

MODELO *DELAY TIME* PARA REUSO DE COMPONENTES

Augusto C. J. Santos

Universidade Federal de Pernambuco
Av. Prof. Moraes Rego, 1235 – Cidade universitária – Recife, PE
a.c.j.santos@random.org.br

Cristiano A. V. Cavalcante

Universidade Federal de Pernambuco
Av. Prof. Moraes Rego, 1235 – Cidade universitária – Recife, PE
c.a.v.cavalcante@random.org.br

Lucas Queiroz Melo da Costa

Universidade Federal de Pernambuco
Av. Prof. Moraes Rego, 1235 – Cidade universitária – Recife, PE
l.q.m.dacosta@random.org.br

RESUMO

O conceito de *delay time* tem sido utilizado em grande número de aplicações para modelar importantes aspectos da realidade. Concisamente, um defeito surge em um componente ou sistema e a falha só ocorre após o intervalo denominado *delay time*. Em algumas situações, o tempo no estado defeituoso interfere no custo de reparo do componente para o seu reuso subsequente. Apesar disso, um número pequeno de contribuições lida com a influência do tempo em estado defeituoso e seu respectivo custo. Nesse sentido, considerando a crescente tendência pelo reuso de itens, este trabalho propõe uma modificação na modelagem de forma que o custo de reparo do item é função do tempo de permanência no estado defeituoso. Os resultados indicam que o modelo proposto permite uma expressiva redução no custo total esperado quando comparado com o modelo tradicional. Além do benefício econômico, a proposta introduz o aspecto da sustentabilidade na modelagem *delay time*.

PALAVRAS CHAVE. *Delay time*. Sistema de componente único. Reuso de itens.
Tópicos: (POI – PO na Indústria)

ABSTRACT

The delay time concept has been used in a great number of applications for modelling important aspects of reality. Concisely, a defect arises in a component or system followed by a failure after an interval called delay time. In some situations, the time in the defective state interferes with the cost of repair or recycling the item for its subsequent reuse. Despite this fact, a small number of contributions deal with the influence of the time in the defective state and its implication on cost. In this way, considering a crescent tendency of second-hand items, we propose the model adjustment so that the preventive (refurbishment) cost is modeled as a function of the sojourn time in defective state. The results indicate a significant reduction in the total expected cost when using the proposed model. Despite the economic benefit, the model introduces the sustainable aspect in delay time modelling.

KEYWORDS. *Delay time*. Single-component system. Reuse of items.
Paper topics (OPI – OP in Industry)

1. Introdução

[Pintelon e Parodi-Herz 2008] consideram que a função manutenção executa um importante papel para a competitividade organizacional. Entretanto, o estabelecimento de uma política de manutenção não é uma tarefa simples e pressupõe o entendimento do funcionamento do sistema para se estabelecer operações com bom custo-benefício [Pinjala et al 2006].

Nesse sentido, políticas de manutenção tradicionalmente utilizadas continuam sendo postas em práticas para atender a diversos contextos. Em muitos casos, elas vêm sendo continuamente estudadas, melhoradas e aplicadas para alcançar melhores resultados para os sistemas analisados. Como consequência, modificações interessantes em modelos de manutenção têm sido sugeridas para atender considerações anteriormente não atendidas ou apenas tratadas de forma superficial.

Nessa perspectiva, o presente trabalho tem por objetivo a proposição de uma modificação no modelo *delay time* para sistemas de componente único com a finalidade de considerar a possibilidade de reuso de um item defeituoso. A concepção de reuso de itens vem sendo amplamente explorada na literatura devido a benefícios econômicos e ambientais [Yeh et al. 2011; Lo e Yu 2013; Sibidé et al. 2015]. De fato, o reuso representa uma importante estratégia para a sustentabilidade devido à preservação de recursos naturais e a possibilidade de redução de custos [Lo e Yu 2013].

Além disso, contribuições prévias na modelagem *delay time* ainda não abordaram o aspecto da sustentabilidade da forma descrita neste trabalho. A maioria dos trabalhos focam nas seguintes contribuições: sistemas multicomponentes [Christer e Waller 1984a; 1984b; Berrade et al. 2018], inspeção imperfeita [Scarf e Cavalcante 2012; Berrade et al. 2017], intervalo de inspeção múltipla [Wang 2014], modelo *delay time* de três estágios [Wang, 2009; 2014], estoque de peças sobressalentes [Wang 2012], manutenção baseada na condição [Ferreira et al. 2009], inspeções e substituições por oportunidade [Cavalcante et al. 2018; Scarf et al. 2019], etc.

Diferentemente, a modelagem proposta neste trabalho considera que o componente pode ser reusado no mesmo contexto em que foi utilizado anteriormente. Considera-se ainda que quanto maior o tempo de permanência no estado defeituoso, maior é o estado de degradação do componente e mais elevado é o esforço para repará-lo. Desse modo, é conveniente considerar que existe um limite máximo que pode ser estabelecido a partir do qual o componente não pode ser mais recuperado. Entretanto, se o componente não está extremamente degradado ele pode ser recuperado para ser reusado novamente. Em termos práticos, considera-se que o custo de reparo do defeito aumenta de forma proporcional ao tempo de permanência no estado defeituoso até que o custo de reparo não se torna atrativo por estar próximo ao da aquisição de um item novo.

