

Aplicação de técnicas de simulação em projetos de manufatura enxuta

Application of simulation techniques in lean manufacturing projects

Clênio Senra de Oliveira

Mestre em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Minas Gerais
Rua Donana Lima, 189
Itaúna, MG, Brasil CEP 35.680-373
clenios@yahoo.com.br

Resumo

A forte competição evidenciada atualmente no mercado tem forçado as empresas de manufatura a buscarem maior eficiência e eficácia na administração de seus processos de produção. Diversas metodologias e técnicas foram e continuam sendo desenvolvidas. A manufatura enxuta, mundialmente aceita como originária do desenvolvimento dos processos de produção da Toyota, também conhecida como Sistema Toyota de Produção, tem sido amplamente utilizada como base filosófica para a melhoria dos processos de produção industrial. Com diversas técnicas aplicadas, tem contribuído para o aumento da competitividade das organizações que nessa filosofia têm se baseado. Este trabalho apresenta os principais conceitos e diretrizes relacionadas à manufatura enxuta e ao uso da técnica de simulação neste tipo de projeto.

Palavras-chave: manufatura enxuta, simulação, Sistema Toyota de Produção.

Abstract

The strong competition observed nowadays in the market has forced the manufacturing enterprises to look for more efficiency and efficacy in the production process administration. Many methodologies and techniques were and are been developed. The lean manufacturing strategy, globally accepted as originated from the development of the Toyota production processes, also known as Toyota Production System, has been extensively applied as philosophical base to improve the industrial production process. With a wide variety of techniques applied, has contributed to increase the competitiveness of organizations that have based on this philosophy. This paper presents the concepts and guideline related to the lean manufacturing philosophy and the application of simulation techniques in this kind of project.

Key words: lean manufacturing, simulation, Toyota Production System.

1. Introdução

A busca da competitividade no atendimento às necessidades do cliente final tem gerado a necessidade de melhor organizar os processos de produção e logística, tornando mais ágil toda a cadeia do processo produtivo. A pesquisa por um processo produtivo bem estruturado, com baixos níveis de estoques intermediários, maior produtividade e menores prazos de entrega, tem sido o principal desafio imposto às empresas do setor industrial.

O paradigma da manufatura enxuta tem sido amplamente utilizado em alguns setores industriais, como o automobilístico que, com suas linhas de montagem de componentes, apresenta maior facilidade para implementar esta estrutura de produção.

Este trabalho parte do pressuposto que a utilização de técnicas de simulação em projetos de implementação da estratégia da manufatura enxuta, contribui em muito para o desenvolvimento de processos mais econômicos, garantindo um melhor atendimento aos clientes, tornando as empresas mais competitivas. Tem como objetivo apresentar os termos e conceitos da manufatura enxuta, com base no Sistema Toyota de Produção, facilitando o entendimento de como as empresas poderão trabalhar para melhorar seus processos produtivos, de forma a conseguir a competitividade hoje necessária para a sobrevivência no mercado.

A simulação permite a visualização dos resultados de uma mudança sem, contudo, alterar a realidade do sistema de produção. Possui a vantagem do tratamento estocástico das variáveis de processo, pois a utilização de valores médios dos tempos de processos produtivos para o estudo das linhas de produção não assegura uma representação confiável do sistema de produção, pois estes tempos são parcialmente aleatórios e devem ser tratados como tal. A utilização da simulação para desenvolvimento de projetos de melhoria possibilita uma experimentação a baixo custo, contribuindo para a melhoria dos processos produtivos e também para a tomada de decisão.

A primeira parte deste trabalho apresenta uma referência aos conceitos da manufatura enxuta, apresentando os cinco princípios do pensamento enxuto, os benefícios alcançados pelas organizações bem sucedidas nesta iniciativa e as técnicas aplicáveis à manufatura enxuta. Na segunda parte são apresentados os conceitos de simulação computacional, vantagens de seu uso e os softwares comerciais hoje disponíveis no mercado. A terceira parte discute a utilização da simulação em projetos de manufatura enxuta, apresentando os trabalhos já desenvolvidos nesta área.

2. Manufatura Enxuta

2.1. A origem do termo

James P. Womack, Daniel T. Jones e Daniel Ross, estudaram os processos de produção de diversas organizações ao redor do mundo e relataram o resultado deste estudo de *benchmarking* no livro *A Máquina que Mudou o Mundo* (Womack et al., 1992). Eles encontraram “uma forma melhor de organizar e gerenciar nossos relacionamentos com clientes, cadeia de fornecedores, desenvolvimento de produtos e operações de produção” e utilizaram o termo produção enxuta (*lean production*), para denominar essa abordagem.

