



## **Política combinada de manutenção, considerando inspeção, substituição por idade, e oportunidades para componentes provenientes de população heterogênea**

Cristiano Cavalcante

Grupo de pesquisa em Risco e Análise de Decisão em Operações e Manutenção,  
Departamento de Engenharia de Produção,  
Universidade Federal de Pernambuco, Recife PE, CEP: 50.670-901, Brasil  
cristianogesm@gmail.com

Rodrigo Lopes

Grupo de pesquisa em Risco e Análise de Decisão em Operações e Manutenção,  
Departamento de Engenharia de Produção  
Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru – PE, CEP: 55002-970, Brasil  
rodrigoengep@gmail.com

### **RESUMO**

Sistemas de alta produtividade exigem programas de manutenção precisos que mantêm o desempenho sem requerem longos períodos de inatividade. Oportunidades proporcionam boas ocasiões para manter o sistema, evitando a paralisação futura e dando a melhoria necessária no desempenho dos sistemas. Este artigo propõe um modelo onde a influência de oportunidades é considerada para um sistema, cuja componente é de população heterogênea. Sem regras que direcionem o uso das oportunidades, elas podem ser mal utilizadas ou desperdiçadas. Assim, considerar a janela de tempo onde as oportunidades podem ser desfrutadas podem trazer benefícios para o desempenho do sistema, como maior disponibilidade e menor custo. Os resultados mostram algumas vantagens em considerar a manutenção por oportunidades, adicionalmente às ações de inspeção e às ações manutenção preventiva.

**PALAVRAS CHAVE. Políticas de manutenção, Inspeções, Oportunidades.**

**Tópicos (Manutenção Oportuna; Modelo *Delay time*; políticas de manutenção para componentes advindos de população heterogênea; Desempenho de sistema)**

### **ABSTRACT**

Systems of high productivity demand precise maintenance programs that keep them performance without require long downtimes. Opportunities provide good occasions to maintain the system, preventing future stoppage and giving the needed improvement on the systems' performance. This paper proposes a model where the influence of opportunities is considered for a system, whose component is from heterogonous population. Without rules that drive the opportunities' use, they can be misused or wasted. Thus, to consider the window of time where the opportunities can be enjoyed can bring benefits for the system performance, such as higher availability and smaller cost. The results show some advantages in considering maintenance by opportunities, besides the inspection and preventive maintenance actions.

**KEYWORDS. Maintenance policy. Inspection. Opportunities.**

**Paper topics (Opportunistic Maintenance; Delay Time Model; Maintenance policies for components from heterogeneous populations; System performance)**



## 1. Introdução

A manutenção das instalações industriais é primordial para garantir o funcionamento confiável dos equipamentos. De acordo com o estudo realizado por [Mobley (1990)] entre 15% a 60% do total dos custos de produção estão relacionados a atividades de manutenção. Para reduzir o número de incidências de falhas e aumentar a capacidade de produção, um programa de manutenção eficaz é essencial para planejamento e operação dos sistemas industriais.

Para qualquer programa de manutenção a atividade de inspeção é sempre uma atividade necessária, uma vez que fornece informações sobre a condição do item, facilitando a execução de ações de reparo e substituição. [Wang e Carr (2011)] afirmam que mais de 80% das atividades de manutenção preventiva estão relacionadas a falhas previamente relatadas ou identificadas por ações de inspeção.

As ações de inspeção, como uma abordagem de manutenção, para um equipamento, só pode ser benéfica se houver um período suficiente entre o tempo que um defeito potencial é observado e o tempo real de falha do equipamento [Yang et. Al. 2016]. Desta maneira o tempo decorrido entre o ponto de início do defeito e o ponto em que a falha se torna óbvia é essencial para estimar o intervalo de inspeção. Este tempo se refere ao processo de falha de dois estágios definido como *delay-time*, que foi proposto pela primeira vez por [Christer 1976].

Sistemas que seguem uma distribuição de mistura surge em várias situações. Uma situação típica consiste em uma população heterogênea com várias sub-populações, que representam mutuamente dois modos de falha exclusivos: um relacionado a falhas precoces e com tempo médio de falha pequeno e outro relacionado com falhas de desgaste com o tempo médio de falha longo [Scarf et al. 2011]. Quando o tempo até a falha de um item segue uma distribuição de mistura, é difícil determinar uma política de manutenção adequada para reduzir as falhas da fase inicial. Assim uma política de inspeção na fase inicial de vida do sistema pode trazer benefícios.

