

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*

Moacir Godinho Filho UFSCAR

Reha Uzsoy North Carolina State University - USA

RESUMO

O presente trabalho apresenta um modelo quantitativo que utiliza de forma híbrida as abordagens *System Dynamics - SD* (FORRESTER, 1962) e *Factory Physics* (HOPP; SPEARMAN, 2001) objetivando estudar o efeito conjunto de seis programas de Melhoria Contínua - CI (variabilidade na taxa de chegada, variabilidade do processo, qualidade, tempo até a falha, tempo de reparo e tempo de *set up*) e de redução de tamanhos de lote de produção nos níveis médios de Estoque em Processo (WIP) e Utilização em um ambiente produtivo com uma única máquina que processa múltiplos produtos. Os resultados dos experimentos realizados utilizando-se o modelo desenvolvido fornecem insights e subsídios que dão suporte a uma série de modernas ferramentas e filosofias de gestão da manufatura, tais como programas de redução da variabilidade do processo como, por exemplo, Seis Sigma; programas de redução de *set up*, como por exemplo os programas SMED (*Single Minute Exchange of Die*), Sistema Toyota de Produção/Manufatura Enxuta e *Quick Response Manufacturing* (QRM). Além disso, o modelo também serve para auxiliar na escolha de diferentes possibilidades de programas de Melhoria Contínua no chão de fábrica.

PALAVRAS-CHAVE

Tamanho de lote de produção, Melhoria Contínua, Estoque em Processo, Utilização, *System Dynamics*, *Factory Physics*

Effect of lot size reduction and Continuous Improvement on Work In Process and Utilization: study using a combined System Dynamics and Factory Physics approach

ABSTRACT

This paper builds a quantitative model, which is a result of a combination of System Dynamics (FORRESTER, 1962) and Factory Physics (HOPP; SPEARMAN, 2001) approaches aiming to examine how six Continuous Improvement (CI) programs (arrival variability, process variability, quality (defect rate), time to failure, repair time, and set up time), together with lot size reduction, affect Work In Process (WIP) and Utilization in a multi-product, single-machine environment. Results of the paper provides support for: i) the importance of implementing set up reduction programs; ii) Lean Manufacturing (LM) philosophy regarding the implementation of small CI programs in a lot of variables and areas of the shop floor; iii) Quick Response Manufacturing (QRM) philosophy regarding the importance of managers to know the convex relationship between lot size and WIP in order to decide the amount of lot size reduction to be performed on shop floor; iv) the choice between alternative CI programs.

KEY WORDS

Lot Size, Continuous Improvement, Work In Process, Utilization, System Dynamics, Factory Physics.

1. INTRODUÇÃO

Desde os primórdios da Revolução Industrial, a melhoria contínua de produtos e processos tem sido fonte de vantagens competitivas para muitas empresas ao redor do mundo. Atualmente, modernos paradigmas e filosofias de gestão de manufatura tais como o Sistema Toyota de Produção/Manufatura Enxuta (LIKER, 2004), Seis Sigma (PANDE *et al.*, 2000) e a Teoria das Restrições, têm procurado atingir vantagens competitivas de longo prazo por meio de melhorias contínuas e incrementais no chão de fábrica. Isso tem levado ao aparecimento de inúmeras idéias, ferramentas e técnicas direcionadas à melhoria no chão de fábrica, como, por exemplo, redução do tamanho de lote, Manutenção Produtiva Total (TPM), iniciativas de melhoria de qualidade como círculos de controle da qualidade, técnicas de redução de *set up*, como o método SMED (*Single Minute Exchange of Die*), dentre muitas outras. Entretanto, apesar da imensa literatura que descreve e defende estes tipos de programas de melhoria, falta o claro entendimento das condições sob as quais se espera que estes programas funcionem bem e de como estes programas realmente auxiliam na obtenção de vantagens competitivas relativas a alguma variável específica. Particularmente, existem na literatura apenas alguns poucos modelos que auxiliam no entendimento de como esforços para melhoria direcionados a diferentes aspectos da manufatura afetam variáveis de desempenho-chave da manufatura, tais como Estoque em Processo (WIP) e Utilização. O presente artigo é uma primeira tentativa de preencher esta lacuna por meio da proposição de um modelo quantitativo, o qual utiliza as abordagens *System Dynamics - SD* (FORRESTER, 1962) e *Factory Physics* (HOPP; SPEARMAN, 2001) de uma forma híbrida, com a finalidade de estudar o efeito conjunto de seis programas de Melhoria Contínua - CI e de redução de tamanhos de lote de produção nos níveis médios de estoque em processo (WIP) e utilização em um ambiente produtivo com uma única máquina que processa múltiplos produtos. Apesar de a utilização de modelos de simulação para dar suporte a esforços de melhoria contínua não ser algo novo (ADAMS *et al.*, 1999), consideramos que o modelo desenvolvido neste artigo é o primeiro que tenta reunir um modelo quantitativo a respeito do comportamento dos sistemas de manufatura com um modelo de *System Dynamics*, a fim de estudar as interações entre os diferentes programas CI e seus efeitos em indicadores de desempenho dos sistemas de manufatura ao longo do tempo.

Os seis programas de melhoria contínua estudados neste trabalho são relativos aos seguintes parâmetros: i) variabilidade da taxa de chegada das ordens no sistema; ii) variabi-

lidade do processo (composto pela variabilidade natural do processo, variabilidade do tempo de reparo e variabilidade do tempo de *set up*); iii) taxa média de defeitos; iv) tempo médio até a falha do equipamento; v) tempo médio de reparo do equipamento; vi) tempo médio de *set up*.

Dois conjuntos de experimentos são realizados neste trabalho: a) experimentos simulando a implantação de programas para uma grande melhoria - (50%) em cada um dos parâmetros separadamente; b) experimentos simulando a implantação de pequenas melhorias em todos os parâmetros estudados simultaneamente. Estes dois conjuntos de experimentos são realizados objetivando-se estudar duas variáveis de desempenho no chão de fábrica: Estoque em Processo (WIP) e Utilização. Em todos os experimentos, variações nos valores do tamanho de lote de produção são realizadas visando verificar se os resultados obtidos são sensíveis a alterações nos lotes de produção.

Existe uma série de assuntos estudada pela literatura sobre CI internacionalmente e mesmo na literatura nacional, a saber: Attadia e Martins (2003); Mesquita e Alliprandini (2003), dentre outros. Apesar disso, de acordo com Kerrin (1999), mesmo tendo grande importância, na literatura de CI ainda existem diversas lacunas. Uma destas lacunas é a existência de poucos estudos que mostrem o efeito positivo de programas CI em medidas de desempenho da manufatura, tais como *lead time*, utilização, estoque em processo (WIP), dentre outras. Deste modo, o presente artigo mostra, usando SD, como programas de melhoria contínua afetam as medidas de desempenho WIP e Utilização. Neste sentido, está organizado da seguinte forma: na Seção 2 uma breve revisão da literatura a respeito dos principais tópicos abordados (CI, SD e *Factory Physics*) é apresentada; na Seção 3 são mostrados o modelo desenvolvido e os experimentos realizados; na Seção 4, os resultados dos experimentos; e na Seção 5, são tecidas as conclusões.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Melhoria Contínua

De acordo com Berger (1997), *Kaizen* - traduzido para o Ocidente como melhoria contínua (IMAI, 1986) - é visto nos meios acadêmico e prático como sendo uma das razões pelas quais as companhias ocidentais não têm conseguido os benefícios completos com a implementação dos vários conceitos gerenciais japoneses. Caffyn (1999) define melhoria contínua (*Continuous Improvement - CI*) como "um envolvimento total na realização de pequenas transformações, que são realizadas de uma forma contínua e estão diretamente relacionadas aos objetivos organizacionais". Jha *et al.* (1996)

definem CI como “um conjunto de atividades que constituem um processo destinado a alcançar melhoria”.

