

POLÍTICA HÍBRIDA DE MANUTENÇÃO DE DUAS FASES VOLTADA PARA SISTEMAS CRÍTICOS USANDO O CONCEITO DELAY-TIME

Waldomiro A. Ferreira Neto

UFPE-Universidade Federal de Pernambuco
Departamento de Eng. de Produção-CTG, Av. da Arquitetura, s/n
Cidade universitária – Recife, PE
w.a.ferreiraneto@random.org.br

Cristiano A. V. Cavalcante

UFPE-Universidade Federal de Pernambuco
Departamento de Eng. de Produção-CTG, Av. da Arquitetura, s/n
Cidade universitária – Recife, PE
c.a.v.cavalcante@random.org.br

Alexandre R. Alberti

UFPE-Universidade Federal de Pernambuco
Departamento de Eng. de Produção-CTG, Av. da Arquitetura, s/n
Cidade universitária – Recife, PE
a.r.alberti@random.org.br

Augusto C. J. Santos

UFPE-Universidade Federal de Pernambuco
Departamento de Eng. de Produção-CTG, Av. da Arquitetura, s/n
Cidade universitária – Recife, PE
a.c.j.santos@random.org.br

RESUMO

Sistemas críticos são sistemas cujas falhas podem gerar prejuízos em múltiplas dimensões. Neste contexto, adotar uma política de manutenção eficaz é de suma importância, pois um dos objetivos da manutenção é prevenir as sérias consequências decorrentes de uma falha. Assim, este trabalho apresenta um modelo de manutenção híbrida de duas fases voltado para sistemas críticos, onde uma das fases de inspeção tem sua periodicidade reduzida por um fator de redução. O processo de falha do sistema foi modelado segundo o conceito *delay-time*, que caracteriza o sistema em três possíveis estados: bom, defeituoso e falho. Sua eficiência é validada através de um modelo analítico que avalia o desempenho da política em relação ao custo, taxa de falha e *downtime* esperados ao longo prazo. Após a aplicação em um estudo de caso, o modelo apresentou o custo e taxa de falha esperada no longo prazo menor que outras políticas existentes.

PALAVRAS CHAVE. Política de manutenção híbrida, Sistemas críticos, Delay-time

Tópicos: (POI – PO na Indústria, EST&MP – Estatística e Modelos Probabilísticos)

ABSTRACT

Critical systems are systems whose failures can generate losses in multiple dimensions. In this context, adopting an effective maintenance policy is important, as one of the objectives of maintenance is to prevent the serious consequences resulting from a failure. Thus, this work

presents a two-phase hybrid maintenance model aimed at critical systems, where one of the inspection phases has its periodicity reduced by a reduction factor. The system failure process was modeled according to the delay-time concept, which characterizes the system in three possible states: good, defective and failed. Its efficiency is validated through an analytical model that assesses the policy's performance in relation to the expected cost, failure rate and downtime over the long term. As a result of applying the model in a case study, the model obtained the cost and expected failure rate in the long run lower than other existing policies.

KEYWORDS. Hybrid maintenance policy. Critical system. Delay-time

Paper topics (OPI – OP in Industry. STA&PM – Statistics and Probabilistic Models)

1. Introdução

Sistemas críticos são sistemas nos quais falhas são fortemente indesejadas. Além do impacto econômico, o colapso destes sistemas geralmente provoca impactos humanos ou ambientais, por exemplo, perda de vidas devido a uma falha em um dispositivo médico e impactos negativos no meio ambiente e na saúde pública devido a uma falha em um sistema nuclear [Knight 2002]. Embora a maioria dos modelos de manutenção não se concentre na dimensão de risco à segurança relacionada a sistemas críticos, há um número crescente de modelos vinculando essas áreas [Vatn e Aven 2010]. Em relação às abordagens de manutenção para lidar com questões de segurança, [Vatn e Aven 2010] introduzem uma estrutura para otimização da manutenção, onde as questões de segurança são importantes. Nesta abordagem, considera-se que a manutenção de componentes aumenta principalmente a confiabilidade e, conseqüentemente, o nível de segurança. [Vatn et al. 1996] consideram os critérios de segurança, saúde e meio ambiente em um modelo geral para otimização da manutenção. O artigo apresenta uma abordagem para lidar com os múltiplos critérios relacionados à otimização da manutenção de um sistema de produção. Em relação aos modelos de manutenção, [Aven e Castro 2008] consideraram uma restrição de segurança no desenvolvimento de um modelo de manutenção de reparo mínimo e substituição. Mais recente, [Scarf et al. 2019] modelaram a manutenção de um sistema crítico sujeito a falhas aleatórias. Nesse caso em particular, o sistema foi considerado crítico por causa das conseqüências da falha na produção.

Como visto, a relevância da manutenção para um sistema crítico de segurança depende basicamente do desenvolvimento de abordagens e modelos para evitar os impactos negativos da falha. De fato, uma das principais funções da manutenção é evitar as sérias conseqüências decorrentes de uma falha [Ben-daya et al. 2016]. Dessa forma, uma política de manutenção eficaz é de suma importância para esse tipo de sistema, pois suas falhas atingem proporções catastróficas, com perdas em várias dimensões, como humanas, financeiras e ambientais [Almeida et al. 2015].