Para melhorar a eficácia da política de manutenção e melhorar o desempenho dos sistemas as atividades de inspeção podem ser combinadas com outras ações de manutenção. Dessa forma, o processo para decisão tem de ser pensado não só de um ponto de vista local (uma única ação de manutenção), mas também a partir de um ponto de vista do desempenho do sistema, considerando as relações existentes. A manutenção oportuna vem a contribuir com este objetivo onde busca combinar ações de manutenção com objetivo de construir abordagens mais eficazes de manutenção.

O paradigma da manutenção oportuna é aproveitar os eventos de oportunidade para realização de uma ação de manutenção que ocorre dentro de um limite de controle. As políticas de manutenção oportuna devem responder a duas questões fundamentais: quando é vantajoso aproveitar as oportunidades e quais ações de manutenção devem ser realizadas.

Em alguns estudos a oportunidade da manutenção ocorre relacionada às ações de manutenção em alguma parte do sistema em outros estudos ocorrem conforme um processo estocástico, nas duas situações as oportunidades surgem no tempo e quando uma oportunidade surge, para poder ser aproveitada, é necessário ter todos os recursos necessários para ação de manutenção recomendada, como: peças de reposição, pessoal, etc. Necessitando para isto um planejamento efetivo de quando é possível ter vantagem com as oportunidades.

Este artigo examina a eficácia da uma política de manutenção que trata não só aspectos relativos a heterogeneidade da população dos componentes sob análise, como também considerando a existência de oportunidades, que podem ser advindas de falhas de uma sub parte que influencia o funcionamento do sistema como todo. Por um lado, as inspeções são realizadas, de modo a explorar e eliminar os itens fracos e atenuar as falhas iniciais do sistema. Por outro lado, para aumentar a eficácia da política, são definidos os intervalos para que as oportunidades sejam aproveitadas. Para o caso de não surgir oportunidade no intervalo especificado uma ação preventiva é indicada.

O restante deste artigo está dividido como: Na seção 2 é apresentado o conceito *delay-time*, na seção 3 a descrição do Problema, na seção 4 a modelagem do Problema, em seguida na seção 5 é apresentado o estudo numérico com análise de sensibilidade e por fim na seção 6 a conclusão



## 2. O conceito *delay-time*

O conceito *delay-time* foi proposto por [Christer, 1976] e desde então várias pesquisas foram desenvolvidas. Como demonstrado nas revisões da literatura relacionadas ao *delay-time* apresentadas por [Baker & Christer, 1994] e [Wang, 2012]. A seguir são apresentados alguns artigos que aplicaram a modelagem *delay-time*.

Cavalcante et al. (2011) consideram uma política de inspeção para um único componente de um sistema de proteção, em que o componente provém de uma população heterogênea. Em qualquer ponto no tempo, o sistema pode estar em um dos três estados, bom, com defeito ou falha. O sistema só é utilizado em caso de emergência, e, a fim de garantir uma elevada disponibilidade do sistema, são realizadas uma sequência de inspeções. São considerados os critérios de disponibilidade e custo. A política é estudada no contexto de uma válvula numa rede de abastecimento gás.

[Wang et al (2012)] modela o mecanismo de falha onde as chegadas de defeitos são assumidas como processos de Poisson. As variáveis de decisão são os intervalos de inspeção, enquanto a função objetivo é expressa em termos de custo, *downtime* ou confiabilidade. O modelo é demonstrado através de um exemplo numérico.

[Lu et al. (2012)] estudam um sistema com um componente e outro redundante. Os processos de falha destes dois componentes são estatisticamente idênticos. A inspeção periódica é realizada para verificar se o componente está defeituoso ou não. Se o defeito for identificado, o componente é desligado e enviado para reparo. A capacidade de reparo é limitada para reparar apenas um componente. Apresentam cinco cenários do estado do sistema em um período de inspeção, que são derivados analiticamente. O custo mínimo por unidade de tempo é encontrado.

