

Calendário de inspeções em Manutenção Preventiva Condicionada com base na Fiabilidade

Rui Assis

Faculdade de Engenharia da Universidade Católica Portuguesa

Rio de Mouro, Portugal

rassis@rassis.com

<http://www.rassis.com>

Resumo

Em manutenção preventiva sistemática um órgão crítico é substituído (recuperado, beneficiado ou afinado) com regularidade após ter acumulado um certo tempo de funcionamento ou periodicamente em conjunto com outros componentes críticos (substituição em grupo). Esta política de manutenção preventiva tem vindo progressivamente a ser substituída pela política de manutenção preditiva (ou preventiva condicionada), a qual se vem revelando mais eficaz e económica. Neste artigo propõe-se um método de construção de um calendário de inspeções de um componente crítico de um equipamento com base no conhecimento do seu comportamento previsional em falha, de modo a manter constante a fiabilidade entre cada duas inspeções e considerando um intervalo de tempo característico entre a falha potencial e a falha funcional (período P-F). O calendário resultante é caracterizado por intervalos de tempo variáveis entre inspeções e por um conjunto de janelas seguras e inseguras. Complementarmente, o calendário é ajustado para ter em conta a probabilidade de o método de teste usado devolver falsos negativos, bem como o grau de confiança do inspector nas condições de realização do teste. O método torna-se assim dinâmico e auto-ajustável. Este intervalo só será constante e igual ao período P-M após as janelas inseguras desaparecerem. A combinação de calendários de intervalos de tempo variáveis entre inspeções com o período P-F permite rejeitar a prática comum de adopção de intervalos de tempo entre inspeções constantes e iguais a uma fracção do intervalo P-F (metade frequentemente) e ainda uma economia de custos importante. Apresenta-se um exemplo de aplicação do método.

Palavras-chave

Bayes

Diagrama P-F

Fiabilidade

Intervalos de inspeção

Manutenção condicionada

1. Introdução

Muitos modos de falha exibem sinais indiciadores da proximidade da sua ocorrência. A manutenção sob condição ou condicionada baseia-se na capacidade de detecção daqueles sinais de modo a impedir a sua progressão e despoletar uma intervenção preventiva para substituição/reparação. Se durante uma inspecção, um técnico de manutenção detectar uma falha em curso, é muitas vezes possível evitar que ela atinja uma dimensão limite com consequências, por vezes catastróficas, providenciando a paragem planeada do equipamento. Alguns dos sinais de falha que podem ser detectados compreendem: vibrações, fracturas, temperatura, ruído, partículas metálicas, viscosidade, cor, etc. Nas últimas décadas foram desenvolvidas muitas técnicas capazes de monitorizar as características de uma falha, tais como a vibrometria, radiografia por raios X, ultra-sons, termografia de infravermelhos, análise de óleos, emissão acústica, etc.

Conforme recomendado pelo diagrama de decisão RCM¹ a manutenção preventiva condicionada (ou preditiva) deve ser preferida quando for técnica e economicamente viável. Esta política de manutenção pressupõe um controlo *on-line* quando é possível instalar sensores que monitorizam permanentemente o estado de condição de um componente crítico do equipamento ao qual pertence. O sinal enviado pelo sensor alerta para a proximidade de um estado limite aceitável de degradação e, a sua evolução temporal pode mostrar tendência – o que constitui uma ajuda para o planeamento da intervenção de manutenção. Quando o controlo *on-line* não é possível, então, levam-se a cabo inspecções (espaçadas no tempo de forma uniforme ou não). Este controlo recebe o nome de controlo *off-line*. Só quando a política de manutenção preventiva condicionada não se justifica técnica e/ou economicamente, se prossegue então para a política de manutenção preventiva sistemática (*overhaul*), na qual, um componente crítico é sistematicamente substituído; quer se encontre em mau ou em bom estado operacional.