No presente artigo, modelamos uma política de manutenção híbrida para um sistema crítico, em que a frequência de inspeções aumenta em uma das fases seguindo um fator de redução (α), que é uma variável de decisão. O estado do sistema é modelado usando o conceito *delay-time* [Christer 1987], no qual o sistema pode visitar três estados, bom, defeituoso ou falho. O sistema encontra-se operacional nos estados bom e defeituoso. As falhas são imediatamente reveladas, sendo o objetivo da inspeção identificar se o sistema está com defeito ou não e, em caso afirmativo, realizar alguma manutenção preventiva.

Em contextos em que a falha não é aceitável, as políticas híbridas surgem como uma alternativa interessante para evitar a falha e todos os eventos catastróficos relacionados a ela. Políticas híbridas, ou seja, políticas que combinam mais de uma atividade de manutenção, podem trazer melhores resultados do que políticas puras, como já foi demonstrado por [Cavalcante et al. 2011]. Segundo [Scarf e Cavalcante 2012], uma política híbrida seria apropriada para os sistemas sujeitos à riscos de grandes magnitudes, onde substituições preventivas frequentes são desaconselhadas. Assim, antes da substituição preventiva, o número de inspeções e o intervalo entre elas são modelados para equilibrar as conseqüências de uma falha com o custo para evitá-la. Esse princípio é aceitável se observarmos que o custo de uma inspeção é muito menor que o custo da substituição preventiva ou mesmo o custo de uma falha. Para situações em que falhas trazem problemas de segurança, espera-se que as inspeções sejam ainda mais intensas, a fim de reduzir a probabilidade de falha. Idealmente, a frequência da inspeção deve aumentar com o passar do tempo.

O aumento na periodicidade da inspeção geralmente é modelado por mais de um modelo de fase. [Ma et al. 2017] modelaram uma estratégia ótima de inspeção e substituição na qual o intervalo de inspeção é reduzido de acordo com uma razão constante. [Wang et al. 2017] apresentaram um modelo de inspeção em duas fases para um sistema de componentes com um processo de degradação em três estágios. Uma política de inspeção de múltiplas fases foi apresentada por [Cavalcante et al. 2011]. Os autores consideraram duas fases (I e II), cada uma

delas associada a um número de inspeções (M_1 e M_2) e a um intervalo específico (T_1 e T_2), de modo que a fase I termine no momento ($M_1 T_1$) e a fase II consista no intervalo de tempo $[(M_1 T_1), (M_1 T_1 + M_2 T_2)]$. A presença de uma fase adicional fornece a flexibilidade necessária para intensificar ou reduzir a frequência com que as inspeções estão sendo realizadas. Isso é importante para corresponder o nível de vigilância às diferentes necessidades do sistema relacionadas à sua idade, buscando evitar falhas.

Diferentemente dos trabalhos anteriores, propomos uma política híbrida com duas fases de inspeção, onde uma das fases está associada a uma política de inspeção não periódica. Em cada fase, o número de inspeções a serem executadas é conhecido (M_1 e M_2). Entretanto, enquanto na primeira fase o intervalo de tempo entre inspeções (Δ_1) permanece constante, na segunda fase o intervalo entre inspeções (Δ_2) é reduzido a cada nova inspeção através de um fator de redução α . O modelo é proposto usando uma abordagem analítica. Os impactos provenientes da falha são traduzidos em termos monetários e são contabilizados no modelo através do custo da falha. Medidas de desempenho do sistema, como taxa de falha e indisponibilidade, também são mensuradas a partir do modelo analítico.

O trabalho tem como objetivo avaliar o impacto de adotar a política de manutenção híbrida proposta em um sistema crítico. A importância deste artigo se baseia na possibilidade de aplicar o modelo em um contexto crítico em que falhas promovem consequências drásticas, como a perda de vidas. Neste contexto, um estudo de caso foi realizado utilizando o modelo proposto. Uma análise de sensibilidade foi realizada para avaliar o comportamento e desempenho do modelo diante de variações de seus parâmetros de entrada.

O restante deste artigo está organizado da seguinte forma. As suposições e notações são descritas na seção 2. O modelo detalhado é apresentado na seção 3. Um estudo de caso é introduzido na seção 4. Na sessão 5, os resultados obtidos no estudo de caso são discutidos e analisados. Por último, concluímos o artigo na sessão 6 com uma discussão das implicações de alguns achados para a gestão da manutenção.

2. Suposições e notações

2.1. Notações

X	Tempo até a chegada do defeito – variável aleatória não negativa
f_X, F_X, R_X	Função densidade de probabilidade, função distribuição acumulada e confiabilidade de X
H	<i>Delay-time</i> (tempo desde a chegada do defeito até a falha) – variável aleatória não negativa
f_H, F_H, R_H	Função densidade de probabilidade, função distribuição acumulada e confiabilidade de H
M_1, M_2	Número de inspeção na primeira e na segunda fase, respectivamente
Δ_1, Δ_2	Intervalo entre inspeção da primeira e da segunda fase, respectivamente
α	Fator de redução
C_V, C_P, C_F	Custo da inspeção, da substituição preventiva e da falha, respectivamente
T_V, T_P, T_F	Duração da inspeção, da substituição preventiva e da falha, respectivamente
E_C, E_L, E_D	Custo, duração e <i>downtime</i> esperado de um ciclo de renovação de uma política
$C_\infty, D_\infty, \lambda$	Custo, <i>downtime</i> e taxa de falha esperado por unidade de tempo no longo prazo

