parte, materializado em software de apoio à decisão desenvolvido em consórcio com grandes empresas industriais e de serviços no âmbito de projectos de I&DE financiados pela Comunidade Europeia e pelo Estado Português. Dois destes projectos – o ADITEC, terminado em 2004 e o SITEM, terminado em 2006 – produziram, para além de outros “deliverables”, aplicações para análise económica de alternativas de investimento e de políticas em manutenção. Este artigo ilustra a aplicação de várias políticas alternativas de manutenção ao caso de um compressor de ar com dados ficcionados. São comparadas entre si as políticas com base no tempo de funcionamento acumulado de cada componente crítico (Curativa; Preventiva empírica impondo uma determinada probabilidade de intervir curativamente; Preventiva empírica impondo uma determinada vida acumulada de intervenção; Preventiva óptima na perspectiva do custo mínimo; Preventiva óptima na perspectiva da disponibilidade máxima; Preventiva condicionada) e a política de manutenção com base no tempo de funcionamento acumulado do equipamento como um todo. Uma vez identificados todos os componentes críticos de um equipamento, apurados os parâmetros da distribuição de probabilidade Weibull que melhor descreve o modo de falha predominante de cada componente, os custos (mão-de-obra, materiais e oportunidade) e o tempo de down-time decorrentes de uma intervenção planeada e não planeada a cada componente, e outros dados particulares de cada política, obtém-se uma previsão dos indicadores mais comuns: MTTM, MTTR, custo horário e disponibilidade do equipamento resultantes da implementação de cada uma daquelas políticas alternativas. No caso da política de manutenção com base no tempo acumulado do equipamento, determina-se o intervalo óptimo de tempo para parar totalmente o compressor e proceder à substituição preventiva de todos os componentes críticos independentemente da vida que cada um tenha acumulado até então.

1. Introdução

O caso a seguir descrito (adaptado de <http://www.barringer1.com>) tem como objectivo o de ilustrar os diferentes modos de cálculo dos principais indicadores de desempenho de um qualquer equipamento de produção e constitui uma extensão dos Exemplos 4.6 e 5.4 do livro “Apoio à Decisão em Gestão da Manutenção”. A solução para este caso bem como para quaisquer outros até ao limite de vinte componentes críticos pode ser obtida recorrendo ao *software* de apoio à decisão INES-III desenvolvido pelo ISQ em consórcio com outras grandes empresas no âmbito do projecto SITEM financiado pela Comunidade Europeia e pelo Estado Português através da Agência para o Desenvolvimento e Inovação (ADI), o qual terminou no fim de 2006.

As empresas são compelidas crescentemente para racionalizarem os seus custos; e os custos de manutenção não poderiam constituir uma excepção. Os responsáveis da manutenção – embora existam naturalmente excepções – vêm-se assim compelidos a tornarem-se também eficientes onde anteriormente só se preocupavam em ser eficazes. O objectivo de eficiência obriga a um esforço permanente de boa gestão, mensurável através de indicadores apropriados. No caso de equipamentos de produção, não existe uma receita universal para a política de manutenção. Assim, em cada caso, há que determinar qual a mais adequada. De entre as possíveis, existe um grupo de políticas que se baseiam no tempo acumulado de cada componente crítico e uma política que se baseia no tempo acumulado do equipamento (componentes em bloco). É a comparação entre estas várias políticas – através de indicadores apropriados – que se desenvolve ao longo deste trabalho recorrendo a um caso real ficcionado.

2. Dados do caso

Um compressor de ar trabalha uma média de 1.200 horas por ano e possui nove componentes críticos cujos comportamentos em falha podem ser descritos por distribuições de probabilidade *Weibull*. Os parâmetros destas distribuições, todos os custos e os tempos médios de intervenção curativa e preventiva encontram-se descritos nos Quadros 1, 2 e 3.

Quadro 1 – Comportamento em falha dos componentes críticos

Componentes	Weibull α	Weibull β (horas)
<i>Auto Drain</i>	1,8	6.000
<i>Reed Valves</i>	2,2	7.000
<i>Unloader</i>	3,9	6.000
<i>Bearings</i>	1,4	13.000
<i>Rings</i>	2,1	9.000
<i>Pistons</i>	2,7	14.000
<i>Check Valve</i>	1,2	9.000
<i>Motor</i>	1,3	11.000
<i>V Belts</i>	1,9	9.000

