

# Estudo do efeito de programas de melhoria contínua em variáveis do chão de fábrica na relação entre tamanho de lote de produção e *lead time*

## *Study of the effect of continuous improvement programs on lot size: lead time relationship*

Moacir Godinho Filho<sup>1</sup>  
Reha Uzsoy<sup>2</sup>



**Resumo:** No atual ambiente competitivo, a tomada de decisão tem se tornado uma tarefa cada vez mais complicada, envolvendo inúmeras variáveis, e suas relações, nem sempre claramente entendidas. Uma dessas relações, foco deste artigo, é a relação entre tamanho de lote de produção e *lead time* médio. Essa relação é amplamente conhecida na literatura específica sobre teoria de filas, porém o mesmo não acontece na prática em gestão de operações. Este artigo trata deste assunto, objetivando apresentar e comparar o efeito de seis programas de melhoria contínua em variáveis do chão de fábrica (variabilidade da chegada das ordens, variabilidade do processo, taxa de defeito, tempo até a falha, tempo de reparo e tempo de *set up*) na relação tamanho de lote  $\times$  *lead time* em um ambiente de máquina única que fabrica múltiplos produtos. Isto é feito por meio de uma combinação das abordagens *System Dynamics* (FORRESTER, 1962) e *Factory Physics* (HOPP; SPEARMAN, 2008). Dois conjuntos de experimentos são realizados: i) Uma melhoria de grandes proporções (50%) em cada uma das variáveis separadamente, como aquela que seria obtida por um grande investimento; ii) Uma pequena melhoria em todas as variáveis simultaneamente. Os resultados mostraram: (a) o efeito positivo de programas de melhoria contínua em variáveis do chão de fábrica no *lead time*; (b) a importância de se conhecer a curva tamanho de lote  $\times$  *lead time* e o papel da redução de *set up* antes de se iniciarem programas de redução de tamanhos de lote; (c) que investir em pequenas melhorias em muitas variáveis de forma simultânea é uma política melhor, com relação ao *lead time*, do que realizar uma grande melhoria em somente uma variável; (d) algumas contribuições para um melhor entendimento de modernos paradigmas de gestão da produção, tais como *Lean Manufacturing* e *Quick Response Manufacturing*.

**Palavras-chave:** Tamanho de lote. *Lead time*. Sistemas dinâmicos. Fatores físicos. Melhoria contínua.

**Abstract:** *Many modern manufacturing management approaches present relationships between variables on the shop floor, aiming to increase the manager's intuition about manufacturing dynamics. One of these is the relationship between lot size and average lead time, which is studied in this paper. Although this general relationship is widely recognized, only a selected number of authors address this relationship in a practical manner. This paper presents and compares the effect of six continuous improvement programs (arrival variability, process variability, quality (defect rate), time to failure, repair time, and set up time) on lot size  $\times$  lead time relationship in a multi-product, single-machine environment, by means of a combination of System Dynamics (FORRESTER, 1962) and Factory Physics (HOPP and SPEARMAN, 2008) approaches. Two sets of experiments are performed in this paper: a) A large (50%) improvement in each parameter separately, as might be obtained by a significant one-time investment; b) a small improvement in all parameters simultaneously. The results showed: (a) the positive effect of continuous improvement in shop floor variables on lead time; (b) the importance of knowing the lot size  $\times$  lead time curve and the effect of set up reduction programs before beginning with lot size reduction program; (c) that investing in small improvements in several variables is preferable regarding lead time than investing in a large improvement in just one variable; (d) some insights about modern manufacturing management paradigms such as: Lean Manufacturing and Quick Response Manufacturing.*

**Keywords:** Lot size. *Lead time*. System Dynamics. Factory Physics. Continuous improvement.

<sup>1</sup> Departamento de Engenharia de Produção, Universidade Federal de São Carlos – UFSCar, Via Washington Luiz, Km 235, CEP 13565-905, São Carlos – SP, Brasil, E-mail: moacir@dep.ufscar.br

<sup>2</sup> Edward P. Fitts Department of Industrial and Systems Engineering, North Carolina State University, Campus Box 7906, Raleigh, NC 27695-7906 (USA)

## 1 Introdução

Decisões rotineiras no ambiente fabril, tais como o tamanho de lote de produção, têm implicações estratégicas fundamentais na empresa (BUFFA, 1984). Tradicionalmente, modelos de custo são utilizados para dar suporte às decisões sobre tamanhos de lote. A grande maioria da vasta literatura existente a respeito do problema do tamanho de lote busca encontrar um tamanho de lote ótimo que minimize os custos totais. Estes modelos são denominados EOQ – Lote Econômico de Compra ou EPQ – Lote Econômico de Produção. Para revisões da literatura a respeito desses modelos e suas extensões, ver Drexler e Kimms (1997) e Karimi et al. (2003). Apesar de ter seus benefícios, a Teoria do Lote Econômico tem recebido muitas críticas na literatura Suri (1998), Burbidge (1996), Elliot (1990), dentre outros; e, portanto, sua utilização na prática tem sido largamente reduzida.

De acordo com Kuik e Tielemans (2004), críticas à utilização dos métodos de contabilidade de custos para o planejamento da produção têm levado a um crescente interesse em indicadores de desempenho físicos a respeito dos sistemas de produção. Um desses indicadores é o *lead time* (também denominado tempo de ciclo ou ainda tempo de fluxo), definido nesse trabalho, de acordo com Ericksen et al. (2007), como sendo o tempo desde quando o cliente faz um pedido, passando pelo caminho crítico, até que a primeira peça do pedido seja entregue ao cliente. A redução do *lead time* vem ganhando bastante atenção desde o surgimento da estratégia da Competição Baseada no Tempo (TBC), no final dos anos 80. A estratégia TBC, também denominada Manufatura Responsiva por Kritchanchai e MacCarthy (1998), foi inicialmente proposta por Stalk (1988), e foca a redução do *lead time* como objetivo primordial de uma organização. Essa estratégia vem ajudando muitas empresas a obter grandes melhorias competitivas (JAYARAM et al., 1999). Hum e Sim (1996) apresentam uma ampla revisão da literatura a respeito do TBC.

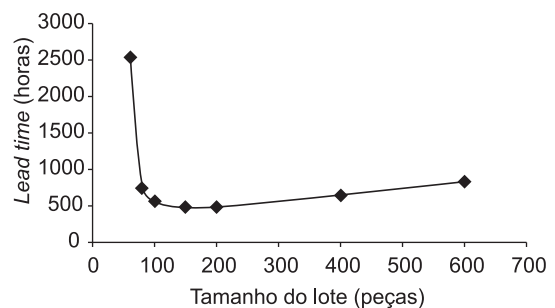
Apesar do grande interesse na redução do *lead time*, de acordo com Treville et al. (2004), a grande maioria da literatura sobre redução de *lead time* tem se apresentado somente teórica e exploratória, com duas exceções: i) o trabalho de Hopp e Spearman (2008), que reuniu um conjunto de princípios matemáticos para o estudo e determinação do *lead time* – baseado na teoria de filas –, denominado *Factory Physics*; ii) o trabalho de Suri (1998) na redução de *lead time*, por meio de sua estratégia denominada *Quick Response Manufacturing*.

