

## GESTÃO DE ESTOQUES DE PEÇAS DE REPOSIÇÃO DE BAIXO GIRO

**Paula Dias Elias, Edilson Fernandes de Arruda e Virgílio José Martins Ferreira Filho**  
Programa de Engenharia de Produção, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós Graduação e  
Pesquisa em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro.  
Centro de Tecnologia, Bloco F, Cidade Universitária, Rio de Janeiro, Brasil.  
pdelias@terra.com.br, efarruda@po.coppe.ufrj.br, virgilio@ufrj.br

### RESUMO

A gestão de estoques de peças de reposição de baixo giro pode ser considerada um grande desafio da atualidade. Isto ocorre em função dos elevados custos de aquisição, longos tempos de reposta de fornecimento, baixo giro, consumo irregular e alto risco de obsolescência, tornando dificultoso, ou mesmo inviável, gerenciamento pelos métodos tradicionais.

O presente artigo apresenta uma nova metodologia, prática e eficaz, para a gestão de estoques desses materiais, por meio de uma classe de processos markovianos, denominada Processos Markovianos Determinísticos por Partes. Trata-se de uma abordagem distinta em relação aos atuais modelos disponíveis na literatura.

O trabalho tem aplicação em setores como petrolífero, siderúrgico, automobilístico, aéreo e naval, que mantêm elevados custos de estoque de itens de reposição com baixíssimo consumo, mas primordiais ao processo produtivo. Nesse âmbito, as decisões precisam ser tomadas rapidamente, e algumas análises relacionadas ao gerenciamento de peças de reposição são deixadas em segundo plano.

**PALAVRAS CHAVE.** Gestão de estoques, Processos Markovianos Determinísticos por Partes, Otimização, Controle Ótimo, Peças de reposição.

**Área principal:** P&G - PO na Área de Petróleo e Gás; OA - Outras aplicações em PO; L&T - Logística e Transportes.

### ABSTRACT

Management low turnover replacement parts may be deemed as a huge challenge nowadays. This happens due to high acquisition costs, long supply answer time, low turnover, irregular consumption and high risk of obsolescence, making difficult or even impossible the management by traditional methods.

This article features a new methodology, practical and effective, for low turnover replacement parts management. It makes use of a class of Markovian processes called Piecewise Deterministic Process. This is a novel approach and incorporates stock and order costs in infinite horizon.

The findings in this work can be applied in industries such as oil, steel, automobile, air and maritime, which feature high costs of stock of replacement items that have a very low consumption, but are instrumental to the productive process. In this sense, decisions must be taken swiftly, and often the analysis related to the management of replacement parts are left to second role.

**KEYWORDS.** Inventory Management, Piecewise Deterministic Processes, Optimization, Intervention Control, Replacement parts.

**Main area:** P&G - PO na Área de Petróleo e Gás; OA - Outras aplicações em PO; L&T - Logística e Transportes

## 1. Introdução

A gestão de estoques de peças de reposição pode ser considerada um grande desafio acadêmico e empresarial. Segundo Wanke (2003), as maiores dificuldades na administração desses itens são os elevados custos de aquisição, os longos tempos de reposta de fornecimento (*lead-time*) e o giro baixíssimo.

Outras dificuldades normalmente somam-se a estas, tais como o consumo irregular e o alto risco de obsolescência. Estas características tornam dificultoso, ou até mesmo inviável, o gerenciamento de estoque de peças de reposição pelos métodos tradicionais.

Nesse cenário, é usual que o estoque de reposição seja administrado sob a ótica do nível de serviço, ou seja, mesmo com custo de aquisição muito alto e com demanda irregular, as peças fundamentais ao processo produtivo não podem faltar (Wanke, 2003).

Este posicionamento simplifica a tomada de decisão, mas aumenta significativamente a complexidade da gestão física dos itens, sendo possível uma grande empresa ter mais de 500 mil peças de reposição diferentes em estoque (Silver, Pyke e Peterson, 1998).

O presente artigo apresenta um modelo de gestão de estoques para peças de reposição de baixo giro, por meio de uma classe de processos markovianos, denominada Processos Markovianos Determinísticos por Partes (Davis, 1993). Trata-se de uma abordagem distinta em relação aos atuais modelos disponíveis na literatura, e previamente utilizada em problemas de produção (*e.g.*, Arruda, 2002).

A modelagem utilizada faz-se valer do fato de que o tempo de resposta de fornecimento (*lead time*) está, na realidade, ligado ao processo produtivo do fornecedor. Dessa forma, um modelo de produção e estoque (P&E) com tempo de conclusão aleatório pode representar o processo, desde que a distribuição do tempo de conclusão do modelo P&E considerado coincida com a distribuição do tempo de resposta de fornecimento.

Isso posto, a modelagem por meio de Processos Markovianos Determinísticos por Partes parece ser bastante adequada, pois leva em consideração tanto os saltos aleatórios relativos à chegada de demanda ou de itens previamente solicitados junto ao fornecedor, como também um custo de *setup* que, no modelo considerado, representa o custo de pedido do processo. Além disso, a solução do problema de P&E é bastante simples para o caso de um único item, o que a torna ainda mais atrativa para o problema estudado.