De acordo com Leede e Looise (1999), CI é vital no atual ambiente competitivo e é uma das principais atividades necessárias para se ter excelência na manufatura.

De acordo com Savolainen (1999), o processo de CI é essencialmente um processo de aprendizagem. Este processo não ocorre da noite para o dia, mas sim envolve considerável aprendizagem (BESSANT; FRANCIS, 1999).

De acordo com Bhuiyan e Baghel (2005), ao longo das décadas, muitas metodologias de CI, tais como *lean manufacturing* e *six sigma*, foram desenvolvidas. Estes autores, após uma revisão da literatura sobre CI, afirmam: “programas de CI evoluíram de tradicionais práticas focadas na manufatura com o objetivo de reduzir desperdícios e melhorar a qualidade para metodologias sistemáticas focadas na organização como um todo”. Também de acordo com estes autores, mais recentemente, grandes empresas têm desenvolvido seus próprios programas de CI por meio da utilização conjunta de técnicas e ferramentas de diversas metodologias e filosofias de gestão.

A pesar de estar sendo bastante aplicada em um grande número de áreas, existem poucas aplicações de *System Dynamics* em sistemas de manufatura, mesmo com a evidência de que esta técnica tem o potencial de trazer inúmeras vantagens aos sistemas de manufatura.

De acordo com Adams et al. (1999), a simulação pode dar suporte aos esforços de melhoria contínua de diversas formas, tais como: i) auxiliando na identificação dos problemas; e ii) medindo e avaliando o impacto das várias opções de melhoria. Neste artigo, a simulação usando SD é usada exatamente para cumprir o objetivo (ii), ou seja, medir e avaliar o impacto de seis opções de melhoria contínua no *lead time* da manufatura para um ambiente com múltiplos produtos e uma máquina.

Os seis programas de CI, tratados neste trabalho, na verdade, envolvem melhorias em dois parâmetros: a) variabilidade (HOPP; SPEARMAN, 2001) – 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 (2001) 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. Portanto, se uma empresa não realizar esforços para reduzir a variabilidade, ela “pagará”, apresentando baixa taxa de saída do processo (*throughput*), altos *lead times*, desperdícios de capacidade e altos níveis de WIP. Schoemig (1999) mostra, em um estudo baseado em simulação, a influência devastadora da variabilidade (neste caso, resultado da não disponibilidade de máquinas e equipamentos) no desempenho de um sistema de produção. A literatura também traz uma série de métodos que contribuem para a redução da variabilidade. Com relação à redução da variabilidade na taxa de chegada das tarefas, Hopp e Spearman (2001) sugerem: i) melhor programação da produção (*scheduling*); 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.

Apesar de ser bastante conhecido que a variabilidade tem um efeito negativo no desempenho dos sistemas de manufatura e que a redução da variabilidade contribua para este desempenho, existem poucos estudos que mostram estes efeitos de uma forma dinâmica.

Mapes et al. (2000), por meio de um estudo em 963 plantas industriais no Reino Unido, encontraram evidências de que as empresas com mais alta performance são aquelas que têm baixos níveis de variabilidade e incerteza. Apesar desta conclusão, estes autores afirmam que o seu trabalho avaliou o desempenho das plantas em um instante particular de tempo. A partir disso, os autores sugerem estudos que relacionem redução da variabilidade e melhoria de desempenho em um ambiente dinâmico, de fato, estudos que mostrem os resultados com relação ao desempenho do sistema de produção de contínuas reduções na variabilidade. Isto é exatamente o que o presente trabalho pretende demonstrar.

Melhoria nos tempos médios de *set up* e de reparo, nos tempos entre falhas e na taxa de defeito 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 tratados na li-

teratura: 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.

Da mesma forma que redução da variabilidade, inúmeros estudos citam os benefícios da melhoria do tempo médios de *set up*, do tempo médio de reparo, do tempo médio entre falhas e da taxa de defeito aos sistemas de produção; porém, há uma escassez de trabalhos que mostrem o impacto da melhoria nestes fatores em parâmetros-chave de um sistema de produção (por exemplo, WIP e Utilização) de uma forma dinâmica e combinada.

2.2 System Dynamics

System Dynamics (SD) foi desenvolvido por Jay Forrester em 1956 no MIT (*Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA*). O livro *Industrial Dynamics*, de Forrester (1962), representou o início desta área de pesquisa. Em sistemas complexos (tais como um sistema de manufatura), objetos interagem e a mudança em uma variável afeta as outras variáveis dinamicamente. Esta mudança, por sua vez, retroalimenta (*feedback*) a variável original e assim por diante (TESFAMARIAM; LINDBERG, 2005). A esse conjunto de relacionamentos entre as variáveis é dado o nome de comportamento do sistema. Os modelos de *System Dynamics* capturam as relações causais e os *feedbacks* existentes em um sistema. De acordo com Sterman (2000), SD é um método para aumentar o aprendizado sobre um sistema complexo.

Apesar de estar sendo bastante aplicada em um grande número de áreas, existem poucas aplicações de SD em sistemas de manufatura, mesmo com a evidência de que esta técnica tem o potencial de trazer inúmeras vantagens aos sistemas de manufatura. De acordo com Baines e Harrison (1999), a simulação computacional de sistemas de manufatura é comumente feita por meio da simulação de eventos discreta (*Discrete Event Simulation - DES*). Estes autores tentam encontrar as razões para esta lacuna por meio de uma revisão da literatura, que mostra o estado atual de aplicações de SD na manufatura. Eles concluem que os sistemas de manufatura representam uma oportunidade para a modelagem utilizando SD. Esta é também a opinião de Lin et al. (1998), que propõe um *framework* para auxiliar gerentes industriais a aplicar SD para a modelagem de situações práticas industriais. A existência deste *gap* é uma das motivações para a realização deste trabalho. Além disso, os recentes avanços tecnológicos a respeito de modelagem interativa, ferramentas para a representação da estrutura dos *feedbacks*

e *softwares* de SD tornaram a simulação com SD uma técnica que pode ser aprendida e utilizada muito mais facilmente (STERMAN, 2000). Isto torna este trabalho também uma contribuição para a prática na área de gestão de operações.

2.3 Factory Physics

Factory Physics é uma abordagem criada por Hopp e Spearman (2001), que objetivam propor uma abordagem científica para a manufatura. Isto é feito por meio de um conjunto de equações matemáticas derivadas da Teoria das Filas. De acordo com Penttälä (2005), a abordagem *Factory Physics* estabelece um conjunto de leis para explicar o comportamento e o relacionamento entre variáveis no chão de fábrica, fornecendo ferramentas para análise das operações existentes, para projeto de possíveis esforços de melhorias e para análise de *trade offs*. Esta abordagem, de acordo com Hopp e Spearman (2001), apresenta três propriedades principais: é quantitativa, simples e intuitiva, fornecendo dessa forma importantes *insights* sobre a manufatura.

De acordo com Treville et al. (2004), “enquanto a grande maioria da literatura sobre redução de *lead time* tem se apresentado somente exploratória, Hopp e Spearman (2001) reuniram um conjunto de princípios matemáticos para o estudo e determinação do *lead time* – baseado na Teoria de Filas – que eles denominaram *Factory Physics*”.

Standridge (2004) afirma que a abordagem *Factory Physics* fornece uma descrição sistêmica, expressa por meio de algumas leis do comportamento básico de um sistema. Este autor também aponta que esta abordagem tem o potencial de contribuir para a realização de estudos utilizando simulação.

