

ESTUDO DE POLÍTICAS DE MANUTENÇÃO UTILIZANDO PROCESSOS COMBINADOS DE *BURN-IN* COM SUBSTITUIÇÃO

Thiago Gomes do Nascimento

Departamento de Engenharia de Produção, Centro de Tecnologia e Geociências
Universidade Federal de Pernambuco
Rua Acadêmico Hélio Ramos, s/nº, CEP - 50740-530, Recife-PE
thiago.gnascimento1@gmail.com

Cristiano Alexandre Virgínio Cavalcante

Departamento de Engenharia de Produção, Centro de Tecnologia e Geociências
Universidade Federal de Pernambuco
Rua Acadêmico Hélio Ramos, s/nº, CEP - 50740-530, Recife-PE
cristianogesm@gmail.com

Rodrigo Sampaio Lopes

Departamento de Engenharia de Produção, Centro de Tecnologia e Geociências
Universidade Federal de Pernambuco
Rua Acadêmico Hélio Ramos, s/nº, CEP - 50740-530, Recife-PE
rodrigoengep@gmail.com

RESUMO

Componentes sujeitos a falhas precoces e falhas por desgaste podem ter sua manutenção modelada por meio de uma política combinada de procedimentos *burn-in* com atividades de substituição. Para itens como estes, cuja taxa de falhas segue a curva da banheira, a aplicação de políticas simples não é suficiente. Mesmo ao considerar uma política híbrida, a minimização do custo como único objetivo também não gera resultados satisfatórios. A melhor opção é fazer uso de uma política combinada que utilize uma abordagem multicritério, levando em conta tanto o custo como critérios relativos ao desempenho dos equipamentos e componentes. Assim, foi aplicada uma política híbrida de *burn-in* com substituição, para a minimização do custo e a maximização da vida residual média através da Teoria da Utilidade Multiatributo (MAUT).

Palavras-Chave: Burn-in, MAUT, Vida Residual

Área Príncial: Apoio a Decisão Multicritério

ABSTRACT

Components subject to early failures and failures due to wear and tear may have their maintenance modelled by means of a combined policy of burn-in procedures with replacement activities. For items like these, the failure rate of which follows a bathtub curve, the application of simple policies is not enough. Even when considering a hybrid policy, the minimization of cost as the sole objective also does not generate satisfactory results. The best option is to make use of a combined policy that uses a multicriteria approach, taking into account the cost combined with other criteria associated with the performance of items. Thus, a hybrid policy of burn-in with replacement was applied so as to minimize cost and maximize mean residual life using Multi-attribute Utility Theory (MAUT).

Keywords: Burn-in, MAUT, Residual life.

Main Area: Multicriteria Decision Support

1. Introdução

É crescente a busca por sistemas que possuam um alto grau de confiabilidade. Neste sentido, a manutenção desempenha um papel fundamental nas Organizações, já que pode contribuir de forma significativa tanto para a redução de custos como para a redução de falhas, sejam elas em qualquer momento da vida útil do componente. A manutenção preventiva atua com a aplicação de políticas capazes de eliminar falhas potenciais antes que os problemas de fato ocorram. Como exercem ampla influência sobre a segurança e a economia das operações, essas políticas são de grande importância para os sistemas, fazendo uso de métodos e procedimentos suficientes para garantir o desempenho e o custo desejado.

Itens de comportamentos diversos podem ser agrupados em um único equipamento ou sistema. Alguns apresentam defeitos no início de sua operação, enquanto outros se desgastam apenas após certo período. Na definição das ações de manutenção a serem tomadas, pode-se adotar a aplicação de procedimento *burn-in* para evitar as falhas iniciais e de uma política de substituição para prevenir falhas decorrentes do desgaste.