O problema é resolvido utilizando uma abordagem analítica que resulta na obtenção de valores ótimos para o custo de manter o sistema em um regime de inspeções a longo prazo. Uma análise comparativa entre o modelo tradicional e a modificação proposta é realizada para a verificação dos benefícios da utilização da abordagem proposta. Cabe ressaltar que a modificação na modelagem *delay time* está fundamentada na possibilidade de aplicação prática, o que representa um importante aspecto da modelagem da manutenção [Scarf 1997]. Além disso, a proposta de modificação contribui para o desenvolvimento de novas abordagens para o reuso de componentes em indústrias, concepção que contribui para a preservação dos recursos naturais e para a possível redução de custos [Lo e Yu 2013].

O restante deste artigo está organizado da seguinte forma: a seção 2 apresenta o modelo *delay time* tradicional para sistemas de componente único. A seção 3 aborda a importância da consideração do tempo de permanência no estado defeituoso no contexto de reuso de componentes. A seção 4 apresenta a proposta de modificação no modelo *delay time*. A seção 5 apresenta os resultados comparativos entre o modelo tradicional e o proposto e, por fim, a seção 6 apresenta as considerações finais.

2. Modelo *Delay time* tradicional para sistemas de componente único

Nesta seção, o modelo *delay time* para sistemas de componente único é revisado e discutido. O conceito base para a modificação proposta no trabalho é revisto e brevemente explicado como ele foi inicialmente proposto por [Christer 1976].

Primeiramente, um sistema de componente único pode ser interpretado como um componente e um socket que juntos executam uma função operacional [Ascher e Feingold 1984; Scarf e Cavalcante 2012]. É importante mencionar que apesar de um sistema poder ter inúmeros componentes, se as falhas mais recorrentes são devidas a um componente específico, o sistema pode ser modelado como um sistema de componente único. Nesse sentido, o sistema de componente único pode ser interpretado como um sistema complexo no qual um componente específico é crítico e responsável pelas falhas mais recorrentes.

Partindo-se dessa perspectiva, o modelo *delay time* considera que a falha acontece por meio de um processo de dois estágios. Um defeito chega no componente em um tempo x , e é seguido por uma falha após um intervalo h [Baker e Christer 1994], como mostrado na Figura 1a.

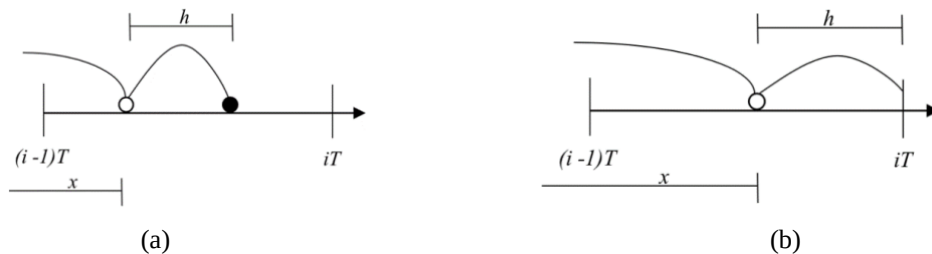


Figura 1: Conceito de *delay time* (a) situação em que a falha ocorre (b) inspeção previne a falha.

Como pode-se observar na Figura 1a, a falha é precedida pelo defeito que permanece durante o intervalo h . Esse intervalo representa uma oportunidade de inspecionar o sistema e corrigir o defeito antes que ele se transforme em falha (Figura 1b). Então a interação entre a operação do sistema e a realização de suas inspeções podem ser avaliadas de acordo com o conceito *delay time* [Wang, 2008] para minimizar o custo total esperado $U(T)$ dividido pela duração esperada do ciclo $V(T)$, $C(T) = \frac{U(T)}{V(T)}$.

As seguintes suposições são consideradas em um modelo *delay time* para sistemas de componente único:

- 1) O componente pode estar em um dos seguintes estados: bom, defeituoso ou falho.
- 2) O sistema para quando o componente falha.
- 3) O *delay time* h é independente do tempo de chegada do defeito x .
- 4) A inspeção ocorre a cada T unidades de tempo e custa C_i unidades monetárias.
- 5) Inspeções são perfeitas e o defeito existente é sempre identificado em uma inspeção.
- 6) O defeito identificado é reparado instantaneamente com custo C_p unidades monetárias.
- 7) A falha é reparada assim que ela ocorre e custa C_f , de forma que $C_f > C_p > C_i$.
- 8) O tempo de chegada do defeito, x , é distribuído de acordo com uma função densidade de probabilidade conhecida $f_x(x)$.
- 9) A função densidade de probabilidade, $f_h(h)$, e a função de distribuição acumulada do *delay time* h , $F_h(h)$ são conhecidas.