Devido ao seu potencial em explicar o comportamento de sistemas de manufatura, a abordagem *Factory Physics* também pode ser utilizada como uma ferramenta de ensino na área de Gestão de Operações. Spearman e Hopp (1998) apresentam como *Factory Physics* pode ser usada dentro de um novo paradigma de ensino para a área de Gestão da Produção e Operações.

3. MODELO E EXPERIMENTOS

3.1 A Abordagem híbrida *System Dynamics - Factory Physics*

A utilização da abordagem *Factory Physics* em um modelo de *System Dynamics* pode parecer, em uma primeira análise, contraditória. A abordagem *Factory Physics*, apresentada nos capítulos 8 e 9 de Hopp e Spearman (2001), é baseada em uma análise do sistema de produção a longo prazo, após este ter atingido o chamado estado de equilíbrio (*steady state*), na linguagem da Teoria de Filas. *System Dynamics*, por

outro lado, enfatiza o comportamento dinâmico de sistemas complexos que não estão no estado de equilíbrio. Entretanto, para os objetivos deste trabalho, as equações mostradas na abordagem *Factory Physics* são únicas em fornecer uma modelagem matemática sistêmica para o comportamento do sistema de produção, modelagem esta que consegue medir o impacto de valores médios e desvios padrões de parâmetros-chave do sistema de produção (tais como tempos de *set up*, tempo de reparo, taxa de defeito, dentre outros) em medidas de desempenho do sistema, tais como Estoque em Processo (WIP) e Utilização. Para que ambas as abordagens possam ser utilizadas conjuntamente e, dessa forma, as equações de *Factory Physics* possam ser utilizadas no modelo de *System Dynamics*, neste trabalho, 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 suposição é razoável no contexto deste trabalho, uma vez que geralmente demora algum tempo para que a oportunidade de melhoria seja identificada, implementada e os resultados alcançados. Também é assumido que dentro de

Standridge (2004) afirma que a abordagem *Factory Physics* fornece uma descrição sistêmica, expressa por meio de algumas leis do comportamento básico de um sistema. Este autor também aponta que esta abordagem tem o potencial de contribuir para a realização de estudos utilizando simulação.

cada intervalo de tempo o sistema encontra-se em equilíbrio (dessa forma as equações de *Factory Physics* 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. Políticas de melhoria contínua são modeladas como sendo reduções nos valores médios e variância, relativos aos parâmetros estudados: variabilidade da taxa de chegada das ordens no sistema; 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*; qualidade –

aqui representada pela redução na taxa média de defeitos do processo; tempo médio entre falhas de máquina; tempo médio de reparo da máquina; e tempo médio de *set up* da máquina. Em cada período, os novos valores dos parâmetros são calculados baseados nas melhorias implementadas no período anterior e as equações da *Factory Physics* são usadas para propagar os efeitos das melhorias nas medidas de performance do sistema estudadas (WIP e Utilização). O modelo desenvolvido também assume um comportamento determinístico das variáveis, seguindo a sugestão de Sterman (2000), que 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*.

3.2 O modelo

O modelo desenvolvido 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/1*. 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 σ_0 . Também se denota o 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) como t_e , e seu coeficiente

de variação c_e . Também se assume que as tarefas chegam à estação de trabalho em lotes de tamanho médio L e o tempo médio entre chegadas destes lotes tem média t_a e coeficiente de variação c_a . A taxa de chegada dos lotes λ é o inverso do tempo entre chegadas, resultando em $\lambda = 1/t_a$. Se a demanda anual média é denotada por D , 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 $t_a = LH/D$, onde 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 dado por:

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

Outra medida de desempenho de interesse neste estudo é o

tempo de ciclo médio. Para a fila G/G/1, não existe nenhuma expressão analítica exata para o cálculo do tempo de ciclo médio, mas a seguinte aproximação, recomendada por Hopp e Spearman (2001), mostra-se bastante útil e pode ser utilizada:

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

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

$$WIP = \frac{(\lambda CT)}{L} \quad (3)$$

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 (2001), denota-se o tempo entre duas falhas consecutivas como sendo exponencialmente distribuídas com média m_f , o tempo médio de reparo m_r e a variância do tempo de reparo σ_r^2 . Disso tem-se que a disponibilidade média do servidor é dada por $A = m_f / (m_f + m_r)$, resultando em $t_e^f = t_0 / A$. A variância deste tempo é dada por:

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

Em seguida, são incorporados os efeitos das paradas não preemptivas (*set up*), assumindo, como em Hopp e Spearman (2001), 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 σ_s^2 . A partir disso, pode-se obter o tempo médio de processamento, levando-se em conta ambas as paradas (preemptivas e não preemptivas), denotadas por t_e^o , como sendo $t_e^o = t_e^f + t_s / L$. Sua variância é dada por:

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

Finalmente, incorporando o efeito de itens defeituosos, tem-se o tempo efetivo médio global, t_e , dado por $t_e = t_e^o / (1-p)$, onde p denota a proporção de itens defeituosos. A variância deste tempo efetivo médio global é dada por:

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

A Figura 1 mostra estas relações entre as variáveis.

Como o objetivo deste artigo é estudar os efeitos de programas de melhoria contínua em seis parâmetros nas medidas de desempenho WIP e Utilização, é necessário um mecanismo que modele a melhoria contínua. Neste trabalho,

É preferível, referente à redução no WIP, investir em pequenas melhorias em um grande número de parâmetros do sistema de produção do que se investir na implantação de um grande programa para melhoria de somente um parâmetro do sistema. Esta conclusão independe do tamanho de lote de produção utilizado.

utilizamos um modelo de melhoria exponencial, onde o valor do parâmetro A em um dado tempo t é dado por:

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

Onde A_0 denota o valor inicial do parâmetro e G o nível mínimo que o parâmetro pode ser reduzido.

O parâmetro τ 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 2 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 2 é ligada na variável tempo de *set up* após melhoria, que também aparece na Figura 1. Outras sete estruturas similares à mostrada na Figura 2 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

($c_a = 1$), 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* igual a $t_s = 180$ minutos. O valor do parâmetro τ do processo de melhoria foi escolhido de tal forma que fornece uma meia vida para a 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) caso sem a implementação de melhorias; (ii) caso com 50% de melhoria (redução) na variabilidade dos tempos entre as chegadas; (iii) caso com 50% de melhoria na variabilidade do processo; (iv) caso com 50% de melhoria na qualidade (50% de redução na taxa de itens defeituosos); (v) caso com 50% de melhoria (aumento) no tempo média entre falhas; (vi) caso com 50% de melhoria no tempo médio de reparo; (vii) caso com 50% de melhoria no tempo médio de *set up*; (viii) caso com 5% de melhoria conjunta em todos os parâmetros considerados; (ix) caso com 10% de melhoria conjunta em todos os parâmetros considerados; (x) caso com 15% de melhoria conjunta em todos os parâmetros considerados; (xi) caso com 20% de melhoria conjunta em todos os parâmetros considerados.

4. RESULTADOS

4.1 Efeito da redução do tamanho do lote e de programas de melhoria contínua no WIP

A Figura 3 mostra o comportamento do nível médio de

WIP ao longo do tempo resultantes da implementação de programas, objetivando 50% de melhoria nos seis parâmetros estudados (casos (i) a (vii)) para um tamanho de lote de 170 peças. Para a análise realizada nesta seção, somente um valor do WIP mostrado na Figura 3 é utilizado para cada caso analisado. Este valor corresponde ao valor do WIP no momento em que ele se torna constante na Figura 3 (após os esforços de melhoria atingiram seu objetivo final). Simulações resultando em Figuras similares a essa também foram realizadas para as outras duas possibilidades de tamanho de lote testadas nesse estudo (80 e 600 peças). Os resultados deste procedimento, mostrando o impacto no WIP dos programas para 50% de melhoria nos parâmetros estudados, para as três possibilidades de tamanho de lote testadas, são mostrados na seção 4.1.1. Procedimento semelhante é realizado para se avaliar o impacto de pequenas e concomitantes melhorias nos seis parâmetros (casos (viii) a (xi)). Estes resultados são mostrados na seção 4.1.2.