Hoje o paradigma da manufatura enxuta é discutido amplamente na literatura. É considerado como aplicável à maioria dos processos de produção, trazendo benefícios como melhora da produtividade, maior valor agregado aos produtos, redução de desperdícios e maior satisfação dos clientes. Baseia-se no pioneirismo do Sistema Toyota de Produção (TPS), cujos princípios enxutos podem ser resumidos como valor – valor para o cliente, fluxo de valor – onde realmente se cria este valor, fluxo – fazer com que as etapas que criam valor fluam, puxar – produzir apenas o que os clientes ou os processos seguintes solicitam e a perfeição – a busca pela melhoria contínua, removendo cada vez mais os desperdícios (Womack e Jones, 2004).

2.2. Desperdícios no sistema de produção

O pensamento enxuto, em sua essência, busca identificar e eliminar todos os desperdícios existentes na cadeia de produção, concentrando esforços nas atividades que criam valor para o cliente. De acordo com Womack e Jones (2004), desperdício é “qualquer atividade humana que absorve recursos, mas não cria valor”. Para Ohno (1997), “desperdício se refere a todos os elementos de produção que só aumentam os custos sem agregar valor – por exemplo, excesso de pessoas, de estoques e de equipamentos”.

Alguns dos desperdícios mais comuns encontrados em um sistema de manufatura são:

- Excesso de estoques de matéria prima;
- Excesso de produção, tanto de produto semi-elaborado como também de produto final;
- Movimentação excessiva, tanto de materiais como também de operadores;
- Fila de espera, aguardando liberação das máquinas para processamento, tanto de materiais como também de operadores;
- Tempo de transporte de matéria prima, produto semi-elaborado e produto final dentro dos processos;
- Perdas dentro do processo, como exemplo, demora no aquecimento de máquinas ou mesmo de processos não necessários;
- Correção de falhas de produção devido à má qualidade ou ao não atendimento aos requisitos do cliente.

A eliminação de todo desperdício existente nos processos das organizações leva a uma maior eficiência. Analisando todas as fontes de desperdícios identificadas anteriormente, não existem dúvidas sobre os resultados que podem ser alcançados com a implementação da manufatura enxuta. O desenvolvimento da compreensão dos gerentes e supervisores em relação ao que é desperdício e as suas causas, é fundamental para o sucesso de uma iniciativa *lean*.

2.3. Benefícios *lean*

As organizações que têm se baseado na filosofia da manufatura enxuta na busca por melhorar seus processos, têm tido como resultados principais:

- Redução no prazo de desenvolvimento de novos produtos;
- Redução no número de pedidos processados em regime de urgência;
- Melhoria da qualidade do produto final;
- Redução do tempo de entrega;
- Aumento na satisfação dos clientes;
- Melhora no relacionamento da área comercial com a área de produção;
- Redução do estoque de produto semi-elaborado entre os processos e de produto final nos depósitos;

- Redução nos espaços requeridos para estocagem de produtos;
- Redução do tempo de troca de ferramentas para mudança do *mix* de produtos;
- Visão clara das capacidades do sistema de produção;
- Aumento da produtividade e da capacidade de produção;
- Redução dos custos operacionais de produção;
- Aumento na segurança do trabalho e da saúde ocupacional;
- Melhora no nível de moral dos trabalhadores.

2.4. Técnicas aplicadas à manufatura enxuta

Observando os processos de produção, com o foco nas operações que realmente criam valor para o cliente, muitos pontos críticos nos processos se tornarão aparentes. Para minimizar ou até mesmo eliminar estes pontos críticos, algumas técnicas foram e continuam sendo desenvolvidas. Pode ser que não seja necessária uma grande revolução na empresa, mas é importante conhecer estas técnicas e aplicar aquelas mais convenientes ao processo produtivo em estudo.

Just-in-time (JIT): é o primeiro pilar do Sistema Toyota de Produção. Em um processo de fluxo, as partes corretas necessárias à montagem alcançam a linha de produção no momento em que são necessários, na quantidade necessária e isentas de defeitos. Segundo Vollmann *et al.* (1997), *JIT* reúne não só os conceitos e técnicas do planejamento e controle da produção, mas também é uma base filosófica para administração da produção, trazendo benefícios como redução da complexidade do planejamento de materiais, da necessidade de rastreamento no chão de fábrica, dos estoques em processos e da logística de suprimentos.

Autonomação (*jidoka*): segundo pilar do Sistema Toyota de Produção, a autonomação significa automação com um toque humano. São dispositivos instalados nas máquinas que irão impedir a produção de produtos com defeitos. O sistema de conferência desenvolvido por Sakichi Toyoda, fundador da Toyota, no seu tear auto-ativado foi a base do desenvolvimento dos sistemas de autonomação como, por exemplo, os dispositivos de parada automática, dispositivos de segurança e dispositivos a prova de erros. Estes dispositivos permitem que a máquina trabalhe sem a supervisão direta do operador, que passa a supervisionar a produção de diversos equipamentos ao mesmo tempo.