Em muitos casos, uma falha não se declara imediatamente; antes, dá sinais de si (falha potencial), evolui durante algum tempo e manifesta-se finalmente com todas as consequências negativas (falha funcional). Noutros casos, como por exemplo em desgaste, este tipo de degradação verifica-se desde que um componente a ele sujeito entra em serviço e, muitas vezes, o seu avanço é facilmente mensurável. Nestas situações não existe propriamente uma falha potencial.

A política preditiva consiste basicamente em inspeccionar o estado de condição de cada órgão crítico e decidir após cada inspecção sobre se prosseguir até à próxima inspecção ou parar imediatamente, tendo em conta o resultado obtido. Um calendário de inspecções pode assim ser encontrado como correspondendo a um determinado critério (ou objectivo) ou por compromisso entre vários critérios (ou objectivos). No que se segue, procura-se um calendário que cumpra o objectivo de manter a fiabilidade entre cada duas inspecções sucessivas constante e igual a um valor previamente fixado.

2. Período P-F

O período P-F é um meio comum de ilustração do comportamento em falha de um componente de um equipamento, equipamento Moubay, (1999). O período (horas, km, ciclos, manobras, etc.) que medeia em média entre o momento em que uma falha potencial se inicia até que se transforma numa falha funcional é designado por “período P-F” (Potencial, Funcional), “período de alerta” ou “prazo de falha” (*lead time to failure*). Este período pode mediar entre uma fracção de segundo e várias décadas. A Figura 1 ilustra a evolução de uma falha potencial. Conforme a tecnologia de medição usada, assim o ponto *P* pode ser detectado mais cedo ou mais tarde. Por exemplo, no caso de um rolamento, a vibração é o primeiro efeito noticiável; vêm depois: o aumento de partículas no óleo de lubrificação, o ruído e, por fim, o desenvolvimento de calor antes de se verificar a sua destruição (gripagem).

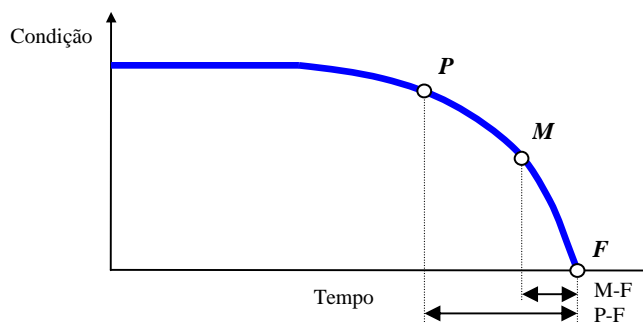


Figura 1 – Períodos P-F e M-F

¹ Reliability Centered Maintenance

O ponto M representa o momento mais tarde em que a falha pode ser detectada de forma a garantir tempo suficiente para tomar providências e evitar a sua transformação em falha funcional (ponto F) ou, pelo menos, evitar (ou minimizar) as suas consequências (por ex., um equipamento em rotação de grandes dimensões pode ser parado automaticamente por intermédio de sensores de vibração quando um determinado limite de desequilíbrio dinâmico é atingido – não se evita a falha mas limitam-se as consequências). O ponto F representa o momento em que a falha funcional se verifica.

O intervalo M-F é, portanto, o tempo mínimo de reacção ou o tempo que resta para se tomarem providências. Assim sendo, uma falha em progressão deve ser detectada entre os momentos P e M . Se o for mais tarde, já não se poderá evitar o pior.

No caso das falhas potenciais, estas levam algum tempo antes de se transformarem em falhas funcionais. Quando as consequências de uma tal falha são graves na perspectiva económica ou da segurança (pessoas e/ou ambiente), é importante evitar que a falha progrida até se revelar catastrófica. Para consegui-lo, têm de se realizar inspecções regulares de forma a detectar uma falha em curso e providenciar a paragem atempada do equipamento para reparação (ou substituição) do órgão falhado.