Assim, o presente artigo contribui com uma modelagem que é uma novidade em termos de gerenciamento de estoque de baixo giro, e que permite analisar não apenas nível de fornecimento, como também obter estratégias ótimas em termos de custo de operação em longo prazo. Além disso, o modelo resulta em um algoritmo simples e fácil de implementar e em políticas de reposição simples e intuitivas.

## 2. O sistema estudado

Considere um sistema responsável pela gestão do estoque das peças de reposição de uma empresa. As solicitações de reposição de peças chegam em instantes aleatórios. Dessa maneira, forma-se uma sequência aleatória de pedidos de reposição, com uma função de probabilidade associada às quantidades possíveis de peças de um mesmo item a serem repostas.

Adjunto aos pedidos de reposição, existe uma sequência formada pelos instantes em que ocorrem as chegadas das necessidades de reposições no sistema. Sendo assim, é possível obter a demanda acumulada até um determinado instante por meio do somatório dos pedidos realizados neste período.

Os pedidos são atendidos com o estoque disponível do item, previamente adquirido do fornecedor em unidades ou pequenas quantidades. A compra de poucas unidades ocorre em função do baixo giro e do alto custo de aquisição dessas peças de reposição.

Nesse sistema, considera-se que o fornecedor não possui estoque de peças de reposição (também em função do baixo giro e alto custo dessas peças), portanto ele inicia seu processo de fabricação apenas quando recebe um pedido de novas peças.

O processo produtivo do fornecedor evolui a uma taxa de progressão de atendimento do pedido, e demanda um tempo apropriado para sua produção. Um pedido é finalizado quando a

progressão do tempo de produção chega a um determinado valor. De forma que é possível obter a produção acumulada até um determinado instante por meio do somatório da produção neste período.

Portanto, a quantidade de itens em estoque ou sob encomenda, em cada instante de tempo, é obtida pela diferença entre a produção e a demanda. O sistema será estável se a todo instante a demanda por reposições for suprida.

Pode-se considerar as mudanças na quantidade estocada como saltos do processo, que ocorrem nos instantes de chegada de demanda e também nos instantes de conclusão (entrega) de um novo lote de itens. O processo possui também uma medida de probabilidade de saltos.

Com estas informações, o gestor do sistema precisa decidir se realiza ou não novas compras, que por sua vez irão acarretar, ou não, o início do processo de fabricação de novas peças.

Tais decisões são consideradas intervenções no processo produtivo, e o conjunto dessas decisões caracteriza a estratégia ou política de aquisição de itens, definida pela seqüência de instantes de intervenção.

A política ótima para a solução deste sistema é uma política do tipo *bang-bang*, ou seja, ou paralisa-se a produção, cancelando pedidos existentes, ou fabrica-se com o esforço máximo de produção, em seqüência a uma nova solicitação de itens ao fornecedor.

Portanto, pode-se considerar a divisão do espaço dos estados possíveis do sistema em dois subconjuntos, de produção e de paralisação. As intervenções transferem o sistema de um subconjunto para outro (controle impulsional) em instantes apropriados.

Assume-se que as políticas de intervenção admissíveis são markovianas e portanto têm conhecimento completo do estado (estoque e esforço de produção) e do subconjunto em que este se encontra (produção ou paralisação).

Para cada estratégia de aquisição, associamos um custo de operação do sistema. Por conseguinte, o objetivo é minimizar o custo esperado de operação do sistema em horizonte infinito.

### 3. A demanda

A demanda do sistema é formada por solicitações de reposição de peças unitárias que chegam em instantes aleatórios, formando um processo de Poisson com taxa de  $\delta > 0$ . Considera-se  $\sigma_i, i = 1, 2, 3, \dots$  a seqüência de instantes de chegada no sistema desses pedidos de reposição.

A demanda acumulada até um determinado instante  $t$  é definida pelo processo  $t \rightarrow d_t$ , dado por:

$$d_t = \sum_i \omega_i \mathbb{1}^{\{\sigma_i \leq t\}}, \quad t \geq 0 \quad (3.1).$$

### 4. A produção

As peças são usualmente compradas dos fornecedores em unidades ou em pequenas quantidades. A quantidade de peças de um item solicitadas em um pedido de compras será representada por  $K$ . O tempo de produção do fornecedor evolui a uma taxa normalizada  $u_t \in [0, 1], \forall t \geq 0$ . A progressão do atendimento do pedido é representada pelo processo contínuo  $t \rightarrow \xi_t$ , definido como:

$$\xi_t = \int_{\theta}^t u_s ds \quad (4.1).$$

No qual  $\theta \in [0, t)$  é o instante de conclusão da produção do pedido. Um pedido é finalizado quando a progressão do tempo de produção chega a um certo valor dado por  $\Gamma$ ; logo,  $0 \leq \xi \leq \Gamma, \forall t \geq 0$ . Note que  $\Gamma$  denota o *lead-time* do pedido. Para cada item fabricado,  $\Gamma \in$

$[0, \infty)$  é uma variável aleatória exponencialmente distribuída a uma taxa  $\gamma$ . A figura abaixo, retirada de Arruda (2002), exemplifica a trajetória do processo  $t \rightarrow \xi_t$ , onde  $\Gamma_i$  representa o esforço total de produção do  $i$ -ésimo pedido.

