

ESTUDO DO IMPACTO DA INDUÇÃO DE DEFEITO EM UMA POLÍTICA DE INSPEÇÃO

Lucas Queiroz Melo da Costa

UFPE-Universidade Federal de Pernambuco
Departamento de Eng. de Produção-CTG, Av. da Arquitetura, s/n
Cidade universitária – Recife, PE
l.q.m.dacosta@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

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

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

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

RESUMO

Para implementar um programa de manutenção efetivo, é fundamental entender os aspectos de qualidade das atividades executadas através da política estabelecida. Neste trabalho, a influência de eventos externos combinados ao fator humano sobre a qualidade da manutenção é considerada, de forma inovadora, dentro do contexto de uma política de inspeção e substituição preventiva híbrida, considerando um sistema composto por um único componente. O impacto sobre a política de manutenção é modelado assumindo que eventos externos podem perturbar as condições próprias para uma inspeção, tornando os mantenedores sujeitos a erros que podem levar a indução de defeitos durante esta inspeção. Implicações econômicas e em termos de confiabilidade são determinadas. Um modelo matemático é proposto, e alguns resultados são obtidos para comparação com literatura prévia neste tema, com a finalidade de prover uma melhor análise em como práticas operacionais cotidianas podem impactar a qualidade global de uma política de manutenção.

PALAVRAS CHAVE. Políticas de manutenção, qualidade, eventos externos

Tópicos: (POI – PO na Indústria)

ABSTRACT

In order to implement an effective maintenance program, it is paramount to understand the aspects of quality of the activities executed through the established policy. In this work, the influence of external events combined with human error over maintenance quality is considered, in a novel way, within the context of a hybrid inspection and preventive replacement policy, assuming a single component system. The impact over a maintenance policy is modelled by supposing that external events can disrupt proper conditions for an inspection, making maintainers subject to errors that can lead to defects induction during this inspection. Economic and reliability implications are determined. A mathematical model is proposed, and some results are obtained in order to compare with previous literature on the subject, aiming to provide a better look at how operational day-to-day practices can impact the overall quality of a proposed maintenance policy.

KEYWORDS. Maintenance policy. Quality. External events.

Paper topics (OPI – OP in Industry)

1. Introdução

Neste presente trabalho, consideramos um sistema com um único componente que é colocado em conjunto com um soquete, provendo uma função operacional [Ascher e Feingold 1984]. Por sua manutenção, o componente é sujeito a um procedimento de inspeção com a finalidade de reduzir sua probabilidade de falha, com trocas quando um defeito é detectado, em conjunto com substituições programadas baseadas na idade. Nessa situação, é comum para o departamento de manutenção preocupar-se com a qualidade das intervenções propostas especialmente através de inspeções. Dada a complexidade de desempenhar essas intervenções de manutenção devido a dificuldades tais como acesso ao local determinado, equipamentos de manutenção necessários (para segurança pessoal do operador e serviço executado), supervisão de uma terceira parte durante o procedimento e muitas outras, pode-se levantar questões sobre como eventos externos poderiam impactar a atividade de manutenção ou qual a influência do erro humano na intervenção realizada, com consequências que, além do dano econômico, impõem riscos à vida humana. Além desta aplicação, é notado que em muitos sistemas onde condições especiais devem ser alcançadas para que uma intervenção de manutenção seja desempenhada com sucesso (tais como temperatura, pressão, medidas de segurança, iluminação, etc.) o impacto de eventos externos combinados ao fator humano perturbando tais condições pode ser crítico para o sucesso da política adotada, com todos os desdobramentos em consequência ainda não bem definidos e entendidos (além dos aspectos econômicos e de segurança).

Apesar da qualidade em manutenção poder ser mensurada e estudada em diversas maneiras, nosso *framework* aqui discutido apresenta uma perspectiva inovadora, que amplia o alcance e o potencial de resultados propostos inicialmente por [Scarf e Cavalcante 2012] relacionado à indução de defeitos em inspeções, com implicações práticas relevantes.

Seguindo as hipóteses comumente usadas para construção de políticas de manutenção, com base no conceito *delay time* para sistemas de um único componente [Scarf et al. 2009; Scarf e Cavalcante 2012; Cavalcante et al. 2018], nosso *framework* básico consiste em um sistema composto por um único componente sujeito a intervenções na forma de inspeções e substituição preventiva. É assumido que um processo de falha em três estágios ocorre, onde o componente pode estar no estado “bom”, “defeituoso” ou “falho”. Em estados “bom” e “defeituoso”, o componente ainda apresenta condição operacional, apesar de ser substituído caso este último estado seja detectado através de uma inspeção.