Nivelamento da produção: busca distribuir a produção de forma homogênea ao longo da jornada de trabalho. Em uma linha de montagem de automóveis, o número total de carros a serem produzidos no mês será dividido pelo número de dias disponíveis para produção, nivelando o número de carros a serem produzidos por dia de trabalho. Podemos observar em alguns sistemas não nivelados, a produção mais apertada em alguns períodos do mês, implicando em trabalho em horário extraordinário na proximidade da data de entrega do pedido e uma ociosidade após a entrega. "A fim de evitar flutuações na produção,... precisamos tentar manter a flutuação na linha de montagem final em zero" (Ohno, 1997).

Sistema puxado: no sistema *puxado*, o processo final retira as quantidades necessárias do processo precedente num determinado momento e este procedimento é repetido na ordem inversa passando por todos os processos anteriores. Já no sistema “empurrado”, o planejamento da produção é feito com base na previsão de demanda e nos estoques disponíveis, produzindo o volume necessário para atender aquela demanda total. O TPS é um sistema puxado. “O sistema de produção puxado, onde o processo subsequente busca os produtos no processo precedente, não sendo este dedicado a apenas um tipo de produto, requererá trocas de ferramentas com maior frequência” (Ohno, 1997).

Kanban: são instruções colocadas num pedaço de papel para comunicar de forma clara e direta, informações necessárias ao operador da estação de trabalho, como por exemplo, quantidade a produzir, quantidade retirada, quantidade recebida, código do item, estoque mínimo, estoque atual, local de armazenagem. O *kanban* funciona como um pedido de produção para os processos anteriores e apresenta como vantagens: organiza a produção de forma a se produzir apenas o necessário; reduz os estoques intermediários e de matéria prima; reduz o tamanho dos depósitos e das equipes dedicadas a controle e movimentação de estoques; facilita o controle gerencial e de supervisão de processos.

Controle visual: são sistemas de informação visual criados para manter baixa ou prevenir a superprodução. Como exemplo tem-se os quadros sinalizadores de parada das linhas de produção, colocados em locais visíveis, que “quando as operações estão normais, a luz verde está ligada; quando um operário deseja ajustar alguma coisa na linha e solicita ajuda, ele acende uma luz amarela. Se uma parada na linha for necessária para corrigir um problema, a luz vermelha é acesa” Ohno (1997). São também as folhas de descrição da operação de trabalho afixadas na estação de trabalho e as caixas para reposição de estoque colocadas ao lado do posto de trabalho com os componentes necessários e seu cartão *kanban*.

Cinco por quês: base científica do Sistema Toyota, é uma técnica que ajuda a descobrir a raiz de um problema e corrigi-lo. Segundo Ohno (1997), os cinco por quês é um método adaptado do hábito de observação de Sakichi Toyoda. Ele passava horas e mais horas observando os teares que as mulheres mais velhas tinham em casa para tecer à mão, buscando melhorias que posteriormente foram introduzidas em seus teares. Ohno (1997) recomenda: “fique na área de produção durante todo o dia e observe – eventualmente você irá descobrir o que deve ser feito... entendendo o que é desperdício... descobrimos maneiras de transformar movimento em trabalho... perguntando-se cinco vezes por quê” Ohno (1997).

Troca rápida de ferramentas (*setup*): quando se trata de trabalhar com pequenos lotes ou mesmo sob encomenda, o tempo para troca de produto na linha deve ser extremamente curto, para não comprometer a disponibilidade das máquinas para produção. São sistemas que reduzem de horas para minutos, uma mudança na linha de produção. Segundo Womack e Jones (2004), Taiichi Ohno e seus colaboradores desenvolveram a troca rápida de ferramentas de um produto para o próximo, dimensionando corretamente as máquinas para que as etapas de processamento pudessem ser realizadas imediatamente adjacentes umas das outras, enquanto o objeto em produção era mantido em fluxo contínuo.

Balanceamento das linhas de produção: Ohno (1997) destaca como condição básica para o funcionamento do TPS, o estabelecimento de uma sincronia nos processos de produção, processo por processo atuando de forma balanceada, cadenciada, fazendo fluir toda a produção. O desbalanceamento das

linhas de produção pode ser observado através do cálculo dos *tempos de ciclo* (tempo necessário para realizar um processo de produção) das operações de produção. O desenvolvimento de um sistema de produção com tempos de ciclo nivelados poderá exigir um novo *lay out*, a redistribuição da carga de trabalho entre os operários da linha de produção e eliminação da movimentação excessiva de materiais.

Manufatura celular: consiste em agrupar os processos de produção que compõem uma determinada família de produtos, numa célula de produção, com distâncias mínimas entre os postos de trabalhos e balanceando-se os tempos de ciclo dos processos, buscando assim, um fluxo de produção próximo do contínuo. Com família de produtos bem definidas, a criação dessas células de produção se mostra mais produtiva que o *lay out* tradicional. Vollmann *et al.* (1997) destacam:

Células são tipicamente no formato de U para aumentar a interação entre os trabalhadores e reduzir o manuseio de materiais. Trabalhadores treinados podem operar diversas máquinas. A manufatura celular pode tornar a capacidade de produção mais flexível, permitindo mudanças mais ágeis no mix de produção.