[Wang et al. (2014)] apresentam um modelo de política de inspeção de dois níveis para um sistema com único componente. O primeiro nível de inspeção, a inspeção menor, só pode identificar o estágio com defeito menor com uma certa probabilidade, mas sempre pode revelar o estágio com defeito grave. A inspeção principal pode, contudo, identificar ambos os estágios defeituosos. Eles constroem um modelo que otimiza o custo a longo prazo esperado por unidade de tempo com base no teorema de recompensa por renovação.

[Lopes et al. (2015)] propõem uma política para o desenvolvimento de um programa de inspeção e programação de equipes de inspeção e de resposta ao *breakdown*. Com objetivo de encontrar o tempo entre as inspeções, o número de equipes para agendamento e o número de equipes para atender o *breakdown* que minimizam o custo.

[Yang et al (2015)] propõem um modelo de inspeção que otimiza o intervalo de inspeção, minimizando o custo esperado por unidade de tempo. Assumem que a inspeção é imperfeita para identificar o estágio defeituoso menor. A inspeção perfeita, porém, é realizada se a inspeção detecta que o sistema está com defeito grave. O modelo foi aplicado a rolamentos.

[Yang et al. (2016)] propõem uma política de inspeção para um sistema de componente único que sucessivamente executa missões com durações aleatórias. O processo de falha do sistema pode ser dividido em dois estados, normal e defeituosos. As inspeções são realizadas periodicamente e imediatamente após a conclusão de cada missão (inspeções aleatórias). Obtiveram o custo esperado por unidade de tempo.

[Ramadan (2016)] apresenta um modelo de otimização bi-objetivo para encontrar o número e o tempo aperiódico para as inspeções de sistemas reparáveis com vida finita. Considerando a disponibilidade do componente e o custo de manutenção total.

Pode-se destacar que a modelagem *delay-time* vem recebendo grande atenção dos pesquisadores, com aplicações e desenvolvimentos em várias setores, nota-se no entanto que a aplicação do conceito *delay-time* combinado a outras políticas de manutenção ainda é pouco explorado, principalmente no que tange a consideração de oportunidades.



### 3. Descrição do Problema

Considere um sistema que segue uma distribuição de mistura composta por uma sub-população de itens fracos. O processo de falha do sistema tem duas etapas: o tempo até a chegada do defeito é considerado a primeira fase, deste ponto até o estado falho, caracteriza-se a segunda fase. Esta consideração no sistema implica que a inspeção é viável e pode identificar o defeito, evitando assim a falha do sistema. A sub-população de itens fracos tem uma maior probabilidade de falhar logo no início da vida, desta maneira são programadas inspeções para identificar os defeitos precoces e evitar as falhas. As inspeções são perfeitas e conseguem identificar os defeitos no momento da inspeção. Todos os defeitos encontrados no momento da inspeção são reparados durante a inspeção. Após o período de inspeção, como o sistema sofre com a ação do tempo são definidos limites de controle para aproveitar as oportunidades que surgem. Considera-se que as oportunidades surgem conforme um processo de Poisson e que a ação de manutenção oportuna renova o sistema a uma condição de tão bom quanto novo. Caso não ocorra oportunidades durante o intervalo de controle uma ação de manutenção preventiva é indicada, com objetivo de evitar a falha do sistema. A ação preventiva é perfeita e renova o sistema. O objetivo do modelo é estabelecer as ações de manutenção para minimizar o custo esperado.

#### 3.1 Notação

##### Parâmetros

$h$  Delay-time

$x$  chegada do defeito

$F(x)$  Função distribuição de probabilidade acumulada de  $x$

$F(h)$  Função distribuição de probabilidade acumulada  $h$

$f(x)$  Função densidade de probabilidade de  $x$

$f(h)$  Função densidade de probabilidade de  $h$

$1/\lambda_1$  Delay-time medio

$\mu$  Taxa de chegada das oportunidades

$C_i$  Custo de inspeção

$C_o$  Custo de oportunidade

$C_r$  Custo de substituição preventiva

$C_f$  Custo da falha

$p$  parâmetro da distribuição de mistura

$\eta_1$  parâmetro de escala da distribuição de vida da sub-população de componentes fracos