3. Intervalo de tempo entre inspecções

O intervalo de tempo entre inspecções poderá não ser constante, antes variará conforme a natureza do modo de falha que se procura acautelar.

Na prática, apresentam-se tipicamente duas fases:

- Uma primeira, em que se torna necessário estimar um calendário de intervenções (por ex., para efeitos do orçamento de actividades);
- Uma segunda, em que se deve reformular a data da próxima inspecção depois de um resultado negativo, tendo em conta o mecanismo de falha, a precisão do teste usado e a confiança do inspector nas condições de realização do teste.

De acordo com *Elsayed* (1996, p. 82), o critério mais comum de optimização nestes casos consiste em fixar um valor de fiabilidade entre cada duas inspecções R (ou probabilidade de que não ocorra uma falha entre cada duas inspecções). Nestas circunstâncias, os momentos de inspecção t_n serão determinados pela forma descrita adiante.

A fiabilidade entre inspecções é uma probabilidade condicional, isto é, a probabilidade R de não se verificar uma falha durante a próxima missão Δt (tempo até à próxima inspecção) dado não ter ocorrido nenhuma falha até ao momento t – momento em que terá terminado uma inspecção sem revelar qualquer falha em curso. Da expressão geral que fornece a fiabilidade condicionada $R(\Delta t/t) = \frac{R(t + \Delta t)}{R(t)}$, deduz-se que $R(t + \Delta t) = R(\Delta t/t) \cdot R(t)$. Como a fiabilidade deve ser mantida constante entre cada duas inspecções, ter-se-á que $R(\Delta t/t) = R(t)$.

Sendo n a enésima inspecção, conclui-se que:

$$R(t + \Delta t) = R^n \tag{1}$$

Este resultado poderia ser agora combinado com qualquer distribuição descritora de probabilidade de falha. Se for combinada com a distribuição de *Weibull*, *Ebeling* (1997), *Elsayed* (1996) obtém-se:

$$t_n = t_0 + \beta \cdot \left[-\ln(R^n) \right]^{1/\alpha} \tag{2}$$

Em que t_n representa o momento da enésima inspecção. Constata-se assim que, para um determinado valor de fiabilidade fixo $R(t)$ entre cada duas inspecções, quando α toma os valores descritos abaixo, verifica-se o seguinte:

- $\alpha < 1$: $(t_{n+1} - t_n) < (t_{n+2} - t_{n+1})$ a função de risco $h(t)$ é decrescente
- $\alpha = 1$: $(t_{n+1} - t_n) = (t_{n+2} - t_{n+1})$ a função de risco $h(t)$ é constante
- $\alpha > 1$: $(t_{n+1} - t_n) > (t_{n+2} - t_{n+1})$ a função de risco $h(t)$ é crescente

Isto é, constata-se que, quando a função de risco decresce, os intervalos entre inspecções crescem e *vice-versa*. O valor de $\alpha = 1$ desempenha o papel de “linha divisória” entre falhas infantis e falhas por degradação.

O modelo aqui descrito segundo *Elsayed* (1996, p. 82), não teve em conta a existência do período P-F, *Moubray*, (1999, p. 117). Se este período for conhecido, a determinação de um calendário de inspecções tornar-se-á um pouco mais complexa.

Cada inspecção n deve então ter lugar nos momentos t_n calculados por (2) com excepção do período em que se verifica $(t_{n+1} - t_n) < P-M$. Neste período, as inspecções terão lugar com a periodicidade P-M. Ter-se-á assim, até um determinado limite temporal T_p , uma sucessão de “janelas de tempo seguras” ($M_n - P_n$) a cinza na Figura 2 e “janelas de tempo inseguras” ($P_n - M_{n-1}$). A probabilidade de uma falha potencial não ser detectada, será assim igual à probabilidade de o ponto P cair dentro das janelas de tempo inseguras. Se todas as inspecções forem localizadas nos momentos $M_n \equiv t_n$ conforme em (2), as janelas de tempo seguras estender-se-ão conseqüentemente ($M_n - P_n$) para trás.