Manutenção produtiva total: as máquinas devem estar permanentemente em condições operacionais; isto é conseguido através de um conjunto de técnicas de manutenção, onde todos participam, não só a equipe de manutenção, mas também operadores e demais envolvidos no processo de produção. Vollmann *et al.* (1997) destacam que o foco é aplicar os mesmos cuidados abordados na qualidade do produto para a qualidade dos processos e equipamentos. Ohno (1997) destaca que mesmo uma máquina mais antiga pode dar condições de atender às necessidades da produção. Por isto a manutenção é parte integrante do TPS, evitando problemas nas máquinas, nos processos e na qualidade.

Métodos a prova de falhas: são ferramentas e sistemas de controle desenvolvidos para garantir a qualidade de cada parte produzida, em cada um dos processos, ou seja, a qualidade é avaliada durante sua criação. Com isto se reduz drasticamente o *custo da não qualidade*. É também conhecido como *poka-yoke* (à prova de defeitos) ou *baka-yoke* (à prova de bobeira). Ohno (1997) dá como exemplo de dispositivos à prova de erros, a instalação de instrumentos do tipo passa-não passa, sensores de defeitos que não permitem que a máquina opere e dispositivos para barrar erros de produção em processos anteriores.

Trabalhadores com múltiplas habilidades: a aplicação das técnicas de manufatura enxuta nos processos produtivos, normalmente acarreta mudanças de *lay out*, do fluxo de produção, na cadência do ritmo de trabalho, bem como também do número de máquinas por operador. Tudo isso poderá exigir que o operário passe a supervisionar mais de uma máquina, e não apenas trabalhar em um único posto de trabalho, em uma determinada máquina. Deverá então ser treinado nas diversas operações que forem necessárias, desenvolvendo assim suas habilidades e mudando a organização do trabalho de monofuncional para multifuncional.

Trabalho padronizado: Womack e Jones (2004) definem como trabalho-padrão: “cada aspecto da tarefa é analisado, otimizado e então executado sempre exatamente da mesma forma, de acordo com um padrão de trabalho”. Para a criação de um procedimento de trabalho padronizado, é importante a vivência de seu criador no chão de fábrica, como observador participante. O procedimento deverá ser de fácil entendimento,

devendo ser testado e revisado várias vezes antes da emissão final e do treinamento dos operadores. Ohno (1997) destaca que a padronização do trabalho não deve ser estabelecida de cima para baixo, mas pelos próprios operários da produção, reduzindo o risco de se padronizar operações erradas.

Mapeamento do fluxo de valor: é fundamental para o sucesso da iniciativa *lean* que gerentes, supervisores e operadores de chão de fábrica enxerguem e compreendam o fluxo de valor, ou seja, aquelas operações que realmente agregam valor aos produtos. Rother e Shook (2003) desenvolveram uma metodologia para facilitar o mapeamento do fluxo de valor, de forma a possibilitar a eliminação dos desperdícios, com conseqüente criação de valor. Consiste em “seguir a trilha de produção de um produto, desde o consumidor até o fornecedor, e cuidadosamente desenhar uma representação visual de cada processo no fluxo de material e informação”, identificando-se os desperdícios que deverão ser tratados.

5S: a organização das áreas de produção é fundamental e o programa 5S se mostra eficiente no atendimento a este quesito. Sujeiras e itens desnecessários são eliminados e todas as ferramentas e componentes têm um local para armazenamento identificado e organizado. O programa se baseia em 5 termos japoneses, que começam com a letra S e relacionados pelo Lean Institute Brasil (2003) como: *Seiri* (senso de utilização) descarta os itens desnecessários; *Seiton* (senso de organização): organiza os itens necessários; *Seiso* (senso de limpeza); *Seiketsu* (senso de padronização): padronização dos três primeiros Ss; *Shitsuke* (senso de autodisciplina): disciplina para manter os outros quatro Ss.

Kaizen: termo japonês que significa “melhoria incremental contínua” (Womack e Jones, 2004). São atividades normalmente realizadas por grupos de funcionários da organização, que atuam no sentido de eliminar os desperdícios ou problemas de produção identificados nos processos. A utilização da técnica de mapeamento do fluxo de valor normalmente expõe problemas que necessitam de intervenções, ou seja, os pontos onde um evento *kaizen* seria apropriado. Neste caso, as equipes vão para as áreas de produção e buscam identificar melhores formas de trabalho, através do desenvolvimento de um novo *lay out*, equipamentos de transporte, sistema de estocagem, porém de forma criativa, tentando aproveitar ao máximo os recursos existentes na organização.