2.2. Suposições do modelo

O modelo foi desenvolvido a partir dos seguintes pressupostos:

- 1) O sistema é um sistema crítico que compreende um componente em um soquete que, juntos, desempenha uma função operacional [Ascher e Feingold 1984];
- 2) O custo da substituição do componente é elevado $C_F > C_P > C_V$;
- 3) O sistema pode estar em um dos três estados: bom, defeituoso, com falha;

- 4) O defeito é observado apenas na inspeção;
- 5) O sistema opera em bom estado e com defeito;
- 6) Uma falha é imediatamente revelada;
- 7) O sistema é renovado em caso de falha, quando um defeito é encontrado na inspeção ou na idade de substituição, o que acontecer primeiro;
- 8) O *delay-time* e o tempo de chegada do defeito são variáveis aleatórias independentes;
- 9) As inspeções são perfeitas;
- 10) O sistema não fica indisponível durante uma inspeção ou, caso fique, o tempo necessário para realização de uma inspeção é desprezível;
- 11) No momento programado para realização da substituição preventiva, é feita uma inspeção para verificar o estado do sistema e registrar essa informação.

3. Modelo proposto

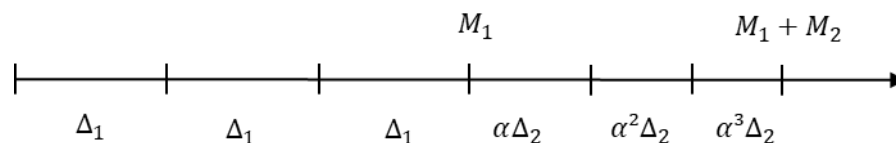
Para apoiar o processo de definição da política de manutenção em contextos críticos, foi desenvolvido um modelo de política de manutenção híbrida de duas fases para um sistema simples, composto por um componente e um suporte, que juntos desempenham uma função operacional [Ascher e Feingold 1984].

O processo de falha do sistema é modelado usando o conceito *delay-time*, onde a falha de um componente ocorre em dois estágios, desde novo até um ponto inicial em que um defeito pode ser identificado por uma inspeção e, deste ponto, até a falha, se o defeito não foi observado. A substituição do componente ocorre quando o sistema é identificado durante uma inspeção no estado defeituoso, após a última inspeção da segunda fase ou após uma falha, o que acontecer primeiro. Com a substituição, o sistema como um todo é renovado.

3.1. Política de manutenção

A primeira fase é caracterizada por um número determinado de inspeções (M_1) com um intervalo de tempo específico (Δ_1). Após o término desta primeira fase em $M_1\Delta_1$, caso não haja substituição preventiva, inicia-se uma sequência de diferentes intervalos de inspeções. Esta segunda fase não possui um valor fixo de intervalo de tempo, mas um vetor de M_2 diferentes valores de tempo, associado entre eles por um fator decrescente de $(1 - \alpha)$, ou seja, o primeiro intervalo da segunda fase é $\alpha\Delta_2$, o segundo intervalo é $\alpha(\alpha\Delta_2)$, e assim por diante, até a M_2 -ésima inspeção da segunda fase, onde o sistema é substituído preventivamente, conforme ilustrado na Figura 1.

Figura 1 – Representação da política de manutenção



Fonte: Autor desta pesquisa

Essa redução sistemática do intervalo de inspeção fornece um recurso interessante à política. A variável α modula a rapidez com que a frequência da inspeção deve aumentar. Quando α é igual a 1, não há redução no intervalo de tempo entre a inspeção, o que significa que os intervalos de inspeção na primeira e na segunda fase são constantes; portanto, a política se torna uma política de inspeção de duas fases, na qual as inspeções são feitas a cada intervalo de tempo Δ_1 na primeira fase, podendo mudar em $M_1\Delta_1$ para um intervalo diferente Δ_2 , com a substituição preventiva programada para acontecer em $M_1\Delta_1 + M_2\Delta_2$.

A adição de uma segunda fase pode aumentar a complexidade gerencial do modelo quando comparada a uma política de inspeção monofásica, mas é justificada porque (i) o componente é crítico para o sistema principal, (ii) o custo da substituição do componente é alto,

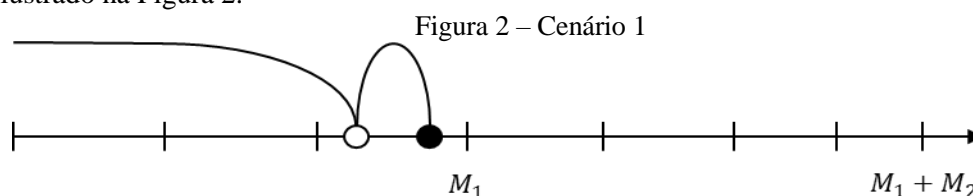
(iii) uma redução em seu desempenho pode contribuir para consequências desfavoráveis e, (iv) a falha pode promover situações extremas, como um acidente, que pode ter implicações operacionais, humanas, de custo e / ou ambientais. Desta forma, a complexidade inerente à política proposta é compensada pela possível redução da taxa de falhas do sistema, evitando as graves consequências da falha.