Considerando a Figura 1, $U(T)$ pode ser determinado considerando duas possibilidades: a falha ocorre dentro do intervalo de inspeções ($x + h \in [(i-1)T, iT]$) (Figura 1a) ou a inspeção previne a ocorrência da falha, assim, $x \in [(i-1)T, iT]$, mas $(x + h > iT)$ (Figura 1b), então $U(T)$ pode ser obtido a partir da Equação (1) [Wang, 2008]:

$$U(T) = \sum_{i=1}^{\infty} [iC_i + C_p] \int_{(i-1)T}^{iT} f_x(x) R_h(iT - x) dx + \sum_{i=1}^{\infty} [(i-1)C_i + C_f] \int_{(i-1)T}^{iT} f_x(x) F_h(iT - x) dx \quad (1)$$

De forma semelhante, a duração esperada do ciclo, $V(T)$, pode ser obtida por meio da Equação (2) [Wang, 2008].

$$V(T) = \sum_{i=1}^{\infty} iT \int_{(i-1)T}^{iT} f_x(x) R_h(iT - x) dx + \sum_{i=1}^{\infty} \int_{(i-1)T}^{iT} f_x(x) \left[\int_0^{(iT-x)} (x+h) f_h(h) dh \right] dx \quad (2)$$

O primeiro termo de ambas Equações (1 e 2) representam a situação de quando a falha não ocorre dentro do intervalo entre inspeções e o segundo termo representa o caso complementar em que a falha ocorre dentro do intervalo entre inspeções. Esse intervalo deve ser determinado de forma em que a taxa de custo esperado dividido pela duração esperada do ciclo seja minimizada. Em muitas situações práticas, o custo de falha é mais elevado que o custo de reparar o defeito e que o custo de inspeção (da hipótese 7: $C_f > C_p > C_i$), devido a alguma consequência advinda da falha pra o sistema, como por exemplo, um tempo de permanência entre a falha e o retorno à operação. Consequentemente, o intervalo de inspeção é determinado de forma a evitar a ocorrência da falha e de suas consequências negativas para o sistema [Santos e Cavalcante 2018].

Como o modelo *delay time* tradicional para sistemas de componente único não considera níveis distintos de esforço para o reparar e reintroduzir o item no sistema, o presente artigo propõe uma modificação para que essa possibilidade possa ser considerada. A modificação proposta é apresentada na seção 4, após a justificativa da importância da consideração do tempo de permanência em estado defeituoso no contexto do reuso de componentes.

3. A importância da consideração do tempo de permanência no estado defeituoso no contexto de reuso de componentes

A crescente preocupação com os aspectos ambientais trouxe uma nova perspectiva para a manutenção no segmento industrial. Nesse contexto, os produtos de segunda-mão (*second-hand products*) têm sido frequentemente usados em indústrias para diminuir custos, aumentar benefícios econômicos e contribuir para a sustentabilidade. Além disso, a reciclagem e/ou reuso de itens têm se tornado uma possibilidade para a redução do desperdício de componentes que possam ser restaurados e reintegrados à operação ou vendidos para novos mercados, como produtos de segunda-mão.

[Sibidé et al. 2015] enfatiza que novas legislações têm contribuído para a introdução de itens de segunda-mão no mercado, devido à combinação de iniciativas que promovem ou induzem a qualidade de sistemas ou produtos reutilizados, como por exemplo, adequação do item usado antes da revenda, garantia e redução de preços.

Essas iniciativas promovem a inserção de itens de segunda-mão em indústrias pois propiciam a comercialização de um item mais barato, com garantia e com condições de operação similar a um novo. Como resultado, indústrias estão mais propensas a incorporar os itens de segunda-mão em suas operações.

Um outro tipo importante de regulamentação que contribui para o uso de itens de segunda-mão é a legislação *take-back*, a qual tem estendido a responsabilidade das indústrias para recuperar e descartar com segurança seus itens [Rahimifard et al. 2009].

Além do aspecto legal, estabelecido pelas legislações mencionadas acima, existem outros fatores que favorecem a utilização desse tipo de item. [Yeh et al. 2011; Lo e Yu (2013)], por exemplo, indicam o reuso de itens como uma das mais importantes estratégias para redução do custo de compra de materiais e para atendimento às questões de proteção ambiental. Segundo esses

autores, a reutilização de um item conserva os recursos naturais, reduz custos de produção e protege o meio ambiente.

Por outro lado, a qualidade inicial do item usado é inferior ao de um item novo, de forma que duas dimensões de qualidade devem ser alcançadas: funcionalidade, que se refere às condições do item na fase inicial da segunda vida, e confiabilidade, que representa a capacidade do item realizar sua função dentro de um período determinado durante a segunda vida [Anityasari et al. 2007].

Assim, as políticas de manutenção devem promover formas de atender as dimensões mencionadas. No entanto, apesar de existir um crescimento significativo em pesquisas relacionadas com a recuperação e reciclagem de produtos nas últimas décadas [Anityasari et al. 2007], a literatura sobre políticas de manutenção para itens de segunda mão ainda é escassa e geralmente relacionada com a perspectiva de contratos de venda ou locação [Yeh et al. 2011; Lo e Yu, 2013].

Nesse sentido, o modelo proposto neste artigo, considera que o tempo de permanência no estado defeituoso interfere na quantidade de esforço necessário para reparar um item com vistas a reutilizá-lo no sistema. A modificação proposta pode contribuir também para a melhoria da funcionalidade e confiabilidade do item em sua segunda vida por estabelecer um tempo de substituição mais adequado para seu reparo, considerando a degradação do item na modelagem da política de inspeção. Além disso, ela contribui para o contexto de reuso de itens em indústrias o que representa um importante fator para o desenvolvimento da sustentabilidade no âmbito industrial.

4. Proposta de modificação no modelo *delay time*

Esta seção detalha a proposta de modificação no modelo *delay time* que considera a possibilidade de reuso de um componente defeituoso, por meio do seu reparo e posterior reintrodução no sistema. Além disso, apresenta-se a formulação da influência do tempo de permanência em estado defeituoso na possibilidade de reuso do componente.