$\beta_1$  parâmetro de forma da distribuição de vida da sub-população de componentes fracos

$\eta_2$  parâmetro de escala da distribuição de vida da sub-população de componentes fortes

$\beta_2$  parâmetro de forma da distribuição de vida da sub-população de componentes fortes

##### Variáveis de decisão

$K$  número de inspeções durante o período de inspeções

$\Delta$  intervalo entre as inspeções

$t$  Idade em que as oportunidades passam a ser consideradas

$T$  Idade para substituição preventiva

#### 3.2 Pressupostos

- 1) As oportunidades são independentes do surgimento dos defeitos
- 2) As oportunidades surgem conforme um processo de Poisson
- 3) Os componentes seguem uma distribuição de mistura
- 4) O componente pode assumir três estados: defeito, falha, bom.
- 5) O tempo de *delay-time* é independente da chegada do defeito
- 6) Inspeções são perfeitas
- 7)  $C_i < C_o < C_r < C_f$  Custo da inspeção é menor que o custo da oportunidade que é menor que o custo da falha



O primeiro pressuposto diz respeito à ocorrência de oportunidades serem independentes do surgimento de defeito no equipamento estudado. O segundo pressuposto está relacionado ao surgimento das oportunidades conforme um processo de Poisson. O terceiro pressuposto está relacionado à distribuição do sistema considerando uma distribuição de mistura com itens fracos. O quarto e quinto pressuposto comumente utilizado para modelagem de inspeção com conceito *delay-time*. O sexto pressuposto afirma que no momento da inspeção os defeitos presentes são identificados. O sétimo pressuposto apresenta as relações de custos.

#### 4. Modelagem do Problema

Para descrever o custo total é necessário considerar os custos de inspeção, substituição preventiva, oportunidade e custo de falha vezes suas respectivas probabilidades de ocorrência, este valor vai ser representado por  $EC(\Delta, K, t, T)$ . Após definir o valor esperado de custo é necessário definir o tamanho esperado do ciclo representado  $EL(\Delta, K, t, T)$ .

O valor de custo vezes as respectivas probabilidades definido pela Equação 1.

$$\begin{aligned}
 EC(\Delta, K, t, T) = & \sum_{i=1}^K (C_B + iC_I) \int_{(i-1)\Delta}^{i\Delta} f(x)R_h(i\Delta - x)dx + \sum_{i=1}^K (C_F + (i-1)C_I) \int_{(i-1)\Delta}^{i\Delta} f(x)F_h(i\Delta - x)dx \\
 & + (C_F + KC_I) \left[ \int_{K\Delta}^t f(x)F_h(t-x)dx \right. \\
 & + \int_{K\Delta}^t f(x) \int_{t-x}^{T-x} f(h) \left[ 1 - \int_t^{x+h} \mu e^{-\mu(z-t)} dz \right] dhdx \\
 & + \left. \int_t^T f(x) \int_0^{T-x} f(h) \left[ 1 - \int_t^{x+h} \mu e^{-\mu(z-t)} dz \right] dhdx \right] \\
 & + (C_O + KC_I) \left[ \int_{K\Delta}^t f(x) \int_{t-x}^{T-x} f(h) \int_t^{x+h} \mu e^{-\mu(z-t)} dz dhdx \right. \\
 & + \int_t^T f(x) \int_0^{T-x} f(h) \int_t^{x+h} \mu e^{-\mu(z-t)} dz dhdx + \int_T^\infty f(x) \int_t^T \mu e^{-\mu(z-t)} dz dx \\
 & + \left. \int_{K\Delta}^t f(x) \int_{T-x}^\infty f(h) \int_t^T \mu e^{-\mu(z-t)} dz dhdx + \int_t^T f(x) \int_{T-x}^\infty f(h) \int_t^T \mu e^{-\mu(z-t)} dz dhdx \right] \\
 & + (C_B + KC_I) \left[ \int_{K\Delta}^T f(x) \int_{T-x}^\infty f(h) \left[ 1 - \int_t^T \mu e^{-\mu(z-t)} dz \right] dhdx \right. \\
 & + \left. \int_T^\infty f(x) \left[ 1 - \int_t^T \mu e^{-\mu(z-t)} dz \right] dx \right]
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Após encontrar o custo esperado, é necessário definir o valor esperado do ciclo representado pela Equação 2.