Ambas as estratégias (*Factory Physics* e *Quick Response Manufacturing*) apresentam uma série de relações entre variáveis no chão da fábrica, objetivando aumentar o grau de conhecimento e intuição dos gerentes de produção a respeito da dinâmica do fluxo produtivo no chão de fábrica. Uma destas relações

é a relação entre tamanho de lote de produção e *lead time* médio, foco deste artigo. De acordo com Vaughan (2006), apesar de essa relação ser amplamente conhecida na literatura específica sobre Teoria de Filas, poucos autores tentam trazê-la para a prática em gestão de operações. Karmarkar et al. (1985) foram os primeiros a introduzir a relação convexa, em formato U, existente entre tamanho de lote e *lead time*. Basicamente, esta relação baseia-se na Teoria de Filas, mais especificamente na chamada fila G/G/1 (sistema de manufatura modelado como um servidor único com tempos entre chegadas e de processamento genéricos). A Figura 1 ilustra basicamente a relação entre tamanho de lote e *lead time*. Lambrecht e Vandaele (1996) descrevem esta relação:

Tamanhos de lote grandes causarão longos *lead times* (efeito do tamanho de lote); conforme os tamanhos de lote são reduzidos, o *lead time* também decrescerá, mas, uma vez que um tamanho de lote mínimo é alcançado, uma redução do tamanho do lote além deste valor causará um aumento na intensidade do tráfego no fluxo produtivo, também resultando em *lead times* longos (efeito de saturação).

Outros artigos, baseados na Teoria de Filas e na simulação, foram desenvolvidos relacionando tamanho de lote e *lead time*. Karmarkar et al. (1992) apresentam heurísticas direcionadas à minimização do tempo médio de filas. Rao (1992) apresenta uma discussão geral a respeito da aplicação de modelos alternativos baseados na Teoria de Filas na relação tamanho de lote e *lead time*. Kuik e Tielemans (2004) desenvolvem aproximações para o tamanho de lote ótimo que minimize o *lead time*, focando especificamente situações nas quais a utilização das máquinas é baixa. Kenyon et al. (2005) avaliam, por meio da simulação, o efeito da decisão do tamanho de lote em alguns indicadores de desempenho chave (tais como *lead time*) de uma empresa que fabrica semicondutores. Vaughan (2006) desenvolve um modelo no qual relações baseadas na Teoria de Filas são utilizadas para modelar o efeito do tamanho do



**Figura 1.** Ilustração da relação entre tamanho de lote de produção e *lead time* médio.

lote no *lead time*. De acordo com este autor, esse modelo demonstra os benefícios de se levar em conta o efeito do dimensionamento do tamanho de lote no *lead time* no momento de se decidir sobre o tamanho de lote a ser utilizado; contrastando com isso, a ideia de se assumir o *lead time* como sendo fixo (como é feito, por exemplo, pelos sistemas MRP). Outros exemplos de trabalhos que relacionam tamanho de lote e *lead time* são: Kekre (1987); Hafner (1991); Karmarkar et al. (1992); Lambrecht e Vandaele (1996); Choi e Enns (2004).

Apesar da existência destes e de outros trabalhos na área, não existe na literatura um estudo que mostre o efeito de melhorias contínuas em variáveis do chão de fábrica na relação tamanho de lote  $\times$  *lead time*. Este trabalho se encaixa exatamente dentro deste contexto, uma vez que objetiva apresentar e analisar o efeito de seis diferentes programas de melhoria contínua em variáveis do chão de fábrica na relação tamanho de lote  $\times$  *lead time*. Esta análise é feita para um sistema de produção com uma máquina que processa múltiplos produtos. A metodologia utilizada nesse trabalho é uma abordagem híbrida *System Dynamics* (FORRESTER, 1962) e *Factory Physics* (HOPP; SPEARMAN, 2007), proposta por Godinho Filho e Uzsoy (2009).

Os seis programas de melhoria contínua estudados neste trabalho são referentes às seguintes variáveis do chão de fábrica: i) variabilidade da chegada das ordens; ii) variabilidade do processo (a qual é formada por outros três tipos de variabilidade: variabilidade natural do processo, variabilidade do tempo de reparo das máquinas e variabilidade do tempo de *set up*); iii) taxa de defeitos; iv) tempo até a falha; v) tempo de reparo; e vi) tempo de *set up*. Dois conjuntos de experimentos são realizados: a) Uma melhoria de grandes proporções (50%) em cada uma das variáveis separadamente, como aquela que seria obtida por um grande investimento; b) Uma pequena melhoria em todas as variáveis simultaneamente.

Este artigo é dividido como segue: na seção 2 é apresentada uma revisão da literatura a respeito dos principais tópicos tratados neste trabalho: Melhoria Contínua (CI), *System Dynamics* (SD) e *Factory Physics*; na seção 3 é apresentado o modelo desenvolvido e também o projeto dos experimentos realizados; a seção 4 apresenta os resultados obtidos; e na seção 5 são tecidas algumas conclusões.

## 2 Revisão da literatura

### 2.1 Melhoria contínua

Caffyn (1999) define melhoria contínua (*Continuous Improvement – CI*) como

“... um envolvimento total na realização de pequenas transformações de melhoria as quais são realizadas de uma forma contínua e estão diretamente relacionadas aos objetivos organizacionais.”

De acordo com Leede e Looise (1999), CI é vital no atual ambiente competitivo.

Baseado em Imai (1986), Berger (1997) apresenta os princípios fundamentais do CI:

- i) orientação ao processo;
- ii) pequenas melhorias no padrão de trabalho; e
- iii) orientação ao indivíduo.

De acordo com Savolainen (1998) e Bessant e Francis (1999), o processo do CI é um processo de aprendizagem que não ocorre da noite para o dia, envolvendo considerável aprendizagem entre os mecanismos utilizados. Bhuiyan e Baghel (2005) citam o *Lean Manufacturing* e *Six Sigma* como exemplos de metodologias utilizadas para a melhoria contínua.

As seis melhorias tratadas neste trabalho, na verdade, envolvem melhorias em dois parâmetros: a) variabilidade (HOPP; SPEARMAN, 2008, variabilidade neste trabalho é medida em termos de coeficiente de variação, ou seja, em termos da relação entre desvio padrão e média); e, b) tempos e taxas médias. A seguir são tecidas algumas considerações a respeito da melhoria nestes dois parâmetros.

Hopp e Spearman (2008) definem variabilidade como “... o atributo de não uniformidade de um conjunto de itens.” De acordo com estes autores, alta variabilidade sempre prejudica o desempenho (com relação a estoques, capacidade e tempo) de um sistema de produção. Uma série de técnicas contribui para a redução da variabilidade. Com relação à redução da variabilidade na taxa de chegada das ordens de produção, Hopp e Spearman (2008) sugerem: i) melhor programação da produção; ii) melhor controle de chão de fábrica; iii) utilização de um sistema puxado, como por exemplo o sistema Conwip (*Constant Work in Process*). Com relação à redução da variabilidade no processo, a literatura traz métodos como treinamento do operador nas tarefas, utilização de práticas de padronização de atividades e uso de ferramentas de automação, dentre outras.

Referente à melhoria nos tempos médios de *set up*, de reparo, tempos entre falhas e na taxa de defeito, pode-se dizer que estes são objetivos de uma série de modernos paradigmas de gestão da manufatura, tais como *Lean Manufacturing* (WOMACK et al., 2000) e *Quick Response Manufacturing* (SURI, 1998), dentre outros. Métodos para se conseguir estas melhorias são bastante tratadas na literatura: o sistema SMED (SHINGO, 1986) para a redução de tempos médios de *set up*, a chamada Manutenção Produtiva Total (*Total Productive Maintenance – TPM*) para

a melhoria nos tempos médios de reparo e tempos médios entre falhas e métodos como CEP (Controle Estatístico do Processo), Seis *Sigma* e TQM (*Total Quality Management*) para a redução da taxa média de defeitos e melhoria na qualidade.