Tanto o uso de uma política de substituição quanto a determinação da duração do *burn-in*, requerem análises referentes à sua viabilidade econômica e aos efeitos gerados no desempenho dos equipamentos. Isso é obtido por meio da consideração de mais de um critério de avaliação, porém devido ao conflito existente entre diferentes objetivos, a tomada de decisão torna-se mais complicada, sendo preciso considerar tal situação como um problema de otimização multiobjetivo, considerando tanto o custo como critérios relacionados ao desempenho.

O *burn-in* vem sendo estudado por vários pesquisadores, entre eles Kuo & Kuo (1983) e Block & Savits (1997), que apresentam os principais aspectos e critérios usados no procedimento. Políticas de substituição também são abordadas por autores como Sheu (1998) e Vagnorious *et al* (2010), os quais indicam as aplicações de tais políticas. Entretanto, trabalhos envolvendo políticas combinadas de *burn-in* com substituição são mais escassos, destacando-se os de Jiang & Jardine (2007) e Drapella & Koznik (2002).

Este documento apresenta além da introdução seis seções. Na seção 2 é feita uma breve revisão dos conceitos de *burn-in* e substituição. Na seção 3 é apresentado como se chegou ao modelo utilizado, de forma a proporcionar o entendimento das etapas executadas durante o trabalho. Os critérios avaliados são discutidos na seção seguinte, e por fim é apresentada uma aplicação para o modelo desenvolvido. Na seção 6, as conclusões obtidas são apontadas.

2. Burn-in e Substituição

Utilizado sobretudo em equipamentos eletrônicos, o *burn-in* baseia-se em um processo de triagem por meio do envelhecimento acelerado ou que simule as condições de uso dos itens ou conjunto destes. Durante tal processo, os itens são submetidos a altas temperaturas e elevado grau de vibração. Após este período, é possível identificar que alguns itens resistem, enquanto outros falham (principalmente os representantes da sub-população fraca). Os que resistem são considerados de boa qualidade, enquanto os que falham são descartados ou reparados além de possuírem as causas de suas falhas analisadas.

Geralmente, as causas das falhas precoces estão ligadas a problemas de projeto, controle do processo, acabamento e instalação. Esse mau desempenho inicial é indesejado pelos clientes, os quais não admitem que um bem recém adquirido apresente falhas, pelos fabricantes devido a maiores gastos com serviços de garantia, por exemplo.

A substituição, por sua vez, deve ser realizada em situações em que com o passar do tempo há o aumento dos custos de operação, diminuição do nível de confiabilidade (taxa de falhas crescente) ou obsolescência dos itens. A política de substituição por idade, em particular, corresponde à substituição do item após decorrido um determinado espaço de tempo desde o

início de sua vida útil ou devido a ocorrência de falhas (o que ocorrer primeiro), atribuindo aos itens as suas características iniciais.

Se for adotado o custo como único critério de interesse, uma forma de efetuar uma política de substituição é dada pela construção de um modelo que defina como equilibrar o custo da substituição preventiva com os seus benefícios, determinando a idade de troca do equipamento, a fim de minimizar o custo esperado total de substituições por unidade de tempo. Para que um modelo seja capaz de descrever situações mais reais, a integração de políticas de substituição e *burn-in* aliada à consideração de múltiplos critérios torna-se essencial. Na seção seguinte, são descritas as etapas desenvolvidas durante a realização deste trabalho.

3. O Modelo Utilizado

Em relação ao modelo matemático, inicialmente foi estudado um modelo de substituição baseado no conceito de custo marginal, tendo suas características cuidadosamente analisadas, tanto do ponto de vista qualitativo (benefícios trazidos para o desempenho ou confiabilidade) quanto do ponto de vista quantitativo (redução dos custos, formas de solucionar, interpretar resultados). A atividade sucessora consistiu em determinar como incluir o *burn-in*, implementando melhorias no modelo inicial a fim de poder tratar com uma maior eficácia os problemas a que sua construção objetiva solucionar.

O enriquecimento do modelo do qual se partiu se deu pela implementação de situações mais peculiares como já descrito acima. Além de levar em conta dois tipos de política (*burn-in* e substituição), foi preciso fazer uso de métodos multicritério de apoio à decisão, já que em situações reais o decisor pode ter mais de um objetivo.