No nosso modelo, inspeções são permitidas a induzir defeitos, com probabilidade que combina ambos os efeitos de erro humano e eventos externos perturbando as condições para uma intervenção efetiva. Erro humano tem sido extensivamente estudado como um fator crítico na determinação das atividades de manutenção e sua efetividade, dentro de diretrizes alinhadas com a metodologia proposta neste trabalho. [Reason e Hobbs 2003] desenvolvem o tema de níveis de performance proposto por [Rasmussen 1983] associando-o a atividades de manutenção, concluindo que muitos erros na dimensão de desempenho *knowledge-based* estão relacionados a um entendimento incompleto ou impreciso do sistema, comum quando um indivíduo executa uma atividade não-familiar pela primeira vez, o que pode se materializar na forma de estados de contingência. Numa revisão acerca de modelos para mensuração do erro humano, [Apostolakis et al. 1988] evidenciam uma já consolidada linha de pesquisa que relaciona taxas de erro humano com o tempo disponível para ação de manutenção e condições ambientais, o que pode ser interpretado dentro da presente proposta em termos do tempo disponível para reestabelecer as condições ideais para uma inspeção, após a manifestação e encerramento de um evento perturbador externo. Uma abordagem em aspecto mais psicológico revela uma categoria de erro ligada a inabilidade humana de seguir mudanças no comportamento de um sistema. Segundo esta teoria, tal qual afirma [Rasmussen 1988], o erro está ligado ao mecanismo cognitivo individual que relaciona sinais estereótipos a rotinas familiares normalmente efetivas, mas que se mostram indevidas mediante à alteração das condições de trabalho durante perturbações na planta produtiva.

[Hudoklin e Rozman 1992] associa a performance humana a grupos de estresse, dentre os quais se destaca os “estresses ambientais”, relacionados às condições sociais e físicas de trabalho.

Voltando-se mais à manifestação desse fenômeno dentro de políticas de manutenção, [Asadzadeh e Azadeh 2014] identificam através de uma revisão da literatura a possibilidade de erros serem introduzidos no sistema durante a execução da manutenção, com destaque para exemplos como mal ajuste e acréscimo de danos ao equipamento, que se ligam ao procedimento humano durante o serviço prestado. [Noroozi et al. 2013] ressaltam o ponto de que, devido ao envolvimento humano na maioria das atividades industriais, erros humanos aparentam ser inevitáveis. Enfoque é dado a este efeito durante os estágios imediatamente antes e depois dos procedimentos de manutenção, onde o sistema deve ser retirado e colocado de volta em operação. Fatores em forma de condições ambientais adversas (temperatura, humidade e barulho) são colocados como fortes potencializadores do erro humano. [Hwang e Hwang 1990] atentam para a particularidade de que erros humanos podem não acarretar uma falha imediata do componente, “escondendo-se” no sistema e gradativamente comprometendo sua operacionalidade, o que conversa intimamente com a noção atual de *delaytime* correlacionada à indução de defeitos tal qual promovido neste presente modelo.

Nota-se que uma abordagem quantitativa acerca do aspecto intrinsecamente subjetivo que é o erro humano, implementada numa política de manutenção preventiva híbrida e condicionada à chegada de eventos externos, constitui uma carência na literatura atual. Isso representa não só um elemento inovador como também evidencia a relevância deste trabalho, ainda em desenvolvimento no que compete à incorporação de novos efeitos indutores de defeitos e modelagens através de simulação computacional e cálculo analítico. Devido à sua relativa complexidade, o modelo permite algumas simplificações relativas a outros aspectos da política de manutenção e análise – tal qual proposto por [Scarf e Cavalcante 2012] – proporcionando um melhor entendimento e estimativa da influência de eventos externos e erros humanos na indução de defeitos em intervenções de inspeção.

Este trabalho encontra-se estruturado da seguinte forma: na seção 2, políticas de manutenção base e indução de defeitos são especificadas. Seção 3 introduz o critério de decisão utilizado para avaliar o modelo proposto e comparar resultados calculados com valores encontrados na literatura, enquanto a seção 4 detalha o procedimento de cálculo na determinação desse critério de decisão para o presente modelo. Na seção 5, resultados obtidos neste desenvolvimento são efetivamente analisados e comparados com trabalhos anteriores, sendo a seção 6 destinada às discussões finais e conclusões com possíveis futuros desenvolvimentos em aprimoramento ao modelo aqui proposto.

2. Política de manutenção e modelo de indução de defeitos em inspeções influenciado pela combinação de eventos externos e erro humano

2.1. Política de manutenção

Seguindo o trabalho de [Scarf et al. 2009], a política primária usada no modelo é como se segue. Numa primeira fase inicial, quando o componente atinge a idade $i\Delta$, $i = 1, \dots, K$, $K\Delta < T$, uma inspeção é realizada de modo que, caso um estado defeituoso seja identificado, substitui-se o componente em operação por uma nova unidade. Após atingir uma idade $K\Delta$ ainda sem substituição ao longo das inspeções, a fase de inspeção termina e uma última intervenção é agendada para o instante T , quando o componente é substituído preventivamente. Na substituição de componente, o sistema torna-se “tão bom quanto novo” (*as good as new*). Essa política híbrida permite uma fase inicial de intervenção intensa, atenuando a possibilidade de falha precoce devido a um componente “fraco” ou mal instalado, ao mesmo tempo que relaxa a condição de inspeção na fase final de vida, assumindo a hipótese de se tratar de um componente “forte”. Sendo assim, nota-se que a abordagem de populações heterogêneas mistas na forma de componentes “fortes” e “fracos” é introduzida como desenvolvimento natural da política híbrida original.