## 2.2 System Dynamics (SD), Factory Physics (FP) e o Modelo híbrido SD-FP proposto por Godinho Filho e Fernandes (2009)

*System Dynamics* (SD) foi desenvolvido por Jay Forrester em 1956 no MIT (*Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA*).

Segundo Forrester (1962), SD permite a representação, ao longo de grandes períodos de tempo, de sistemas que possuem inter-relacionamentos complexos e processos não lineares. De acordo com Fernandes (2001), a premissa central presente em SD é que o comportamento de um sistema é determinado por sua estrutura interna e, pelo uso de uma linguagem própria para modelar um sistema, é possível testar diferentes tipos de comportamento de um sistema ao longo do tempo, possibilitando a identificação e avaliação de melhorias potenciais.

A estrutura e as inter-relações entre as variáveis em modelos de *System Dynamics* são representadas matematicamente por meios de diagramas estoque-fluxo (GEORGIDAIS et al., 2004). Esses diagramas possuem quatro elementos principais:

- **Estoques:** Representam as acumulações de um recurso como, por exemplo, pedidos de carteira, trabalhadores, inventários ou capital intelectual. O nível de qualquer estoque é representado pela diferença entre o fluxo de entrada e o de saída (PIDD, 2004). A Figura 2 representa um estoque, de acordo com a notação de SD.
- **Fluxos:** São atividades que produzem crescimento ou redução dos estoques (FERNANDES, 2001). Os fluxos são, em geral, o resultado das decisões por parte da gestão ou de forças exógenas fora do controle dos gestores. Eles representam a dinâmica do sistema e dependem da quantidade presente nos estoques. A Figura 3 mostra a representação de um fluxo em um diagrama estoque-fluxo.
- **Auxiliares (conversores e constantes):** são componentes para a realização de operações algébricas, que processam informações a respeito dos estoques e fluxos ou representam fontes de informação externa ao sistema (FERNANDES, 2001).
- **Conectores:** São *links* de informação que descrevem a relação entre estoques, fluxos e

conversores (FERNANDES, 2001). A Figura 4 ilustra um conector em um diagrama estoque-fluxo.

A abordagem *Factory Physics* encara a manufatura como uma ciência, por meio do estabelecimento de conceitos básicos por meio de princípios fundamentais tais como leis da manufatura e identificação de *insights* gerais para práticas específicas (HOPP; SPEARMAN, 2008). As primeiras ideias que deram origem ao método *Factory Physics* surgiram em 1988, quando Wallace Hopp e Mark Spearman, professores da *Northwestern University*, trabalhavam como consultores em uma planta da IBM, localizada no Texas. Eles começaram a observar os relacionamentos entre diversas variáveis do chão de fábrica e a partir disso, começaram a caracterizar o comportamento básico da manufatura, identificar áreas de influências e comparar políticas de controle alternativas. A consolidação do método aconteceu em 1996 quando Hopp e Spearman publicaram a primeira edição do livro *Factory Physics* (HOPP; SPEARMAN, 1996), o qual contém os princípios que governam os sistemas de manufatura e fornece *insights* sobre práticas de gestão que podem melhorar esses sistemas.

A ideia de se utilizar de forma híbrida as abordagens *System Dynamics* e *Factory Physics* surgiu no trabalho de Godinho Filho e Uzsoy (2009). Esses autores estudaram, por meio desse modelo, o efeito de programas de redução do tamanho do lote de produção e de melhoria contínua no WIP (estoque em processo) e na utilização de um sistema de produção. Da mesma forma que nesse trabalho, o presente artigo, a fim de se combinar ambas as abordagens, assume-se que os incrementos de tempo (*Time Step*) que formam a base do modelo de *System Dynamics* desenvolvido são longos, correspondendo a períodos de alguns meses (em nosso caso este valor é de 3 meses). Esta

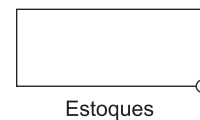


Figura 2. Estoque.

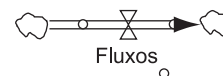


Figura 3. Representação de um fluxo.

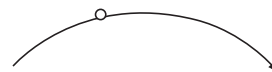


Figura 4. Representação de um conector.



suposição é razoável no contexto deste trabalho, uma vez que geralmente demora algum tempo para que a oportunidade de melhoria seja identificada, esta seja implementada, e os resultados alcançados. Também é assumido que, dentro de cada intervalo de tempo, o sistema encontra-se em equilíbrio (dessa forma, as equações de *Factory Physics*, baseadas na Teoria de Filas, podem ser utilizadas). Esta suposição de longos períodos de tempo também permite que o comportamento transiente do sistema nas fronteiras entre os períodos seja desconsiderado.

Portanto, a abordagem básica utilizada neste trabalho é modelar o desempenho do sistema de produção ao longo de um intervalo de tempo de vários anos (em nosso caso simulamos por 10 anos) com intervalos de tempo de 3 meses. Os programas de melhoria contínua são modelados como sendo reduções nos valores das médias e das variâncias relativas aos parâmetros estudados. Em cada período, os novos valores dos parâmetros são calculados com base nas melhorias implementadas no período anterior, e as equações da *Factory Physics* são usadas para propagar os efeitos das melhorias nas medidas de desempenho estudadas. O modelo desenvolvido também assume um comportamento determinístico das variáveis, seguindo a sugestão de Sterman (2000), o qual cita que uma abordagem determinística é suficiente para capturar as principais relações de interesse em um estudo de SD. É interessante notar que, apesar desta suposição, os efeitos da aleatoriedade no sistema são capturados pelas variâncias dos parâmetros considerados, os quais estão incluídos nas equações da abordagem *Factory Physics*.

### 3 Modelo e experimentos

#### 3.1 O modelo

O modelo desenvolvido, conforme já salientado anteriormente, é o mesmo proposto por Godinho Filho e Fernandes (2009). Essa seção é, portanto, baseada nesses autores. O modelo considera um sistema de manufatura modelado como um servidor único com tempos entre chegadas e de processamento genéricos, os quais podem ser representados como um fila *G/G/I*. Assume-se que o tempo natural do processo (tempo normal necessário para processar uma tarefa excluindo-se qualquer variabilidade do processo) tem média  $t_0$  e desvio padrão  $\sigma_0$ . Outras notações utilizadas no trabalho:

$t_e$  = tempo efetivo médio para se processar uma peça sem defeito (que é o tempo natural de processamento devidamente descontados os efeitos de falhas preemptivas e não preemptivas, bem como o efeito de itens defeituosos);

$c_e$  = coeficiente de variação do tempo efetivo médio para se processar uma peça sem defeito;  
 $L$  = tamanho de lote em que as peças chegam à estação de trabalho;  
 $t_a$  = média do tempo entre as chegadas de dois lotes consecutivos;  
 $c_a$  = coeficiente de variação do tempo entre as chegadas de dois lotes consecutivos;  
 $\lambda$  = taxa de chegada dos lotes (inverso do tempo entre chegadas, resultando em  $\lambda = 1/t_a$ ); e  
 $D$  = demanda anual média.

Como o sistema deve estar em estado de equilíbrio para evitar acumulação sem restrições de tarefas na fila, a taxa média de chegada no sistema deve ser igual à demanda média, resultando em  $t_a = LH/D$ , em que  $H$  denota o número total de horas trabalhadas em um ano. O tempo médio para se processar um lote de  $L$  peças é dado por  $Lt_e$ , e a utilização média do servidor é dada pela Equação (1):

$$u = \frac{Lt_e}{t_a} = \frac{Dt_e}{H} \quad (1)$$

Outra medida de desempenho de interesse neste estudo é o *lead time* ( $CT$ ). Para a fila *G/G/I*, não existe nenhuma expressão analítica exata para o cálculo do *lead time* médio, mas a seguinte aproximação, recomendada Hopp e Spearman (2008), se mostra bastante útil e pode ser utilizada Equação (2):

$$CT = \frac{(c_a^2 + c_e^2)}{2} \left( \frac{u}{1-u} \right) Lt_e + Lt_e \quad (2)$$

Em que  $Lt_e$  é o tempo médio para se processar um lote.