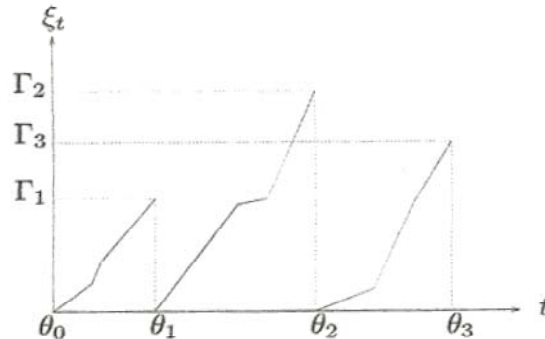


Figura 4.1: Trajetória do processo  $\xi_t$  (Arruda, 2002)

A produção acumulada até um determinado instante  $t$ , representada pelo processo discreto  $t \rightarrow q_t$  obedece à seguinte equação:

$$q_t = \sum_i K \mathbb{I}_{\{\theta_i \leq t\}} \quad t \geq 0 \quad (4.2).$$

Portanto, a quantidade de itens em estoque ou sob encomenda é expressa pelo processo discreto  $t \rightarrow \eta_t$  assim definido:

$$\eta_t = q_t - d_t \quad t \geq 0 \quad (4.3).$$

O sistema será estável, se a todo instante  $t \geq 0$  a demanda por reposições for suprida.

## 5. Os saltos do processo

Seja  $\bar{N} = \{N^-, \dots, N^+\} \subset Z$  um conjunto enumerável, onde  $N^-$  representa o menor nível de estoque do sistema e  $N^+$  representa o máximo estoque admitido para o sistema. O processo  $t \rightarrow z_t = (\eta_t, \xi_t)$  toma valores em um conjunto  $S: \bar{N} \times \mathbb{R}_+$  e apresenta uma trajetória determinística intercalada por saltos aleatórios, que ocorrem quando da solicitação de reposição de uma peça ou da entrega de um pedido por parte do fornecedor.

Considerando que é aplicada ao sistema uma taxa de produção normalizada  $u_t = a, a \in [0,1]$ , para todo instante  $t \geq 0$ , a taxa total de saltos do processo é expressa por:

$$\lambda(a) = \delta + \gamma a \quad (5.1).$$

O processo possui também uma medida de probabilidade de saltos:

$$\mu(z', z | u = a) = \frac{\delta}{\lambda(a)} P(z' - z = \omega) + \frac{\gamma a}{\lambda(a)} \mathbb{I}_{\{z - z' = K\}} \quad (5.2).$$

Na qual considera-se que o processo salta de  $z'$  para  $z$ .

A figura 5.1 mostra uma trajetória típica do processo  $(\eta_t, \xi_t)$  para  $K=2$ . Note que nos

instantes de conclusão  $\theta_i$ , o processo salta de  $(\eta_{\theta_i}, \Gamma)$  para  $(\eta_{\theta_i} + K, 0)$ , ao passo que nos instantes de chegada de pedidos o processo salta de  $(\eta_{\sigma_i}, \xi_{\sigma_i})$  para  $(\eta_{\sigma_i} - \omega_i, \xi_{\sigma_i})$ .

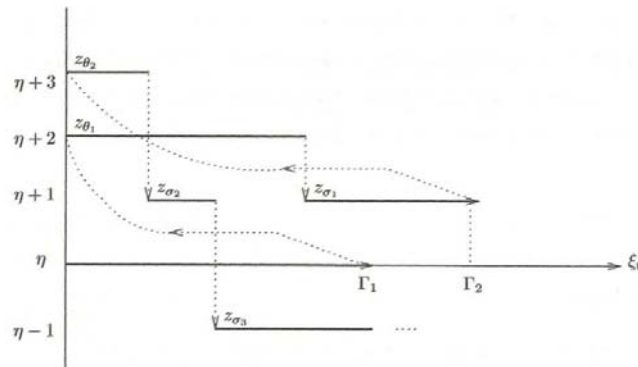


Figura 5.1: Trajetória do processo  $(\eta_t, \xi_t)$  (Arruda, 2002).

## 6. O controle impulsional

Considera-se que a variável  $u_t$  definida na equação (4.1) assume os valores do conjunto  $\{0,1\}$ . Esta política é chamada de *bang-bang* e ocorre pois, sendo o custo linear, é sempre ótimo produzir à máxima taxa ou parar o processo produtivo (Arruda, 2002). Na prática, isso significa que estamos dividindo o espaço de estados  $S$  do processo  $t \rightarrow z_t$  em duas cópias idênticas representadas por  $S'$  e  $S''$ .