3.2. Formulação matemática

Observando o modelo proposto, três diferentes cenários de ciclo de renovação do componente são possíveis, os quais são detalhados a seguir. A chegada do defeito e a ocorrência da falha são representadas por círculos brancos e pretos, respectivamente.

Cenário 1. Falha do componente

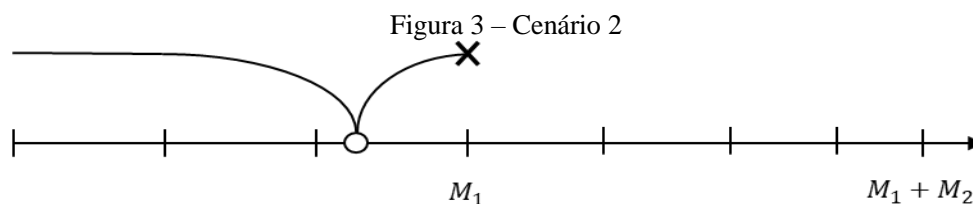
A chegada do defeito ocorre no período de inspeção, podendo ser tanto na primeira quanto na segunda fase. Entretanto, o tempo de permanência no estado defeituoso (*delay-time*) é inferior ao tempo até a próxima inspeção. Assim, o defeito não é identificado e a falha acontece, como é ilustrado na Figura 2.



Fonte: Autor desta pesquisa

Cenário 2. Defeito identificado durante uma inspeção

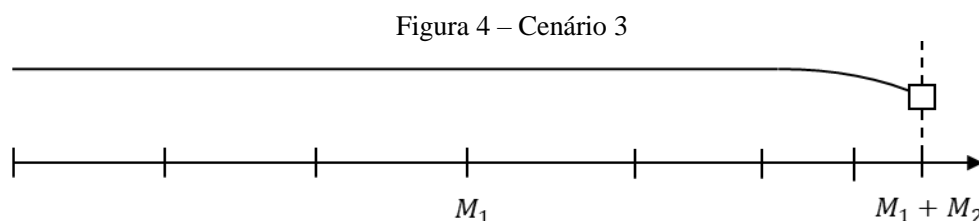
Novamente a chegada do defeito ocorre no período de inspeções, podendo ser tanto na primeira quanto na segunda fase. Porém, o *delay-time* é grande o suficiente para que o componente continue operando no estado defeituoso até a próxima inspeção, onde o defeito é identificado e o componente é substituído preventivamente. A Figura 3 ilustra este cenário. A identificação do defeito durante a inspeção é simbolizada por um “x”.



Fonte: Autor desta pesquisa

Cenário 3. Substituição preventiva em $M_1 + M_2$

Neste cenário, a chegada do defeito só ocorreria após as fases de inspeção. Desta forma, o componente, após a M_2 -ésima inspeção da segunda fase, é substituído preventivamente. A Figura 4 ilustra este cenário, onde a substituição preventiva é representada por um quadrado.



Fonte: Autor desta pesquisa

Para facilitar a dedução matemática do modelo, vamos definir \emptyset como o conjunto das variáveis de decisão da política de manutenção, ou seja, $\emptyset = \{M_1, M_2, \Delta_1, \Delta_2, \alpha\}$. Sendo i o número da inspeção realizada ($i = 1, 2, \dots, M_1 + M_2$), define-se o instante de tempo em que a i -ésima inspeção é realizada $t(i)$, tendo como referencia o início do ciclo de renovação, como:

$$t(i, \emptyset) = i \cdot \Delta_1, \quad \text{se } i < M_1$$

$$t(i, \emptyset) = i \cdot \Delta_1 + \frac{\Delta_2 \cdot (1 - \alpha^{i-M_1})}{(1 - \alpha)}, \quad \text{se } M_1 < i < M_1 + M_2$$

A partir da análise dos possíveis cenários de ciclo de renovação do componente, é formulado matematicamente o custo $EC(\emptyset)$ e a duração esperada do ciclo de renovação $EL(\emptyset)$ de uma política de manutenção \emptyset . A expressão do cálculo de $EC(\emptyset)$ e $EL(\emptyset)$ são apresentadas a seguir.

$$EC(\emptyset) = \sum_{i=1}^{M_1+M_2} \left\{ [(i-1) \cdot C_v + C_p] \cdot \int_{t(i-1, \emptyset)}^{t(i, \emptyset)} f_x(x) \cdot F_h[t(i, \emptyset) - x] dx \right\}$$

$$+ \sum_{i=1}^{M_1+M_2} \left\{ (i \cdot C_v + C_p) \cdot \int_{t(i-1, \emptyset)}^{t(i, \emptyset)} f_x(x) \cdot R_h[t(i, \emptyset) - x] dx \right\}$$

$$+ [(M_1 + M_2) \cdot C_v + C_p] \cdot R_x[t(M_1 + M_2, \emptyset)]$$

$$EL(\emptyset) = \sum_{i=1}^{M_1+M_2} \left\{ \int_{t(i-1, \emptyset)}^{t(i, \emptyset)} f_x(x) \cdot \int_0^{t(i, \emptyset) - x} f_h(h) \cdot (x + h + T_f) \right\} +$$

$$+ \sum_{i=1}^{M_1+M_2} \left\{ [t(i, \emptyset) + T_p] \cdot \int_{t(i-1, \emptyset)}^{t(i, \emptyset)} f_x(x) \cdot R_h[t(i, \emptyset) - x] dx \right\} +$$

$$+ [t(M_1 + M_2, \emptyset) + T_p] \cdot R_x[t(M_1 + M_2, \emptyset)]$$

Outras medidas de desempenho do sistema, como o tempo de indisponibilidade esperado $ED(\emptyset)$ e a probabilidade de um ciclo de um ciclo de renovação terminar em falhas (ρ), também podem ser calculados e suas expressões matemáticas são apresentadas a seguir.