O cálculo do estoque em processo (WIP), outra medida de desempenho avaliada neste trabalho é dado simplesmente pela conhecida Lei de Little Equação (3):

$$WIP = \lambda \times CT \times L \quad (3)$$

O tempo efetivo médio para se processar uma peça é construído a partir do tempo natural de processo por meio da adição de três efeitos: i) efeito de paradas preemptivas (em nosso caso falhas na máquina); ii) efeito de paradas não preemptivas (em nosso caso tempo de *set up*); iii) efeito de itens defeituosos. Portanto, o primeiro passo para o cálculo de  $t_e$  envolve o cálculo do valor médio do tempo efetivo de processamento levando-se em consideração somente o efeito de falhas nas máquinas. Denota-se este tempo como  $t_e^f$ . Seguindo o tratamento dado por Hopp e Spearman (2008), denota-se o tempo entre duas falhas consecutivas como sendo exponencialmente distribuídas com média  $m_f$ , o tempo de reparo também exponencialmente distribuído e com médio  $m_r$ .

(o reparo é renovável e capaz de levar a máquina ao seu estado anterior à quebra) e a variância do tempo de reparo  $\sigma_r^2$ . Disso tem-se que a disponibilidade média do servidor é dada por  $A = m_i / (m_i + m_r)$ , resultando em  $t_e^f = t_0 / A$ . A variância deste tempo é dada pela Equação (4):

$$(\sigma_e^f)^2 = \frac{\sigma_0^2}{A^2} + \frac{(m_r^2 + \sigma_r^2)(1-A)t_0}{Am_r} \quad (4)$$

Após isso são incorporados os efeitos das paradas não preemptivas (*set up*), assumindo, como em Hopp e Spearman (2008), que o *set up* é igualmente provável de ocorrer após o processamento de qualquer peça, com número esperado de peças entre dois *set ups* consecutivos igual ao tamanho médio de lote  $L$ . O tempo médio de *set up* é denotado por  $t_s$ , e a variância por  $\sigma_s^2$ . A partir disso, pode-se obter o tempo médio de processamento levando-se em conta ambas as paradas (preemptivas e não preemptivas), denotado por  $t_e^o$ , como sendo  $t_e^o = t_e^f + t_s / L$ . Sua variância é dada pela Equação (5):

$$(\sigma_e^o)^2 = (\sigma_e^f)^2 + \frac{\sigma_s^2}{L} + \frac{L-1}{L^2} t_s^2 \quad (5)$$

Finalmente, incorporando o efeito de itens defeituosos, tem-se o tempo efetivo médio global,  $t_e$ , dado por  $t_e = t_e^o / (1-p)$ , em que  $p$  denota a proporção

de itens defeituosos. A variância deste tempo efetivo médio global é dada pela Equação (6):

$$\sigma_e^2 = \frac{(\sigma_e^o)^2}{1-p} + \frac{p(t_e^o)^2}{(1-p)^2} \quad (6)$$

A Figura 5 mostra estas relações entre as variáveis por meio de um diagrama de estoque-fluxo.

Como o objetivo deste artigo é estudar os efeitos de programas de melhoria contínua em seis parâmetros na curva tamanho de lote  $\times$  *lead time*, é necessário um mecanismo que modele a melhoria contínua. Neste trabalho, utilizamos um modelo de melhoria exponencial, no qual o valor do parâmetro  $A$  em um dado tempo  $t$  é dado pela Equação (7):

$$A(t) = (A_0 - G) e^{-t/\tau} \quad (7)$$

Em que  $A_0$  denota o valor inicial do parâmetro e  $G$  o nível mínimo a que o parâmetro pode ser reduzido. O parâmetro  $\tau$  representa o tempo que demora para a melhoria ocorrer; neste trabalho esse parâmetro indica o grau de dificuldade em melhorar o parâmetro em questão. A Figura 6 mostra como foi modelada a estrutura de melhoria para o tempo de *set up* neste trabalho. Como pode ser visto, a estrutura mostrada na Figura 6 é ligada na variável tempo de *set up* após melhoria, a qual também aparece na

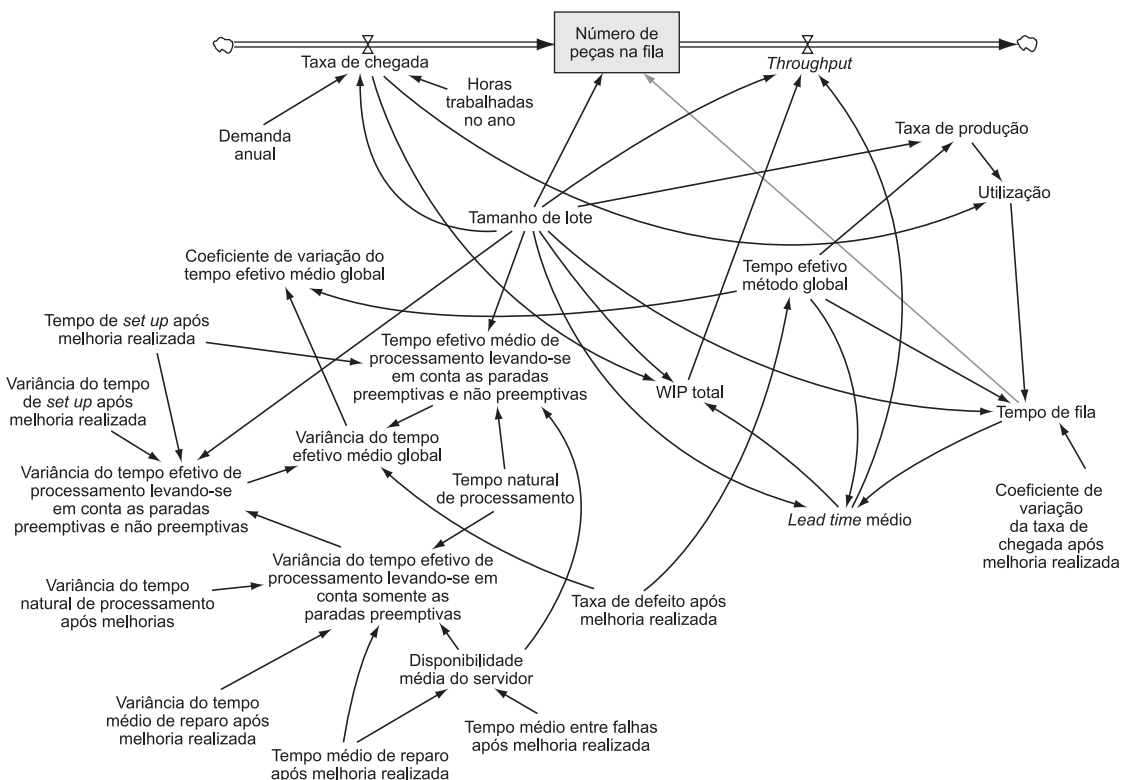


Figura 5. Parte principal do modelo utilizado neste trabalho.