Assim como o modelo tradicional, a proposta de modificação assume que antes do componente falhar ele passa um período de tempo no estado defeituoso ou o defeito é detectado e reparado em uma inspeção. Nessa situação, o item defeituoso pode ser reparado para ser reintroduzido no sistema futuramente, caso o tempo de permanência em estado defeituoso não seja superior a um limite pré-estabelecido ou é descartado como anteriormente previsto na modelagem tradicional.

Nesse sentido, considera-se que o custo de reparo do item aumenta de uma determinada porcentagem de $\%C_p$ até $100\%C_p$ quando uma duração pré-determinada de *delay time* é alcançada. A Figura 2 apresenta uma comparação da variação no custo de reparo C_p entre o modelo tradicional e o proposto.

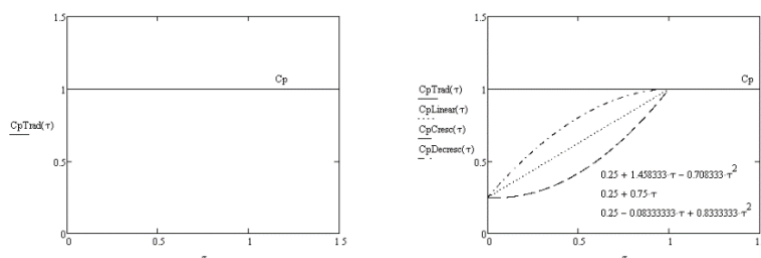


Figura 2: (a) Modelo *delay time* tradicional (b) Modelo proposto com variação no valor de C_p .

Como visto na Figura 2, o custo do reparo do defeito é definido por partes como uma função do tempo de permanência no estado defeituoso até a substituição, chamemos essa variável de (τ), observe que para o cenário de substituição do componente no estado defeituoso, esta variável é exatamente o *delay time*. Consideramos que até um valor limite, que definimos como

limite máximo para o reuso, este tempo de permanência no estado defeituoso influenciará no custo de troca, assumindo um comportamento crescente. Se definirmos o valor limite máximo por exemplo, $1/\lambda$, a partir do qual uma troca terá o mesmo custo que uma substituição por um item novo, vamos observar que a partir de $1/\lambda$ o custo de troca será C_p , podemos observar uma forma geral na Equação 4. Assim, a Equação 1 passa a ser modificada para Equação 3.

$$U(T) = \sum_{i=1}^{\infty} \int_{(i-1)T}^{iT} \int_{iT-x}^{\infty} [(i)C_i + C_p(iT-x)] f_h(h) f_x(x) dh dx + \sum_{i=1}^{\infty} \int_{(i-1)T}^{iT} [(i-1)C_i + C_f] f_x(x) F_h(iT-x) dx \quad (3)$$

$$C_p(\tau) = \begin{cases} \text{função de } \tau, & \text{se } \tau \leq 1/\lambda \\ C_p, & \text{se } \tau > 1/\lambda \end{cases} \quad (4)$$

Considera-se que o componente sempre é substituído. No caso da permanência no estado defeituoso ser maior que o limite máximo, ele é descartado. No caso complementar, apesar do componente defeituoso ainda ser substituído, ele é reparado e enviado para o estoque de peças sobressalentes com custo $C_p(\tau)$ inferior ao custo de aquisição de um item novo C_p . A Figura 3 descreve o processo de reparo e reenvio do item para o estoque de peças sobressalentes.

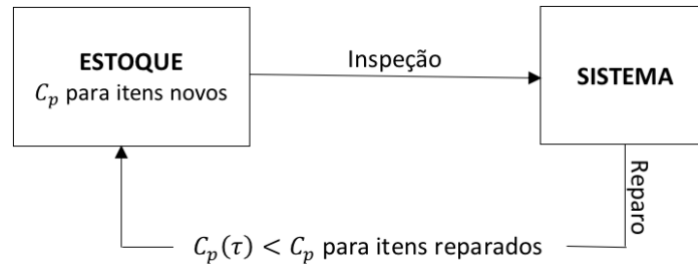


Figura 3: Processo de reintrodução de um item reparado no estoque de peças sobressalentes.

Enfatiza-se a possibilidade de redução do custo de reparo do componente e sua respectiva reintrodução no sistema como a principal contribuição deste trabalho. Sua relevância também pode ser descrita do ponto de vista de sustentabilidade ambiental uma vez que o modelo insere a possibilidade de reuso de componentes.

A comparação entre os modelos tradicional e proposto em termos de custo e intervalo ótimo entre inspeções é apresentada na próxima seção.

5. Comparação entre modelos tradicional e proposto

Esta seção compara os modelos tradicional e proposto por meio de um exemplo ilustrativo. O intervalo ótimo entre inspeções, T , e o respectivo custo esperado por ciclo de inspeção, $C(T) = \frac{U(T)}{V(T)}$, são determinados e comparados. $C(T)$ é determinado a partir de $U(T)$ na Equação 3 e $V(T)$ na Equação 2.