2.2. Modelo de indução de defeitos

Em adição à política de manutenção base, agora supomos que eventos externos perturbadores das condições ideais para uma efetiva “boa” inspeção surgem como uma variável aleatória seguindo uma distribuição de probabilidade exponencial. A duração desses eventos também se comporta como uma variável aleatória, seguindo uma distribuição de probabilidade exponencial. Se os eventos têm sua duração encerrada antes que uma inspeção subsequente ocorra, nenhuma influência é exercida sobre a efetividade da inspeção e absolutamente nenhum defeito pode ser induzido. Isso representa um possível cenário real onde o departamento de manutenção, após sofrer um evento perturbador externo, tem a oportunidade – em forma de tempo hábil – para “reconstruir” as condições ideais para uma boa inspeção seguinte, não intensificando assim o fator erro humano do operador da manutenção. No entanto, caso o evento externo se encerre no mesmo instante de tempo ou após o momento em que a inspeção subsequente ocorre, a probabilidade para indução de defeitos surge, modelada como um evento certo que é então introduzido no sistema pelo fator do erro humano inerente ao mantenedor. Esse cenário representa o caso onde o evento externo perturbador está se manifestando no momento da realização da inspeção planejada, causando um defeito no sistema pelo efeito combinado das condições não-ideais para intervenção influenciando o aspecto do erro humano do operador da atividade.

Também é assumida a existência de apenas um modo de falha e defeito para o componente, conseqüentemente determinando que nenhum defeito proveniente do uso regular pode surgir em superposição à indução de um defeito. A distribuição dos tempos de *delay time* é a mesma, seja para defeito induzido ou não.

3. Critério de decisão em manutenção

Sob a consideração de que o sistema é renovado quando o componente é substituído, nós então justificamos o uso do indicador de custo por unidade de tempo no longo prazo por unidade de tempo como critério de decisão pelo teorema (*renewal-reward*) proposto por [Tijms 1994], em concordância com a literatura pertinente à análise de políticas de manutenção [Scarf et al. 2009; Scarf e Cavalcante 2012], dado por:

$$C_{\infty}(K, \Delta, T) = \frac{E(U)}{E(V)}$$

Onde “E(U)” é o custo esperado por ciclo de renovação e “E(V)” o tempo de vida esperado por ciclo de renovação. Esse indicador pode ser minimizado através da otimização dos parâmetros K , Δ e T .

4. Cálculo do critério de decisão considerando indução de defeitos por eventos externos e erro humano

Aqui é apresentado o cálculo do critério de decisão para o modelo de indução de defeitos em inspeções influenciado pela combinação de eventos externos e erro humano.

4.1. Notação

T, Δ, K	Idade para substituição preventiva, intervalo de inspeção, número de inspeções (variáveis de decisão)
Z, f_Z	Tempo de chegada do evento externo perturbador e correspondente densidade de probabilidade
R, f_R	Tempo de duração do evento externo perturbador e correspondente densidade de probabilidade
X, f_X, F_X	Idade do componente na chegada do evento natural (por uso regular) e correspondente densidade de probabilidade e função distribuição

- H, f_H, F_H Delay time entre a chegada de um defeito e a falha e correspondente densidade de probabilidade e função distribuição
- $1 - q, q$ Probabilidade de não se induzir defeito e probabilidade de indução de defeito
- C_R Custo de substituição
- C_F Penalidade de custo da falha
- C_I Custo de inspeção
- U Custo de um ciclo de renovação (variável aleatória)
- V Duração de um ciclo de renovação (variável aleatória)

4.2. Formulação matemática de casos

Para simplificar a abordagem analítica, consideramos que ambos os tempos de chegada e duração dos eventos externos comportam-se como variáveis aleatórias seguindo funções de probabilidades exponenciais distintas. As probabilidades de indução (q) e não indução ($1-q$), aqui consideradas, dependem do resultado de dois fenômenos: a chegada do evento perturbador externo e a duração deste evento. Face ao efeito de “ausência de memória” da distribuição exponencial, podemos observar que tais probabilidades dependem unicamente do intervalo entre inspeções “ Δ ”, como pode ser visto nas expressões abaixo:

$$(1 - q) = \int_0^{\Delta} \mu e^{-\mu(z)} (1 - e^{-\omega(\Delta-z)}) dz + e^{-\mu(\Delta)}, \text{ sendo } q = \int_0^{\Delta} \mu e^{-\mu(z)} (e^{-\omega(\Delta-z)}) dz$$

A partir desta formulação, podemos denotar por completo as expressões associadas com cada possível cenário dentro do modelo de indução de defeitos proposto. Para tornar mais sucinta a apresentação destas expressões, utilizamos uma variável genérica “ $\varphi_{l,c}$ ”, é introduzida dentro de cada parcela calculada de modo a “adequar” o desenvolvimento à um tipo de análise específica, em função dos seus índices, como demonstrado abaixo:

Tabela 1 – Explicativo da variável genérica “ $\varphi_{l,c}$ ”

Variável	Índice	Valor	Análise
$\varphi_{l,c}$	l	1	Probabilidade
		2	Custo
		3	Vida
	c	Ex.: “1.2”	Cenário

Fonte: Autor desta pesquisa

Quatro casos principais e seus respectivos subcasos são identificados e calculados, como demonstrado abaixo.