Figura 5. Outras sete estruturas similares à mostrada na Figura 6 são utilizadas no modelo para modelar as melhorias contínuas nos outros parâmetros estudados neste trabalho: variabilidade da taxa de chegada das ordens no sistema, variabilidade natural do processo, variabilidade do tempo de reparo das máquinas, variabilidade do tempo de *set up*, taxa média de defeitos do processo, tempo médio entre falhas de máquina e tempo médio de reparo da máquina. Estas estruturas são ligadas, respectivamente, às seguintes variáveis mostradas na Figura 5: variabilidade da taxa de chegada após melhoria, variabilidade natural do processo após melhoria, variabilidade do tempo de reparo das máquinas após melhoria, variabilidade do tempo de *set up* após melhoria, taxa média de defeitos do processo após melhoria, tempo médio entre falhas de máquina após melhoria e tempo médio de reparo da máquina após melhoria. Portanto o modelo final desenvolvido é formado pela junção da Figura 5 com oito estruturas semelhantes à Figura 6 mostrada.

### 3.2 Parâmetros do modelo

Os parâmetros do modelo também seguem o proposto por Godingo Filho e Uzsoy (2009). Dessa forma, o sistema é simulado por 10 anos, 19200 horas (considerando-se 160 horas por mês). A demanda anual ( $D$ ) é constante e igual a 11520 peças por ano. Assume-se um lote de produção de inicialmente 200 peças, e que a fábrica opera um total de  $H = 1920$  horas por ano. Os tempos entre chegadas são assumidos como sendo exponencialmente distribuídos ( $c_a = 1$ ), com tempo natural de processo por peça igual a  $t_0 = 6$  minutos e  $c_0 = 1$ . No início da simulação, o tempo médio entre falhas é igual a  $m_f = 9600$  minutos, o tempo médio de reparo é igual a  $m_r = 480$  minutos, e o tempo médio de *set up* é igual a  $t_s = 180$  minutos. O valor do parâmetro  $\tau$  do processo de melhoria foi escolhido de tal forma que fornece uma meia vida para o processo de decaimento exponencial de 1 ano. A proporção de itens defeituosos ( $p$ ) é igual a 5%.

Os casos testados nos experimentos realizados são: (i) nenhuma melhoria realizada; (ii) melhoria de 50% na variabilidade dos tempos entre as chegadas; (iii) melhoria de 50% na variabilidade do processo; (iv) melhoria de 50% na qualidade (50% de redução na taxa média de itens defeituosos); (v) melhoria de 50% no tempo médio até a falha; (vi) melhoria de 50% no tempo médio de reparo; (vii) melhoria de 50% no tempo médio de *set up*; (viii) melhoria simultânea de 5% em todas as seis variáveis consideradas; (ix) melhoria simultânea de 10% em todas as seis variáveis consideradas; (x) melhoria simultânea de 15% em todas as seis variáveis consideradas; (xi) melhoria simultânea de 20% em todas as seis variáveis consideradas.

## 4 Resultados

A simulação foi feita utilizando-se o simulador Vensim PLE Plus (Ventana Systems Inc) e processada em um computador com processador Intel Centrino Duo (1.6 GHz), com memória RAM de 1024 MB.

A Figura 7 mostra o comportamento do *lead time* médio, ao longo do tempo, resultante da implementação de programas objetivando 50% de melhoria nos seis parâmetros estudados (casos (i) a (vii)) para um tamanho de lote de 200 peças. Gráficos similares a esse, mostrando o comportamento do *lead time* médio ao longo do tempo, também foram plotados para as outras possibilidades de tamanho de lote

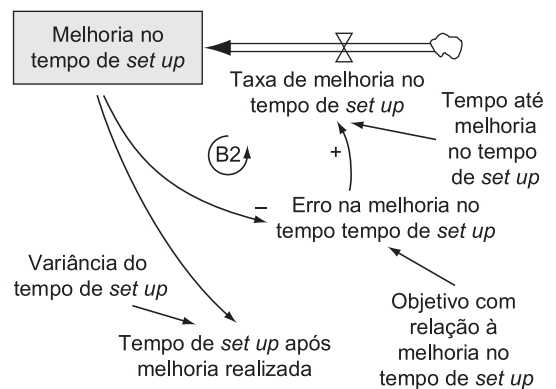


Figura 6. Estrutura modelada em SD para representar a melhoria no tempo de *set up*.

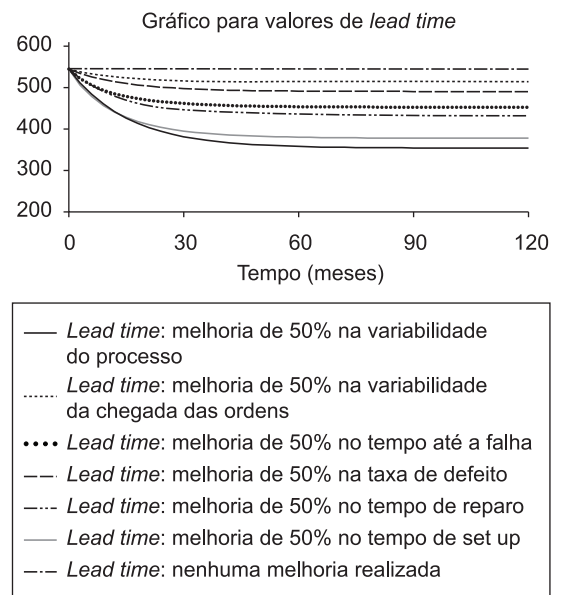


Figura 7. Comportamento ao longo do tempo do *lead time* médio resultante dos programas de CI implementados (tamanho de lote = 200 peças).

testadas neste estudo (600, 400, 170, 150, 130, 100, 80, 70, 60, 40, 30). A partir desses gráficos, curvas relacionando o tamanho de lote e o *lead time* médio foram construídas para cada uma das possibilidades de melhoria estudadas. Isto foi feito coletando-se os valores do *lead time* médio após as curvas que mostram o comportamento do *lead time* ao longo do tempo se tornarem estáveis. As curvas que mostram o efeito da implantação de programas para melhorias de grandes proporções em cada uma das variáveis separadamente na relação tamanho de lote  $\times$  *lead time* são mostradas na seção 4.1. O mesmo procedimento foi realizado para se construir as curvas que mostram o efeito da implantação de programas para pequenas melhorias em todas as variáveis simultaneamente na relação tamanho de lote  $\times$  *lead time*. Estas curvas encontram-se na seção 4.2.

#### 4.1 Efeito de melhorias de grandes proporções em cada uma das variáveis separadamente na curva tamanho de lote $\times$ *lead time*

As Figuras de 8 a 13 mostram o efeito de cada um dos programas para 50% de melhoria nas seis variáveis tratadas (casos (ii) até (vii)). A Figura 14 reúne todos estes casos em uma única figura. Em todas estas figuras pode ser visto que:

- 50% de melhoria na variabilidade da chegada das ordens têm somente um pequeno efeito na redução do *lead time*. Este efeito é ainda menor quando a empresa utiliza pequenos lotes de produção;
- 50% de melhoria na taxa de defeitos, no tempo de reparo, no tempo até a falha, no tempo de *set up* e na variabilidade do processo traz a curva tamanho de lote  $\times$  *lead time* para baixo e para a esquerda, fazendo com que o tamanho de lote ótimo com relação ao *lead time* possa ser menor. Em outras palavras, todas estas melhorias trazem contribuições à redução do *lead time* em um sistema de produção;
- O efeito positivo na redução do *lead time* de 50% de melhoria nos tempos de *set up*, na taxa de defeitos e na variabilidade do processo aumenta conforme tamanhos de lote menores são utilizados;
- O efeito positivo na redução do *lead time* de 50% de melhoria nos tempos de reparo e no tempo até a falha aumenta conforme os tamanhos de lote de produção apresentam valores extremos (tamanhos de lote muito pequenos ou muito grandes são utilizados);

- 50% de melhoria no tempo de *set up* atinge o melhor resultado com relação à redução do *lead time* quando pequenos lotes de produção são utilizados. Na verdade, a melhoria no tempo de *set up* permite que o sistema produtivo trabalhe com tamanhos de lote bem menores do que aqueles que seriam utilizados caso nenhuma melhoria no tempo de *set up* tivesse sido implementada; e
- 50% de melhoria na variabilidade do processo atinge o melhor resultado com relação à redução do *lead time* quando grandes tamanhos de lote de produção são utilizados.