$$ED(\emptyset) = \sum_{i=1}^{M_1+M_2} \left\{ T_f \cdot \int_{t(i-1, \emptyset)}^{t(i, \emptyset)} f_x(x) \cdot F_h[t(i, \emptyset) - x] dx \right\} +$$

$$+ \sum_{i=1}^{M_1+M_2} \left\{ T_p \cdot \int_{t(i-1, \emptyset)}^{t(i, \emptyset)} f_x(x) \cdot R_h[t(i, \emptyset) - x] dx \right\} +$$

$$+ T_p \cdot R_x[t(M_1 + M_2, \emptyset)]$$

$$\rho(\emptyset) = \sum_{i=1}^{M_1+M_2} \left\{ \int_{t(i-1, \emptyset)}^{t(i, \emptyset)} f_x(x) \cdot F_h[t(i, \emptyset) - x] dx \right\}$$

Mensurar os impactos da falha em múltiplas dimensões é uma tarefa complexa. Como forma de simplificação, nosso modelo traduz os impactos da consequência da falha em termos monetários que são embutidos no C_F . Sob a premissa de que o sistema é renovado toda vez que o componente é substituído, o modelo usa como critério de decisão o indicador de custo por unidade de tempo no longo prazo, de acordo com o teorema (*renewal-reward*) proposto por [Tijms 1994], sendo ele apresentado a seguir.

$$C_{\infty}(\emptyset) = \frac{EC(\emptyset)}{EL(\emptyset)}$$

As medidas de desempenho *Downtime* $D_{\infty}(\emptyset)$ e taxa de falha por unidade de tempo no longo prazo $\lambda(\emptyset)$ também são calculadas e são apresentadas a seguir.

$$\lambda(\emptyset) = \frac{\rho(\emptyset)}{EL(\emptyset)}, \quad D_{\infty}(\emptyset) = \frac{ED(\emptyset)}{EL(\emptyset)}$$

4. Estudo de caso

As possibilidades de aplicação do modelo são amplas, uma vez que pode ser aplicado a qualquer sistema de componente único sujeito a inspeções e cuja falha é crítica. Para possibilitar a análise do comportamento e avaliação do modelo proposto, um estudo de caso é desenvolvido utilizando dados e parâmetros ilustrativos a respeito do sistema e de seu processo de falha.

O processo de deterioração e falha do componente é modelado utilizando o conceito *delay-time*. Para o tempo até a chegada do defeito, foi considerada uma distribuição *Weibull* com parâmetros $\eta_X = 250$ dias e $\beta_X = 2.5$ (respectivamente, parâmetros escala e de forma). A distribuição de probabilidade do *delay-time*, também foi considerada uma distribuição *Weibull* com parâmetros $\eta_H = 60$ dias e $\beta_H = 1$.

Com relação aos custos das atividades de manutenção, o custo de realizar uma inspeção foi considerado como unidade de referência, de forma que $C_V = 1$ u.m. (unidades monetárias). Dessa forma, os demais custos foram estimados da seguinte forma: $C_P = 20$ u.m. e $C_F = 200$ u.m. Além de um custo, cada atividade de manutenção tem um tempo de duração previsto. Como pressuposto do modelo, o tempo de execução de uma inspeção é desprezível e os demais tempos são: $T_P = 0.5$ dias e $T_F = 2$ dias.

Para otimizar as variáveis de decisões e encontrar a política ótima a ser sugerida, aplicou-se ao modelo um algoritmo de otimização global. O algoritmo foi implementado na linguagem de programação Python e o método utilizado foi o *Differential Evolution* [Storn e Price 1997].

5. Resultados e discussões

Considerando os parâmetros de entrada do estudo de caso, obtém-se a seguinte recomendação para a política de manutenção: $M_1 = 1$, $M_2 = 11$, $\Delta_1 = 61.63$ dias, $\Delta_2 = 20.61$ dias e $\alpha = 0.9189$, o que resulta em $C_{\infty} = 0.2141$ u.m./dia. Devido ao alto custo associado à manutenção corretiva, recomenda-se uma política de manutenção relativamente conservadora, com um maior número de inspeções na segunda fase, com fator de redução superior a 8% ($1 - \alpha$), e o tempo para substituição preventiva, que ocorre na M_2 -ésima inspeção da segunda fase, programada para ocorrer no 222º dia contado a partir do início do ciclo de renovação, que é inferior a η_X .

Uma análise de sensibilidade foi realizada, de forma a observar o comportamento do modelo diante a variação dos parâmetros de entrada. Os resultados são apresentados na Tabela 1:

na linha 1 é apresentado o resultado para o caso base; nas demais linhas são apresentados os resultados para os demais casos e os parâmetros com valores diferentes são destacados em cinza.