Para a situação em questão, os métodos que melhor se aplicam são os de critério único de síntese, já que ao tratar de problemas relacionados à manutenção o custo e determinadas medida de desempenho podem ser conflitantes, entretanto variações sofridas por qualquer um deles são de certa forma absorvidas pelos demais. Pertencente a esta categoria, a Teoria da utilidade multiatributo, conhecida como MAUT (*Multi-Attribute Utility Theory*) surgiu da teoria da utilidade, e é dotada de uma estrutura axiomática bastante sólida e consistente.

O MAUT compreende tanto teoria matemática quanto uma série de técnicas de avaliação. As informações obtidas por meio da avaliação servem para classificar alternativas, fazer escolhas ou esclarecer uma situação para o decisor. É necessário obter inicialmente as funções utilidade unidimensionais e a partir delas chega-se à função utilidade multiatributo. Assim é possível incorporar as preferências do decisor com respeito às conseqüências (ALMEIDA, 2010; DYER *et al*, 1992).

Para agregar os objetivos diversos na política híbrida envolvendo o *burn-in* e a substituição foi utilizado o MAUT, cujas características citadas se adéquam perfeitamente ao problema. Após isso, cabe determinar os objetivos desejados. Além do custo, alguns critérios de desempenho foram pesquisados, sendo analisados comportamentos mediante variações. Tendo definido a política e o método, foram determinados critérios para o modelo que foi proposto e em seguida testado.

4. Critérios de Avaliação

Para a definição de uma política de manutenção envolvendo *burn-in* e substituição capaz de melhor representar as condições reais, utilizando abordagem multicritério é preciso definir que critérios serão avaliados. Neste artigo, os critérios utilizados são o custo e a vida residual média, a qual é conhecida na literatura em língua inglesa como MRL- *Mean Residual Life*.

Ao tratar o política mistas de *burn-in* e substituição, Jiang & Jardine (2007) propõem um modelo capaz de determinar o período de *burn-in* e o intervalo ótimo de substituição considerando a população heterogênea (mista). Nesse trabalho, adota-se a seguinte notação:

- | | |
|---|---|
| C_f - Custo de substituição por falha. | C_b - Custo esperado do <i>burn-in</i> |
| C - Custo da substituição programada. | $C(t)$ - Custo médio por unidade de tempo. |
| C_r - Custo de reparos durante o <i>burn-in</i> | $R(t)$ - Função Confiabilidade. |
| β - parâmetro de forma . | $Fs(t)$ - Função de distribuição acumulada simples. |
| η - parâmetro de escala. | $F(t)$ - Função de distribuição acumulada mista. |

A Função de distribuição acumulada simples é dada por $Fs(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta}$. Porém, por se tratar de um caso de distribuição heterogênea, $F(t) = p_1F_1(t) + p_2F_2(t)$, onde $F_1(t)$ e $F_2(t)$ são duas distribuições simples, e p_1 e p_2 são as proporções de cada uma delas na população total.

A função Custo é dada por:

$$C(b, y) = \frac{C_r \cdot F(b) + C_b \cdot \int_0^b R(t) dt + C_p \cdot R(b) + (C_f - C_p) \cdot [F(y + b) - F(b)]}{\int_0^y R(x + b) dx}$$

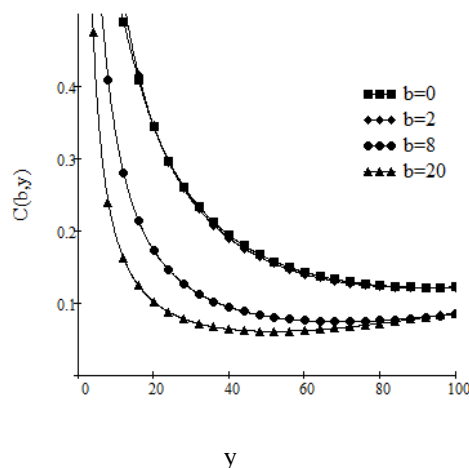


Figura 1: Comportamento do Custo.