Considera-se que o processo  $t \rightarrow z_t$  evolui ora no subconjunto  $S' := \bar{N} \times [0, \Gamma)$  (sempre que  $u_t = 1$ ), ora no subconjunto  $S'' := \bar{N} \times [0, \Gamma)$  (para todo  $u_t = 0$ ). Portanto, não é sem razão que  $S'$  é denominado subconjunto de produção, enquanto  $S''$  é chamado de subconjunto de paralisação. O espaço de estados do processo é dado por  $S = S' \cup S''$ .

Supõe-se também que o tomador de pedidos tem a capacidade de intervir no sistema, transferindo-o de  $S'$  para  $S''$ , ou vice-versa, em instantes quaisquer, formando uma sequência  $\tau_i$  de instantes aleatórios que representam as intervenções de controle no sistema. As intervenções devem, contudo, ser penalizadas.

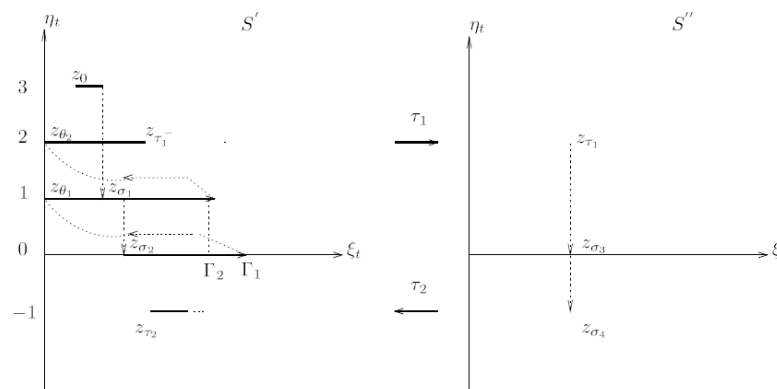


Figura 6.1: Trajetória típica do problema de controle impulsional (Arruda, 2002)

A figura 6.1 mostra uma trajetória típica do processo  $t \rightarrow z_t = (\eta_t, \xi_t)$ . No subconjunto  $S'$  o processo  $t \rightarrow z_t$  salta nos instantes de chegada de demanda  $(\sigma_i, i = 1, 2)$  e também nos instantes de conclusão de um novo lote de itens  $(\theta_i, i = 1, 2)$ . No subconjunto  $S''$ , o processo

$t \rightarrow z_t$  apresenta apenas saltos por demanda ( $t = \sigma_i, i = 3,4$ ), permanecendo de outra forma no mesmo estado até o próximo evento do tipo de demanda ( $\sigma_i$ ) ou intervenção ( $\tau_i$ ). Observe também que o processo  $t \rightarrow z_t$  é transferido de  $S'$  para  $S''$  e vice-versa nos instantes  $\tau_1$  e  $\tau_2$ , respectivamente.

Define-se uma estratégia de produção pela sequência de instantes de intervenção  $\pi = \{\tau_1, \tau_2, \dots\} \in \Pi$ , sendo  $\Pi$  a classe de todas as políticas de intervenção factíveis. Assume-se que as políticas de intervenção admissíveis são markovianas, portanto têm conhecimento completo do estado ( $\eta_t, \xi_t$ ) e do subconjunto em que este se encontra ( $S'$  ou  $S''$ ).

Para cada estratégia de produção  $\pi$  associamos certo custo de operação para o sistema. O decisor busca a estratégia de intervenções que minimize o custo esperado de operação do sistema em horizonte infinito.

### 7. Os custos operacionais do sistema

As decisões de controle devem ser tomadas de modo a minimizar o custo esperado de operação do sistema. Neste estudo, o custo é formado pelos seguintes elementos:

- **Custo de aquisição:** o custo de aquisição  $\beta$  é o valor que o fornecedor cobra pela produção de cada quantidade  $K$  de itens por unidade de tempo, considerando uma margem de lucro e gastos diretamente ligados à taxa de produção, tais como treinamento, despesas com empregados, aquisição de matéria-prima, manutenção de equipamentos etc.
- **Custo do pedido:** o custo do pedido dado pela função  $g : S \rightarrow R_+$  engloba todos os custos referentes a uma nova encomenda: o envio da encomenda, receber essa mesma encomenda e inspeção. O modelo de estudo foi analisado com três funções de custo do pedido, o que nos permite avaliar situações nas quais esse custo é muito baixo, ou até mesmo nulo, e situações em que esse custo é representativo.
- **Custo de armazenagem:** o custo de armazenagem é dado por  $L(\eta)$  onde  $\eta \rightarrow L(\eta)$  é uma função convexa representativa do custo de estoque ( $\eta > 0$ ) ou déficit ( $\eta \leq 0$ ) de itens, que considera os custos proporcionais às quantidades armazenadas. Tais como os custos despendidos com a área física, taxa de seguro, perdas, obsolescência, e, no caso da falta de estoque, são os valores relativos ao não atendimento da demanda em um dado período de tempo. No presente trabalho, o custo de armazenagem utilizado é proporcional ao custo do produto: 25% do custo dos produtos armazenados e 40% do custo dos produtos em falta de estoque.