Tabela 1 – Análise de sensibilidade

casos	Parâmetros X		Delay-time		Custo			Tempos			Variáveis de decisão					Desempenho		
	η_X	β_X	η_H	β_H	C_V	C_P	C_F	T_i	T_P	T_F	M_1	M_2	Δ_1	Δ_2	α	$C_\infty(\emptyset)$	$\lambda(\emptyset)$	$D_\infty(\emptyset)$
1	250	2.5	60	1	1	20	200	0	0.5	2	1	11	68.63	20.61	0.9189	0.2141	0.00033	0.0064
2	200	2.5	60	1	1	20	200	0	0.5	2	1	11	57.94	17.44	0.9207	0.2531	0.00038	0.0082
3	300	2.5	60	1	1	20	200	0	0.5	2	1	10	79.66	24.05	0.9144	0.1867	0.00029	0.0051
4	250	2	60	1	1	20	200	0	0.5	2	1	19	50.29	19.07	0.9515	0.2279	0.00040	0.0073
5	250	3	60	1	1	20	200	0	0.5	2	1	7	82.00	22.87	0.8757	0.2004	0.00027	0.0056
6	250	2.5	30	1	1	20	200	0	0.5	2	1	10	60.88	17.20	0.9142	0.2540	0.00041	0.0058
7	250	2.5	90	1	1	20	200	0	0.5	2	1	11	74.75	23.26	0.9195	0.1935	0.00029	0.0068
8	250	2.5	60	1.5	1	20	200	0	0.5	2	1	18	68.42	21.59	0.9491	0.1756	0.00021	0.0078
9	250	2.5	60	1	0.5	20	200	0	0.5	2	1	25	56.62	14.14	0.9559	0.1837	0.00026	0.0072
10	250	2.5	60	1	1.5	20	200	0	0.5	2	1	6	77.64	25.77	0.8787	0.2340	0.00037	0.0059
11	250	2.5	60	1	1	10	200	0	0.5	2	1	4	66.22	23.18	0.8490	0.1550	0.00024	0.0058
12	250	2.5	60	1	1	30	200	0	0.5	2	1	18	72.36	19.35	0.9413	0.2603	0.00039	0.0072
13	250	2.5	60	1	1	20	150	0	0.5	2	1	11	76.80	22.93	0.9174	0.1958	0.00041	0.0066
14	250	2.5	60	1	1	20	250	0	0.5	2	1	10	63.57	19.57	0.9152	0.2292	0.00028	0.0062

Fonte: Autor desta pesquisa

Antes de discutir os resultados, é importante observar que para todos os casos analisados, a quantidade de inspeções na primeira fase se manteve constante e igual a 1. Esse resultado assemelha-se com a política proposta por [Wang et al. 2017], onde os autores propõem realizar uma única inspeção na primeira fase com uma periodicidade T_1 e n inspeções na segunda com periodicidade T_2 , ambas fixas. Neste caso, o nosso modelo se diferencia pela redução dos intervalos de tempo entre inspeção na segunda fase, tornando a política de [Wang et al. 2017] um caso especial quando α for igual a 1.

Analisando os resultados obtidos através da análise de sensibilidade, o modelo se comporta como esperado. Observa-se uma sensibilidade em relação a β_X . Valores maiores de β_X (linha 5) representam que o tempo de chegada dos defeitos se concentram cada vez mais próximo de η_X , o que torna a falha mais fácil de ser identificada, necessitando de uma quantidade de inspeções menor e menos frequente. Como consequência, o valor das medidas de desempenho do modelo decresce. Na situação inversa (linha 4), o oposto é observado.

O *delay-time* pode ser visto como uma janela de oportunidade de identificação do defeito e prevenção da falha. Logo, quanto menor for o *delay-time*, mais difícil é para identificar o componente no seu estado defeituoso e quanto maior, mais fácil. É interessante notar que o modelo reage a essas variações (linha 6 e 7), não interferindo na quantidade de inspeções a serem executadas e sim no intervalo Δ_2 entre suas execuções, mantendo α sem variações significativas. Ainda em relação ao *delay-time*, algo interessante ocorre quando β_H aumenta (linha 8). Neste caso, o modelo opta por realizar mais inspeções na segunda fase. Como resultado, o C_∞ e λ reduzem substancialmente, mas D_∞ aumenta.