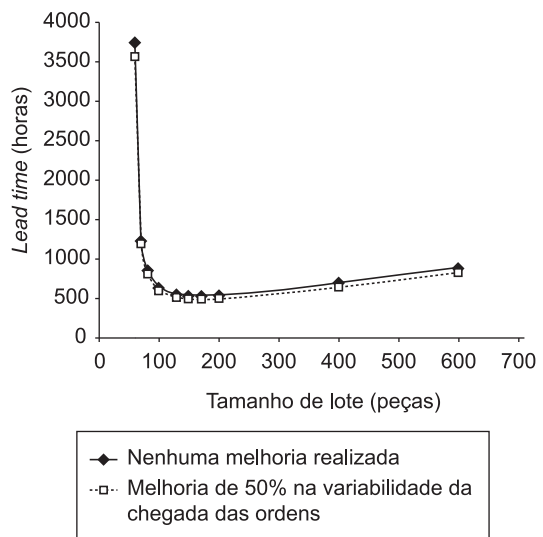


Figura 8. Efeito do programa para melhoria de 50% na variabilidade da chegada das ordens na curva tamanho de lote  $\times$  *lead time*.

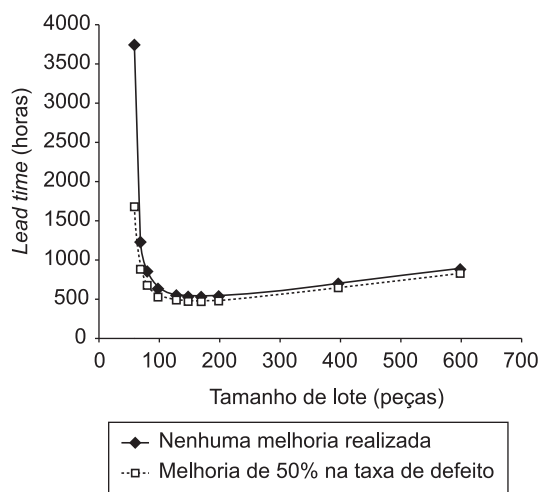


Figura 9. Efeito do programa para melhoria de 50% na taxa de defeito na curva tamanho de lote  $\times$  *lead time*.



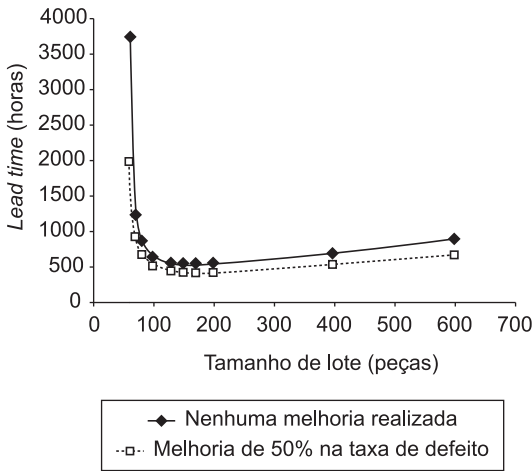


Figura 10. Efeito do programa para melhoria de 50% no tempo de reparo na curva tamanho de lote  $\times$  lead time.

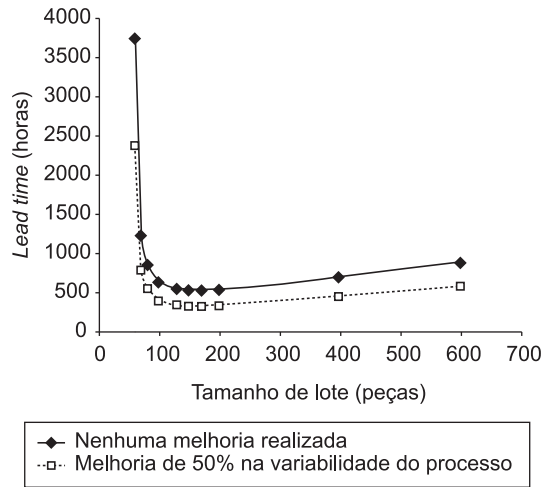


Figura 13. Efeito do programa para melhoria de 50% na variabilidade do processo na curva tamanho de lote  $\times$  lead time.

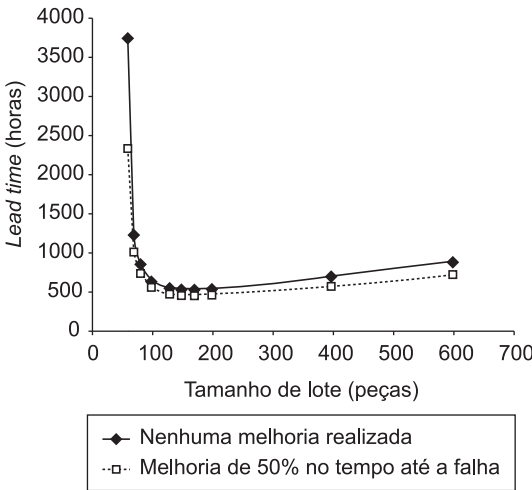


Figura 11. Efeito do programa para melhoria de 50% no tempo até a falha na curva tamanho de lote  $\times$  lead time.

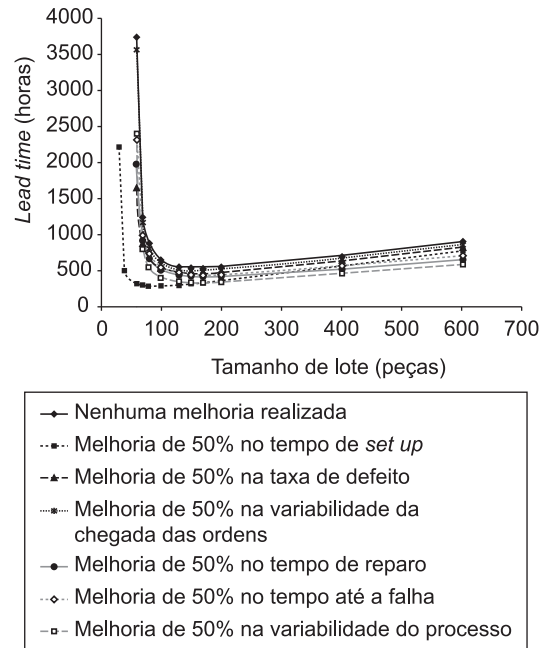


Figura 14. O efeito de todos os programas de 50% de melhoria na curva tamanho de lote  $\times$  lead time.