$$\begin{aligned}
 EL(\Delta, K, t, T) = & \sum_{i=1}^K i\Delta \int_{(i-1)\Delta}^{i\Delta} f(x)R_h(i\Delta - x)dx + \sum_{i=1}^K \int_{(i-1)\Delta}^{i\Delta} \int_0^{i\Delta-x} (x+h)f(h)f(x)dhdx \\
 & + \int_{K\Delta}^t \int_0^{t-x} (x+h)f(h)f(x)dhdx \\
 & + \int_{K\Delta}^t \int_{t-x}^{T-x} (x+h)f(x)f(h) \left[ 1 - \int_t^{x+h} \mu e^{-\mu(z-t)} dz \right] dhdx \\
 & + \int_t^T \int_0^{T-x} (x+h)f(h)f(x) \left[ 1 - \int_t^{x+h} \mu e^{-\mu(z-t)} dz \right] dhdx \\
 & + \int_{K\Delta}^t \int_{t-x}^{T-x} f(h)f(x) \int_t^{x+h} (z)\mu e^{-\mu(z-t)} dz dhdx \\
 & + \int_t^T \int_0^{T-x} f(h)f(x) \int_t^{x+h} (z)\mu e^{-\mu(z-t)} dz dhdx + \int_T^\infty f(x) \int_t^T (z)\mu e^{-\mu(z-t)} dz dx + \\
 & + \int_{K\Delta}^t \int_{T-x}^\infty f(h)f(x) \int_t^T (z)\mu e^{-\mu(z-t)} dz dhdx \\
 & + \int_t^T \int_{T-x}^\infty f(h)f(x) \int_t^T (z)\mu e^{-\mu(z-t)} dz dhdx \\
 & + T \left[ \int_{K\Delta}^t \int_{T-x}^\infty f(h)f(x) \left[ 1 - \int_t^T \mu e^{-\mu(z-t)} dz \right] dhdx \right. \\
 & \left. + \int_T^\infty f(x) \left[ 1 - \int_t^T \mu e^{-\mu(z-t)} dz \right] dx \right]
 \end{aligned}$$

(2)

Observa-se que as probabilidades consideram exaustivamente todos os eventos disjuntos que caracterizam uma substituição (renovação). Nesse sentido, nós podemos fazer uso do teorema de renovação por recompensa [Tijms, 1994] em que o custo por unidade de tempo a longo prazo é nossa função objetivo  $ET(\Delta, K, t, T)$  descrita pela Equação 3.

$$\text{Min } ET(\Delta, K, t, T) = \frac{EC(\Delta, K, t, T)}{EL(\Delta, K, t, T)}$$

Sujeito a:

$$\begin{aligned}
 \Delta, K, t, T &> 0 \\
 \Delta K &\leq t \\
 t &\leq T
 \end{aligned}$$

(3)

O objetivo da modelagem proposta é minimizar o custo esperado por unidade de tempo, por meio da escolha das variáveis de decisão. Na próxima seção um estudo numérico é realizado.

## 5 Estudo Numérico

Usando dados realísticos para os parâmetros foram obtidos os valores ótimos para as variáveis intervalo de inspeção  $\Delta$ , número de inspeções  $K$ , idade para oportunidade  $t$  e idade para preventiva  $T$ , de modo a minimizar o valor esperado de custo por unidade de tempo  $ET(\Delta, K, t, T)$

### Exemplo 1

Considerando que os componentes seguem uma distribuição de mistura *Weibull* e os custos  $Co=1$  reais/ocorrência,  $Cf=10$  reais/ocorrência,  $Cr=2$  reais/ocorrência,  $Ci=0,05$  reais/ocorrência,  $\lambda=2$ ,  $\mu=1$ ,  $p=0,1$ ,  $\eta_1=0,8$ ,  $\beta_1=2,5$ ,  $\eta_2=3,6$ ,  $\beta_2=5$ , em seguida o custo total



esperado  $ET= 1,05$  com intervalo entre inspeções de  $\Delta=0,396$ , sendo realizado 4 inspeções  $K=4$ , após a idade de  $t=1,587$  caso ocorra uma oportunidade deve ser aproveitada e o sistema renovado, caso não ocorra oportunidade até a idade  $T=2,771$  deve ser realizada a manutenção preventiva.