Quadro 2 – Tempos médios e custos de intervenção em manutenção curativa

Componentes	MTTR (horas)	Custo m.d.o. (€intervenção)	Custo material (€intervenção)	Custo oportunidade (€intervenção)
<i>Auto Drain</i>	4	31,25	93,75	2.000
<i>Reed Valves</i>	28	500	1.500	14.000
<i>Unloader</i>	6	75	225	3.000
<i>Bearings</i>	80	2.250	6.750	48.000
<i>Rings</i>	80	2.125	6.375	48.000
<i>Pistons</i>	80	2.500	7.500	48.000
<i>Check Valve</i>	12	175	525	4.000
<i>Motor</i>	20	950	2.850	10.000
<i>V Belts</i>	8	575	1.725	4.000

Quadro 3 – Tempos médios e custos de intervenção em manutenção preventiva

Componentes	MTTR (horas)	Custo m.d.o. (€intervenção)	Custo material (€intervenção)	Custo oportunidade (€intervenção)
<i>Auto Drain</i>	1	18,75	56,25	0
<i>Reed Valves</i>	7	312,5	937,5	0
<i>Unloader</i>	1,5	37,5	112,5	0
<i>Bearings</i>	24	1.500	4.500	0
<i>Rings</i>	24	1.375	4.125	0
<i>Pistons</i>	24	1.750	5.250	0
<i>Check Valve</i>	2	87,5	262,5	0
<i>Motor</i>	5	650	1.950	0
<i>V Belts</i>	2	412,5	1.237,5	0

Pretende-se determinar a melhor política de manutenção possível quer na perspectiva do custo quer na perspectiva da disponibilidade.

As políticas possíveis de manutenção são as seguintes:

- 1 Com base no tempo de funcionamento acumulado de cada componente crítico:
 - 1.1 Curativa;
 - 1.2 Preventiva empírica sistemática impondo uma determinada probabilidade de intervir curativamente;
 - 1.3 Preventiva empírica sistemática impondo um determinado tempo acumulado de vida;
 - 1.4 Preventiva óptima sistemática na perspectiva do custo mínimo;
 - 1.5 Preventiva óptima sistemática na perspectiva da disponibilidade máxima;
 - 1.6 Preventiva condicionada;
- 2 Com base no tempo de funcionamento acumulado do equipamento (ou substituição em bloco).

Para cada uma destas políticas determinar-se-ão os indicadores custo horário de manutenção e disponibilidade; este último a partir dos indicadores intermédios MTTF (*Mean Time To Failure*), MTTM (*Mean Time To Maintenance*) e MTTR (*Mean Time To Repair, Replace, Recover ou Restore*).

3. Resolução do caso

3.1 Política de manutenção curativa

A taxa horária de falhas λ_i de cada componente é calculada pela Expressão 1, obtendo-se a segunda coluna do Quadro 4.

$$\lambda = \frac{1}{\beta \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right)} \quad (1)$$

Na perspectiva da fiabilidade, os componentes encontram-se dispostos em série e, logo, a taxa de falhas do compressor λ_C é calculada pela Expressão 2.

$$\lambda_C = \sum_{i=1}^N \lambda_i \quad (2)$$

De onde resulta: $\lambda_C = 0,00116$ falhas/hora.

O MTTF_C do compressor obtém-se pelo inverso da Expressão 2 (ver Expressão 3).

$$\text{MTTF}_C = \frac{1}{\lambda_C} \quad (3)$$

Daqui resulta: $MTTF_C = 1 / 0,00116 = 858,51 \cong 860$ horas.

Quadro 4 – Passos intermédios de cálculo

Componentes	λ (intervencões/hora funcionamento)	$\lambda \cdot MTTR$	Ch (€/hora)
Auto Drain	0,00019	0,00075	0,3983
Reed Valves	0,00016	0,00452	€2,5809
Unloader	0,00018	0,00110	€0,6077
Bearings	0,00008	0,00675	€4,8107
Rings	0,00013	0,01004	€7,0880
Pistons	0,00008	0,00643	€4,6586
Check Valve	0,00012	0,00142	€0,5552
Motor	0,00010	0,00197	€1,3584
V Belts	0,00013	0,00100	€0,7889

O tempo médio de reparação do compressor $MTTR_C$ é calculado pela média ponderada dos $MTTR_i$ dos componentes, conforme a Expressão 4.

$$MTTR_C = \frac{\sum_1^N \lambda_i \cdot MTTR_i}{\sum_1^N \lambda_i} = \frac{\sum_1^N \lambda_i \cdot MTTR_i}{\lambda_C} \quad (4)$$

Os resultados dos produtos ($\lambda_i \cdot MTTR_i$) de cada componente encontram-se na terceira coluna do Quadro 4. Somando esta coluna e dividindo-a por $\lambda_C = 0,00116$ falhas/hora, obtém-se: $MTTR_C = 29,17$ horas.