Para as análises realizadas nesta seção, considera-se que a função de chegada do defeito, $f_x(x)$, segue uma distribuição Weibull com parâmetro de forma $\beta = 3$ e parâmetro de escala $\eta = 5$; a função de distribuição do *delay time* é $f_h(h) = \lambda e^{-\lambda h}$; o custo de inspeção é $C_i = \$0,05$ por inspeção, o custo de falha é $C_f = \$30$ por falha. A parcela de custo fixo para reparar um defeito, C_p , e o parâmetro λ são definidos na Tabela 1. Além disso, a “função de τ ” mencionada na Equação (4) pode ser, dentro do intervalo considerado, linear, quadrática crescente ou quadrática

decrecente, conforme estabelecido na Tabela 1. Por fim, quando $\tau \leq \frac{1}{\lambda}$, $C_p(\tau)$ varia de $\frac{C_p}{4}$ quando $\tau = 0$ a C_p quando $\tau = \frac{1}{\lambda}$.

Tabela 1: Funções de τ aplicadas na Equação (4).

Parâmetros	Funções de h aplicadas na Equação (4)	
$C_p = 1$ e $\lambda = 1$	Linear	$0,25 + 0,75\tau$
	Quadrática crescente	$0,25 - 0,08333333\tau + 0,8333333\tau^2$
	Quadrática decrescente	$0,25 + 1,458333\tau - 0,708333\tau^2$
$C_p = 2$ e $\lambda = 0,5$	Linear	$0,5 + 0,75\tau$
	Quadrática crescente	$0,5 - 0,15\tau + 0,45\tau^2$
	Quadrática decrescente	$0,5 + 1,45\tau - 0,35\tau^2$
$C_p = 3$ e $\lambda = 0,333$	Linear	$0,75 + 0,75\tau$
	Quadrática crescente	$0,75 - 0,075\tau + 0,275\tau^2$
	Quadrática decrescente	$0,75 + 1,583333\tau - 0,2777778\tau^2$
$C_p = 4$ e $\lambda = 0,25$	Linear	$1 + 0,75\tau$
	Quadrática crescente	$1 + 0,07\tau + 0,17\tau^2$
	Quadrática decrescente	$1 + 1,28\tau - 0,1333333\tau^2$

A Tabela 1 mostra todas as funções utilizadas para a análise. Todas elas foram estabelecidas de forma a atender a condição em que $C_p(\tau)$ deve variar de $\frac{C_p}{4}$ quando $\tau = 0$ a C_p quando $\tau = \frac{1}{\lambda}$. Considera-se também que à medida em que a faixa de tamanho de *delay time* na qual ocorre a redução no custo do reparo de defeito aumenta, o valor base definido para C_p aumenta proporcionalmente.

A Tabela 2 mostra o período ótimo entre inspeções, T , e o custo esperado por ciclo de inspeção, $C(T)$, para o modelo tradicional e para quatro situações distintas do modelo proposto, sendo 3 possibilidades de formato de curva $C_p(\tau)$ apresentados para cada situação, conforme as equações apresentadas na Tabela 1.

Tabela 2: Comparação entre modelo tradicional e modelo proposto.

	Tradicional	Modelo proposto		
		Formatos de curva		
		Linear	Quad Cresc	Quad Decresc
	$C_p = 1$	$C_p = 1$ e $\lambda = 1$		
T	0,13206	0,12831	0,12937	0,12713
$C(T)$	1,00386	0,85842	0,84844	0,86683
	$C_p = 2$	$C_p = 2$ e $\lambda = 0,5$		
T	0,19138	0,17926	0,18398	0,17580
$C(T)$	0,98453	0,68432	0,66843	0,69643
	$C_p = 3$	$C_p = 3$ e $\lambda = 0,333$		
T	0,24440	0,21857	0,22685	0,21096
$C(T)$	1,09231	0,63716	0,61898	0,65494
	$C_p = 4$	$C_p = 4$ e $\lambda = 0,25$		
T	0,29908	0,25214	0,26292	0,24452
$C(T)$	1,24011	0,63087	0,61338	0,64406

Percebe-se na Tabela 2 uma redução considerável em termos de custo para todos os casos analisados do modelo proposto em comparação ao modelo tradicional, independentemente do formato da função assumida. A maior redução ocorre no caso em que $C_p = 4$ e $\lambda = 0,25$, no qual obtém-se uma redução de 50,54% utilizando uma função quadrática crescente no intervalo analisado. Além

disso, verifica-se que ao contrário do modelo tradicional, no qual $C(T)$ aumenta à medida em que C_p aumenta, no modelo proposto, quanto maior o valor de C_p , maior será a possibilidade de redução em $C(T)$. Esse resultado é interessante pois mostra que em termos práticos quanto mais dispendiosa for a ação de substituição de um item defeituoso, maior será a possibilidade de economia com a utilização do modelo proposto. Além disso, no que se refere ao período ótimo entre inspeções, T , à medida em que C_p aumenta, T aumenta em todos os casos para ambos os modelos devido ao maior custo associado a ação de substituição, como esperado.

No que se refere ao desempenho dos formatos das curvas na redução de $C(T)$ e T quando comparado ao modelo tradicional, verifica-se que a função quadrática decrescente proporciona a maior contribuição em termos de redução em T , e a função quadrática crescente proporciona a maior contribuição em termos de redução em $C(T)$. Ressalta-se que dentro de uma aplicação prática a função $C_p(\tau)$ deve ser definida de forma a representar o comportamento da degradação do item analisado, entretanto, verifica-se que mesmo com diferentes formatos possíveis, o resultado em termos de redução de $C(T)$ é semelhante. A diminuição no custo esperado por ciclo de inspeção, $C(T)$, para todas as situações apresentadas na análise dos modelos, é mostrada nas Figuras 4, 5, 6 e 7.