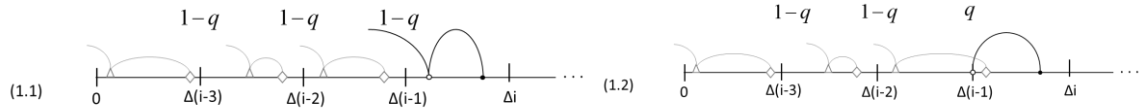
Caso 1. Falha em intervalo de inspeção ($K > 0$)

Neste caso, consideram-se ciclos em que um defeito natural surge entre dois intervalos de inspeção ($i-1$) e i , sem nenhum evento externo anterior induzindo defeito no componente e falha ocorrendo antes que a próxima inspeção em i ocorra (cenário 1.1). Adicionalmente, um defeito pode ser induzido por um evento externo ocorrendo entre os intervalos de tempo $\Delta(i-2)$ e $\Delta(i-1)$, que se encerra apenas no momento da inspeção ($i-1$) ou depois, com falha também ocorrendo antes que a inspeção subsequente em Δi aconteça (cenário 1.2). A expressão global que representa a manifestação desse caso no sistema é então dada por:

$$\sum_{i=2}^K \left(\int_0^{\Delta} \mu e^{-\mu(z)} (1 - e^{-\omega(\Delta-z)}) dz + e^{-\mu(\Delta)} \right)^{i-1} \int_{(i-1)\Delta}^{i\Delta} \int_0^{i\Delta-x} \varphi_{l,1,1} dF_H dF_X + \int_0^{\Delta} \int_0^{\Delta-x} \varphi_{l,1,1} dF_H dF_X$$

$$+ \sum_{i=2}^K \left(\int_0^{\Delta} \mu e^{-\mu(z)} (1 - e^{-\omega(\Delta-z)}) dz + e^{-\mu(\Delta)} \right)^{i-2} \int_0^{\Delta} \mu e^{-\mu(z)} (e^{-\omega(\Delta-z)}) dz \int_{(i-1)\Delta}^{\infty} dF_X \int_0^{\Delta} \varphi_{l,1,2} dF_H$$

Figura 1 – Esquema dos cenários 1.1 e 1.2



Fonte: Autor desta pesquisa

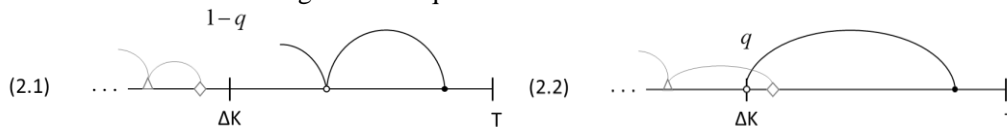
Caso 2. Falha na fase de *wear-out* ($K, \Delta T$)

Neste caso, consideram-se ciclos em que um defeito natural surge entre K e ΔT sem nenhum evento externo anterior induzindo defeito no componente e falha ocorrendo antes que a substituição por idade em T seja realizada (cenário 2.1). Adicionalmente, um defeito pode ser induzido por um evento externo ocorrendo dentro do intervalo de tempo $\Delta(K-I)$ e ΔK , que se encerra apenas no momento da inspeção K ou depois, com falha também ocorrendo antes que a substituição por idade em T aconteça (cenário 2.2). A expressão global que representa a manifestação desse caso no sistema é então dada por:

$$\left(\int_0^{\Delta} \mu e^{-\mu(z)} (1 - e^{-\omega(\Delta-z)}) dz + e^{-\mu(\Delta)} \right)^K \int_{K\Delta}^T \int_0^{T-x} \varphi_{l,2,1} dF_H dF_X$$

$$+ \left(\int_0^{\Delta} \mu e^{-\mu(z)} (1 - e^{-\omega(\Delta-z)}) dz + e^{-\mu(\Delta)} \right)^{K-1} \int_0^{\Delta} \mu e^{-\mu(z)} (e^{-\omega(\Delta-z)}) dz \int_{K\Delta}^{\infty} dF_X \int_0^{T-K\Delta} \varphi_{l,2,2} dF_H$$