Linha de produção flexível: o mercado se apresenta cada vez mais diversificado, com os clientes exigindo muitas opções de compra. O desenvolvimento de linhas de produção flexíveis permite o atendimento dos pedidos dos clientes em menor prazo e é fundamental para uma maior eficiência dos sistemas de produção (Ohno, 1997). A flexibilização exige sistemas de troca rápida de ferramentas, manufatura celular, manutenção produtiva total, bem como outras técnicas comentadas anteriormente. Empresas de ponta estão começando a entender os requerimentos necessários para a flexibilidade, em relação ao tipo e volume de produto a produzir (Vollmann *et al.*, 1997). Gerwin (2005) desenvolveu medidas operacionais para medir a flexibilidade frente às incertezas geradas devido à variabilidade da demanda, aos diferentes ciclos de vida dos produtos, à parada de máquinas e aos tipos de matéria prima.

3. Simulação Computacional

3.1. Conceituação

Simulação é a utilização, normalmente em um computador, de um modelo que representa o processo real ou sistema, com o objetivo de análise do comportamento deste sistema. De acordo com Banks *et al.* (2005): “simulação é a imitação de uma operação de um processo ou sistema reais”. É utilizada para testar alternativas de mudanças sem, contudo, alterar o sistema real, como também para identificação de gargalos nos processos produtivos. Pode também ser utilizada para simular novos sistemas, antes de suas implementações. Como exemplo saber como a contratação de mais um funcionário para um setor irá aumentar a capacidade de produção.

É uma experimentação simples, que pode tomar a forma de questões do tipo “E se fizéssemos esta mudança, qual seria do impacto no sistema?”. Por exemplo, em um projeto de manufatura enxuta, pode-se avaliar o resultado esperado com uma mudança de *lay out*.

Pidd (1998) declara que:

os métodos de simulação computacional têm se desenvolvido desde o início da década de 60 e pode ser uma das ferramentas analíticas mais comuns, usadas na ciência do gerenciamento. Os princípios básicos são suficientemente simples. O analista constrói um modelo do sistema de interesse, cria os programas computacionais que incorporam o modelo e usa um computador para imitar o comportamento do sistema quando sujeito a uma variedade de políticas operacionais. Desta maneira, a política mais desejável poderá ser selecionada.

A simulação é utilizada especialmente para sistemas mais complexos, onde métodos algébricos, teorias de probabilidade e cálculo diferencial não são suficientes para solucionar problemas matematicamente (Banks *et al.*, 2005).

Por isso estudos de simulação têm sido aplicados na simulação de processos da indústria de manufatura, simulação de sistemas públicos (exemplo bancos), sistemas de transporte (logística, transporte de passageiros), na mineração e siderurgia.

3.2. Vantagens da simulação

Hoje se vivencia um processo constante de desenvolvimento dos softwares de simulação, que estão cada vez mais fáceis de usar, permitindo uma modelagem e simulação em menor prazo e uma visualização dos resultados dos sistemas estudados se uma ou outra alternativa de mudança fosse adotada.

O estudo de processos através da simulação computacional apresenta como principais vantagens:

- Simulação de um sistema que ainda está em fase de projeto, antes de sua construção, para observação do comportamento operacional;
- Suporte à análise econômico-financeira de investimentos em projetos envolvendo novos equipamentos e processos;
- Teste de novas políticas e procedimentos operacionais sem interrupção do sistema real;
- Teste de condições de segurança associadas às mudanças a serem implementadas;

- Determinação e estudos de gargalos existentes no sistema;
- Determinação de como o sistema realmente opera ao invés de como as pessoas pensam que ele opera;
- Em consequência dos pontos acima tratados, tem-se um menor custo da simulação se comparado com o custo de experimentações diretas, que envolvem grandes somas de dinheiro e de pessoas, nem sempre alcançando os resultados desejados.

3.3. Linguagens e softwares de simulação

Pidd (1998) discorre sobre as mudanças nos métodos computacionais:

Quando os métodos de simulação discreta foram inicialmente desenvolvidos, os processos de programação computacional e de obtenção dos resultados dos programas eram trabalhosos e altamente especializados. Até meados da década de 70, os computadores eram grandes e caros e operados em forma de lotes. Deste modo quem escrevia o programa de simulação teria de desenvolver o programa na forma de códigos, ter o programa perfurado em cartões, alguém inseria os cartões no computador e então esperava pelos resultados. Frequentemente levava-se um dia inteiro para correr duas simulações nos computadores comerciais. Os resultados, quando apareciam, eram normalmente impressos em uma impressora de linha. Hoje em dia, a maioria das simulações é desenvolvida em diversos ambientes computacionais. Usuários têm como certo que programas e dados podem ser diretamente alimentados em um computador através do teclado ou com a ajuda de algum dispositivo como, por exemplo, o próprio mouse. Eles também estão acostumados a ver os resultados dos programas de computador apresentados e manipulados na tela do monitor ao contrário de ter que lidar com pilhas de papel impresso. Inevitavelmente, estas mudanças tecnológicas têm alterado os métodos da simulação discreta e eles afetam o analista como também o usuário.