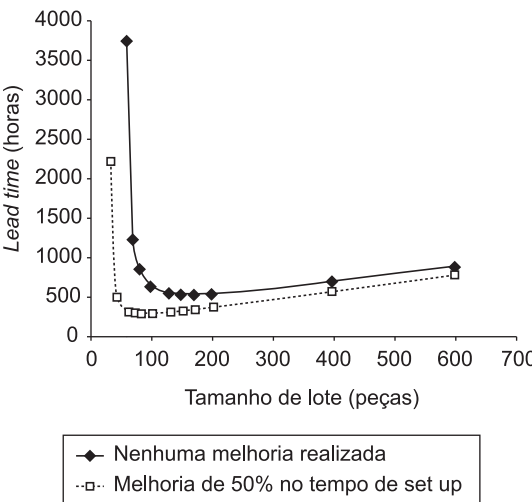
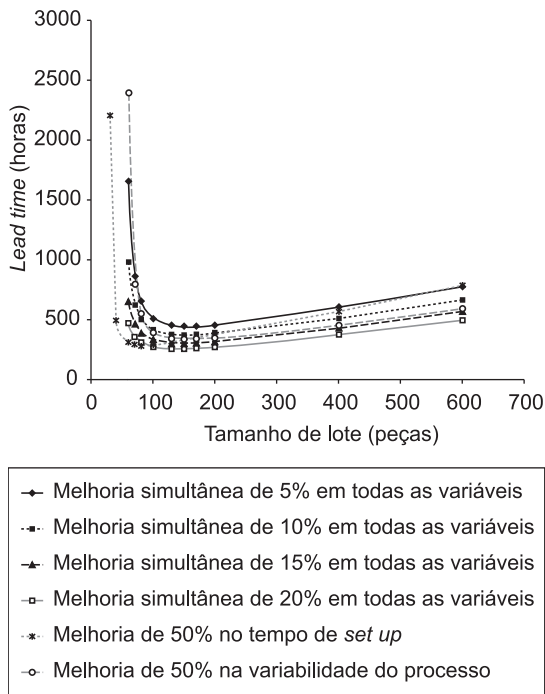


Figura 12. Efeito do programa para melhoria de 50% no tempo de set up na curva tamanho de lote  $\times$  lead time.

#### 4.2 Efeito de pequenas melhorias em todas as variáveis simultaneamente na curva tamanho de lote $\times$ lead time

A Figura 15 apresenta uma comparação entre as duas possibilidades de grandes melhorias que apresentaram o melhor desempenho na seção anterior (melhoria no tempo de set up e na variabilidade do processo) e pequenas melhorias simultâneas em todas



**Figura 15.** Comparação entre grandes melhorias em uma única variável (melhoria de 50% no tempo de set up e na variabilidade do processo) e pequenas melhorias simultâneas em todas as variáveis.

as variáveis (casos (viii) a (xi) mostrados na seção 3.3). Nesta Figura, pode-se ver que o programa para 15% de melhoria simultânea em todas as variáveis apresenta melhor desempenho em relação à redução de *lead time* que programas de melhoria de 50% tanto no tempo de set up quanto na variabilidade do processo (por consequência, se apresenta melhor que todas as outras possibilidades de grandes melhorias), com exceção do caso no qual são utilizados tamanhos de lote de produção muito pequenos (nesse caso, a melhoria de 50% no tempo de set up apresenta o melhor desempenho).

## 5 Conclusões

Este artigo utilizou o modelo híbrido *System Dynamics – Factory Physics* proposto por Godinho Filho e Uzsoy (2009) com o objetivo de estudar o efeito da implantação de seis diferentes programas de melhoria contínua na curva tamanho de lote de produção  $\times$  *lead time* médio em um ambiente de produção com máquina única que manufatura múltiplos produtos. Dois conjuntos de experimentos foram realizados: a) uma melhoria de grandes proporções (50%) em cada uma das variáveis separadamente, como aquela que seria obtida por um grande investimento; b) uma pequena melhoria em todas as variáveis simultaneamente.

O presente artigo forneceu uma melhor compreensão de como os esforços de melhoria contínua, direcionados a vários aspectos da manufatura, afetaram a curva tamanho de lote de produção  $\times$  *lead time* médio. Estes efeitos não são bem entendidos na literatura, especialmente se considerarmos os efeitos acumulados e combinados ao longo de um período de tempo.

Algumas conclusões que podem ser tecidas a respeito dos experimentos realizados neste trabalho são:

- Dos seis programas de melhoria estudados, cinco deles (exceção feita ao programa de melhoria na variabilidade na chegada das ordens) trouxeram a curva tamanho de lote  $\times$  *lead time* para baixo e para a esquerda, fazendo com que o tamanho de lote ótimo com relação ao *lead time* possa ser menor. Em outras palavras, todas estas melhorias trazem contribuições à redução do *lead time* em um sistema de produção. Estes resultados fornecem suporte à literatura que trata de CI, a qual defende que a melhoria contínua dos processos produtivos se tornou condição necessária para as empresas nos dias atuais.
- O programa de melhoria na variabilidade da chegada das ordens teve um efeito muito pequeno com relação à curva tamanho de lote  $\times$  *lead time*. Este resultado mostra que esforços para redução da variabilidade na chegada das ordens de produção não apresenta grande efeito na redução do *lead time*, portanto é possível reduzir o *lead time* por meio da implantação de programas de melhoria contínua em outras variáveis do chão de fábrica, mesmo em um ambiente caracterizado por alta variabilidade na chegada das ordens. Esse resultado muito provavelmente se deve ao fato de que este trabalho estudou um ambiente com uma única estação de trabalho. Estudos futuros podem comprovar ou refutar esses resultados em ambientes com mais estações de trabalho.
- O efeito positivo da implantação de programas de melhoria no tempo de set up, variabilidade do processo e taxa de defeitos no *lead time* é potencializada pela redução dos tamanhos de lote. Esses resultados fornecem suporte à grande parte das modernas técnicas de gestão, como por exemplo, as filosofias *Lean Manufacturing* e *Quick Response Manufacturing*, as quais defendem a redução dos tamanhos de lote como sendo pré-requisito para se conseguir melhorias no chão de fábrica. Além deste resultado, também é interessante salientar que a relação convexa entre tamanho de lote e *lead time* mostra que simplesmente reduzir o tamanho de lote (sem se conhecer exatamente o formato da curva

tamanho de lote  $\times$  *lead time*) não garante a redução do *lead time*. Os resultados apresentados neste artigo mostram que grandes reduções nos tamanhos de lote, mesmo acompanhados por melhorias (por exemplo na variabilidade do processo, na qualidade e no tempo até a falha) pode ter efeito pior no *lead time* do que uma redução mais gradual no tamanho de lote. Este resultado fornece suporte à teoria a respeito de *Quick Response Manufacturing* (QRM), a qual defende que tamanhos de lote de uma peça (*one piece flow*), defendida pela literatura a respeito de *Lean Manufacturing*, pode na verdade contribuir para o aumento do *lead time*. Portanto a mensagem é que se deve conhecer a relação tamanho de lote  $\times$  *lead time* antes de se decidir a respeito de reduções no tamanho de lote.