Figura 2 – Esquema dos cenários 2.1 e 2.2



Fonte: Autor desta pesquisa

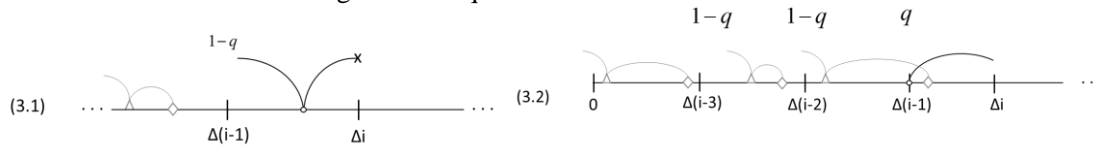
Caso 3. Substituição em inspeção ($K > 0$)

Neste caso, consideram-se ciclos finalizados por detecção de defeito isto pode ocorrer quando um defeito natural surge entre dois intervalos de inspeção $(i-1)$ e i , sem nenhum evento externo anterior induzindo defeito no componente – e a falha não ocorre até a próxima inspeção, onde o componente é preventivamente substituído (cenário 3.1). Adicionalmente, um defeito pode ser induzido por um evento externo ocorrendo entre os intervalos de tempo $\Delta(i-2)$ e $\Delta(i-1)$, que se encerra apenas no momento da inspeção $(i-1)$ ou depois, com falha também não ocorrendo até que a inspeção subsequente em Δi aconteça e o componente seja substituído preventivamente (cenário 3.2). A expressão global que representa a manifestação desse caso no sistema é então dada por:

$$\sum_{i=2}^K \left(\int_0^{\Delta} \mu e^{-\mu(z)} (1 - e^{-\omega(\Delta-z)}) dz + e^{-\mu(\Delta)} \right)^{i-1} \int_{(i-1)\Delta}^{i\Delta} \int_{i\Delta-x}^{\infty} \varphi_{l,3,1,1} dF_H dF_X + \int_0^{\Delta} \int_{\Delta-x}^{\infty} \varphi_{l,3,1,2} dF_H dF_X$$

$$+ \sum_{i=2}^K \left(\int_0^{\Delta} \mu e^{-\mu(z)} (1 - e^{-\omega(\Delta-z)}) dz + e^{-\mu(\Delta)} \right)^{i-2} \int_0^{\Delta} \mu e^{-\mu(z)} (e^{-\omega(\Delta-z)}) dz \int_{(i-1)\Delta}^{\infty} dF_X \int_{\Delta}^{\infty} \varphi_{l,3,2} dF_H$$

Figura 3 – Esquema dos cenários 3.1 e 3.2



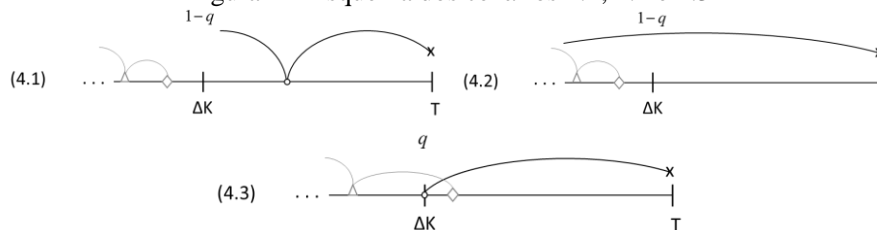
Fonte: Autor desta pesquisa

Caso 4. Substituição na idade T

Neste último caso, consideram-se ciclos em que um defeito natural surge entre K e ΔT sem nenhum evento externo anterior induzindo defeito no componente e falha não ocorrendo até que a substituição por idade em T aconteça (cenário 4.1). O componente pode também não experimentar nenhum defeito natural até a idade T , com nenhum evento externo induzindo defeito durante seu ciclo de vida (cenário 4.2). Adicionalmente, um defeito pode ser induzido por um evento externo ocorrendo dentro do intervalo de tempo $\Delta(K-1)$ e ΔK , que se encerra apenas no momento da inspeção K ou depois, com falha não acontecendo antes que a substituição por idade em T seja realizada (cenário 4.3). A expressão global que representa a manifestação desse caso no sistema é então dada por:

$$\begin{aligned} & \left(\int_0^{\Delta} \mu e^{-\mu(z)} (1 - e^{-\omega(\Delta-z)}) dz + e^{-\mu(\Delta)} \right)^K \int_{K\Delta}^T \varphi_{l,4.1} \bar{F}_H(T-x) dF_X \\ & + \left(\int_0^{\Delta} \mu e^{-\mu(z)} (1 - e^{-\omega(\Delta-z)}) dz + e^{-\mu(\Delta)} \right)^K \int_T^{\infty} \varphi_{l,4.2} dF_X \\ & + \left(\int_0^{\Delta} \mu e^{-\mu(z)} (1 - e^{-\omega(\Delta-z)}) dz + e^{-\mu(\Delta)} \right)^{K-1} \int_0^{\Delta} \mu e^{-\mu(z)} (e^{-\omega(\Delta-z)}) dz \bar{F}_H(T-K\Delta) \int_{K\Delta}^{\infty} \varphi_{l,4.3} dF_X \end{aligned}$$