4.1.1 Efeito no WIP da redução do tamanho de lote e dos programas para 50% de melhoria

A Tabela 1 e a Figura 4 mostram o impacto no WIP da redução do tamanho de lote e dos programas para 50% de melhoria nos parâmetros estudados. Os resultados mostram que:

- 1) Para tamanho de lote grande (no exemplo 600), 50% de redução na variabilidade do processo é o programa que mais contribui para a redução de WIP (33,7% de redução), seguido, respectivamente pelos seguintes programas: melhoria de 50% no tempo de reparo (24,8%), 50% melhoria no tempo entre falhas (21,3%), melhoria de 50%

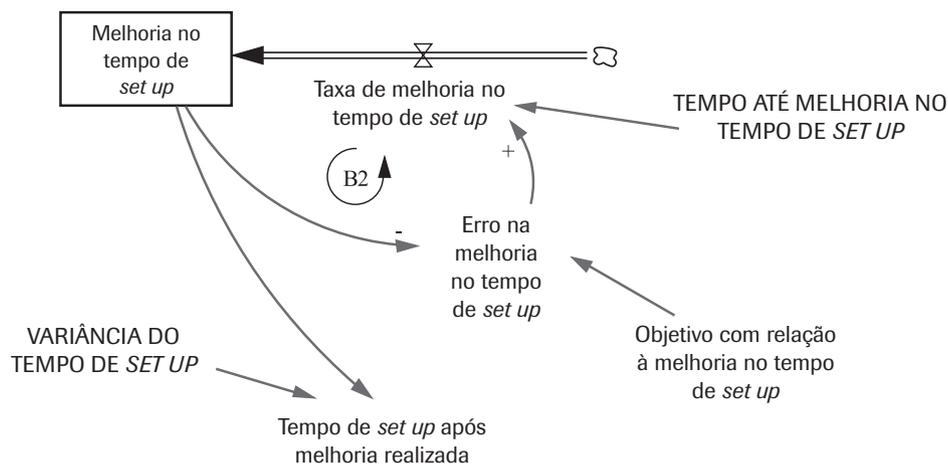


Figura 2: Estrutura modelada em SD para representar a melhoria nos tempos de *set up*.

no tempo de *set up* (12,5%), 50% melhoria na taxa de defeitos (7,9%) e 50% melhoria na variabilidade da chegada das ordens no sistema (6,6%);

- 2) Conforme o tamanho de lote é reduzido, a importância da melhoria nos tempos de *set up* aumenta. Para um tamanho de lote de 80 peças, o programa de melhoria de 50% nos tempos de *set up* obtém o melhor resultado referente à redução de WIP (65,6% de redução), seguido, respectivamente pelos seguintes programas: 50% de redução na variabilidade do processo (35,8%), melhoria de 50% no tempo de reparo (21,3%), melhoria de 50% na taxa de defeitos (20,8%) – a qual vê-se que também ganhou bastante importância conforme os tamanhos de lote foram diminuídos –, melhoria de 50% no tempo entre falhas (16,6%) e melhoria de 50% na variabilidade da chegada das ordens no sistema (4,7%).

4.1.2 Efeito no WIP da redução do tamanho de lote e dos programas para pequenas melhorias conjuntas nos parâmetros estudados

A Tabela 2 e a Figura 5 mostram o impacto no WIP da

redução do tamanho de lote e dos programas para pequenas melhorias conjuntas nos parâmetros estudados. A fim de comparação, também são mostrados nesta seção os resultados referentes aos programas para 50% de melhoria que melhor desempenho tiveram na seção anterior. Os resultados mostram que:

- 1) Para tamanho de lote grande (no exemplo, 600), 20% de melhoria em todos os parâmetros ao mesmo tempo obtiveram o melhor resultado com relação à redução de WIP (44% de redução), seguido, respectivamente pelos seguintes programas: melhoria de 15% em todos os parâmetros ao mesmo tempo (35,2%), 50% de melhoria na variabilidade do processo (33,7%), 10% de melhoria em todos os parâmetros (25,1%), 5% de melhoria em todos os parâmetros (13,4%) e 50% de melhoria no tempo de *set up* (12,5%);
- 2) Conforme o tamanho de lote é reduzido, a importância da melhoria nos tempos de *set up* aumenta. Para um tamanho de lote de 80 peças, o programa de melhoria de 50% nos tempos de *set up* obtém o melhor resultado referente à redução de WIP (65,6% de redução), segui-

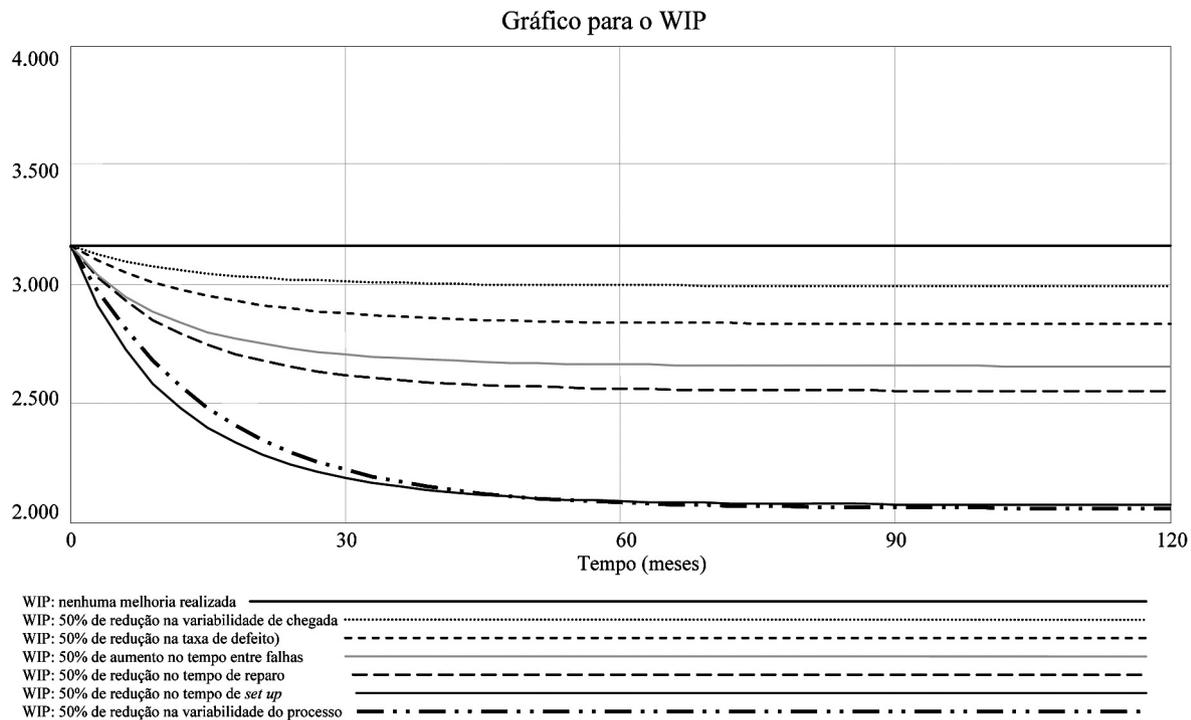


Figura 3: Comportamento do WIP médio ao longo do tempo resultante da implementação dos programas para 50% de melhoria nos parâmetros estudados (tamanho de lote = 170 peças).

do, respectivamente, pelos seguintes programas: 20% de melhoria em todos os parâmetros ao mesmo tempo (63%), melhoria de 15% em todos os parâmetros ao mesmo tempo (53,5%), 10% de melhoria em todos os parâmetros (40,9%), 50% de melhoria na variabilidade do processo (35,8%) e 5% de melhoria em todos os parâmetros (23,9%).