### 5.1 Análise de sensibilidade e discussões

A análise de sensibilidade para os parâmetros foi realizada com objetivo de identificar o efeito de cada parâmetro no valor esperado do custo, demonstrada na Tabela 1.

Caso	Parâmetros								Valores ótimos							Custo Mínimo
	$\beta_1$	$\eta_1$	$\beta_2$	$\eta_2$	$p$	$\mu$	$\lambda$	$C_i$	$C_o$	$C_r$	$C_f$	$\Delta^*$	$t^*$	$T^*$	$K^*$	Custo
1	2	0,8	5	3,6	0,1	1	2	0,05	1	2	10	0,400	1,599	2,770	4	1,051
2	2,5	1,2	5	3,6	0,1	1	2	0,05	1	2	10	0,412	1,647	2,757	4	1,038
3	2,5	0,8	5,5	3,6	0,1	1	2	0,05	1	2	10	0,416	1,561	2,805	3	1,015
4	2,5	0,8	5	3	0,1	1	2	0,05	1	2	10	0,341	1,366	2,313	4	1,239
5	2,5	0,8	5	3,6	0,2	1	2	0,05	1	2	10	0,259	1,816	2,833	7	1,231
6	2,5	0,8	5	3,6	0,1	0,5	2	0,05	1	2	10	0,375	1,499	2,629	4	1,342
7	2,5	0,8	5	3,6	0,1	1	0,5	0,05	1	2	10	0,688	1,802	3,387	2	0,781
8	2,5	0,8	5	3,6	0,1	1	2	0,1	1	2	10	0,580	1,532	2,783	2	1,110
9	2,5	0,8	5	3,6	0,1	1	2	0,05	1,5	2	10	0,310	2,344	2,770	6	1,149
10	2,5	0,8	5	3,6	0,1	1	2	0,05	1	3	10	0,405	1,396	3,165	3	1,165
11	2,5	0,8	5	3,6	0,1	1	2	0,05	1	2	20	0,224	1,570	2,381	7	1,334

- Quando reduz o valor de  $\beta_1$  e  $\eta_1$  o custo total por unidade de tempo sofre redução, quando comparado ao caso do Exemplo 1 isto reflete a redução no parâmetro de falha dos componentes fracos.
- Quando aumenta o valor de  $\eta_2$  o custo total aumento comparado ao caso do Exemplo 1 isto reflete o comportamento de falha dos componentes fortes o que eleva o custo de manutenção.
- Para os casos que a proporção  $p$  de itens fracos aumenta o custo total aumenta refletindo o aumento da necessidade de manutenção, neste caso são indicadas 7 inspeções no período de inspeções.
- Reduzindo o número de oportunidades o custo total aumenta como o custo da oportunidade é menor que o custo da falha e da preventiva, quando a taxa de oportunidades reduz o custo total aumenta.
- Aumentando o custo da inspeção  $C_i$  o custo total aumenta refletindo o aumento no custo de ação de inspeção, o modelo indica reduzir o número de inspeções e aumentar o intervalo para aproveitar as oportunidades
- Quando aumenta o custo da oportunidade o modelo indica uma janela de tempo menor para aproveitar a oportunidade e isto resulta em um custo total maior comparado com o exemplo 1
- Quando aumenta o custo de substituição o custo total aumenta, o modelo indica uma janela de tempo maior para aproveitar a oportunidade de forma a aproveitar a manutenção oportuna que tem um custo menor.
- Para o caso de aumento no custo de falha é indicado um maior número de inspeções, um custo de falha maior aumenta o custo total esperado.



## 6 Conclusão

No contexto do procedimento de manutenção todo equipamento deve ser mantido desempenhando sua função no processo produtivo, existem diferentes formas de ser mantido diante a suas condições econômicas e sua distribuição de probabilidade.

A maneira de controlar as atividades de manutenção é de competência dos gestores de manutenção, o efeito das decisões não podem ser vistos somente no contexto de uma única ação isolada, assim as consequências das ações de manutenção podem ser beneficiar das oportunidades que surgem no processo.