Figura 4 – Esquema dos cenários 4.1, 4.2 e 4.3



Fonte: Autor desta pesquisa

4.3. Cálculo do critério de decisão

Para estimar o critério de decisão na forma de custo de longo prazo por unidade de tempo " C_{∞} ", a vida " $E(V)$ " e custo " $E(U)$ " esperados para um ciclo de renovação da política devem ser primeiramente calculados. Utilizando-se da formulação matemática previamente descrita, uma correta substituição de valores para a variável genérica " $\varphi_{l,c}$ " permite a obtenção das expressões de probabilidade, vida e custo para cada cenário, como se segue:

Tabela 2 – Indicativo de índices para a variável genérica “ $\varphi_{l,c}$ ”

Análise “ l ” Cenário “ c ”	Probabilidade ($l=1$)	Custo ($l=2$)	Vida ($l=3$)
1.1	1	$(i - 1)C_i + C_R + C_F$	$(x + h)$
1.2	1	$(i - 1)C_i + C_R + C_F$	$[(i - 1)\Delta + h]$
2.1	1	$KC_i + C_R + C_F$	$(x + h)$
2.2	1	$KC_i + C_R + C_F$	$(K\Delta + h)$
3.1.1	1	$iC_i + C_R$	$i\Delta$
3.1.2	1	$iC_i + C_R$	Δ
3.2	1	$iC_i + C_R$	$i\Delta$
4.1	1	$KC_i + C_R$	T
4.2	1	$KC_i + C_R$	T
4.3	1	$KC_i + C_R$	T

Fonte: Autor desta pesquisa

Desta forma, a probabilidade “ P ”, custo “ U ” e vida “ V ” global esperados para um ciclo de renovação do componente são obtidos pela substituição da variável genérica $\varphi_{l,c}$, em cada cenário de acordo com o indicativo acima, posteriormente somando-se todas as expressões relativas aos casos. O critério de decisão na forma de custo por unidade de tempo no longo prazo “ C_∞ ” pode então ser facilmente obtido.

5. Resultados

Para vias de aplicação prática do modelo aqui proposto, um exemplo ilustrativo é desenvolvido considerando-se um sistema com único componente. Dados e parâmetros realísticos no tocante ao sistema e processo de falha foram arbitrados, com intuito de prover *insights* sobre a fenomenologia dos mecanismos de funcionamento do sistema, a fim de suportar o gerente de manutenção. O processo de chegada de defeitos por uso regular é modelado como uma combinação de duas distribuições Weibull, com vida característica (η) de 1 e 6 anos para as subpopulações fracas e fortes, respectivamente. Para o parâmetro de forma (β_1 e β_2), de maneira respectiva são adotados os valores de 2,5 e 5, sendo o parâmetro de mistura (p) fixado convencionalmente em 12% para a população fraca. A duração do estado defeituoso é modelada por uma distribuição exponencial com média de 1/3 anos (4 meses). Em se tratando da operação industrial, custos relativos à falha (C_F), inspeção (C_I) e substituição (C_R) são dados tendo como unidade monetária o custo (C_R), nos quantitativos de 11, 0,03 e 1, respectivamente. Como particularidade do presente modelo, consideramos que eventos externos ocorrem em média uma vez a cada 4 anos ($\mu = 0,25$), com duração média de 21 dias, aproximadamente. ($\omega = 18$).

Inicialmente, é proposta uma análise comparativa entre o modelo de indução de defeitos com efeito combinado de eventos externos e fator humano (i), tal qual proposto neste trabalho, e os desenvolvimentos de [Scarf e Cavalcante 2012](ii) – relativo à indução de defeito com probabilidades fixas – e [Scarf et al. 2009](iii), referindo-se ao modelo híbrido de inspeção e substituição por idade sem a consideração acerca da indução de defeitos. Uma otimização analítica das variáveis de decisão “ K ”, “ Δ ” e “ T ” com vistas à minimização do custo de longo prazo é conduzida, sendo os resultados como mostrados nas tabelas 3, 4 e 5.

Tabelas 3, 4 e 5 – Otimização dos modelos de manutenção para instância pré-determinada

Valores ótimos para variáveis de decisão(*) Modelo (i) - Atual proposto				Valor ótimo para critério de decisão	Valores ótimos para variáveis de decisão(*) Modelo (ii) - Scarf e Cavalcante (2012)				Valor ótimo para critério de decisão	Valores ótimos para variáveis de decisão(*) Modelo (iii) - Scarf et al. (2009)				Valor ótimo para critério de decisão
q	T^*	Δ^*	K	C^*	q	T^*	Δ^*	K	C^*	q	T^*	Δ^*	K	C^*
0.0119	3.538	0.668	2	0.7869	0.01	3.525	0.651	2	0.7746	0	3.456	0.656	2	0.7111
0.0128	3.547	0.363	4	0.7948	0.01	3.515	0.361	4	0.7649	0	3.395	0.377	4	0.6585
0.0104	3.649	0.079	18	0.8962	0.01	4.235	0.229	18	0.8388	0	4.025	0.216	18	0.5929