Se uma falha potencial se declarar no interior de uma janela segura, aquela será detectada e o componente será reparado ou substituído prontamente sem conseqüências económicas relevantes. Se, pelo contrário, uma falha potencial se declarar fora das janelas seguras, esta não será detectada e a falha funcional terá lugar, sofrendo-se as conseqüências económicas. Se não se verificar nenhuma falha até T_p , o componente será reparado/substituído neste momento.

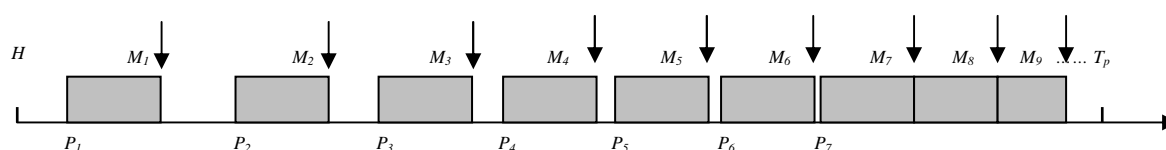


Figura 2 – Janelas seguras P_n-M_n (cinza) momento H (hoje) e momento T_p (paragem para overhaul). As setas representam os momentos de inspecção.

Este método de combinar calendários de intervalos de tempo variáveis entre inspecções com o período P-F permite rejeitar a prática comum de adopção de intervalos de tempo entre inspecções constantes e iguais a uma fracção do intervalo P-F (metade frequentemente). Este intervalo só deve ser constante e igual ao período P-M após as janelas inseguras desaparecerem.

4. Exemplo de aplicação

Uma empresa possui várias máquinas de corte por jacto de água. Determinadas curvas dos tubos de aço inoxidável que conduzem água sob muito alta pressão (cerca de 4.000 bar) em fluxo intermitente sofrem processos de fadiga e erosão interna e acabam por abrir fendas e romper. A empresa pretende prevenir estas falhas implementando uma política de manutenção condicionada. Para tal, seleccionou a radiografia como método de teste para detectar precocemente o início de uma fenda.

4.1 Recolha de dados

O Quadro 1 mostra as vidas acumuladas de sete destes acessórios até ao momento da sua substituição – passaram 115 dias desde a última.

Quadro 1 – TTF's dos últimos 7 tubos

Substituições	Falha (F) (dias)
1	689
2	797
3	372
4	1.148
5	1.320
6	877
7 (hoje)	115*

* durará mais tempo

De acordo com especialistas em engenharia de materiais, o intervalo de tempo entre a ocorrência de uma fenda no interior do material (eventualmente detectável por radiografia – ponto P da curva P-F) e a sua migração até à superfície, originando uma fuga de água e a paragem da máquina (ponto F da curva P-F), é em média 1.200 horas (equivalente a 80 dias de trabalho a 15 horas úteis/dia). A empresa pretende contar com 5 dias para reagir ao anúncio da necessidade de uma próxima paragem para substituição de um tubo e replanear toda a carga de trabalho. O período P-M será assim igual a $80 - 5 = 75$ dias. Todos os meios se encontram já disponíveis e pretende-se saber:

- a) Qual deverá ser o calendário de inspeções a partir de novo, admitindo uma fiabilidade mínima entre inspeções de $R = 0,95$?
- b) Tendo a primeira inspeção resultado negativa, qual deverá ser a data da próxima inspeção, tendo em conta que o grau de confiança atribuído às condições em que o teste foi realizado é $P(cf) = 0,9$ e que o aparelho de teste por radiografia usado apresenta uma probabilidade de falsos negativos de $P(fn) = 0,05$?
- c) Tendo a segunda inspeção resultado também negativa, qual deverá ser a data da próxima inspeção? O grau de confiança atribuído às condições em que o teste foi realizado é, desta vez, $P(cf) = 0,5$.