Várias são as ações de manutenção que podem ser implementadas. O modelo proposto neste artigo combina mais de uma ação de manutenção com objetivo de minimizar os custos de manutenção, além disso, aponta reduções quando a oportunidade é aproveitada para a realização da substituição de um dispositivo. Observa-se que nem todas as oportunidades devem ser aproveitadas, nesse sentido, a variável  $t$  tem um papel essencial para definição do momento a partir do qual é vantajosa uma ação oportuna.

Observa-se que na prática os sistemas produtivos sofrem interrupções frequentes que poderiam ser melhor aproveitadas como oportunidades de realização de substituição de componentes, cujas falhas já apresentam como sendo prováveis.

Este artigo oferece ao decisor uma abordagem diferente da encontrada na literatura para definir uma política combinada, definindo a quantidade e intervalo entre as inspeções, o intervalo de tempo que devem ser realizadas a manutenção oportuna e a idade para substituição preventiva.

## Referências

Baker, R. D., & Christer, A. H. (1994), Review of delay-time OR modelling of engineering aspects of maintenance. *European Journal of Operational Research*, 73(3), 407–422.

Cavalcante, C. A. V., Scarf, P. A., & de Almeida, A. T. (2011), A study of a two-phase inspection policy for a preparedness system with a defective state and heterogeneous lifetime. *Reliability Engineering & System Safety*, 96(6), 627–635.

Christer, A. H. (1976), Innovative Decision Making. In *NATO Conference on the Role and Effectiveness of Theories of Decision in Practice* (pp. 368–377). UK.

L. Yang, X. Ma, Q. Zhai, Yu Zhao (2016), A delay time model for a mission-based system subject to periodic and random inspection and postponed replacement *Reliab Eng Syst Saf*, 150, pp. 96–104

Lopes, R. S., Cavalcante, C. A. V., & Alencar, M. H. (2015), Delay-time inspection model with dimensioning maintenance teams: A study of a company leasing construction equipment. *Computers & Industrial Engineering*, 88, 341–349.

Lu, X., Wang, W., Yang, H., Zuo, M. J., & Zhou, D. (2012), Optimizing the Periodic Inspection Interval for a 1-out-of-2 Cold Standby System Using the Delay-Time Concept. *Quality and Reliability Engineering International*, 28(6), 648–662.

R. Jiang, AKS Jardine (2007), An optimal burn-in preventive-replacement model associated with a mixture distribution *Quality and Reliability Engineering International*, 23 (1), pp. 83–93

R.K. Mobley (1990), *An Introduction to Predictive Maintenance* Van Nostrand Reinhold, New York





Ramadan, S. (2016), A bi-objective inspection policy optimization model for finite-life repairable systems using a genetic algorithm. *Advances in Production Engineering & Management*, 11(1), 38–48.

Scarf, P. A., Cavalcante, C. A., Dwight, R. A., & Gordon, P. (2009). An age-based inspection and replacement policy for heterogeneous components. *IEEE Transactions on Reliability*, 58(4), 641-648.

Tijms, H.C., 1994. *Stochastic Models: An Algorithmic Approach*. Wiley, New York

W. Wang, M. Carr I. Ng, G. Parry, P. Wild, D. McFarlane (2011), Scheduling Asset Maintenance and Technology Insertions. to appear in *Complex Engineering Service Systems: Concepts and Research*, Springer, London, pp. 315–334

Wang, W. (2012), An overview of the recent advances in delay-time-based maintenance modelling. *Reliability Engineering & System Safety*, 106, 165–178.

Wang, W., Zhao, F., & Peng, R. (2014), A preventive maintenance model with a two-level inspection policy based on a three-stage failure process. *Reliability Engineering & System Safety*, 121, 207–220.

Yang, L., Ma, X., Zhai, Q., & Zhao, Y. (2016), A delay time model for a mission-based system subject to periodic and random inspection and postponed replacement. *Reliability Engineering & System Safety*, 150, 96–104.

YANG, R., ZHAO, F., KANG, J., LI, H., & TENG, H. (2015), Inspection optimization model with imperfect maintenance based on a three-stage failure process. *Eksplotacja I Niezawodność - Maintenance and Reliability*, 17(2), 165–173.