### 8. Formulação do problema de controle impulsional

Como visto,  $u_t \in \{0,1\}, \forall t \geq 0$ , o espaço de estados  $S$  é formado pela união de subconjuntos idênticos ( $S'$  e  $S''$ ), que representam as regiões de produção ( $u_t = 1$ ) e de paralisação ( $u_t = 0$ ), respectivamente.

O processo  $t \rightarrow z_t$  toma valores em  $S = S' \cup S''$  e apresenta trajetória determinística intercalada por saltos aleatórios, que ocorrem por ocasião da chegada de demanda ou da conclusão de um lote de itens do produto fabricado. A taxa total de saltos do processo é dada por:

$$\lambda = \begin{cases} \delta + \gamma, & \forall z \in S' \\ \delta, & \forall z \in S'' \end{cases} \quad (8.1).$$

Assim, considera-se a sequência ordenada de instantes de saltos do processo

$\{T_k, k = 0, 1, \dots\}$ , cuja distribuição de probabilidade entre saltos é expressa pela seguinte equação:

$$P(T_{k+1} - T_k > t) = e^{-\lambda t}, \quad t > 0 \quad (8.2)$$

Entre saltos, o processo  $t \rightarrow z_t = (\eta_t, \xi_t) \in S$  obedece a uma trajetória determinística representada pela seguinte função:

$$\varphi(t, z) = \begin{cases} (\eta, t + \xi), & T_k \leq t \leq T_{k+1} \\ (\eta, \xi), & T_k \leq t \leq T_{k+1} \end{cases} \quad \begin{matrix} \forall z \in S' \\ \forall z \in S'' \end{matrix} \quad (8.3)$$

O processo  $t \rightarrow z_t$  possui também uma medida de probabilidade de saltos definida como:

$$\mu(z', z) = \frac{\delta}{\lambda} \mathbb{I}_{\{z' - z = 1, z \in S''\}} + \frac{\gamma}{\lambda} \mathbb{I}_{\{z - z' = K, z \in S'\}}, \quad (8.4)$$

Assumindo-se que o processo salta de  $z'$  para  $z$ .

O problema é caracterizado pelas intervenções que transferem o processo  $z_t$  de  $S'$  para  $S''$  ou vice-versa, pagando-se por isso o custo instantâneo  $g: S \rightarrow R_+$ . Cabe lembrar que as intervenções ocorrem em instantes aleatórios  $\tau_i$ .

Entre os instantes de intervenção, é considerado o custo da evolução do processo  $h: S \rightarrow R_+$ , que é a função em que são considerados os custos de aquisição e estocagem, definida por:

$$h(\eta) := L(\eta) + \beta \mathbb{I}_{\{\eta \in S'\}} \quad \forall \eta \in S \quad (8.5)$$

Para cada política de intervenção factível  $\pi = \{\tau_1, \tau_2, \dots\} \in \Pi$ , associamos uma função valor  $V: N \times [0, \infty) \rightarrow R$  definida por:

$$V(z) := \inf_{\pi \in \Pi} E_z^\pi \left\{ \int_0^\infty e^{-\alpha s} h(z_s) + \sum_{i=1}^\infty e^{-\alpha \tau_i} g(z_{\tau_i^-}) \right\} \quad (8.6)$$

Sendo  $\alpha$  a taxa de desconto e  $z = z_0$  o valor inicial do processo  $t \rightarrow z_t$ .

Nessa função encontra-se uma primeira parcela relativa aos custos da evolução do processo, que por sua vez considera custos de aquisição e estocagem; e uma segunda parcela que considera os custos incorridos pelas intervenções envolvidas no processo.

A solução deste problema consiste em dividir o problema geral em uma série de problemas de um único salto ou uma única intervenção (o que ocorrer no menor horizonte) para depois recuperar a solução geral do problema fazendo o número de saltos e intervenções tender a infinito. Apresenta-se, na sequência, a formulação desse processo de solução para o problema de um item.

## 9. Operador de um salto ou uma intervenção

Primeiramente, define-se dois operadores; um fornece o custo relativo a uma intervenção, o outro fornece o custo até a ocorrência de um salto no processo. Para se escolher a melhor decisão (intervenção ou espera pelo primeiro salto, sem intervenção), pode-se calcular os dois operadores e escolher o de menor custo. Sendo o menor custo o da opção de espera pelo



salto, adota-se este caminho para o processo, caso contrário intervém-se instantaneamente no processo. E assim, a trajetória com menor custo para o processo vai sendo definida.

O operador para um salto no processo, seja ele por demanda ou pela chegada de um pedido, é dado por:

$$R_1[\phi](\eta) := E_z \left\{ \int_0^{T_1} e^{-\alpha s} h(\eta_s) ds + e^{-\alpha T_1} \phi(\eta_{T_1}) \right\} \quad (9.1).$$

A primeira parcela da equação é relativa ao custo de evolução do processo até a ocorrência do primeiro salto e a segunda parcela representa o custo futuro associado ao estado para o qual o processo salta.