4.2 Resolução do caso

a)

Recorrendo ao método de aproximação de *Bernard*, segundo *Abernethy* (2004), determinam-se os parâmetros da distribuição de probabilidade *Weibull* de melhor aderência aos dados empíricos. Estes parâmetros, para um coeficiente de determinação $r^2 = 0,9686$, foram os seguintes: $t_0 = 0$; $\alpha = 2,29$ e $\beta = 999$ dias.

De modo semelhante ao caso anterior e recorrendo a (1), obtém-se o Quadro 2 (primeiras 6 inspeções). A próxima inspeção deverá ter lugar dentro de 348 dias. Notar que, logo que as janelas inseguras desaparecem, bastará realizar as inspeções com a periodicidade P-M.

Quadro 2 – Intervalos de inspeção recomendados

$t_0 = 0$		Tempo já decorrido = 0				
$\alpha = 2,29$		Período P-M = 75				
$\beta = 999$		Fiabilidade mínima requerida = 0,95				
Inspeção n	R_i^n	Momentos de inspeção (M_n) a partir de novo	Momentos de inspeção (M_n) a partir de hoje	Intervalos entre inspeções	Momentos (P_{n-1}) a partir de novo	Probab. de falha funcional $F(P_n/M_n)$
1	0,914466	348	348	348	273	0,050000
2	0,836248	471	471	123	396	0,030338
3	0,764721	562	562	91	487	0,014341
4	0,699311	638	638	76	563	0,000302
5	0,639496	713	713	75	638	0,000000
6	0,584798	788	788	75	713	0,000000

b)

Tomando em conta a precisão do teste e o grau de confiança nas condições da sua realização bem como o resultado negativo obtido na primeira inspeção (aos 348 dias de trabalho do tubo), o calendário do Quadro 1 já não será válido. Com efeito, a probabilidade de detecção de uma falha durante uma inspeção $P(df)$ é uma probabilidade condicional dos seguintes factores (cujas probabilidades são conhecidas):

- Ocorrência de uma falha $P(of)$ cuja probabilidade conhecemos a partir dos parâmetros da distribuição de *Weibull* $P(of) = \text{WEIBULL}(348; 999; 2,29; 1) = 0,085497$;
- Existência de condições físicas favoráveis à realização do teste $P(cf)$, as quais se verificam, em média, 9 em cada 10 inspeções;
- Precisão do teste usado $P(vn)$, a qual proporciona, em média, 95 verdadeiros negativos (ou 5 falsos negativos) em cada 100 inspeções.

A probabilidade de detecção de uma falha $P(df)$ é assim calculável pela produto das probabilidades de se verificarem aquelas circunstâncias: $P(df) = P(of).P(cf).P(vn)$.

Embora se conheça a verdadeira probabilidade de ocorrência de uma falha $P(of)$, tendo em conta que uma falha nem sempre será noticiada ou reconhecida como tal, esta probabilidade deverá ser artificialmente majorada $P(of)^*$ de modo a acautelar estes factores e diminuir os intervalos entre inspeções. Para tal, considera-se $P(df)$ igual a $P(of)$ e calcula-se o valor de $P(of)$ ajustado $P(of)^*$ (ver a Figura 3).

$$P(of)^* = P(df) / [P(cf).P(vn)] = 0,085497 / [0,9 \times (1 - 0,05)] = 0,099996$$