Cavalcante (2011) propõe uma melhoria a esse modelo, adicionando o critério da confiabilidade condicional. Aqui também foi proposta uma melhoria, considerando o custo e outro critério de desempenho. Aqui será utilizado o critério da vida residual, já que a vida residual média representa o quanto o componente ainda resistirá. Dessa forma, ao maximizá-la haverá uma maior possibilidade de que o item permaneça em funcionamento por um maior tempo.

A função da vida residual média pode ser dada pela seguinte expressão:

$$\mu(t) = \begin{cases} E \{X - t | X \geq t\} = \int_t^\infty \frac{R(x) dx}{R(t)}, & \text{se } R(t) > 0 \\ 0, & \text{se } R(t) = 0 \end{cases}$$

Para o custo, busca-se pelo custo mínimo, conforme é possível observar nos diversos comportamentos da função na Figura 1. O período ótimo de *burn-in* pode ser definido pelo ponto onde a vida residual média correspondente atinge o seu máximo (Bebbington *et al*, 2007). Sendo X o tempo de vida, devemos encontrar b que maximize $E[X - b | X > b]$. Lilo(2000) ressalta que na análise de dados, a natureza da distribuição pode ser estabelecida por meio da avaliação da vida residual média ou da taxa de falhas, porém a vida residual média apresenta vantagens

referentes à sua facilidade de interpretação, visto que deriva da confiabilidade de forma mais empírica.

5. Aplicação do MAUT para Vida Residual Média e Custo

Serão considerados os critérios de custo (que deve ser minimizado) e de Vida residual média (dever ser maximizada). Para se obter a função utilidade multiatributo é preciso que seja conhecida a função utilidade para cada um dos atributos. Dessa forma, as funções utilidade unidimensionais serão dadas por $U(C)$ e $U(\mu)$.

Ao tratar da abordagem multicritério para problemas de manutenção, considerando como critérios o custo e a confiabilidade, Almeida (2005) utiliza uma função exponencial para a função utilidade do Custo e uma função logística para a utilidade da Confiabilidade. Essa escolha é justificada pelo desejo de minimizar o custo e maximizar a confiabilidade. Aqui, procederemos de forma análoga visto que quanto maior o custo menor o valor de sua função utilidade e quanto maior a vida residual média, maior o valor de sua função utilidade.

$$U(C) = \lambda_1 \cdot e^{-\gamma_1 \cdot C} \quad U(\mu) = \lambda_2 \cdot e^{-\frac{\gamma_2}{\mu}}$$

Atente para o fato de que $\lambda_1, \lambda_2, \gamma_1$ e γ_2 são constantes utilizadas para auxiliar na conversão para das funções simples para funções utilidade.

Para que o procedimento de agregação seja aplicado é preciso que sejam identificadas as condições de independência preferencial. Depois de verificadas as independências em utilidade e aditiva, pode-se utilizar o modelo aditivo, no qual k_1 e k_2 representam as constantes de escala, conforme é mostrado abaixo.

$$U(C, \mu) = k_1 \cdot U(C) + k_2 \cdot U(\mu)$$

As alternativas são representadas pela duração do *burn-in* e pelo intervalo de substituição. Dessa forma, para cada par (b, y) , há um custo e uma vida residual média e, por conseguinte uma função utilidade correspondente. A melhor opção, portanto, será o par de valores (b, y) que maximiza a função utilidade. É possível obter um gráfico das curvas de nível da utilidade global para dados valores de b (Figura 2), o que permite uma melhor visualização do que ocorre com a variação do período de *burn-in* (b) e do intervalo de substituição ($b+y$).