4.2 Efeito da redução do tamanho do lote e de programas de melhoria contínua na Utilização

A Figura 6 mostra o comportamento do nível de utilização 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 170 peças. Da mesma forma que para as análises realizadas na seção anterior, nesta seção somente um valor da Utilização é utilizado para cada caso analisado. Este valor corresponde ao valor médio da Utilização no momento em que esta se torna constante na Figura 6 (após os esforços de melhoria atingiram seu objetivo final). Simulações resultando em Figuras similares a essa também foram realizadas para as outras duas possibilidades de tamanho de lote testadas nesse estudo (80 e 600 peças). Os resultados deste procedimento, mostrando o impacto na Utilização dos programas para 50% de melhoria nos parâmetros estudados, para as três possibilidades de tamanho de lote testadas, são mostrados na seção 4.2.1. Procedimento semelhante é realizado para se avaliar o impacto de pequenas e conco-

Tabela 1: WIP após a implementação dos programas para 50% de melhoria (tamanhos de lote 80, 170 e 600).

Tamanho de lote	WIP - nenhuma melhoria	WIP - 50% de redução					WIP - 50% de aumento no tempo entre falhas
		de <i>set up</i>	na taxa de defeito	na variabilidade da chegada	no tempo de reparo	na variabilidade do processo	
80	5164,04	1777,49	4089,14	4921,04	4065,51	3316,67	4305,41
170	3163,13	2074,13	2833,16	2993,41	2552,39	2059,76	2655,88
600	5380,62	4708,14	4955,19	5024,86	4043,55	3565	4234,43

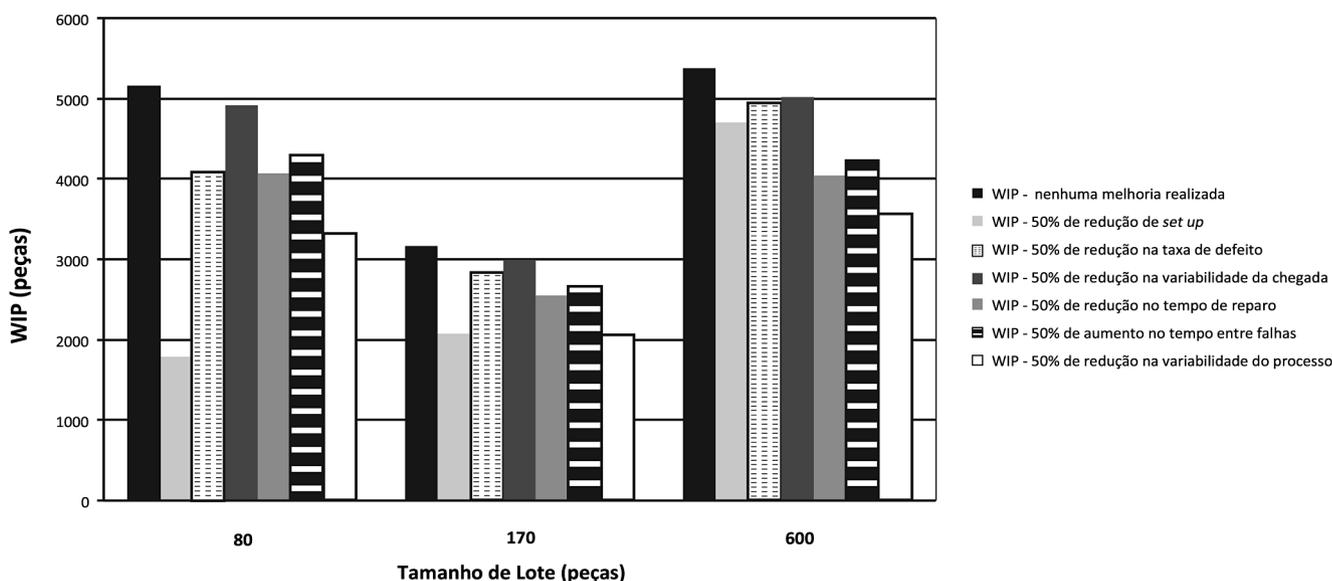


Figura 4: Efeito no WIP da redução do tamanho de lote e dos programas para 50% de melhoria.

mitantes melhorias nos seis parâmetros (casos (viii) a (xi)). Estes resultados são mostrados na seção 4.2.2.

Note na Figura 6 que o nível médio de Utilização para os programas de redução de variabilidade do processo e a taxa de chegada permanecem constantes durante todo o período (comportamento igual ao caso sem a implementação de nenhum programa de melhoria).

4.2.1 Efeito na Utilização da redução do tamanho de lote e dos programas para 50% de melhoria

A Tabela 3 e a Figura 7 mostram o efeito na Utilização da

redução do tamanho de lote e dos programas para 50% de melhoria. Os resultados mostram que:

- 1) Ambos os programas de redução de variabilidade (processo e taxa de chegada das ordens) não têm nenhum efeito na Utilização;
- 2) Para tamanho de lote grande (600, no exemplo), a Utilização é pouco afetada por todos os programas de melhoria estudados. Os programas que fornecem maior redução nos níveis médios de Utilização são os programas para melhoria de 50% nos tempos de *set up* e de reparo, fornecendo somente 2,3% de redução no nível de Utilização médio;

Tabela 2: WIP após a implementação dos programas para melhorias pequenas e conjuntas nos parâmetros estudados (tamanhos de lote 80, 170 e 600).

Tamanho de lote	WIP - nenhuma melhoria realizada	WIP - % de melhoria em todas as variáveis				WIP - 50% de redução	
		5%	10%	15%	20%	<i>set up</i>	variabilidade do processo
80	5164,04	3929,47	3052,18	2403,22	1908,98	1777,49	3316,67
170	3163,13	2684,81	2279,72	1934,62	1639,34	2074,13	2059,76
600	5380,62	4658,45	4032,33	3487,65	3012,73	4708,14	3565

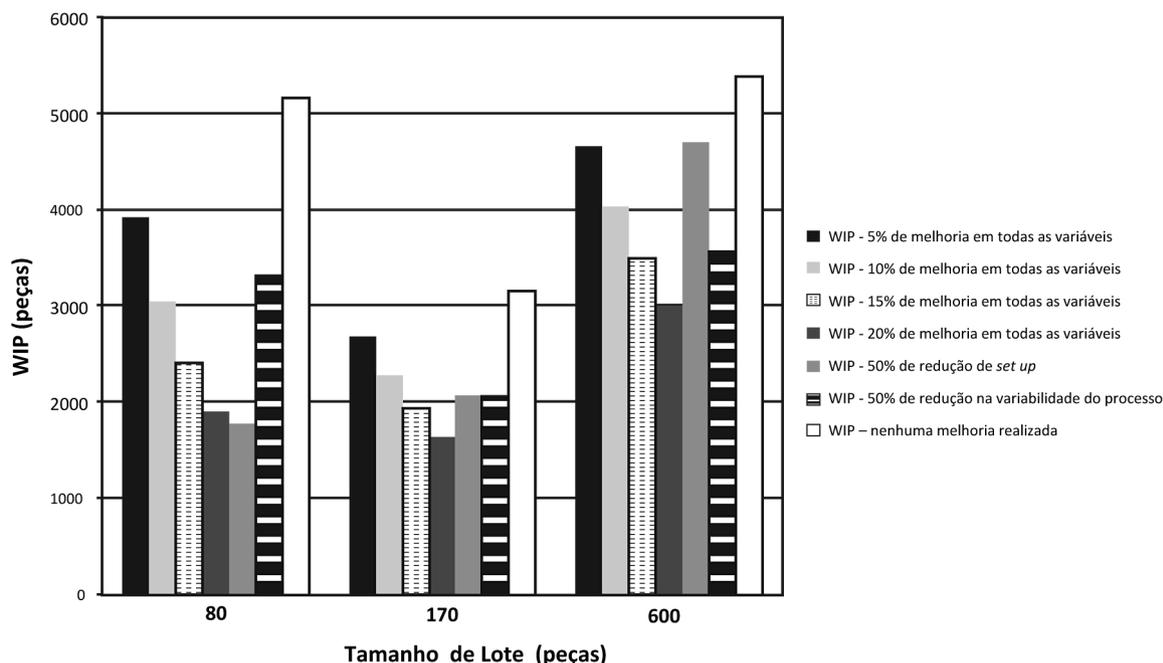


Figura 5: Efeito no WIP da redução do tamanho de lote e dos programas para pequenas melhorias conjuntas nos parâmetros estudados.