Posteriormente, avalia-se o custo para o caso de uma intervenção, utiliza-se o mesmo operador apresentado acima, porém, ao invés de calcular para a posição de estoque  $\eta$  no subespaço em que se encontra, calculamos o custo da mesma posição de estoque para o outro subespaço, ou seja, o subespaço de destino no caso de uma intervenção. Designa-se por  $\bar{\eta}$  o estoque  $\eta$  no subespaço de destino.

Além disso, é necessário acrescentar ao operador o custo de intervenção  $g(\eta)$ , portanto o operador para os casos de uma intervenção será:

$$R_2[\phi](\eta) := R_1[\phi](\bar{\eta}) + g(\eta) \quad (9.2).$$

Como dito anteriormente, para definir a trajetória de menor custo, observa-se o mínimo entre os dois operadores, definido como  $P[\phi] : S \rightarrow R$  na equação abaixo.

$$P[\phi](\eta) := R_1[\phi](\eta) \wedge R_2[\phi](\eta) \quad (9.3).$$

## 10. Cálculo dos operadores

O cálculo do termo à direita da igualdade na Eq. (9.1) é efetuado fazendo-se uso dos Lemas 3.1 e 3.2 de Arruda (2002), chegando-se à expressão abaixo:

$$R_1[\phi](\eta) := \frac{1}{\lambda} \{h(\eta) + \lambda Q[\phi](\eta)\} \quad (10.1).$$

Sendo:

$$Q = \frac{\delta}{\lambda} \phi(\eta - 1) + \frac{\gamma}{\lambda} \phi(\eta + 1) \quad (10.2).$$

E,

$$\hat{\lambda} = \alpha + \lambda \quad (10.3).$$

sendo que  $\lambda$  foi definido na Eq. (8.1).

## 11. Retornando ao problema original

Para calcular a função valor, definida em (8.6), e encontrar a solução do problema original, utiliza-se o algoritmo definido abaixo.

$$V_{k+1}(\eta) := R[V_k](\eta) \wedge \{V_k(\bar{\eta}) + g(\eta)\} \quad (11.1).$$



Iniciando com um dado  $V_0$  arbitrário. O algoritmo converge quando  $\|V_{k+1}(\eta) - V_k(\eta)\| < tol$ , sendo  $tol$  uma tolerância definida a priori. O valor assim obtido coincide com a solução de ponto fixo do operador  $P[V]$ , que satisfaz à expressão:

$$V^*(\eta) = R[V^*](\eta) \wedge \{V^*(\bar{\eta}) + g(\eta)\} \quad (11.2).$$

De forma que, a política extraída desse algoritmo será a política ótima. Indicando para os casos em que o mínimo é  $R[V^*](\eta)$  a permanência no subespaço em que se encontra, e, para os casos em que o mínimo é  $V^*(\bar{\eta}) + g(\eta)$  a troca de subespaço.

## 12. Experimentos numéricos

Para ilustrar a aplicação do algoritmo proposto selecionou-se dados baseados na indústria do petróleo. Os algoritmos foram rodados em Matlab 7.0, utilizado um computador Positivo Premium D7600. Abaixo é apresentada a tabela com os valores de entrada utilizados:

Entradas	Caso A	Caso B	Caso C
$\alpha$	0,3	0,3	0,3
$\beta$	5	5	5
$\delta$	4	4	4
$\gamma$	5	5	5
$tol$	1,00E-04	1,00E-04	1,00E-04

Tabela 12.1: Valores de entrada

No Caso 1, o modelo foi testado com custo de intervenção  $g(\eta)$  igual a zero, para que fosse possível avaliar o impacto deste custo no modelo. Já no Caso 2 o custo de intervenção utilizado foi  $g(\eta) = 10$ , considerado apenas para casos em que a intervenção ocorreu do subespaço de paralisação para o subespaço de produção, ou seja, se  $\eta$  pertence a  $S'$ , e, para os demais casos  $g(\eta)$  igual a zero. Finalmente, no Caso 3 o valor do custo de intervenção utilizado foi  $g(\eta) = 30$ , que é o triplo do Caso 2, e este custo foi considerado para qualquer tipo de intervenção.

Para os Casos 1 e 2 a função do custo de armazenagem  $h(\eta)$  foi empregada como definida abaixo:

$$h(\eta) = x \cdot y \cdot \eta \quad (12.1).$$

Onde:  $x$  é igual a 0,40 para estoques negativos e nulos ( $\eta \leq 0$ ) e 0,25 para estoques positivos ( $\eta > 0$ ).

Para testar o comportamento do modelo, no Caso 3 foi empregada uma função diferente, considerou-se o estoque ao quadrado para avaliação dos impactos, ou seja:

$$h(\eta) = \eta^2 \quad (12.2).$$

## 13. Resultados

A seguir encontram-se os principais resultados e os gráficos que resumem a política de intervenção resultante dos dados experimentais utilizados em cada caso.