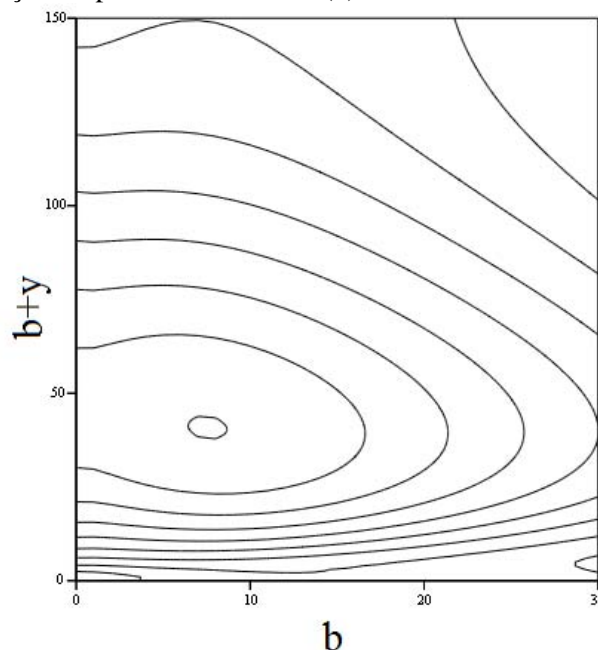


Figura 2: Utilidade considerando Custo e Vida residual média

A adoção de um critério relacionado ao desempenho resulta em uma política mais eficaz. Conforme observado nos resultados, ao considerar apenas o custo a vida residual média apresenta um valor inferior ao alcançado quando se considera a política mista. Por outro lado, um desempenho superior resulta em maiores custos. Um exemplo numérico foi rodado, sendo adotados os parâmetros da Tabela 1 e os resultados expostos na Tabela 2.

Tabela 1: Parâmetros adotados.

Custos	Populações		Função Utilidade	
	Fraca	Forte	Custo	Vida Residual média
$C_0 = 0.2$	$\eta_1 = 7$	$\eta_2 = 125$	$k_1 = 0.55$	$k_2 = 0.45$
$C_r = 0.9$	$\beta_1 = 1.2$	$\beta_2 = 4$	$\lambda_1 = 1.389$	$\lambda_2 = 2.18$
$C_p = 2$	$p_1 = 0.4$	$p_2 = 0.6$	$\gamma_1 = 2.6$	$\gamma_2 = 73$
$C_f = 13$				

Tabela 2: Resultados obtidos com a adoção das políticas I,II e III, sendo a primeira com a minimização do custo, a segunda com a maximização da vida residual média e a terceira com aplicação do Maut para otimização do custo e da vida residual média

Política	I	II	III
b	8.874	2.639	7.543
y	79.96	12.227	40.786
C	0.126	0.589	0.184
Vida Residual Média	37.033	93.448	66.657

Ao comparar os resultados, observa-se que ao adotar a política de custo mínimo o valor correspondente para a vida residual média é pequeno. Por outro lado, ao adotar a política da vida residual média máxima, o custo eleva-se. Portanto, uma política que considera ambos os critérios é mais eficiente. Considerando que os valores de b e y representam semanas, a política III- que utiliza o MAUT para agregar tanto o custo quanto a vida residual média- indica que os valores ideais para o período e *burn-in* e o intervalo de substituição (b+y) para a estrutura de preferências definida são respectivamente 7.543e 48.329 semanas. Essa alternativa oferece um custo que representa menos de um terço do que seria obtido aplicando a política II e uma vida residual média que representa um aumento de quase 80% no valor correspondente à política I, apresentando uma utilidade de 0.801.

6. Conclusões

Alguns equipamentos, sobretudo eletrônicos, podem ter seu funcionamento prejudicado pela ocorrência de falhas precoces. Visando solucionar este tipo de problema, um procedimento largamente utilizado é o *burn-in*, o qual é baseado em um processo de triagem, submetendo os itens a condições de uso, como nível de temperatura e grau de vibração. Mesmo tratando das falhas iniciais, ainda há as que ocorrem no final da vida útil (período de *wear-out*) dos componentes ou sistemas. As políticas de substituição atuam nesse sentido, promovendo a troca do equipamento antes que ele venha a falhar. Para que as falhas sejam evitadas tanto no início quanto no final da vida útil do componente em questão, a melhor opção é utilizar uma política mista que considere tanto o *burn-in* quanto a substituição.