Como $MTTR_C \ll MTTF_C$, a disponibilidade pode ser calculada pela Expressão 5.

$$D_C = \frac{MTTF_C}{MTTF_C + MTTR_C} \quad (5)$$

Da qual se obtém: $D_C = \frac{858,51}{858,51 + 29,17} \times 100 = 96,71\%$

A contribuição de cada componente para o custo horário de manutenção do compressor obtém-se multiplicando o custo de uma intervenção (mão-de-obra + material + oportunidade) pela frequência horária desta. A quarta coluna do Quadro 4 mostra os resultados deste cálculo.

O custo horário previsual de manutenção do compressor Ch_C será, então, igual ao somatório da quarta coluna do Quadro 4, resultando $Ch_C = 22,85$ €/hora. E o custo anual de manutenção do compressor será, finalmente: $22,85$ €/hora \times 1.200 horas/ano $\cong 27.420$ €/ano.

Em resumo, ter-se-á:

D_C (Disponibilidade) = 96,71%; Ch_C (Custo horário) = 22,85 €/hora

3.2 Política de manutenção preventiva empírica sistemática, impondo uma determinada probabilidade de intervir curativamente

Obviamente que, neste caso, obter-se-ão tantas soluções quanto os diferentes valores aceites de probabilidade de falha de cada um dos componentes críticos. É comum, porém, na ausência de quaisquer outros critérios, aceitar-se a regra empírica dos 10%-90%, isto é $F(t) = 0,1$, pelo que se deduz seguidamente uma solução com base neste pressuposto (segunda coluna do Quadro 5). Contudo, existirá de certo uma solu-

ção óptima, isto é, valores de $F(t)$ de cada componente para os quais o custo horário de manutenção resulta mínimo ou valores de $F(t)$ de cada componente para os quais a disponibilidade estacionária do compressor resulta máxima. Será este o objecto das próximas duas políticas alternativas.

Para cada componente, calcula-se a idade de substituição t_p , isto é, o tempo máximo de funcionamento que terá acumulado até à sua substituição. A Expressão 6 permite calcular este tempo e a terceira coluna do Quadro 5 mostra todos os resultados. A quarta coluna mostra estes mesmos resultados aproximados às cinco centenas mais próxima.

$$t_p = t_0 + \beta \cdot \left[\ln \left(\frac{1}{1 - F(t)} \right) \right]^{1/\alpha} = t_0 + \beta \cdot [-\ln(R(t))]^{1/\alpha} \quad (6)$$

Quadro 5 – Passos intermédios de cálculo

Componentes	$F(t)$	t_p (horas)	$t_{p(aj)}$ (horas)	$F(t)_{(aj)}$	\bar{V} (horas)
Auto Drain	0,1	1.718,678013	1.500	0,07916024	955
Reed Valves	0,1	2.516,869606	2.500	0,09860628	1.701
Unloader	0,1	3.369,425334	3.500	0,11502971	2.764
Bearings	0,1	2.605,290339	2.500	0,09466282	1.439
Rings	0,1	3.082,130529	3.000	0,09475616	2.012
Pistons	0,1	6.083,547214	6.000	0,09651811	4.340
Check Valve	0,1	1.379,77228	1.500	0,10994426	804
Motor	0,1	1.948,078462	2.000	0,10329254	1.113
V Belts	0,1	2.753,356522	3.000	0,11663225	1.939

Na quinta coluna do quadro anterior, os $F(t)$ foram recalculados para as missões ajustadas $t_{p(aj)}$ que figuram na quarta coluna.

A vida média de cada componente \bar{V} que falha antes de poder ser substituído preventivamente é calculada pela Expressão 7 e os resultados encontram-se descritos na sexta coluna do Quadro 6.

$$\bar{V} = \int_0^{t_p} f(t) \cdot t \cdot dt \quad (7)$$

O MTTM de cada um dos vários componentes é calculado pela Expressão 8, ou seja pela ponderação das duas vidas possíveis (até à substituição preventiva ou curativa) com as probabilidades de sobreviverem até lá (segunda coluna do Quadro 6).

$$\text{MTTM} = \bar{V} \cdot F(t) + t_{p(aj)} \cdot [1 - F(t)] \quad (8)$$

Quadro 6 – Passos intermédios de cálculo

Componentes	MTTM (horas)	f_{mt}	MTTR	Ch (€/hora)
Auto Drain	1.456,864867	0,000686405	1,237480725	€0,1629
Reed Valves	2.420,56399	0,000413127	9,070731979	€1,1173
Unloader	3.415,293668	0,000292801	2,017633703	€0,1500
Bearings	2.399,525149	0,000416749	29,30111801	€4,5125
Rings	2.906,3345	0,000344076	29,30634521	€3,5552
Pistons	5.839,813506	0,000171238	29,4050142	€2,0416
Check Valve	1.423,470574	0,000702508	3,099442577	€0,5819
Motor	1.908,367352	0,000524008	6,549388139	€1,9686
V Belts	2.876,247196	0,000347675	2,699793494	€0,7622

E a frequência de intervenções de manutenção f_{mt} é dada pela Expressão 9 (terceira coluna do Quadro 6).

$$f_{mt} = \frac{1}{\text{MTTM}} \quad (9)$$

Logo, o f_{mi} do compressor (sistema) obtém-se pela soma das frequências de manutenção f_{mi} dos vários componentes, resultando $f_{mi} = 0,0039$ intervenções/hora de funcionamento. O $MTTM_C$ será então igual a $1/f_{mi} = 1/0,003898 = 256,50 \cong 260$ horas.