Os softwares atualmente comercializados não requerem computadores de alto desempenho e podem ser utilizados pelo próprio pessoal do processo, sem necessitar de analistas especializados ou mesmo do desenvolvimento de um programa computacional. A interface do usuário com o software de simulação é feita através de itens gráficos que representam as diversas entidades (ou processos) do sistema que está sendo simulado bem como suas interações. É como fazer um filme do processo e observar o que ocorre quando alterações são realizadas. É também fazer com que o relógio ande mais rápido, para simular períodos longos de tempo.

Banks *et al.* (2005) divide as linguagens e os softwares usados para desenvolver modelos de simulação em três categorias: linguagens de programação de propósito geral, (C++ e Java), linguagens de programação de simulação (GPSS/H™, SIMAN V® e SLAN II®) e ambientes de simulação (Arena, AutoMod, Extend, Flexsim, Micro Saint, ProModel, Quest, Simul8 e Witness). Pidd (1998) complementa as linguagens de programação de propósito geral: Basic, Visual Basic, C e Turbo Pascal.

Pidd (1998) apresenta um programa de simulação de eventos discretos, com 3 partes, que também se assemelham aos programas comerciais utilizados para este fim:

- (1) *Programa executivo: tem o controle da simulação e sua tarefa é assegurar que as entidades e recursos do modelo engajem na atividade certa no momento certo da simulação; fornecido pelo provedor do sistema;*
- (2) *Modelo lógico: construído pelo modelador; descreve como as entidades e recursos se interagem durante a simulação; e*
- (3) *Ferramentas gerais: conjunto de ferramentas gerais como, por exemplo, funções de amostragem aleatória e de apresentação gráfica; podem ser usadas tanto pelo programa executivo como pelo modelo lógico e são fornecidas pelo provedor do sistema.*

As linguagens de programação de propósito geral necessitam de programadores experientes, tanto no desenvolvimento do programa, que inclui entendimento do processo e sua modelagem, como também na análise dos resultados da simulação. Possuem sub-rotinas, procedimentos e outras funções em sua biblioteca, facilitando a modelagem computacional. Nos ambientes de simulação ou softwares comerciais já vêm agregados *templates* de acordo com as áreas de aplicação, que facilitam a programação, como por exemplo, ícones de correias transportadoras, caminhões e outros sistemas de manufatura. Isto permite que o cliente, com um conhecimento razoável sobre o processo em estudo e sobre modelagem e simulação, simule e analise os resultados da simulação.

Os ambientes de simulação ou softwares comerciais citados anteriormente têm apresentado mudanças ao longo dos anos, agregando ferramentas que facilitam a programação e análise de resultados, bem como corrigindo problemas de versões anteriores. O site da *Winter Simulation Conference* (<http://www.wintersim.org>) tem um espaço reservado aos produtores desses softwares comerciais, para que eles divulguem o produto e suas especificações. Importante conhecer a aplicação para poder identificar qual linguagem ou pacote de software é mais adequado.

Independente da linguagem ou software utilizado na simulação, esta deverá ser uma representação fiel da realidade do sistema em estudo e permitir a análise dos resultados da simulação.

4. Uso de Simulação em Projetos de Manufatura Enxuta

4.1. Justificativa

Em projetos de manufatura enxuta, é comum realizar o mapeamento do fluxo de valor, tendo como resultado o mapa do estado atual, que depois de analisado pela equipe de projetos, será redesenhado, apresentando o mapa do estado futuro. São então programados os eventos *kaizen* para implementação das melhorias.

Porém, essa forma de analisar, propor e implementar melhorias entra normalmente num ciclo de tentativa e erro da experimentação direta, onde podemos identificar como principais falhas:

- As equipes *kaizen* nem sempre são conhecedoras do processo em estudo ou estão preparadas para análise de processos;

- O mapeamento do fluxo de valor é focado no momento, ou seja, são dados instantâneos e, quando trabalhando com dados históricos, utilizam a média, que não representa o comportamento estocástico do sistema;
- Os eventos *kaizen* são normalmente caracterizados por um envolvimento de grande número de pessoas de diversas áreas e por aquisições imediatas de equipamentos e serviços, alterando os processos, *lay out*, criando sistemas à prova de erros.

Como resultado de tudo isso, temos a implementação de projetos que custam caro e não trazem o retorno visualizado no mapa do estado futuro.

Pidd (1998) declara:

Simulação por computador envolve a experimentação em um modelo computacional de algum sistema. O modelo é usado como veículo para experimentação, freqüentemente numa forma de tentativa e erro para demonstrar os efeitos de várias políticas desejadas. Desta maneira, aquelas que produzem os melhores resultados no modelo, poderiam ser implementadas no sistema real.

Este trabalho parte de 2 fortes premissas:

- A aplicação dos conceitos da manufatura enxuta nos processos produtivos torna as empresas mais organizadas e competitivas;
- A simulação permite a visualização, a baixo custo, das implicações de mudanças nos processos.

Portando, a utilização de simulação em projetos de manufatura enxuta, dará à alta e média gerência, a base para a tomada de decisão consciente e consistente, eliminando as insatisfações e os altos custos associados aos projetos implementados através da tentativa e erro da experimentação direta.