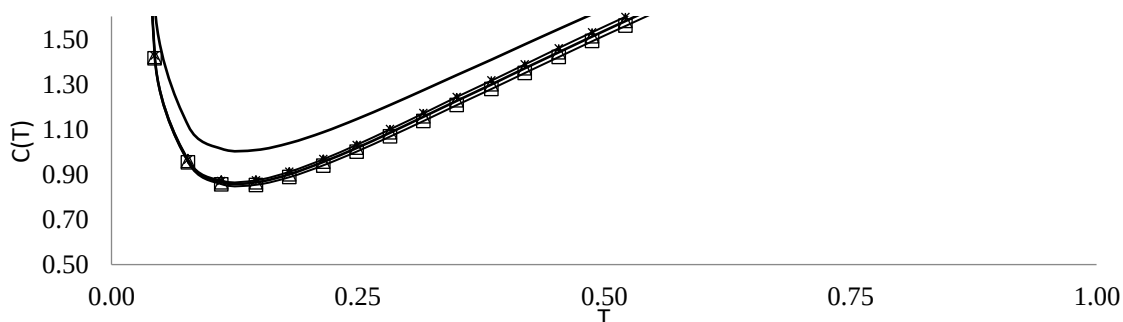


Figura 4: Comparação entre o modelo proposto e o modelo tradicional quando $C_p = 1$ e $\lambda = 1$.
Tradicional (—); Linear (Δ); Quadrático crescente ($\bullet$); Quadrático decrescente ($\ast$)

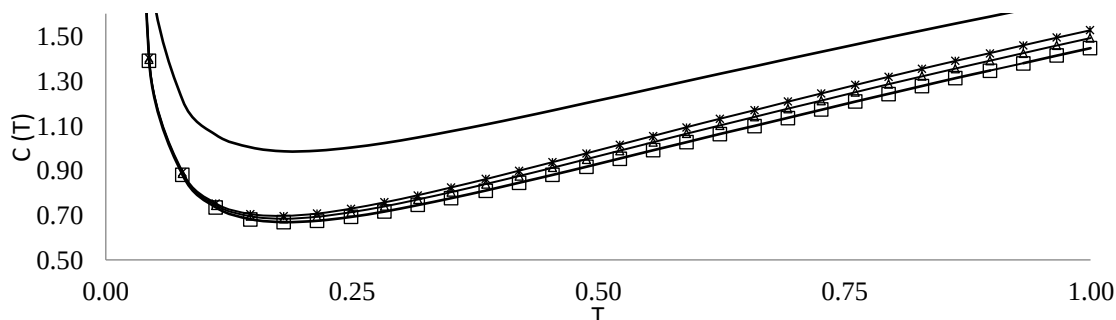


Figura 5: Comparação entre o modelo proposto e o modelo tradicional quando $C_p = 2$ e $\lambda = 0,5$.
Tradicional (—); Linear (Δ); Quadrático crescente ($\bullet$); Quadrático decrescente ($\ast$)

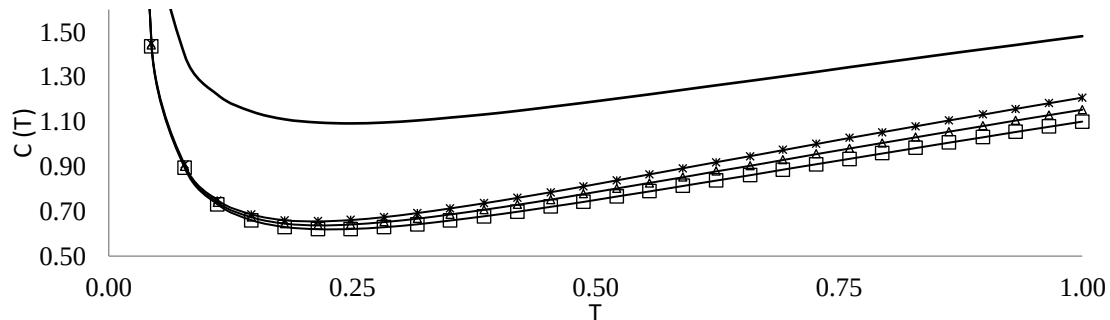


Figura 6: Comparação entre o modelo proposto e o modelo tradicional quando $C_p = 3$ e $\lambda = 0,333$.
Tradicional (—); Linear (—Δ—); Quadrático crescente (—•—); Quadrático decrescente (—*—)