Fonte: Autor desta pesquisa

Os termos em negrito nas tabelas representam o mínimo global encontrado para a instância determinada. A comparação dos modelos (i) e (ii), na forma como foi estruturada, tem o intuito de ilustrar como os modelos apresentam políticas ótimas diferentes, não tendo-se a intenção de fazer julgamento de superioridade entre os modelos. De qualquer forma, com base nos resultados dos modelos (i) e (ii) paralelamente aos resultados do modelo (iii), pode-se afirmar que quando há probabilidade de indução, seja esta constante ou não, o número ótimo de inspeções tende a sofrer redução significativa (enquanto no modelo (iii) o $K^*=18$, os modelos (i) e (ii), apresentaram respectivamente $K^*=2$ e $K^*=4$). Além disso, o custo por unidade de tempo sofre um acréscimo significativo, comparativamente ao valor apresentado pelo modelo (iii). Estes resultados mostram o quão importante é o investimento em ações que venham a mitigar as causas relacionadas com a indução de defeito. O treinamento ou capacitação, além de investimentos que impactem em melhores condições de execução das atividades de manutenção, não têm recebido importância devida. Tal aspecto pode explicar, em parte, a percepção de uma baixa influência das ações de manutenção no melhoramento da performance de equipamentos ou sistemas.

Conforme demonstrado neste trabalho, mais importante do que fazer a atividade de manutenção (inspeção) é fazê-la bem feita. Em cenários bastante plausíveis (para os parâmetros aqui utilizados) em que a probabilidade de indução é da ordem de 3%, já não é recomendada a realização de inspeções. Nota-se que a indução do defeito é um evento cuja ocorrência é oculta, fato que torna difícil a estimativa de parâmetros relativos a tal evento, assim como a ciência dos gestores da presença dele. Esta observação é importante por dois aspectos. Em primeiro lugar, a ignorância da presença da indução de defeito conduz a adoção de políticas muito distantes do padrão de políticas ótimas. Por exemplo, ao se assumir que não existe indução de defeito ($q=0$), a política ideal (de mínimo custo) seria seguir a recomendação do modelo (iii) ($K=18$; $\Delta=0,216$; $T=4,025$). No entanto, ao fazer uso destes valores de variáveis de decisão para condição ilustrada no modelo (i) (em que há indução de defeito), obtém-se um acréscimo no custo de quase 55% (custo sobe de 0,5929 para 0,9182), ou seja, a “ignorância” ou não observância de um aspecto essencial da realidade (há indução de defeito) impõe uma penalidade muito alta para os gestores. Em segundo lugar, na prática, a percepção de que há falhas ocorrendo com uma frequência mais alta do que esperado, geralmente é contra-atacada com um aumento da frequência da ação (inspeção), o que por sua vez, como demonstrado neste trabalho, seria a pior ação a ser feita, uma vez que o acréscimo da frequência de inspeção promove mais falhas por indução de defeito e certamente um acréscimo considerável no custo por unidade de tempo.

Com a finalidade de analisar o impacto de variações dos parâmetros adotados na instância base inicialmente estabelecida sobre o critério de decisão, é conduzida uma análise de sensibilidade sobre as entradas de custo e parâmetros de evento externo, tal qual demonstrado na tabela 6 abaixo:

Tabelas 6– Análise de sensibilidade do modelo (i) proposto

Casos	Parâmetros defeito natural						Parâmetros de eventos externos (q)		Parâmetros de custo			Política ótima			Critério de decisão
	η_1	β_1	η_2	β_2	p	λ	μ	ω	C_l	C_r	C_f	K	Δ	T	C_∞
1	1	2.5	6	5	0.12	3	0.25	18	0.03	1	11	2	0.6679	3.5385	0.7869
2	1	2.5	6	5	0.12	3	0.25	18	0.03	1	5	1	1.1197	3.8741	0.5255
3	1	2.5	6	5	0.12	3	0.25	18	0.03	1	20	3	0.4688	3.3572	1.1455
4	1	2.5	6	5	0.12	3	0.25	18	0.01	1	11	4	0.3614	3.5211	0.7706
5	1	2.5	6	5	0.12	3	0.25	18	0.09	1	11	1	1.1172	3.5578	0.8056
6	1	2.5	6	5	0.12	3	0.25	9	0.03	1	11	1	1.1391	3.5769	0.8244
7	1	2.5	6	5	0.12	3	0.25	36	0.03	1	11	5	0.3046	3.4705	0.7241
8	1	2.5	6	5	0.12	3	0.125	18	0.03	1	11	6	0.2557	3.4735	0.7267
9	1	2.5	6	5	0.12	3	0.5	18	0.03	1	11	1	1.1558	3.5587	0.8066
10	1	2.5	6	5	0.06	3	0.25	18	0.03	1	11	1	1.1415	3.3455	0.6192
11	1	2.5	6	5	0.24	3	0.25	18	0.03	1	11	9	0.1749	3.7408	0.9971