4.2. Trabalhos relacionados

Alguns autores pesquisaram os benefícios da implementação da manufatura enxuta nas organizações e, dentro de uma metodologia de pesquisa quantitativa, procuraram comparar as diversas estratégias através de simulação. A seguir são apresentados alguns destes trabalhos relacionados.

Standridge e Marvel (2006) apresentam uma justificativa para o uso de simulação em projetos de manufatura enxuta, destacando as deficiências de um projeto *lean* e como a simulação ajuda a superar tais deficiências.

Welgama e Mills (1995) estudaram a importância do uso da simulação na fase de projeto de um sistema de produção *just-in-time*, envolvendo a mudança de *lay out* em forma de células, a identificação de gargalos, as operações se tornando multidisciplinares, as revisões dos postos de trabalho e dos sistemas de controle através do uso de *kanbans*. A simulação, utilizando a linguagem de simulação SIMAN, se apresentou eficiente não só para o estudo envolvendo os tópicos anteriormente relacionados, mas também

facilitando o entendimento por parte dos grupos de trabalho de chão de fábrica, que normalmente se opõem às mudanças.

Lee e Alwood (2003) propuseram uma resposta enxuta para os problemas encontrados em interrupções de processos dependentes de temperatura, como forjarias, cozinhas e processos químicos. Neste estudo, eles atentaram para a verificação do conceito de parar a linha de produção quando ocorre uma interrupção, de forma a encontrar a causa do problema. Eles criaram um roteiro, implementado através de simulação de eventos discretos, que provê uma maneira de estabelecer práticas padronizadas para processos dependentes de temperatura, onde os operadores participam diretamente do processo de tomada de decisão.

Grimard *et al.* (2005), apresentaram a validação de um projeto de uma célula de trabalho através da simulação, utilizando ambiente de simulação AUTOMOD. Eles apresentaram os resultados que seriam alcançados em projeto de um sistema de montagem e calibração de injetores.

Greasley (2004) apresenta o uso da simulação numa grande organização manufatora e faz uma análise de como ela pode ser melhor e amplamente utilizada. Focado no projeto do *lay out* do produto, o estudo buscou simular o sistema de manufatura, para observar se ele garantiria os níveis requeridos de produção. O modelo de simulação foi construído usando o sistema SIMAN CINEMA e simularam o balanceamento das linhas de produção, os tempos de ciclo, os tempos de processamento total do pedido e produção semanal, provendo aos gerentes informações para melhoria do sistema.

Rajakumar *et al.* (2005) propuseram um modelo em linguagem C++ para resolver o problema de planejamento de operações paralelas de montagem, com relações de precedência, numa indústria de maquinaria têxtil. O objetivo era determinar estratégias de seqüenciamento (aleatório, pelo menor tempo de processamento ou pelo maior tempo) para alocar operações de montagem aos operadores, de forma a obter o melhor balanceamento de suas cargas de trabalho. Uma vez que o tamanho do problema torna-o computacionalmente intratável por programação linear inteira mista, a simulação apresentou resultados satisfatórios em termos de balanceamento e num tempo computacional aceitável.

Chakravorty e Atwater (1995) compararam através de simulação usando a linguagem de simulação SLAM II, a performance entre linhas de produção com balanceamento baseado nos conceitos ocidentais e com balanceamento baseado no conceito *Just-in-Time*. Nos conceitos ocidentais, o tempo total de produção de um determinado número de peças a fabricar será dividido pelo tempo de ciclo desejado, determinando o número de estações de trabalho. O conceito *Just-in-Time* se baseia na filosofia de melhoria contínua através da eliminação do desperdício e sistema puxado de produção. Eles desenvolveram um modelo de simulação para ambas as formas de desenho de linhas. Chakravorty e Atwater (1996) estenderam sua pesquisa para uma terceira opção filosófica e compararam o balanceamento de linhas tradicional com a linha baseada no sistema puxado usando a filosofia *JIT* e uma linha desenhada e operada usando a teoria das restrições (*TOC*). Este trabalho apresentou como resultado após simulação também utilizando a linguagem SLAM II, que as linhas *JIT* têm melhor desempenho quando a variabilidade no sistema é baixa e com um nível maior de inventário, apresentando maior volume de produção. Quando a variabilidade é alta, é melhor utilizar as linhas *TOC*, que são menos afetadas pela variabilidade dentro de sistema.

Inúmeros trabalhos continuam a ser desenvolvidos, buscando analisar a aplicabilidade da simulação em projetos de manufatura enxuta. Isso tem feito com que os pacotes de simulação (softwares comerciais) apresentem cada vez mais facilidades, como também uma redução no seu custo de aquisição, incentivando seu uso pelos gestores, em seus processos de tomada de decisão.