O MTTR de cada um dos vários componentes é calculado pela Expressão 10, ou seja pela ponderação das duas durações de intervenção possíveis (preventiva $MTTR_p$ ou curativa $MTTR_c$) com as probabilidades de estas ocorrerem (quarta coluna do Quadro 6).

$$MTTR = MTTR_c \cdot F(t) + MTTR_p \cdot [1 - F(t)] \quad (10)$$

O MTTR do compressor é calculado pela Expressão 4, resultando: $MTTR_C = 10,02$ horas.

A disponibilidade estacionária pode agora ser calculada pela Expressão 5, pois $MTTR_C \ll MTTF_C$. Desta resulta:

$$D_C = \frac{256,50}{256,50 + 10,02} \times 100 = 96,24\%$$

A contribuição de cada componente para o custo horário de manutenção do compressor C obtém-se multiplicando o custo de cada natureza de intervenção (preventiva ou curativa) pela frequência horária desta. A quinta coluna do Quadro 6 mostra os resultados deste cálculo.

O custo horário previsional de manutenção do compressor Ch_C será, então, igual ao somatório da quinta coluna do Quadro 6, resultando $Ch_C = 14,85$ €/hora. E o custo anual de manutenção do compressor será, finalmente: $14,85$ €/hora \times 1.200 horas/ano \cong 37.130 €/ano.

Em resumo, ter-se-á:

$$D_C \text{ (Disponibilidade)} = 96,24\%; Ch_C \text{ (Custo horário)} = 14,85 \text{ €/hora}$$

3.3 Política de manutenção preventiva empírica sistemática, impondo um determinado tempo acumulado de vida

Este caso é semelhante ao desenvolvido no ponto 3.2, pois é indiferente abordá-lo na perspectiva da probabilidade de falha aceite para cada componente crítico ou na perspectiva do seu tempo de vida acumulado já que estas duas variáveis são mutuamente convertíveis através da Expressão 6.

3.4 Política de manutenção preventiva ótima sistemática na perspectiva do custo mínimo

Este caso é ainda semelhante ao desenvolvido no ponto 3.2. Contudo, recorrendo a um método numérico e uma vez especificada a precisão de cálculo de t_p , o valor ótimo desta periodicidade de intervenção preventiva para cada componente pode ser determinado. Assim, por exemplo, fixando como precisão um múltiplo de cinco centenas, obtém-se a segunda coluna do Quadro 7. Somando esta coluna obtém-se o custo horário de manutenção do compressor: $Ch_C = 12,59$ €/hora de funcionamento.

Assim, por exemplo, no caso dos *V belts*, o gráfico representando a variação do custo horário com uma gama de periodicidades alternativas de intervenção preventiva, pode ser visto na Figura 1. Este gráfico mostra que o custo da manutenção preventiva começa por ser bastante superior ao custo da manutenção curativa para periodicidades baixas, iguala este custo por volta das 3.000 horas e torna-se depois inferior. Atinge um mínimo para uma periodicidade de 6.000 horas e cresce depois tendendo assintoticamente para o custo da manutenção curativa.

Quadro 7 – Passos intermédios de cálculo

Componentes	t_p óptimos	Ch mínimos
Auto Drain	1.000	€0,3287
Reed Valves	2.000	€1,6804
Unloader	3.000	€0,1196
Bearings	5.500	€3,0206
Rings	4.000	€3,7047
Pistons	6.000	€1,7189
Check Valve	4.000	€0,3998
Motor	9.500	€1,0526
V Belts	6.000	€0,5661