3) Para tamanhos de lotes menores (por exemplo 80), o programa para melhoria de 50% nos tempos de *set up* tem forte impacto na redução dos níveis médios de utilização (13,1% de redução), seguido pelo programa para redução de 50% na taxa de defeitos (2,6%).

4.2.2 Efeito na Utilização da redução do tamanho de lote e dos programas para pequenas melhorias conjuntas nos parâmetros estudados

A Tabela 4 e a Figura 8 mostram o impacto na Utilização da redução do tamanho de lote e dos programas para pequenas melhorias conjuntas nos parâmetros estudados. A fim de comparação, também são mostrados nesta seção os resultados referentes aos programas para 50% de melhoria que melhor desempenho tiveram na seção anterior. Os resultados mostram que:

1) Para tamanho de lote grande (600, no exemplo), a Utilização é pouco afetada por todos os programas de melhoria estudados. O programa que fornece maior redução nos níveis médios de Utilização é o programa

de melhoria de 20% em todos os parâmetros conjuntamente, o qual fornece somente 3,4% de redução no nível de Utilização médio;

2) Para tamanhos de lotes menores (por exemplo, 80), o programa para melhoria de 50% nos tempos de *set up* tem forte impacto na redução dos níveis médios de utilização (13,1% de redução), melhor desempenho que o programa de melhoria de 20% em todos os parâmetros conjuntamente (7,4%).

5. CONCLUSÕES

Este artigo apresentou um modelo de simulação para estudar como a implantação de seis diferentes programas de melhoria contínua, juntamente com redução do tamanho de lote de produção, afetam os níveis médios de estoque em processo (WIP) e utilização em um ambiente de produção com máquina simples e com múltiplos produtos.

A utilização de um modelo híbrido SD e *Factory Physics*

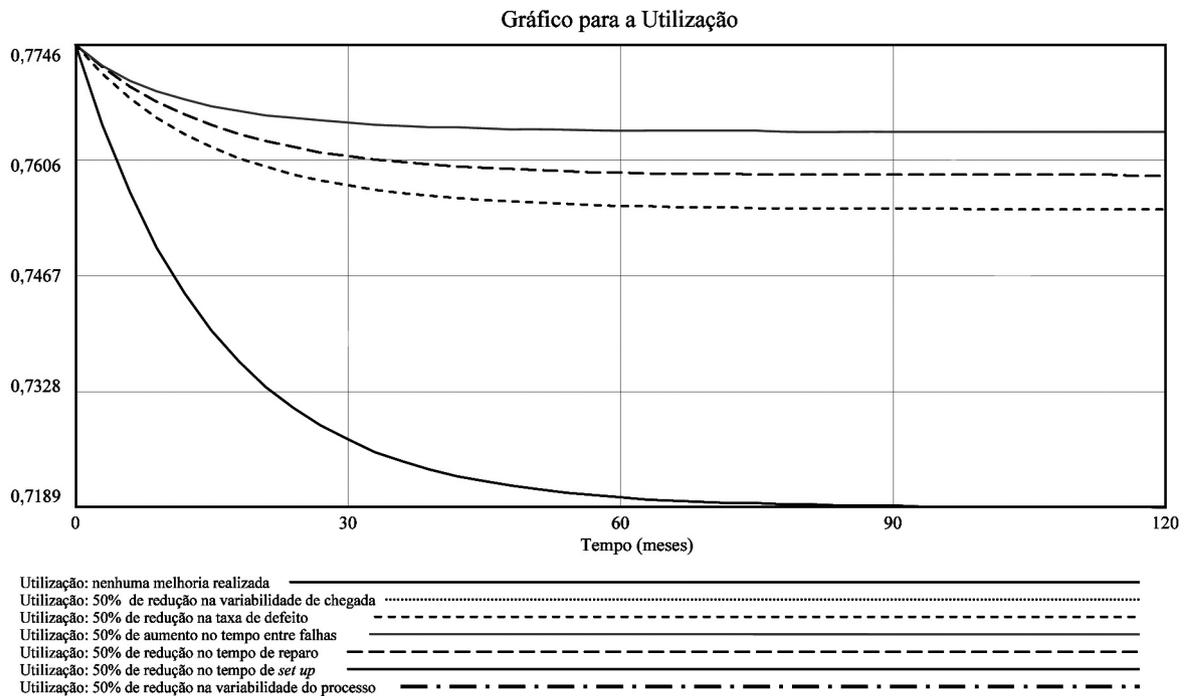


Figura 6: Comportamento da Utilização média ao longo do tempo resultante da implementação dos programas para 50% de melhoria nos parâmetros estudados (tamanho de lote = 170 peças).

fornece uma melhor compreensão de como os esforços de melhoria contínua, direcionados a vários aspectos da manufatura, afetam os sistemas de manufatura, especialmente os níveis médios de WIP e Utilização, fornecendo importantes *insights*. 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:

- Quando os tamanhos de lote de produção são grandes, a redução da variabilidade do processo contribui largamente para a redução do WIP. Conforme os tamanhos de lote de produção são reduzidos, a importância da variabilidade do processo diminui. Neste contexto, o programa de melhoria no tempo de *set up* passa a ser o programa que mais

contribui para a redução do WIP. Também é interessante notar que programas de melhoria de qualidade têm sua importância aumentada conforme são menores os tamanhos de lote de produção utilizados. De maneira oposta, programas de manutenção de máquinas que reduzam o tempo de reparo e aumentem o tempo médio entre falhas têm seu impacto no WIP reduzido conforme tamanhos de lote menores são utilizados. Programas de melhoria na variabilidade da chegada das ordens têm pouco impacto na redução do WIP. Estes resultados fornecem suporte para toda a literatura que defende a importância e a necessidade de programas de redução de variabilidade como, por exemplo, a estratégia Seis Sigma e programas de redução de *set up*, como o programa SMED (*Single Minute Exchange of Die*) idealizado por Shingo (1986).

Tabela 3: Utilização após a implementação dos programas para 50% de melhoria (tamanhos de lote 80, 170 e 600).