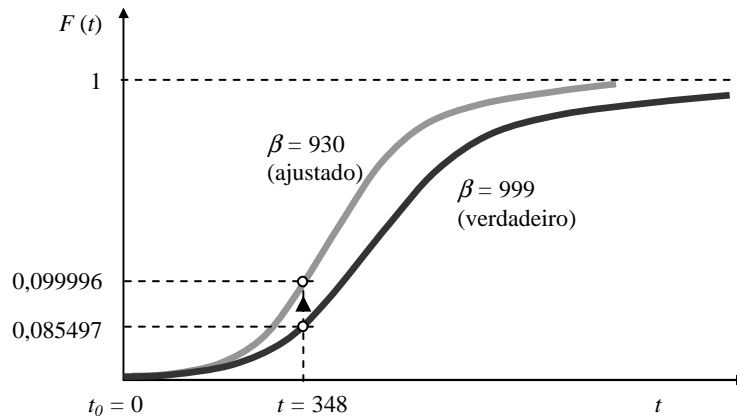


Figura 3 – Ajustamento do parâmetro β

Este parâmetro fictício β da distribuição de Weibull que apresenta uma probabilidade acumulada de falha de 0,099996 até 348 dias é deduzido de (2), resultando:

$$\beta_{corr} = \frac{t}{-\ln(1 - P(of)_{aj})^{1/\alpha}} = \frac{348}{-\ln(1 - 0,099996)^{1/2,29}} = 930 \text{ dias}$$

Substituindo este valor, obtém-se novo calendário de inspeções (Quadro 3).

Quadro 3 – Intervalos de inspeção recomendados após o 1º ajustamento de β

$t_0 = 0$				Tempo já decorrido = 348			
$\alpha = 2,29$				Período P-M = 75			
$\beta = 930$				Fiabilidade mínima requerida = 0,95			
Inspeção n	R_i^n	Momentos de inspeção (M_n) a partir de novo	Momentos de inspeção (M_n) a partir de hoje	Intervalos entre inspeções	Momentos (P_{n-1}) a partir de novo	Probab. de falha funcional $F(P_n/M_n)$	
1	0,911446	329	-	329	254	0,050001	
2	0,830733	446	98	117	371	0,028460	
3	0,757168	532	184	86	457	0,010896	
4	0,690118	607	259	75	532	0,000000	
5	0,629005	682	334	75	607	0,000000	
6	0,573304	757	409	75	682	0,000000	

Assim, a segunda inspeção que originalmente deveria ser realizada aos 471 dias é antecipada para o dia 446, ou seja, após 98 dias da primeira.

c)

A terceira inspeção seria aos 532 dias mas, como esta inspeção mereceu um grau de confiança de apenas 0,5, ter-se-á de refazer os cálculos da alínea anterior. Aos 446 dias, a probabilidade de uma falha se encontrar em curso é, no Excel, WEIBULL(446; 999; 2,29; 1) = 0,145938. Esta probabilidade é agora majorada, fazendo $0,145938 / [0,5 \times (1 - 0,05)] = 0,307237$. O valor do parâmetro de escala β volta a ser ajustado, desta vez para:

$$\beta_{corr} = \frac{t}{-\ln(1 - F)^{1/\alpha}} = \frac{446}{-\ln(1 - 0,307237)^{1/2,29}} = 691 \text{ dias}$$

Substituindo estes valores, obtém-se novo calendário de inspeções (Quadro 4).

Quadro 4 – Intervalos recomendados após o 2º ajustamento de β

$t_0 = 0$					Tempo já decorrido = 446	
$\alpha = 2,29$					Período P-M = 75	
$\beta = 691$					Fiabilidade mínima requerida = 0,95	
Inspeção n	R_i^n	Momentos de inspeção (M_n) a partir de novo	Momentos de inspeção (M_n) a partir de hoje	Intervalos entre inspeções	Momentos (P_{n-1}) a partir de novo	Probab. de falha funcional $F(P_n/M_n)$
1	0,895556	264	-	264	189	0,050000
2	0,802021	357	-	93	282	0,018118
3	0,718255	432	-	75	357	0,000000
4	0,643238	507	61	75	432	0,000000
5	0,576055	582	136	75	507	0,000000
6	0,515890	657	211	75	582	0,000000

Assim, a terceira inspeção que anteriormente deveria ser realizada aos 532 dias (86 dias depois), é antecipada para o dia 507, ou seja, após $507 - 446 = 61$ dias da segunda inspeção.