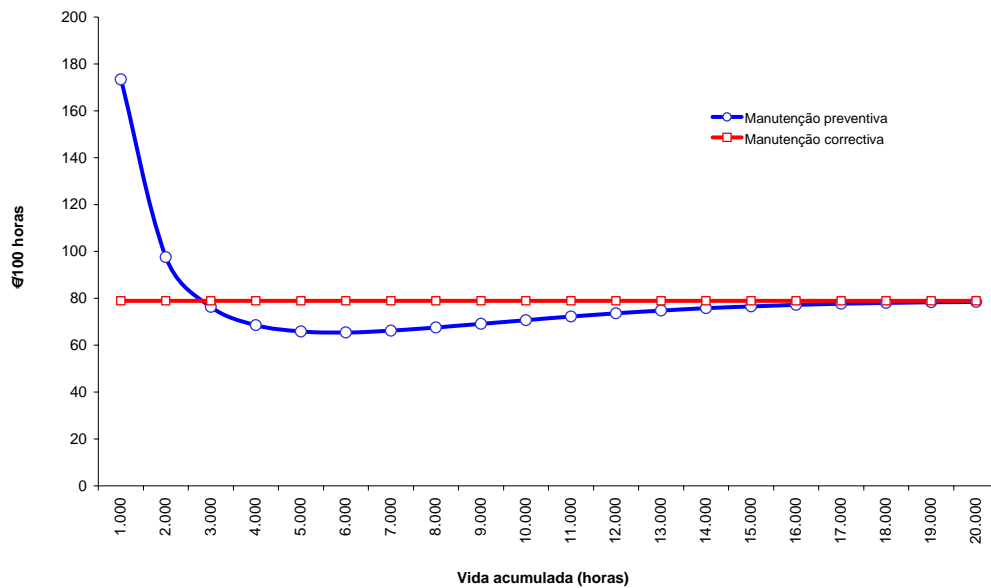


Figura 1 – Evolução do custo horário com a periodicidade de intervenção preventiva no caso dos V belts

Os outros indicadores resultam conforme se segue:

$MTTM_C = 325,95$ horas; $MTTR_C = 10,07$ horas; $Ch_C = 12,59$ €/hora de funcionamento; $D_C = 97,00\%$

3.5 Política de manutenção preventiva óptima sistemática na perspectiva da disponibilidade máxima

Este caso é ainda semelhante ao desenvolvido no ponto 3.2. Recorrendo novamente a um método numérico e uma vez especificada a precisão de cálculo de t_p , o valor óptimo desta periodicidade de intervenção preventiva para cada componente pode ser determinado. Assim, por exemplo, fixando como precisão um múltiplo de cinco centenas, obtêm-se as disponibilidades de todos os componentes (segunda coluna do Quadro 8). O produto destas disponibilidades é igual à disponibilidade estacionária do compressor: $D_C = 97,41\%$.

Assim, por exemplo, no caso dos *V belts*, o gráfico representando a variação da disponibilidade com uma gama de periodicidades alternativas de intervenção preventiva, pode ser visto na Figura 2.

Quadro 8 – Passos intermédios de cálculo

Componentes	t_p óptimos	D máximos
Auto Drain	4.000	0,999392961
Reed Valves	5.000	0,996711996
Unloader	4.000	0,999431696
Bearings	18.500	0,993451548
Rings	6.000	0,991763639
Pistons	9.000	0,995415058
Check Valve	12.000	0,998625081
Motor	16.000	0,998077358
V Belts	6.000	0,999204517

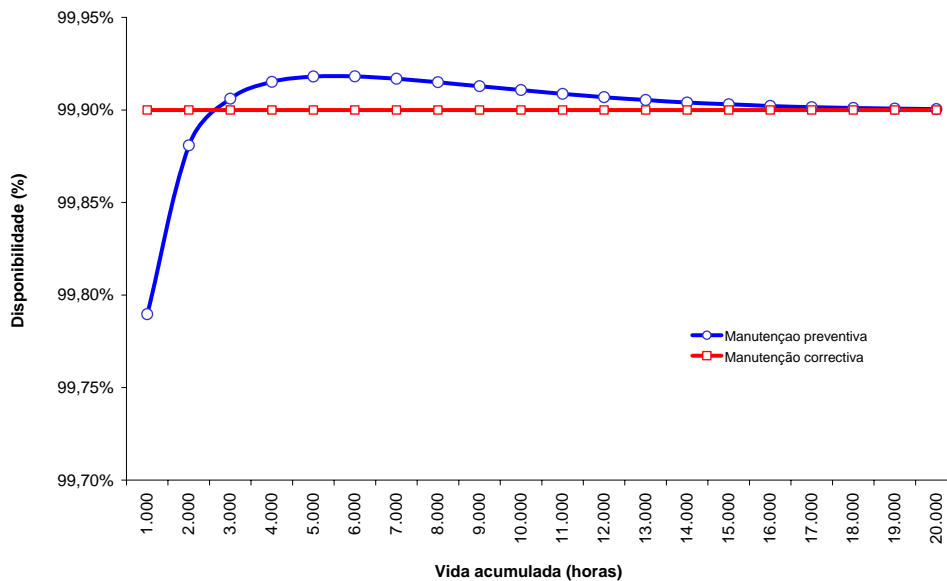


Figura 2 – Evolução da disponibilidade estacionária com a periodicidade de intervenção preventiva no caso dos V belts

O gráfico da Figura 2 mostra que a disponibilidade da manutenção preventiva começa por ser bastante inferior à disponibilidade proporcionada pela manutenção curativa para periodicidades baixas, iguala esta disponibilidade por volta das 2.500 horas e torna-se depois superior. Atinge um máximo para uma periodicidade de 6.000 horas e desce depois tendendo assintoticamente para a disponibilidade da manutenção curativa.