No primeiro caso, o modelo foi testado para situações em que não existe penalidade pela troca de subespaços, ou seja, para o caso em que a função de intervenção assume o valor zero. Nestas condições, foram necessárias 238 iterações para a convergência do modelo, e o

tempo de processamento foi de 0.298 segundos.

Nos gráficos a seguir mostra-se o controle  $u$  nos subespaços  $S_0 = S''$  e  $S_1 = S'$ . Quando  $u = 0$ , indica que o sistema deve permanecer paralisado, se estiver em  $S'$ , e que uma intervenção deve ser aplicada, transferindo o sistema para  $S'$ , se estiver  $S''$ .

Já para os casos em que  $u = 1$ , quando o sistema estiver em  $S'$  indica que o este deve continuar solicitando itens do fornecedor, e quando este estiver operando em  $S''$  significa que uma intervenção deve transferir o sistema para  $S'$ .

Como resultado, a mesma política é indicada para os dois subconjuntos, ou seja, como não existe penalização a decisão recai apenas sobre o custo de evolução do processo. Pode-se observar no gráfico, que para estoques iguais ou inferiores a zero unidades deve-se permanecer ou migrar para o subespaço de produção. Já para estoques iguais ou superiores a uma unidade deve-se permanecer ou migrar para o subespaço de paralisação.

A solução encontrada confirma a função do custo de evolução utilizada no modelo, em que a penalidade pela falta é mais onerosa que manutenção de estoques, por isso, para os casos em que o estoque assume o valor de zero deve-se manter ou migrar para o subespaço de produção. Porém, como esta penalidade é inferior ao custo de aquisição de uma unidade, para os casos em que o estoque seja igual ou inferior a uma unidade deve-se permanecer ou migrar para o subespaço de paralisação.

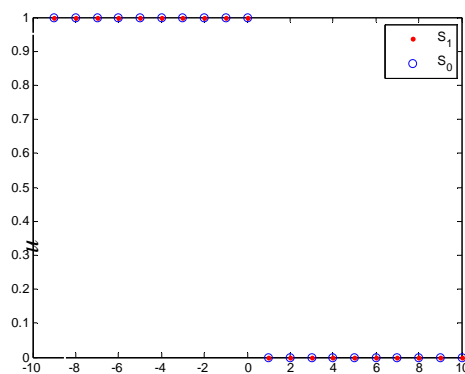


Figura 13.1: Caso 1

No Caso 2, o modelo foi testado com penalidade apenas para intervenções que iniciem o processo de produção, ou seja, casos em que o sistema esteja paralisado e decida-se pela troca de subespaço. Já os estados em que o sistema esteja produzindo e decida-se por intervir parando a produção, estes continuaram sem penalização. Isso faz sentido no nosso problema, uma vez que é mais comum a existência de um custo de pedido associado à solicitação de uma nova ordem, mas não é tão comum uma penalidade por não se efetuar um novo pedido em seguida à entrega de um item previamente solicitado.

Nestas condições, foram necessárias 238 iterações para a convergência do modelo, e o tempo de processamento foi de 0.212 segundos.

Como esperado, os dois subconjuntos apresentam políticas de intervenção diferentes. Pode-se observar no gráfico que no subconjunto de paralisação, para estoques iguais ou inferiores a zero unidades deve-se intervir no processo, migrando para o subespaço de produção. Já para estoques iguais ou superiores a uma unidade deve-se permanecer no subespaço de paralisação.

No subconjunto de produção, para estoques iguais ou inferiores a uma unidade deve-se permanecer no subconjunto de produção. Já para estoques iguais ou superiores a duas unidades deve-se intervir, mudando para o subespaço de paralisação.

A solução encontrada confirma que o custo de intervenção influenciou no momento de intervenção no subespaço de produção. Observando os gráficos, nota-se que no Caso A a intervenção resultante em  $S'$  ocorre no salto de 0 para 1 unidade, ou vice-versa, já no Caso B,

com a consideração do custo de intervenção. esta decisão foi adiada para o salto de 1 para 2 unidades, ou vice-versa. O subespaço de paralisação  $S''$ , todavia, não sofreu alteração.

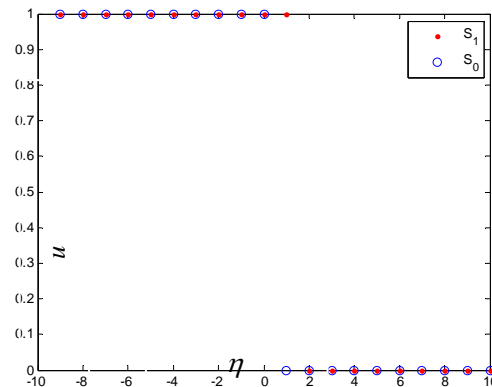


Figura 13.2: Caso 2

Finalmente, no Caso 3 o modelo testado para situações em que exista penalidade pela troca de subespaços, assim como foi utilizada uma função de custo quadrático, como definido anteriormente. Nestas condições, foram necessárias 233 iterações para a convergência do modelo, e o tempo de processamento foi de 0.207 segundos.