O processo visto até aqui prossegue com intervalos de 75 dias até que o teste do tubo resulta positivo e é substituído.

Notar que o ajustamento do parâmetro β só se torna necessário quando se verificar uma ou as duas circunstâncias seguintes:

- A eventual substituição do método usado nos testes, implicando uma precisão diferente;
- Alteração do grau de confiança nas condições físicas de realização dos testes.

O método torna-se assim dinâmico e auto-ajustável.

O Quadro 5 põe em confronto os três calendários obtidos anteriormente na perspectiva do prazo para a realização das primeiras seis inspeções. A sua leitura permite tirar duas conclusões:

- Este prazo reduz-se quando o parâmetro β diminui, aumentando o custo diário com inspeções (6 inspeções x # €/inspeção / Prazo de realização das 6 inspeções)
- Este prazo reduz-se ainda mais, no caso de não se considerar o período P-F.

Quadro 5 – Prazo para a realização das primeiras seis inspeções

Parâmetro de escala (dias)	$\beta = 999$	$\beta = 930$	$\beta = 691$
Considerando o período P-F (dias)	788	757	657
Não considerando o período P-F (dias)	597	556	413

Esta última conclusão é muito importante pois evidencia que considerar o período P-F (ou o conseqüente conjunto de janelas seguras e inseguras) permite economizar algumas inspeções sem que o risco de não detectar uma falha em curso aumente por este facto.

5. Conclusões

Na ausência de outros critérios para a construção de um calendário de inspeções de modos de falha evidentes em manutenção preventiva condicionada, o objectivo de um valor de fiabilidade entre cada duas inspeções consecutivas fixado, mesmo que arbitrariamente, é bastante apelativo. Outro critério a ter em conta, o qual será contemplado em próximo artigo, consistirá em determinar aquele valor de fiabilidade que torne mínimo o custo horário esperado de operação e manutenção do equipamento ao qual o componente em análise pertence.

A combinação de calendários de intervalos de tempo variáveis entre inspeções com o período P-F permite rejeitar a prática comum de adopção de intervalos de tempo entre inspeções constantes e iguais a uma fracção do intervalo P-F (metade frequentemente) e ainda uma economia de custos importante.

O registo histórico de falsos negativos obtidos na utilização de diferentes tecnologias de inspeção e sua posterior consideração nos cálculos de fiabilidade permite afinar o calendário de inspeções de modo a realizar as estritamente necessárias e garantir mesmo assim a fiabilidade requerida ao menor custo possível.

Considerar o período P-F (ou o conseqüente conjunto de janelas seguras e inseguras) na determinação de um calendário de inspeções é mais económico do que não o fazer pois reduz a quantidade de inspeções necessárias sem que se verifique um aumento do risco de não detecção de uma falha.

Na continuidade deste caso, à medida que mais tubos vão sendo substituídos, mais TTF vão sendo conhecidos e adicionados ao Quadro 1. Com mais informação, os parâmetros da distribuição de *Weibull* podem ser progressivamente reajustados, contribuindo assim para uma maior confiança quanto à sua representatividade do modo de falha.

O método torna-se assim dinâmico e auto-ajustável.

Descartar progressivamente os dados mais antigos e manter uma janela temporal de amplitude constante constitui uma boa prática de gestão, pois permite melhor ponderar os efeitos que o envelhecimento progressivo do equipamento possa ter sobre o componente analisado.

Referências bibliográficas

- ABERNETHY, Robert B., *The New Weibull Handbook*, 5th edition, Author and Publisher, 2004
- EBELING, Charles E., *Reliability and Maintainability Engineering*, Mc-Graw Hill, Boston, 1997
- ELSAYED, A., *Reliability Engineering*, Addison Wesley Longman, Inc., New York, 1996
- MOUBRAY J.M., *Reliability Centred Maintenance*. Butterworth - Heinemann, Oxford, 2nd edition, 1999