Os outros indicadores resultam conforme se segue:

$MTTM_C = 618,87$ horas; $MTTR_C = 16,48$ horas; $Ch_C = 14,80$ €/hora de funcionamento; $D_C = 97,41\%$

3.6 Política de manutenção preventiva condicionada (ou preditiva)

Neste caso, a monitorização pode ser realizada de forma contínua ou intermitente:

- No primeiro caso, assume-se que uma falha potencial será detectada automaticamente e imediatamente corrigida;
- No segundo caso, assume-se que as inspecções serão realizadas com uma frequência que torne praticamente impossível não detectar uma falha em curso (tempo entre cada duas inspecções inferior ao intervalo de tempo entre uma falha potencial P e uma falha funcional F).

Nestas circunstâncias, pode-se assumir que a frequência de falhas será a mesma que ocorreria no caso da política de manutenção curativa mas os custos e os tempos de intervenção serão os mesmos que ocorreriam no caso da política de manutenção preventiva sistemática.

Neste caso ainda, poderão surgir situações de falsos positivos ou de falsos negativos. Suponham-se como dados do caso os mostrados no Quadro 9. Este quadro mostra que uma falha potencial que tenha lugar em qualquer dos componentes, com excepção dos *Rings*, *Pistons* e *V belts*, será prontamente noticiada e eliminada; não dando ocasião à ocorrência de uma falha funcional.

No caso dos componentes *Rings*, *Pistons* e *V belts* podem ocorrer duas situações:

- Uma falha potencial encontra-se efectivamente em curso e não é noticiada em $x\%$ das vezes (falsos negativos), dando origem a uma falha funcional corrigida com uma intervenção de natureza curativa e, logo, a um maior custo horário;
- Uma falha potencial não se encontra efectivamente em curso mas foi erradamente percebida como tal em $y\%$ das vezes (falsos positivos) dando origem a intervenções preventivas desnecessárias e, logo, uma maior frequência de intervenções com os consequentes custos.

Quadro 9 – Probabilidades de falsos negativos e de falsos positivos

Componentes	Probabilidade de falsos negativos	Probabilidade de falsos positivos
<i>Auto Drain</i>	0%	0%
<i>Reed Valves</i>	0%	0%
<i>Unloader</i>	0%	0%
<i>Bearings</i>	0%	0%
<i>Rings</i>	25%	10%
<i>Pistons</i>	25%	10%
<i>Check Valve</i>	0%	0%
<i>Motor</i>	0%	0%
<i>V Belts</i>	50%	20%

No caso de falsos positivos, admite-se que o componente que provocou o falso alarme não é substituído mantendo-se “*as old as is*”. Admite-se também que o tempo consumido (“abrir-fechar” em lugar de “abrir-substituir-fechar”) seja igual ao tempo previsto de intervenção preventiva (na prática seria algo menor mas pouco influenciaria os resultados do cálculo).

No cálculo, procedeu-se do seguinte modo:

- A frequência de intervenções/hora de funcionamento de cada componente em manutenção preventiva é igual à frequência de intervenções/hora de funcionamento de cada componente em manutenção curativa ajustada pelo factor multiplicativo $(1 + \text{probabilidade de falsos positivos})$;
- O tempo de reparação/hora de funcionamento em manutenção preditiva é igual ao tempo de reparação/hora de funcionamento em manutenção curativa ponderado com a probabilidade de se verificarem falsos negativos mais o tempo de reparação/hora de funcionamento em manutenção preventiva ponderado com a probabilidade de não se verificarem falsos negativos e ajustada pelo factor multiplicativo $(1 + \text{probabilidade de falsos positivos})$;
- O custo de manutenção/hora de funcionamento em manutenção preditiva é igual ao custo de manutenção/hora de funcionamento em manutenção curativa ponderado com a probabilidade de se verificarem falsos negativos mais o custo de manutenção/hora de funcionamento em manutenção preventiva ponderado com a probabilidade de não se verificarem falsos negativos mais o custo de manutenção/hora de funcionamento em manutenção preventiva (excluindo os materiais) ponderado com a probabilidade de não se verificarem falsos negativos e, novamente, ponderada com a probabilidade de se verificarem falsos positivos;

O resultado obtido pode ser visto no Quadro 10.