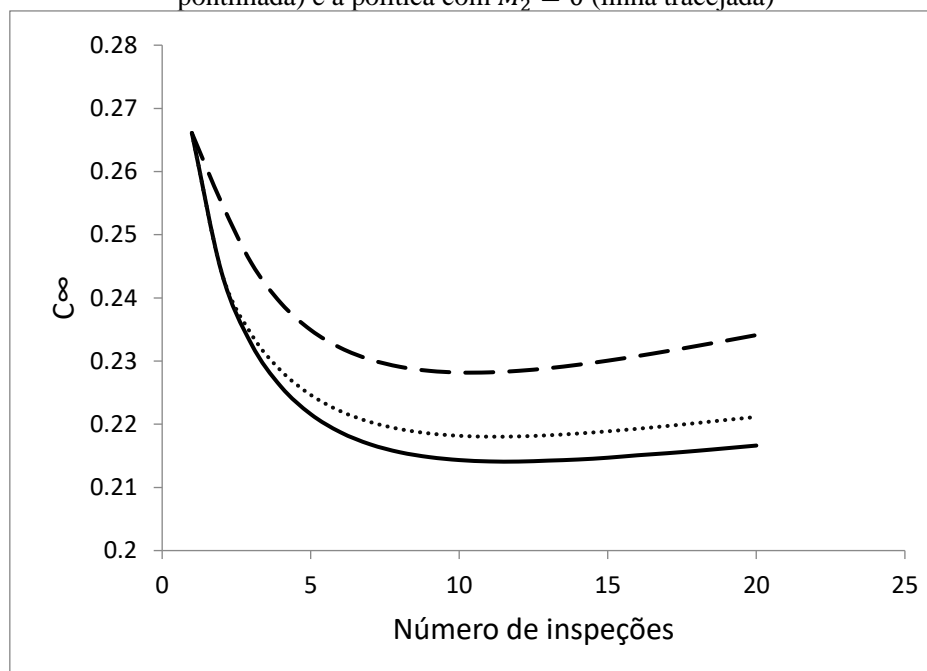
Quando se trata dos parâmetros de custo, observa-se que os custos C_V , C_P e C_F são diretamente proporcionais ao C_∞ . Ao contrario do observado com o C_F , variações dos C_V e C_P mudam radicalmente a política obtida inicialmente no caso base. Elevando o C_V ou reduzindo C_P (linha 10 e 11), torna-se mais atrativo realizar substituições preventivas, visto que o custo acumulado da realização das inspeções para evitar a falha rapidamente se iguala ao custo de

substituir preventivamente. Além da redução da quantidade de inspeções, o modelo opta por um Δ_2 maior, mas adotando reduções mais drásticas (α menor). Desta forma, consegue-se reduzir as taxas de falhas e a indisponibilidade do sistema. Uma diferença entre aumentar C_V e reduzir C_P ocorre em relação ao intervalo na primeira fase Δ_1 . Enquanto no primeiro caso a inspeção é retardada, buscando redução de custo; no segundo caso é antecipada, buscando substituições preventivas com mais frequência. Quando há redução de C_V ou aumento de C_P , o inverso ocorre, como é observado nos casos 9 e 12.

Por fim, devido aos grandes impactos causados pela falha, o modelo irá sugerir políticas que minimizem a ocorrência deste evento. Como resultado, pequenas variações de C_F (linha 13 e 14) impactam pouco no modelo, uma vez que este custo continua sendo significativamente superior aos demais custos envolvidos.

Uma análise comparativa foi realizada entre o modelo proposto e dois casos especiais que surgem a partir dele: quando $M_1 = 0$, a política torna-se igual à proposta por [Ma et al. 2017], sendo uma política de inspeção onde o intervalo de inspeção é reduzido de acordo com uma razão constante; e quando $M_2 = 0$, uma política de inspeção periódica pura. Ambas realizam substituições preventivas após a última inspeção, independente do estado do componente. A Figura 5 mostra a comparação entre as três políticas utilizando o C_∞ da política ótima encontrada para um número de inspeções fixo. No caso da política proposta, é fixada uma inspeção na primeira fase e as demais ocorrendo na segunda.

Figura 5 – Gráfico de comparação da política proposta (linha contínua), política com $M_1 = 0$ (linha pontilhada) e a política com $M_2 = 0$ (linha tracejada)



Fonte: Autor desta pesquisa

A política proposta apresenta melhor desempenho de C_∞ do que as demais, mostrando uma redução significativa principalmente em relação à política com $M_2 = 0$. A Tabela 2 apresenta os valores ótimos das variáveis de decisões das políticas casos especiais para cada caso analisado na análise de sensibilidade do modelo proposto. A coluna ao lado do C_∞ e da taxa de falha (probabilidade de falha/dias) fornece o valor da redução, em porcentual, obtida ao adotar a política proposta.

Tabela 2 – Ótimos das políticas casos especiais

Casos	$M_1 = 0$								$M_2 = 0$						
	M_2	Δ_2	α	$C_{\infty}(\emptyset)$	%	$\lambda(\emptyset)$	%	$D_{\infty}(\emptyset)$	M_1	Δ_1	$C_{\infty}(\emptyset)$	%	$\lambda(\emptyset)$	%	$D_{\infty}(\emptyset)$
1	11	36.95	0.8564	0.2180	1.81%	0.00033	1.55%	0.00621	10	19.81	0.2282	6.18%	0.00035	6.72%	0.00601
2	11	31.31	0.8570	0.2578	1.82%	0.00039	1.66%	0.00800	10	16.90	0.2697	6.14%	0.00041	7.01%	0.00774
3	11	42.29	0.8561	0.1901	1.80%	0.00029	1.62%	0.00505	10	22.59	0.1990	6.20%	0.00031	6.67%	0.00489
4	19	26.08	0.9296	0.2310	1.33%	0.00040	0.86%	0.00719	17	15.77	0.2385	4.42%	0.00041	4.02%	0.00709
5	8	48.40	0.7790	0.2046	2.05%	0.00028	2.67%	0.00549	7	24.88	0.2161	7.29%	0.00030	9.39%	0.00523
6	10	33.07	0.8396	0.2586	1.81%	0.00041	1.78%	0.00566	10	16.47	0.2708	6.24%	0.00044	6.64%	0.00558
7	12	40.03	0.8640	0.1971	1.82%	0.00029	2.19%	0.00668	10	22.31	0.2061	6.11%	0.00031	7.41%	0.00636
8	20	30.25	0.9265	0.1797	2.28%	0.00021	0.51%	0.00773	18	17.62	0.1887	6.94%	0.00023	7.56%	0.00765
9	25	20.97	0.9352	0.1869	1.71%	0.00026	1.41%	0.00708	22	11.31	0.1950	5.81%	0.00028	6.55%	0.00686
10	7	51.48	0.7715	0.2380	1.67%	0.00038	1.73%	0.00584	6	28.80	0.2497	6.25%	0.00040	7.06%	0.00563
11	5	50.77	0.6891	0.1573	1.42%	0.00024	1.64%	0.00574	5	26.34	0.1654	6.27%	0.00026	6.24%	0.00573
12	18	31.12	0.9071	0.2651	1.83%	0.00039	1.08%	0.00701	15	17.23	0.2765	5.88%	0.00042	6.99%	0.00042
13	11	42.07	0.8498	0.1994	1.83%	0.00042	1.94%	0.00636	10	22.11	0.2085	6.12%	0.00044	6.85%	0.00671
14	11	33.91	0.8588	0.2334	1.78%	0.00028	1.58%	0.00610	11	17.25	0.2443	6.18%	0.00030	6.47%	0.00601