- O efeito positivo na redução do *lead time* de 50% de melhoria nos tempos de reparo e no tempo até a falha aumenta conforme os tamanhos de lote de produção apresentam valores extremos (tamanhos de lote muito pequenos ou muito grandes utilizados). Portanto, quando uma empresa trabalha com um tamanho de lote próximo ao tamanho de lote ótimo com relação a *lead time* (valor mínimo da curva tamanho de lote  $\times$  *lead time*), a necessidade de programas de melhoria com relação à quebra de máquinas diminui; dessa forma, conforme menos se conhece e se utiliza a curva tamanho de lote  $\times$  *lead time*, mais necessários se fazem programas de melhorias nos tempos de reparo e tempo até a falha.
- O programa de redução nos tempos de *set up* atinge melhor resultado com relação ao *lead time* quando tamanhos de lote pequenos são utilizados. Na verdade, a melhoria no tempo de *set up* permite que o sistema produtivo trabalhe com tamanhos de lote bem menores do que aqueles que seriam utilizados caso nenhuma melhoria no tempo de *set up* tivesse sido implementada. Este resultado fornece suporte à literatura que defende a importância da utilização de métodos de redução de *set up*, como, por exemplo, o método SMED (*Single Minute Exchange of Die*) de Shingo (1986).
- Investir-se em pequenas melhorias em muitas variáveis de forma simultânea é uma política melhor do que realizar uma grande melhoria (a qual, geralmente, pressupõe um investimento maior) em somente uma variável. Neste artigo,

pôde-se verificar que o programa para 15% de melhoria simultânea em todas as variáveis apresenta melhor desempenho em relação à redução de *lead time* do que todos os outros programas para grandes (50%) melhorias em somente uma variável (com exceção do caso no qual um tamanho de lote de produção muito pequeno é utilizado; nesse caso específico, a melhoria de 50% no tempo de *set up* apresentou o melhor desempenho). Estes resultados fornecem suporte à literatura a respeito dos modelos gerenciais japoneses (como por exemplo, *Just in time* e Sistema Toyota de Produção), que defende a necessidade e importância da melhoria contínua e simultânea em todas as variáveis do sistema produtivo.

A extensão natural deste artigo é sua ampliação para se estudar o efeito de programas de melhoria contínua na relação tamanho de lote  $\times$  *lead time* em ambientes com mais estações de trabalho.

## Referências

- BERGER, A. Continuous improvement and kaizen: standardization and organizational designs. **Integrated Manufacturing Systems**, v. 8, n. 2, p. 110-117, 1997.
- BESSANT, J.; FRANCIS, D. Developing strategic continuous improvement capability. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 19, n. 11, p. 1106-1119, 1999.
- BHUIYAN, N.; BAGHEL, A. An overview of continuous improvement: from the past to the present. **Management Decision**, v. 43, n. 5, p. 761-771, 2005.
- BURBIDGE, J. L. **Production flow analysis**. Oxford: Clarendon Press, 1996.
- CAFFYN, S. Development of a continuous improvement self-assessment tool. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 19, n. 11, p. 1138-1153, 1999.
- CHOI, S.; ENNS, S. T. Multi-product capacity-constrained lot sizing with economic objectives. **International Journal of Production Economics**, v. 91, p. 47-62, 2004.
- DREXL, A.; KIMMS, A. Lot sizing and scheduling - survey and extensions. **European Journal of Operational Research**, v. 99, p. 221-235, 1997.
- ELLIOT, N. W. Lot sizing is dead: long live lot sizing. **Production and Inventory Management Journal**, v. 31, n. 1, 1990.
- ERICKSEN, P. D.; STOFLET, N. J.; SURI, R. **Manufacturing Critical-path Time (MCT): the QRM metric for lead time**. Wisconsin-Madison: Technical Report, Center for QRM, 2007.
- FERNANDES, A. C. Dinâmica de sistemas e business dynamics: tratando a complexidade no ambiente de negócios. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO (ENEGEP), 2001. **Anais...**

- FORRESTER, J. W. **Industrial dynamics**. Cambridge, MA: MIT Press, 1962.
- GODINHO FILHO, M.; UZSOY, R. Efeito da redução do tamanho de lote e de programas de melhoria contínua no estoque em processo (WIP) e na utilização: estudo utilizando uma abordagem híbrida *System Dynamics – Factory Physics*. **Revista Produção**, v. 19, n. 1, p. 214-229, 2009.
- HAFNER, H. Lot sizing and *throughput* times in a job shop. **International Journal of Production Economics**, v. 23, p. 111-116, 1991.
- HOPP, W. J.; SPEARMAN, M. L. **Factory physics: foundations of manufacturing management**. 1 ed. Irwin, Nova York, USA, 1996.
- HOPP, W. J.; SPEARMAN, M. L. **Factory Physics: foundation of manufacturing management**. 3 ed. Irwin, New York, USA: McGrawHill, 2008.
- HUM, S.; SIM, H. Time-Based competition: literature review and implications for modeling. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 16, n. 1, p. 75-90, 1996.
- IMAI, M. **Kaizen: the key to japan's competitive success**. New York: Random House, 1986.
- JAYARAM, J.; VICKERY, S. K.; DROGE, C. An empirical study of time based competition in the north american automotive supplier industry. **International Journal of Operations and Production Management**, v. 19, n. 10, p. 1010-1033, 1999.
- KARIMI, B. et al. The capacitated lot sizing problem: A review of models and algorithms. **Omega - International Journal of Management Science**, v. 31, p. 365-378, 2003.
- KARMARKAR, U. S. et al. Multi-item batching heuristics for minimization of queues. **European Journal of Operational Research**, v. 58, p. 99-111, 1992.
- KARMARKAR, U. S. et al. Lot sizing and *lead time* performance in a manufacturing cell. **Interfaces**, v. 15, n. 2, p. 1-9, 1985.
- KEKRE, S. Performance of a manufacturing cell with increased product mix. **IIE Transactions**, v. 19, n. 3, p. 329-339, 1987.
- KENYON, G.; CANELB, C. et al. The impact of lot-sizing on net profits and cycle times in the n-job, m-machine job shop with both discrete and batch processing. **International Journal of Production Economics**, v. 97, p. 263-278, 2005.
- KRITCHANCHAI, D.; MACCARTHY, B. L. Responsiveness and strategy in manufacturing. In: WORKSHOP RESPONSIVENESS IN MANUFACTURING (digest nº 98/213). **Proceedings...** London: IEE, 1998.
- KUIK, R.; TIELEMANS, T. F. J. Expected time in system analysis of a single-machine multi-item processing center. **European Journal of Operational Research**, v. 156, p. 287-304, 2004.
- LAMBRECHT, M. R.; VANDAELE, N. J. A General Approximation for the Single Product Lot Sizing Model with Queueing Delays. **European Journal of Operational Research**, v. 95, p. 73-88, 1996.
- LEEDE, J.; LOOISE, J. K. Continuous improvement and the mini-company concept. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 19, n. 11, p. 1188-1202, 1999.
- LIN, C. et al. Generic methodology that aids the application of system dynamics to manufacturing system modeling. **IEE Conference Publication**, v. 457, p. 344-349, 1998.
- RAO, S. The relationship of work-in-process inventories, manufacturing *lead times* and waiting line analysis. **International Journal of Production Economics**, v. 26, p. 217-227, 1992.
- SAVOLAINEN, T. **Cycles of continuous improvement: realizing competitive advantages through quality – a longitudinal case study**. Continuous improvement – from idea to reality. Enschede, Netherlands: Twente University Press, 1998.
- SHINGO, S. **A Revolution in Manufacturing: The SMED System**. Cambridge: Productivity Press, 1986.
- STALK, G. Time: The next source of competitive advantage. **Harvard Business Review**, p. 41-51, July-August 1988.
- STERMAN, J. D. **Business dynamics: systems thinking and modeling for a complex world**. New York, McGraw-Hill, 2000.
- SURI, R. **Quick response manufacturing: A companywide approach to reducing lead times**. Portland, USA: Productivity Press, 1998.
- TREVILLE, S. D. et al. From supply chain to demand chain: the role of *lead time* reduction in improving demand chain performance. **Journal of Operations Management**, v. 21, p. 613-627, 2004.
- VAUGHAN, T. S. Lot size effects on process lead time, lead time demand, and safety stock. **International Journal of Production Economics**, v. 100, p. 1-9, 2006.
- WOMACK, J. P.; JONES, D. T.; ROSS, D. **The machine that changed the world**. New York: Harper Perennial, 1990.