Quadro 10 – Resultados em manutenção preditiva

Componentes	λ (intervenção/hora funcionamento)	MTTR (horas reparação/hora funcionamento)	Ch (€/hora funcionamento)
<i>Auto Drain</i>	0,00019	0,00019	€0,0141
<i>Reed Valves</i>	0,00016	0,00113	€0,2016
<i>Unloader</i>	0,00018	0,00028	€0,0276
<i>Bearings</i>	0,00008	0,00203	€0,5064
<i>Rings</i>	0,00014	0,00499	€2,3024
<i>Pistons</i>	0,00009	0,00320	€1,5969
<i>Check Valve</i>	0,00012	0,00024	€0,0413
<i>Motor</i>	0,00010	0,00049	€0,2559
<i>V Belts</i>	0,00015	0,00065	€0,5029

De onde resultam os seguintes indicadores:

$MTTM_C = 826,16$ horas; $MTTR_C = 10,90$ horas; $Ch_C = 5,45$ €/hora de funcionamento; $D_C = 98,70\%$

De notar que se não se verificassem quaisquer falsos (positivos ou negativos) obter-se-iam os seguintes indicadores:

$MTTM_C = 858,51$ horas; $MTTR_C = 8,19$ horas; $Ch_C = 2,51$ €/hora de funcionamento; $D_C = 99,06\%$

Estes resultados evidenciam a vantagem de adopção de uma política de manutenção preditiva. Dever-se-á, contudo, ter em conta o facto de que os custos com a aquisição e operação de aparelhos específicos de medida ou ainda de contratação ou formação de pessoal especializado não intervieram nos cálculos anteriores.

4. Política de manutenção com base no tempo de funcionamento acumulado do equipamento (ou substituição em bloco)

Para além dos dados de custo e de tempos da política de manutenção curativa considerados anteriormente, considerem-se também:

- Os coeficientes de simultaneidade dos vários componentes (Quadro 11), isto é, a percentagem média de tempo em que cada um dos componentes permanece em operação quando o compressor se encontra em funcionamento;
- Os custos de m.d.o., materiais e oportunidade (eventualmente) de uma intervenção geral de manutenção preventiva = 24.575 € (embora seja de pressupor que este custo será menor do que a soma dos verificados quando a manutenção é realizada com base na vida acumulada de cada componente – pelo menos o tempo de intervenção poderá ser menor – considera-se este valor);
- A duração média de uma intervenção geral de manutenção preventiva = 24 horas (embora seja de pressupor que esta duração será superior a qualquer das durações previstas para os vários componentes, considera-se a duração máxima prevista para qualquer um deles);
- Intervalo de tempo acumulado de funcionamento do compressor entre intervenções gerais de manutenção preventiva. Este dado pressupõe a fixação de um determinado intervalo de tempo desejável. Este poderá todavia ser questionado e outros valores poderão ser ensaiados.

Neste caso, os componentes críticos que falharem antes do compressor ter acumulado o tempo de funcionamento limite fixado para a paragem geral, serão substituídos curativamente. Durante a paragem geral, todos os componentes críticos serão substituídos, independentemente da vida acumulada entretanto por cada um deles.

Este caso é mais facilmente resolúvel recorrendo à simulação pelo método de Monte-Carlo. Assim, supondo o intervalo de tempo desejável entre paragens gerais igual a 5.000 horas, obteremos, após 1.000 iterações e um nível de confiança de 95%, os seguintes resultados:

$MTTF_C = 4.078$ horas; $MTTR_C = 26,13 \pm 2,64$ horas; $Ch_C = 8,85 \pm 0,37$ €/hora de funcionamento; $D_C = 98,88\% \pm 0,00\%$

Quadro 11 – Coeficientes de simultaneidade

Componentes	Coeficientes
<i>Auto Drain</i>	10%
<i>Reed Valves</i>	100%
<i>Unloader</i>	15%
<i>Bearings</i>	100%
<i>Rings</i>	100%
<i>Pistons</i>	100%
<i>Check Valve</i>	100%
<i>Motor</i>	100%
<i>V Belts</i>	100%

O Quadro 12 mostra os resultados de uma das iterações. Neste pode-se ver que durante o período de 5.000 horas, os componentes 2 (*Reed Valves*), 4 (*Bearings*), 7 (*Check valve*) e 9 (*V belts*) falharam uma vez cada um deles. Os tempos de intervenção curativa somaram $28 + 80 + 12 + 8 = 128$ horas, mais a duração da paragem geral (24 horas) resultaram em 152 horas. Os custos das quatro intervenções curativas e da paragem geral somaram 108.575 €/ciclo de 5.000 horas ou 2.172 €/100 horas de funcionamento do compressor. Neste quadro pode-se ver ainda que a disponibilidade da política de manutenção preventiva resultou igual a 0,9696 e que o custo da política de manutenção curativa seria de 2.197 €/100 horas de funcionamento do compressor (nesta iteração muito próximo do custo da manutenção preventiva).