Fonte: Autor desta pesquisa

Antes de tecermos discussões sobre o comportamento do modelo diante de variações dos parâmetros de entrada, é válido que mantenhamos em mente que a presença de possibilidade de indução de defeito, ao se realizar uma inspeção, tem um efeito inibidor de inspeção além de ser um fator de incremento de custo “ C_∞ ”. Nesse sentido, na ausência do fenômeno de indução, a intensificação de inspeções é uma estratégia efetiva. Dito isto, podemos observar que as variações apresentam resultados de acordo com esperado. Analisando a influência dos eventos externos na política, com a redução de sua frequência de ocorrência (“ μ ” reduzido), o modelo sugere intensificar a realização de inspeções, visto que a probabilidade de indução de defeito diminui, (caso 8). Quando os eventos externos são mais frequentes, o inverso ocorre, como observado no caso 9. Em relação à duração do evento externo, eventos mais duradouros (redução em “ ω ”) tornam a indução mais provável. Dessa forma, o modelo reage propondo aumentar o intervalo entre inspeção “ Δ ”, reduzindo a quantidade de inspeções (caso 6). Para eventos mais breves, é sugerido elevar a quantidade de inspeções, assim como sua frequência (caso 7). Um parâmetro que se mostrou relevante foi à proporção de itens fortes e fracos. Quando se aumenta “ p ” (caso 11), o modelo propõe realizar mais inspeções buscando identificar defeitos prematuros devido a maior quantidade de itens fracos, como resultado torna mais provável a indução de defeito, o que eleva drasticamente “ C_∞ ”. Caso “ p ” reduza (caso 10), a quantidade de inspeção decresce, junto com o valor do custo de longo prazo.

6. Conclusões

O presente trabalho trata da qualidade de intervenções (inspeção), de maneira inovadora, através de uma modelagem quantitativa sobre o aspecto intrinsecamente subjetivo que constitui o erro humano, condicionada à chegada de eventos externos e implementada numa política preventiva híbrida. O modelo lida com um evento que está presente em vários contextos operacionais – a indução de defeito – que pode ser decorrente de erros de caráter naturalmente oculto no sistema.

O desenvolvimento teórico aqui enfatizado apresenta-se como um aprofundamento sobre modelagens tradicionais presentes na literatura. Um importante resultado relativo à indução de defeitos chama a atenção para a necessidade de investir em condições mais apropriadas para a condução das intervenções sobre o sistema. Isso se traduz em uma recomendação de redução no número de ações preventivas sobre o sistema caso essas apresentem probabilidade ainda que inexpressivas de induzir um defeito. O caráter oculto da introdução de defeitos, aliado a um desconhecimento acerca desta fenomenologia, acarreta significativos prejuízos monetários em função de uma “ignorância” por parte da gerência de manutenção, o que ainda pode se desdobrar em uma inefetiva tomada de decisão em reação a ocorrências crescentes de falhas no sistema.

A análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo indica um comportamento previsível e não sensível em patamares comprometedores. Limitações deste trabalho dizem respeito a um estudo mais profundo do fenômeno relativo ao erro humano.

Referências

Asadzadeh, S. M., Azadeh, A. (2014) An integrated systemic model for optimization of condition-based maintenance with human error. *Reliability Engineering and System Safety*. 124:117-131.

Ascher, H. e Feingold, H. (1984). *Repairable Systems Reliability*. MarcelDekker, New York.

Apolostolakis, G. E., Bier, V. M., Mosleh, A. (1988) A Critique of Recent Models for Human Error Rate Assessment. *Reliability Engineering and System Safety*. 22:201-217.

Cavalcante, C. A. V., Lopes, R. S., Scarf, P. A. (2018) A general inspection and opportunistic replacement policy for one-component systems of variable quality. *European Journal of Operational Research*. 266:911-919.

Christer, A. H, Redmond, D. F. (1991) Revising Models of Maintenance and Inspection. *International Journal of Production Economics*. 24:227-234.

Hudoklin, A., Rozman, V. (1992) Human errors versus stress. *Reliability Engineering and System Safety*. 37:231-236.

Hwang, C.-T., Hwang, S.-L. (1990) A Stochastic Model of Human Errors on System Reliability. *Reliability Engineering and System Safety*. 27:139-153.

Noroozi, A., Khakzad, N., Khan, F., MacKinnon, S., Abbassi, R. (2013) The role of human error in risk analysis: Application to pre- and post-maintenance procedures of process facilities. *Reliability Engineering and System Safety*. 119:251-258.

Rasmussen, J. (1983) Skills, rules, and knowledge; signals, signs, and symbols, and other distinctions in human performance models. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 13 (3):257-266.

Rasmussen, J. (1988) Human Error Mechanisms in Complex Work Environments. *Reliability Engineering and System Safety*. 22:155-167.

Reason, J., Hobbs, A. (2003) *Managing maintenance error: a practical guide*. CRC Press, Boca Raton, FL.

Scarf, P. A., Cavalcante, C. A. V., Dwight, R. A., Gordon, P. (2009) An Age-Based Inspection and Replacement Policy for Heterogeneous Components. *IEEE Transactions on Reliability*, 58 (4):641-648.

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

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