5. Conclusão

A simulação de eventos discretos se baseia nos conceitos de fila e tempos de serviço, observável em qualquer processo de manufatura: as filas são os estoques de peças aguardando para serem processados nas máquinas num determinado tempo de serviço. Independente da linguagem utilizada, o uso da simulação se apresenta aplicável e, considerando a necessidade de uma base para a tomada de decisões, justificável e necessária.

Em resumo final, podemos identificar algumas etapas para o uso de simulação para a tomada de decisões na implementação da filosofia da manufatura enxuta:

- Mapeamento dos processos, levantando-se os tempos de ciclo de cada operação e de transporte, o número de funcionários envolvidos, tempos de *setup* e o estoque de produto semi-elaborado (filas) antes de cada estação de trabalho;
- Determinação do *lead time* (tempo total de transformação da matéria prima em produto final; tempo do pedido à entrega; tempo de processamento de todas as operações de produção) e do tempo *takt*;
- Identificação dos gargalos de produção;
- Construção de um modelo de simulação utilizando-se de um software de simulação de sistemas de manufatura (Arena, ProModel);
- Estudo de alternativas de mudanças com base nas técnicas aplicáveis à manufatura enxuta, relacionadas aos tempos de ciclo, *setup*, inclusão/exclusão de mão de obra, redução de distâncias entre operações e todas as idéias que permitirão visualizar melhorias no sistema;
- Estudo de viabilidade técnica, econômica e financeira para implementação das alternativas simuladas que se apresentarem como boas soluções, como base para a tomada de decisão;
- Realização dos eventos *kaizen* de melhoria e comparação com os resultados da simulação.

Referências

- BANKS, J.; CARSON II, J.S.; NELSON, B.L.; NICOL, D.M. 2005. *Discrete - Event System Simulation*. 4ª ed., Upper Saddle River, Prentice Hall, 608 p.
- CHAKRAVORTY, S.; ATWATER, J.B. 1996. A comparative study of line design approaches for serial production systems. *International Journal of Operations and Production Management*, **16**(6):91-108.

- CHAKRAVORTY, S.; ATWATER, J.B. 1995. Do JIT lines perform better than traditionally balanced lines? *International Journal of Operations and Production Management*, **15**(2):77-88.
- GERWIN, D. 2005. An agenda for research on the flexibility of manufacturing processes. *International Journal of Operations and Production Management*, **25**(12):1171-1182.
- GREASLEY, A. 2004. The case for the organizational use of simulation. *Journal of Manufacturing Technology Management*, **13**(7):560-566.
- GRIMARD, C.; MARVEL, J.H.; STANDRIDGE, C.R. 2005. Validation of The Re-Design of a Manufacturing Work Cell Using Simulation. In: Winter Simulation Conference, Piscataway, 2005. *Anais...* Piscataway, Institute of Electrical and Electronics Engineers, p.1386-1391.
- LEAN INSTITUTE DO BRASIL. 2003. *Léxico Lean: glossário ilustrado para praticantes do Pensamento Lean*. São Paulo, Lean Institute Brasil, 98 p.
- LEE, W.L.; ALWOOD, J.M. 2003. Lean manufacturing in temperature dependent processes with interruptions. *International Journal of Operations and Production Management*, **23**(11):1377-1400.
- OHNO, T. 1997. *O Sistema Toyota de produção: além da produção em larga escala*. Porto Alegre, Bookman, 152 p.
- PIDD, M. 1998. *Computer Simulation in Management Science*. 4ª ed., New York, John Wiley & Sons Ltd., 280 p.
- RAJAKUMAR, S.; ARUNACHALAN, V.P.; SELLADURAI, V. 2005. Simulation of Workflow balancing in assembly shopfloor operations. *Journal of Manufacturing Technology Management*, **16**(3):265-281.
- ROTHER, M.; SHOOK, J. 2003. *Aprendendo a Enxergar: mapeando o fluxo de valor para agregar valor e eliminar o desperdício*. São Paulo, Lean Institute Brasil, 112 p.
- STANDRIDGE, C.R.; MARVEL, J.H. 2006. Why Lean Needs Simulation. In: Winter Simulation Conference, Piscataway, 2006. *Anais...* Piscataway, Institute of Electrical and Electronics Engineers, p. 1907-1913.
- VOLLMANN, T.E.; BERRY, W.L.; WHYBARK, D.C. 1997. *Manufacturing planning and control systems*. 4ª ed., Boston, Irwin/McGraw-Hill, 836 p.
- WELGAMA, P.S.; MILLS, R.G.J. 1995. Use of simulation in the design of a JIT System. *International Journal of Operations and Production Management*, **15**(9):245-260.
- WOMACK, J.P.; JONES, D.T. 2004. *A mentalidade enxuta nas empresas*. 3ª ed., Rio de Janeiro, Campus, 408 p.
- WOMACK, J.P.; JONES, D.T.; ROSS, D. 1992. *A máquina que mudou o mundo*. 5ª ed., Rio de Janeiro, Campus, 347 p.

Submissão: 21/02/2008
Aceite: 20/08/2008