Tamanho do lote	Utilização						
	nenhuma melhoria	50% de redução					
		de <i>set up</i>	na taxa de defeito	na variabilidade da chegada das ordens	no tempo de reparo	na variabilidade do processo	50% de aumento no tempo entre falhas
80	90.00%	78.15%	87.69%	90.00%	88.42%	90.00%	88.94%
170	77.46%	71.88%	75.47%	77.46%	75.88%	77.46%	76.40%
600	69.47%	67.89%	67.69%	69.47%	67.89%	69.47%	68.42%

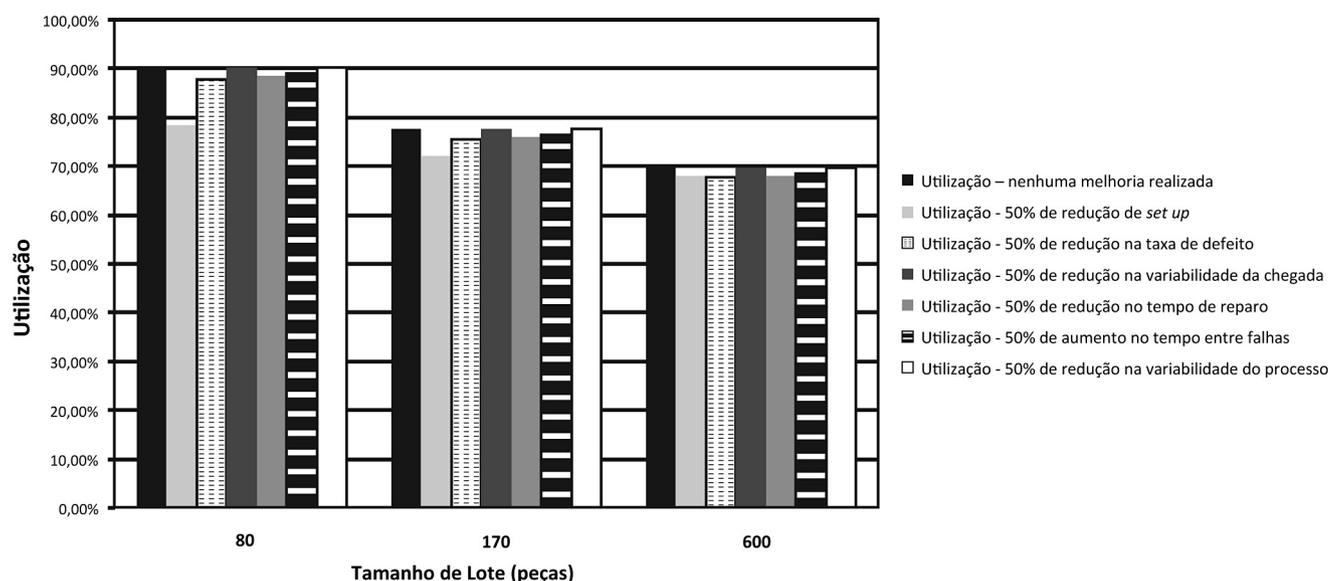


Figura 7: Efeito na Utilização da redução do tamanho de lote e dos programas para 50% de melhoria.

- É preferível, referente à redução no WIP, investir em pequenas melhorias em um grande número de parâmetros do sistema de produção do que se investir na implantação de um grande programa para melhoria de somente um parâmetro do sistema. Esta conclusão independe do tamanho de lote de produção utilizado. Quando se utilizam grandes tamanhos de lote, programas para melhorias de 20% e 15% em todos os seis parâmetros estudados conjuntamente obtiveram melhores resultados com relação à redução de WIP do que qualquer programa para 50% de melhoria em somente um parâmetro. Quando se utilizam pequenos tamanhos de lote, um programa para melhoria de 20% em todos os seis

parâmetros estudados conjuntamente obteve quase que o mesmo resultado com relação à redução de WIP que um programa para 50% de melhoria nos tempos de *set up*. Estes resultados fornecem suporte à literatura sobre o Sistema Toyota de Produção/Manufatura Enxuta, a qual defende que melhorias substanciais nas empresas devem ser conseguidas por meio de pequenos esforços de melhorias contínuas efetuadas em todos os setores da empresa com a participação ativa de todos os funcionários da empresa. Estes resultados também ilustram o porquê de grande parte das modernas práticas gerenciais focarem CI como uma forma de se conseguir benefícios competitivos por meio da redução do WIP.

Tabela 4: Utilização após a implementação dos programas para melhorias pequenas e conjuntas nos parâmetros estudados (tamanhos de lote 80, 170 e 600).

Tamanho de lote	Utilização - nenhuma melhoria realizada	Utilização - % de melhoria em todas as variáveis				
		5%	10%	15%	20%	50%
80	90,00%	88,28%	86,60%	84,95%	83,33%	78,15%
170	77,46%	76,40%	75,37%	74,37%	73,40%	71,88%
600	69,47%	68,83%	68,22%	67,64%	67,08%	67,89%

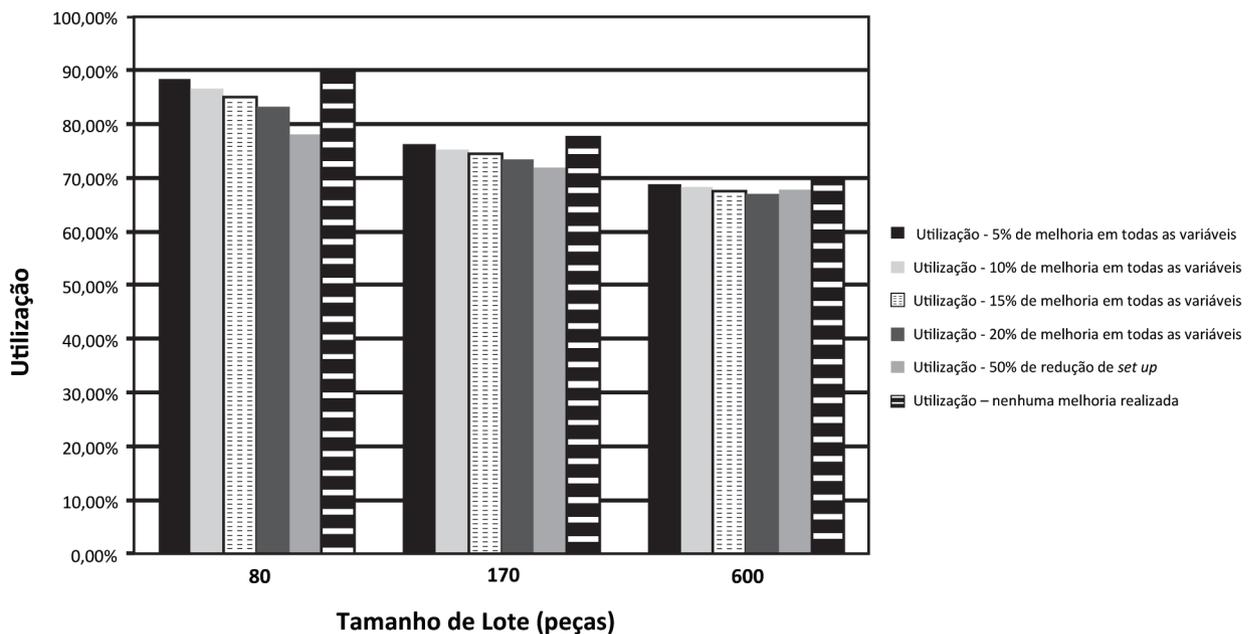


Figura 8: Efeito na Utilização da redução do tamanho de lote e dos programas para pequenas melhorias conjuntas nos parâmetros estudados.