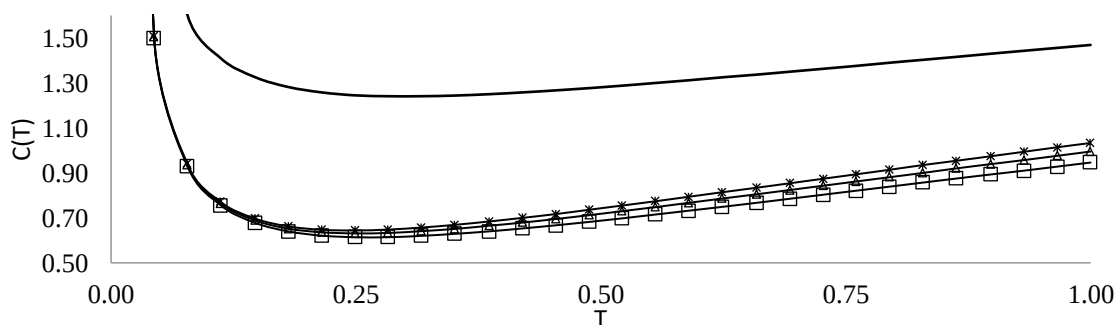


Figura 7: Comparação entre o modelo proposto e o modelo tradicional quando $C_p = 4$ e $\lambda = 0,25$.
Tradicional (—); Linear (—Δ—); Quadrático crescente (—•—); Quadrático decrescente (—*—)

As Figuras 4, 5, 6 e 7 mostram de forma clara o comportamento do modelo proposto em comparação com o modelo tradicional. Apesar da redução no período ótimo entre inspeções não ser facilmente detectada, evidencia-se a redução do custo anteriormente comentada: maior para a função quadrática crescente, menos intensa para a função linear e menor para a função quadrática decrescente. Além disso, percebe-se, por meio da comparação entre os gráficos, o comportamento de maior impacto nas reduções no tempo e no custo quando o tamanho do *delay time* definido para estabelecer a possibilidade de variação no valor de C_p e o valor base de C_p são maiores.

Esse comportamento de redução tanto em T quanto em $C(T)$ indica que esse modelo pode ser usado no contexto de reuso de itens. No entanto, para a aplicação do modelo em um contexto real, necessita-se de uma série de informações para a confirmação que o modelo de fato pode ser uma boa representação da realidade específica a ser modelada e também para que a definição da função $C_p(\tau)$ e dos parâmetros seja mais bem definida.

5.1 Análise de sensibilidade

Esta seção trata da sensibilidade do modelo proposto diante de uma variação nos custos de falha ou de inspeção. O intuito dessa análise é verificar a consistência das soluções ótimas obtidas frente a possíveis variações nesses custos. Para análise, o caso base apresentado no tópico anterior é comparado com casos em que os custos de falha ou de inspeção são aumentados ou diminuídos em 20%.

A Tabela 3 retrata o comportamento do modelo diante de variações nos custos de falha ou inspeção para as situações em que $C_p = 1$ e $\lambda = 1$ e $C_p = 4$ e $\lambda = 0,25$.

Tabela 3: Sensibilidade do modelo proposto em relação à variação de C_f e C_i .

	C_i	C_f	c	$C_p = 1$ e $\lambda = 1$		$C_p = 4$ e $\lambda = 0.25$	
				T	$C(T)$	T	$C(T)$
Caso base	0,05	30	Tradicional	0,13206	1,00386	0,29908	1,24011
			Linear	0,13027	0,95288	0,27274	1,02268
			Quad cresc	0,13008	0,93426	0,27380	0,96178
			Quad decres	0,13044	0,96871	0,27669	1,06963
Diminuindo C_f	0,05	24	Tradicional	0,14958	0,91520	0,35310	1,18896
			Linear	0,14426	0,77241	0,28252	0,58833
			Quad cresc	0,14620	0,76144	0,29754	0,56892
			Quad decres	0,14266	0,78163	0,27212	0,60288
Aumentando C_f	0,05	36	Tradicional	0,11947	1,08366	0,26385	1,28474
			Linear	0,11666	0,93626	0,22975	0,66943
			Quad cresc	0,11776	0,92704	0,23798	0,65339
			Quad decres	0,11574	0,94404	0,22386	0,68160
Diminuindo C_i	0,04	30	Tradicional	0,11737	0,92375	0,26581	1,20474
			Linear	0,11406	0,77596	0,22427	0,58892
			Quad cresc	0,11535	0,76691	0,23397	0,57317
			Quad decres	0,11299	0,78360	0,21743	0,60080
Aumentando C_i	0,06	30	Tradicional	0,14552	1,07583	0,32953	1,27188
			Linear	0,14138	0,93249	0,27761	0,66858
			Quad cresc	0,14291	0,92171	0,28936	0,64955
			Quad decres	0,14011	0,94158	0,26928	0,68295

Verifica-se que em todas as situações analisadas, o comportamento do modelo proposto em comparação com o modelo tradicional, segue a mesma tendência de redução tanto no período ótimo entre inspeções T como no custo esperado por ciclo de inspeção $C(T)$. Em todos os casos, independentemente das variações em C_p , C_i ou C_f , há um maior decréscimo em T quando se utiliza a função de comportamento quadrático decrescente e há um maior decréscimo em $C(T)$ quando se utiliza a função quadrática crescente. Nesses termos, indica-se para uma maior redução de $C(T)$, que a degradação do componente seja modelada por meio de uma função quadrática crescente, caso seja possível.

6. Conclusões

Este trabalho contribui para avanços na modelagem *delay time* por levar em consideração o custo relacionado ao tempo de permanência em estado defeituoso. A consideração desse custo pode representar uma melhor adequação do modelo em algumas situações práticas. Como exemplo, apresentou-se a possibilidade de reintrodução do componente no sistema após seu reparo, algo ainda não mencionado na modelagem *delay time*. Além disso, a modificação proposta não apresenta aumento na complexidade do modelo tradicionalmente utilizado.