Até certo tempo, predominavam modelos cujo objetivo era o de minimizar o custo, porém critérios de desempenho são bastante relevantes e em algumas situações até mais

importantes que o custo. É possível que haja vários objetivos, por vezes até conflitantes. Na modelagem do problema mais de um aspecto pode ser considerado, através da abordagem multicritério. Há uma gama de métodos, cabendo escolher o que melhor se ajusta à situação. Dessa forma, o gestor terá condições de tomar decisões mais acertadas, pois se obtêm uma política de manutenção capaz de evitar diferentes tipos de falhas, por meio da aplicação combinada de procedimentos, levando em conta múltiplos objetivos.

A manutenção preventiva de itens caracterizados pela ocorrência de falhas tanto no início quanto no final da vida útil apresenta melhores resultados quando faz uso de uma política combinada de *burn-in* e manutenção que considere o custo e a vida residual dos componentes. De acordo com o grau de preferência definido pelo decisor, a aplicação do MAUT é capaz de representar com maior fidelidade as situações enfrentadas na realidade.

Agradecimentos

Parte deste trabalho foi suportado pelo CNPQ, FACEPE e CDSID.

Referências Bibliográficas

- Almeida, A. T.** (2005), Modelagem Multicritério para Seleção de Intervalos de Manutenção Preventiva Baseada na Teoria da Utilidade Multiatributo, *Pesquisa Operacional*, 25(1), 69-81.
- Almeida, A. T.** *O Conhecimento e o Uso dos Métodos Multicritério de Apoio a Decisão*, Editora Universitária da UFPE, Recife, 2010.
- Bebbington, M.; Lai, C. D. e Zitikis, R.** (2007), Optimum Burn-in Time for a Bathtub Shaped Failure Distribution, *Methodology and Computing in Applied Probability*, 9, 1–20.
- Block, H.W.; Savits, T.H.** (1997), Burn-In, *Statistical Science*, 12(01),1-19.
- Cavalcante, C.A.V.**, A Multicriteria Decision Model for a Combined Burn-in and Replacement Policy, em Takahashi, R. H. C.; Deb, K.; Wanner, E. F.; Greco(Orgs.) , *Lecture Notes in Computer Science - Evolutionary Multi-Criterion Optimization*, Springer, Berlin, 579-593, 2011
- Dyer, J. S.; Fishburn, P.C.; Steuer, R. E.; Wallenius, J.; Zionts, S.**(1992). Multiple Criteria Decision Making, Multiattribute Utility Theory: The Next Ten Years *Management Science* 38(5):645-654.
- Drapella, A.; Kosznik, S.** (2002), Combining preventive replacement and burn-in procedures, *Quality Reliability Engineering International*, 18, 423- 427.
- Jiang, R.; Jardine, A.K.S.** (2007), An Optimal Burn-in Preventive-replacement Model Associated with a Mixture distribution, *Quality and Reliability Engineering International*, 23, 83–93.
- Kuo, W.; Kuo, Y.** (1983), Facing the Headaches of Early Failures: A State-of-the-Art Review of Burn-In Decisions, *Proceedings of the IEEE* ,71(11), 1257-1266.
- Lillo, R.E.** (2000), Note on relations between criteria for ageing, *Reliability Engineering and System Safety*, 67,129–133.
- Sheu, S.H.** (1998), A generalized age and block replacement of a system subject to shocks, *European Journal of Operational Research*, 108, 345-362.
- Vagnorius, Z.; Rausand, M. e Sørby, K.** (2010), Determining optimal replacement time for metal cutting tools, *European Journal of Operational Research*, 206,407– 416.