Os gráficos das Figuras 5 e 6 mostram também uma relação convexa entre tamanho de lote de produção e WIP (existe um tamanho de lote ótimo para o qual o nível médio de WIP é mínimo). Esta relação é similar à relação existente entre tamanho de lote e *lead time* (KARMARKAR et al., 1985b), bastante conhecida na literatura sobre Teoria de Filas (VAUGHAN, 2006). A partir desta relação, pode-se concluir que somente esforços para a redução do tamanho de lote – sem se conhecer exatamente a forma da relação entre tamanho de lote e WIP – não garantem, por si sós, redução dos níveis de WIP. Programas de Melhoria Contínua (alguns não necessariamente diretamente relacionados à redução de WIP, como por exemplo redução do tempo de reparo ou melhoria de qualidade) fornecem “caminhos” alternativos para se conseguir redução de WIP. Também pode-se notar a importância de se conhecer a relação entre tamanho de lote e WIP antes de se determinar quanto se deve reduzir no tamanho de lote: em alguns casos, grandes reduções no tamanho de lote (no experimento mostrado, 80 peças), mesmo em conjunto com algum programa de melhoria contínua (nos experimentos mostrados, melhoria na variabilidade, qualidade e tempo até a falha), podem na verdade contribuir para o aumento dos níveis médios de WIP se comparados a um lote maior de peças (nos experimentos efetuados, 170 peças) e nenhuma melhoria implantada (ver Figura 6). Estes resultados fornecem suporte à filosofia *Quick Response Manufacturing* (QRM), proposta por Suri (1998), o qual afirma que tamanhos de lotes de produção de uma única peça, como é defendido pela literatura sobre Manufatura Enxuta, na verdade contribuem, na grande maioria dos casos, para aumentar os

níveis médios de WIP e *lead time*.

- Com relação ao efeito dos programas de melhoria contínua na Utilização, este estudo mostrou que quando grandes tamanhos de lote são utilizados todos os programas de CI avaliados apresentaram pouco ou nenhum efeito no nível médio de Utilização do sistema. Esta conclusão é também válida para a implantação de pequenas melhorias em vários parâmetros ao mesmo tempo. Conforme tamanhos de lote menores são utilizados, programas de melhoria no *set up* apresentam o melhor resultado com relação à redução dos níveis médios de Utilização do sistema.
- Os resultados com relação à Utilização também mostram, como esperado, que conforme os tamanhos de lote são reduzidos a utilização média aumenta. Nestes casos, investimentos em programas de redução de *set up* se mostraram como sendo a melhor alternativa para se tentar manter os níveis de utilização baixos enquanto as reduções de tamanho de lote são efetuadas. Estes resultados, portanto, também fornecem suporte para toda a literatura que defende a importância e a necessidade de programas de redução de *set up*.

Finalmente, deve-se salientar que o modelo híbrido SD/*Factory Physics*, proposto neste artigo, pode ser utilizado na prática por empresas para simular o impacto de programas alternativos e ou combinados de CI em indicadores de desempenho-chave da manufatura como WIP, Utilização, *lead time*, dentre outros. A extensão natural deste artigo é sua ampliação para a modelagem de uma situação com mais estações de trabalho.

Artigo recebido em 08/04/2008

Aprovado para publicação em 10/10/2008

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à Capes pela bolsa de pós doutoramento concedida ao primeiro autor deste texto, que possibilitou o desenvolvido do presente artigo.

REFERÊNCIAS

ADAMS, M., et al. *Simulation As A Tool For Continuous Process Improvement*. Winter Simulation Conference, 1999.

ATTADIA, L. C.; MARTINS, R. A. Medição de desempenho como base para evolução da melhoria contínua. *Produção*, v. 13, n. 2, p. 33-41, 2003.

BAINES, T. S.; D. K. HARRISON. An Opportunity For System Dynamics In Manufacturing System Modeling. *Production Planning and Control*, v. 10, n. 6, p. 542-552, 1999.

BERGER, A. Continuous Improvement And Kaizen: Standardization And Organizational Designs. *Integrated Manufacturing Systems*, v. 8, n. 2, p. 110-117, 1997.

BESSANT, J.; D. FRANCIS. Developing Strategic Continuous Improvement Capability. *International Journal of Operations & Production Management*, v. 19, n. 11, p. 1106-1119, 1999.

BHUIYAN, N.; A. BAGHEL. An Overview Of Continuous Improvement: From The Past To The Present. *Management Decision*, v. 43, n. 5, p. 761-771, 2005.

- CAFFYN, S. Development Of A Continuous Improvement Self-Assessment Tool. *International Journal of Operations & Production Management*, v. 19, n. 11, p. 1138-1153, 1999.
- FORRESTER, J. W. *Industrial Dynamics*. Cambridge, MA: MIT Press, 1962.
- HOPP, W.; M. L. SPEARMAN. *Factory Physics*. Boston: Irwin, 2001.
- IMAI, M. *Kaizen - The Key To Japan's Competitive Success*. Nova York: Random House, 1986.
- JHA, S. et al. The Dynamics Of Continuous Improvement: Aligning Organizational Attributes And Activities For Quality And Productivity. *International Journal of Quality Science*, v. 19, n. 10, p. 1010-1033, 1996.
- KARMAKAR, U. S. et al. Lot Sizing and Lead Time Performance in a Manufacturing Cell. *Interfaces*, v. 15, n. 2, p. 1-9, 1985b.
- KERRIN, M. Continuous Improvement Capability: Assessment Within One Case Study Organisation. *International Journal of Operations & Production Management*, v. 19, n. 11, p. 1154-1167, 1999.
- LASDON, L. S. *Optimization theory for Large Systems*. Nova York: Macmillan, 1970.
- 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.
- LIKER, J. *The Toyota Way: 14 Management Principles from the World's Greatest Manufacturer*. Nova York: McGraw-Hill, 2004.
- 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.
- MAPES, J. et al. Process Variability And Its Effects On Plant Performance. *International Journal of Operations & Production Management*, v. 20, n. 7, p. 792-808, 2000.
- MESQUITA, M.; ALLIPRANDINI, D. H. Competências essenciais para melhoria contínua da produção: estudo de caso em empresas da indústria de autopeças. *Gestão & Produção*, v.10, n.1, p. 17-33, 2003.
- PANDE, P. et al. *The Six Sigma Way: How GE, Motorola and Other Top Companies are Honing Their Performance*. Nova York: McGraw-Hill, 2000.
- PENTILLÄ, M. J. Reducing variability in a semiconductor manufacturing environment. Department of Electrical Engineering and Computer Science. Boston, Massachusetts Institute of Technology. Master: 75, 2005.
- SAVOLAINEN, T. I. Cycles of continuous improvement: Realizing competitive advantages through quality. *International Journal of Operations & Production Management*, v. 19, n. 11, p. 1203-1222, 1999.
- SCHOEMIG, A. K. *The Corrupting Influence of Variability in Semiconductor Manufacturing*. Winter Simulation Conference, 1999.
- SHINGO, S. *A Revolution in Manufacturing: The SMED System*. Cambridge: Productivity Press, 1986.
- SPEARMAN, M. L.; HOPP, W. J. Teaching operations management from a science of manufacturing. *Production and Operations Management*, v. 7, n. 2, p. 132-145, 1998.
- STANDRIDGE, C. R. *How factory physics helps simulation*. Proceedings of the 2004 Winter Simulation Conference, 2004.
- STERMAN, J. D. *Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World*. Nova York: McGraw-Hill, 2000.
- SURI, R. *Quick Response Manufacturing: A Companywide Approach to Reducing Lead Times*. Portland: Productivity Press, 1998.
- TESFAMARIAM, D.; LINDBERG, B. Aggregate analysis of manufacturing systems using system dynamics and ANP. *Computers & Industrial Engineering*, v. 19, p. 98-117, 2005.
- 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. et al. *The machine that changed the world*. Nova York: Harper Perennial, 2000.

SOBRE OS AUTORES

Moacir Godinho Filho

Universidade Federal de São Carlos
 Departamento de Engenharia de Produção
 End.: Via Washington Luiz, km 235 - Caixa Postal 676 - São Carlos - SP - Brasil - 13565-905
 E-mail: moacir@dep.ufscar.br

Reha Uzsoy

Department of Industrial and Systems Engineering
 End.: North Carolina State University - Campus Box 7906 - Raleigh - NC - 27695-7906