De forma geral, o modelo proposto indica um intervalo mais apropriado entre inspeções para o contexto de reutilização de componentes e apresenta uma melhor taxa de custo esperado por ciclo de inspeção. Em termos gerenciais, isso representa a possibilidade de redução no tempo de permanência no estado defeituoso, redução no custo relacionado com a manutenção, e emprego do reuso de componentes, uma prática sustentável que proporciona preservação ambiental.

Uma limitação é a suposição que um item reusado possui o mesmo comportamento de um item novo. Apesar de ser válida em alguns contextos, a possibilidade de considerar uma população heterogênea de itens novos e reusados é uma consideração a ser futuramente estudada.

Referências

- Anityasari, M., Kasebernick, H. e Kara, S. (2007). The role of warranty in the reuse strategy. In: *Advances in Life Cycle Engineering for Sustainable Manufacturing Businesses*, 335–340.
- Ascher, H. e Feingold, H. (1984). *Repairable Systems Reliability*. MarcelDekker, New York.
- Baker, R. D. e Christer, A. H. (1994). Review of delay time-model OR modelling of engineering aspects of maintenance. *European Journal of Operational Research*, 73: 407-422.
- Berrade, M. D., Scarf, P. A. e Cavalcante, C. A. V. (2017). A study of postponed replacement in a delay time model. *Reliability Engineering & System Safety*, 168: 70-79.
- Berrade, M. D., Scarf, P. A. e Cavalcante, C. A. V. (2018). Conditional inspection and maintenance of a system with two interacting components. *European Journal of Operational Research*, 268(2): 533-544.
- Cavalcante, C. A. V., Lopes, R. S. e Scarf, P. A. (2018). A general inspection and opportunistic replacement policy for one-component systems of variable quality. *European Journal of Operational Research*, 266(3): 911-919.
- Christer, A. H. (1976). Innovatory decision making. In *Proc. NATO conference on role and effectiveness of decision theory in practice* (Bowen, K. and White, D. J., Eds.).
- Christer, A. H. e Waller, W. M. (1984a). Delay time models of industrial inspection maintenance problems. *Journal of Operational Research Society*, 35(5): 401-406.
- Christer, A. H. e Waller, W. M. (1984b). Reducing production downtime using delay-time analysis. *Journal of the Operational Research Society*, 35(6): 499-512.
- Ferreira, R. J. P., Almeida, A. T. e Cavalcante, C. A. V. (2009). A multi-criteria decision model to determine inspection intervals of condition monitoring based on delay time analysis. *Reliability Engineering & System Safety*, 94: 905-912.
- Lo, H. e Yu, R. (2013). A study of quality management strategy for reused products. *Reliability Engineering and System Safety*, 119: 172-177.
- Pinjala, S. K, Pintelon, L e Vereecke, A. (2006). An empirical investigation on the relationship between business and maintenance strategies. *International Journal of Production Economics*, 104, 214-229.
- Pintelon, L. e Parodi-Herz, A. (2008). Maintenance: An Evolutionary Perspective. In: Kobbacy, K. A. H., Murthy, D. N. P. (eds.) *Complex system maintenance handbook*, Springer, 21-48.
- Rahimifard, S., Coates, G., Staikos, T., Edwards, C. e Abu-Bakar, M. (2009). Barriers, drivers and challenges for sustainable product recovery and recycling. *Int. Journal of Sustainable Engineering*, 2(2): 80-90.
- Santos, A. C. J. e Cavalcante, C. A. V. (2018). Insight into cost of defective state using delay-time concept. In: *10th IMA International Conference on Modelling in Industrial Maintenance and Reliability*. Disponível em: <https://doi.org/10.19124/ima.2018.001.24>. Acessado 2020-04-04.

- Scarf, P.A. (1997). On the application on mathematical models in maintenance. *European Journal of Operational Research*, 99: 493-506.
- Scarf, P. A. e Cavalcante, C. A. V. (2012). Modelling quality in replacement and inspection maintenance. *Int. J. Productions Economics*, 135: 372-381.
- Scarf, P. A., Cavalcante, C. A. V. e Lopes, R. S. (2019). Delay-time modelling of a critical system subject to random inspections. *European J. of Operational Research*, 278(3): 772-782.
- Sibidé, I., Khatab, A., Claver, D. e Ait-Kadi, D. (2015). A maintenance optimization model for a second hand stochastically deteriorating system under different operating environments. In: *3rd International Conference on Control, Engineering & Information Technology (CEIT)*. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7233136/references#references> . Acessado 2018-12-06.
- Wang, W. (2008). Delay time modelling. In: Kobbacy, K. A. H., Murthy, D. N. P. (eds.) *Complex system maintenance handbook*, Springer, 345-370.
- Wang, W. (2009). An inspection model for a process with two types of inspections and repairs. *Reliability Engineering and System Safety*, 94: 526-533.
- Wang, W. (2012). A stochastic model for joint spare parts inventory and planned maintenance optimisation. *European Journal of Operational Research*, 216(1): 127-139.
- Wang, W. (2014). A preventive maintenance model with a two-level inspection policy based on a three-stage failure process. *Reliability Engineering and System Safety*, 121: 207-220.
- Yeh, R. H., Lo, H. e Yu, R. (2011). A study of maintenance policies for second-hand products. *Computers & Industrial Engineering*, 60: 438-444.