Quadro 12 – Resultados de uma das iterações do simulador

Política preventiva									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Custo/ciclo =	0	16.000	0	57.000	0	0	4.700	0	6.300
Custo/100 horas =	0	320	0	1.140	0	0	94	0	126
Down Time =	0	28	0	80	0	0	12	0	8
Conjunto									
	108.575 €/ciclo								
	2172 €/100 horas								
Down Time =	152,00 horas/ciclo								
Disponibilidade =	0,9696								
Política curativa									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Custo/100 horas =	4	258	9	481	709	466	56	136	79
Conjunto									
	2.197 €/100 horas								

Através de um método numérico, podem-se explorar os resultados em função de outros intervalos de tempo entre paragens gerais e determinar qual o valor deste que minimiza o custo horário ou que maximiza a disponibilidade estacionária.

Ensaando no simulador dez valores do intervalo de tempo entre paragens gerais, múltiplos, por exemplo, de 500 horas, começando em 5.000 horas e realizando 500 iterações em cada ensaio, obtiveram-se os resultados descritos no Quadro 13.

Conforme se pode observar neste quadro, o intervalo de tempo entre paragens gerais que proporciona o menor custo de manutenção (8,08 €/hora) é 7.500 horas. Não obstante, poder-se-ia optar por outro valor (pelo menos dentro do intervalo ensaiado entre 5.000 e 9.500 horas), tendo em conta que o custo horário pouco diferiria do valor mínimo (terceira coluna do Quadro 13).

Quadro 13 – Resultados de uma análise de sensibilidade

Periodicidade de ensaio (horas)	Custo total MP (€100 horas)	Acréscimo ao custo mínimo (%)	Custo total MP (€100 horas)
5.000	877,79	8,65%	1.183,06
5.500	900,95	11,51%	1.183,06
6.000	828,29	2,52%	1.183,06
6.500	832,10	2,99%	1.183,06
7.000	823,75	1,96%	1.183,06
7.500	807,93	0,00%	1.183,06
8.000	852,08	5,47%	1.183,06
8.500	845,37	4,63%	1.183,06
9.000	826,12	2,25%	1.183,06
9.500	838,06	3,73%	1.183,06

Correndo agora o simulador para 7.500 horas, obter-se-ia uma disponibilidade estacionária esperada de 98,87%.

5. Conclusões

O Quadro 14 resume os resultados obtidos dos modelos ensaiados.

Quadro 14 – Resultados dos modelos de manutenção do compressor

Modelos	Custo (€/hora)	Disponibilidade
3.1 Curativa	22,85	96,71%
3.4 Preventiva sistemática – custo mínimo	12,59	97,00%
3.5 Preventiva sistemática – disponibilidade máxima	14,80	97,41%
3.6 Preditiva	5,45 / 2,51*	98,70% / 99,06%*
4. Preventiva sistemática – substituição em bloco	8,08	98,87%

* *sem falsos positivos ou negativos*

Embora os modelos 3.6 e 4. contenham dados adicionais, o que torna um pouco inadequada a comparação, e sem pretensões de generalização, pode-se constatar a maior economia e a maior disponibilidade do modelo de manutenção preditiva, mesmo com falsos positivos ou negativos.

Interessante também notar que o modelo de manutenção com base na vida do compressor (substituição em grupo) proporciona menor custo e maior disponibilidade do que o modelo de manutenção com base na vida acumulada de cada componente crítico. Outra vantagem daquele modelo é o de não necessitar de uma monitorização do tempo de vida (ou do número de manobras) de cada componente específico.

Não obstante o facto de os custos com a aquisição e operação de equipamentos específicos de medida ou de sensores e actuadores ou ainda de contratação ou formação de pessoal especializado não terem sido considerados nos cálculos anteriores, é de crer que a política de manutenção preditiva tornar-se-á dominante nos próximos anos, pois os custos das tecnologias de medição e controlo vão continuar a diminuir e as competências e a polivalência dos operadores de máquina a aumentar.

Embora se tenha tratado de um caso específico, obedece contudo a um padrão comum, pelo que é de crer que as conclusões a que aqui se chegaram serão generalizáveis à maioria dos casos. Recomenda-se a análise quantitativa de cada caso concreto.

A análise realizada foi fundamentada recorrendo a técnicas divulgadas na literatura desde há uns anos, pelo que não se compreende que muitas decisões desta natureza sejam tomadas ainda hoje de forma empírica; mesmo em empresas com dimensão considerável – falta de tempo (como é comum ouvir-se...)? ou falta de conhecimentos e de exigência de rigor?