Pode-se observar pelo gráfico que neste caso, em função do alto custo de intervenção, as decisões de intervir são adiadas tanto em  $S'$  como em  $S''$ , o que resulta em uma superfície de comutação para os níveis de estoque de 0 a 6, na qual a melhor alternativa é continuar fazendo pedidos, se estiver em  $S'$ , ou continuar paralisado, caso contrário.

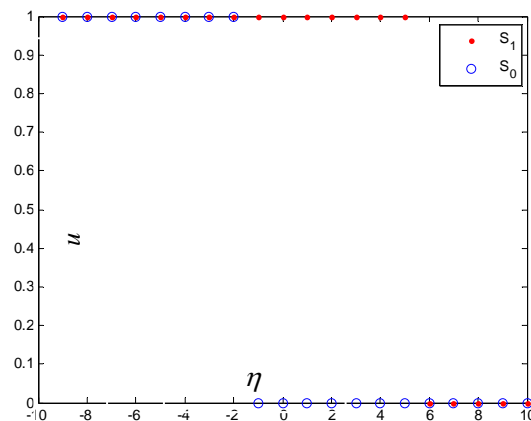


Figura 13.3: Caso 3

## 14. Conclusões

Este artigo propôs uma nova metodologia para problemas de gerenciamento de estoques de peças de reposição de baixo giro. A metodologia se mostrou de prática, objetiva e eficaz, e resulta em políticas de gestão de estoques muito simples e de fácil implementação. Pode-se, através da abordagem proposta, evitar custos desnecessários com falta e excessos de estoques.

O emprego de uma formulação que considera o horizonte de tempo infinito, inerente ao processo envolvido na metodologia empregada, é uma inovação na área, por isso não é trivial a realização de comparações com os métodos tradicionais para descrever qual recai no menor custo.

## Referências

- ARRUDA, Edilson F. Dissertação de Mestrado: Investimento e Produção de Múltiplos Itens em Presença de Incertezas, UNICAMP, 2002.
- BALLOU, Ronald H. Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos. 3ª Edição. São Paulo: Bookman, 2003.
- CORREA, Henrique L. Administração da Produção e Operações: Manufatura e Serviços. Primeira Edição. São Paulo: Atlas, 2004.
- DAVIS, M.H.A. Markov Models and Optimizations, Chapman and Hall, London, 1993.
- DROHOMERETSKI, E.; FALCI, F. S. M. G.; FAVARETTO, F. Modelo de gestão de estoques para peças de reposição: o caso de uma indústria de equipamentos para refrigeração da grande Curitiba. Anais V EMEPRO. Viçosa/MG. 2009.
- LAW, A. M.; KELTON, W. D., Simulation Modeling e Analysis. 3. Ed McGraw Hill, 2000, 759p.
- LOPES, Ricardo Dantas. Previsão de autopeças: Estudo de caso em uma concessionária de veículos. Florianópolis: UFSC, 2002. 107p. Dissertação (Mestrado) Departamento de Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.
- MARTINS, P. G.; ALT, P. R. C. Administração de Materiais e Recursos Patrimoniais. 2.ed. São Paulo: Saraiva, 2006.
- MONKS, Joseph G. Administração da Produção. São Paulo: Editora McGraw Hill, 1989.
- MOREIRA, Daniel. Administração da Produção e Operações. 2ª Edição. São Paulo: Pioneira, 1996.
- PALMISANO, Ângelo; MANÃS, António Vico; MODIA, Esther Cabado; MACHADO, Márcio C-; FABRÍCIO, Márcio M. Gestão da qualidade - tópicos avançados. Cengage Learning Editores, 2004. [Consultado em 23 Março 2012]. Disponível em WWW: URL:<http://books.google.com/books?id=V1mWIIuO3x4C&dq=pt-PT>>. ISBN 978-85-221-0386-7.
- SANDVIG, J. C.; ALLAIRE, J. J. Vitalizing a service parts inventory. Production and Inventory Management Journal, Alexandria, US, v. 39, n. 1, p. 67-71, 1998.
- SILVER, E. A., D. F. PYKE, and R. PETERSON. 1998. *Inventory Management and Production Planning and Scheduling*, 3ª edição, Wiley, New York. Sox, 1998.
- SLACK, Nigel; Chambers, Stuart e Johnston, Robert. Administração da Produção. 3ª Edição. São Paulo: Atlas, 2009.
- VOLMANN, T. E., et AL. Sistemas de planejamento e controle da produção para o gerenciamento de cadeias de suprimento, 5ªed, Porto Alegre, Bookman, 2006.
- WANKE, Peter. Gestão de estoques na cadeia de suprimento. São Paulo: Editora Atlas, 2003.
- WANKE, Peter. Posicionamento Logístico e a Definição da Política de Atendimento aos Clientes. Artigo disponível em: <http://www.ilos.com.br/site/index.php>, acesso em 01/09/2010.