Fonte: Autor desta pesquisa

Além da vantagem financeira, a política proposta apresenta uma redução da taxa de falha em todos os casos, podendo chegar até 9.39% em relação à política com $M_2 = 0$ e 2.67% em relação à política com $M_1 = 0$. Assim, a aplicação do modelo apresenta uma melhoria na confiabilidade e, conseqüentemente, da segurança do sistema. Entretanto, também é observado um maior tempo de indisponibilidade do sistema.

6. Conclusões

O presente trabalho tem como principal contribuição a apresentação de uma política híbrida de inspeção e substituição programada. A política constitui de múltiplas fases, em que a segunda fase tem intervalos decrescente de inspeção. Esta particularidade permite que durante a vida de um componente crítico diferentes níveis de supervisão sejam estabelecidos, como uma medida de controle ao risco de falha. Essa característica é essencialmente importante dentro do contexto de sistemas críticos devido à gravidade inerente à falha a qual pode levar a situações drásticas como danos severos à operação, ao meio ambiente e até mesmo à vida humana, dependendo do sistema crítico analisado.

Através dos resultados obtidos no estudo de caso, observou-se que o modelo proposto, em comparação com outras políticas de inspeções, apresentou redução do custo esperado em longo prazo e da taxa de falhas do sistema, o que nos leva a conclusão que sua utilização melhora a confiabilidade do sistema e, conseqüentemente, a sua segurança. Desta forma, a aplicação do modelo em cenários críticos é plausível, visto que a complexidade do modelo é compensada pelo ganho em confiabilidade e segurança do sistema.

Referências

- Almeida, A. D., Cavalcante, C. A. V., Alencar, M. H., Ferreira, R. J. P., Almeida-Filho, A. D., & Garcez, T. V. (2015). Multicriteria and multiobjective models for risk, reliability and maintenance decision analysis. International Series in Operations Research and Management Science. New York: Springer.
- Ascher, H. e Feingold, H. (1984). Repairable Systems Reliability. MarcelDekker, New York.
- Aven, T., Castro, I. T. (2008). A minimal repair replacement model with two types of failure and a safety constraint. European Journal of Operational Research, 188, 506–515.

Avizienis, A., Laprie, J. C., Randell, B., Landwehr, C. (2004). Basic concepts and taxonomy of dependable and secure computing. *IEEE Trans. Dependable Secure Comput.* 1(1), 11–33.

Ben-daya, M., Kumar, U., Murthy, D. N. P. (2016). *Introduction to maintenance engineering: modelling, optimization and management*, Wiley, Chichester.

Cavalcante, C. A., 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. (1987). Delay-time model of reliability of equipment subject to inspection monitoring. *Journal of the Operational Research Society*, 38, 329–334.

Knight, J. C. (2002). Safety critical systems: challenges and directions. In: *Proceedings of the 24th International Conference on Software Engineering. ICSE 2002, Orlando, FL, USA*, 547-550.

Ma, X., Wang, W., Liu, X., Peng, X. (2017). Optimal Inspection and Replacement Strategy for Systems Subject to Two Types of Failures with Adjustable Inspection Intervals. *J. Shanghai Jiao Tong Univ. (Sci.)*, 22(6), 752-755.

Scarf, P. A., Cavalcante, C. A. (2012). Modelling quality in replacement and inspection maintenance. *International Journal of Production Economics*, 135(1), 372-381.

Scarf, P. A., Cavalcante, C. A. V., Lopes, R. S. (2019). Delay-time modelling of a critical system subject to random inspections. *European Journal of Operational Research*, 278, 772–782.

Storn, R., Price, K. (1997). Differential Evolution - a Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization over Continuous Spaces. *Journal of Global Optimization*, 11, 341 - 359.

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

Vatn, J., Aven, T. (2010). An approach to maintenance optimization where safety issues are important. *Reliability Engineering and System Safety*, 95, 58–63.

Vatn, J., Hokstad, P., Bødsberg, L. (1996). An overall model for maintenance optimization. *Reliability Engineering and System Safety*, 51, 241-257.

Wang, H., Wang, W., Peng, R. (2017). A two-phase inspection model for a single component system with three-stage degradation. *Reliability Engineering and System Safety*, 158, 31-40.