



Produto & Produção, vol. 15 n.1, p. 22-42, fev. 2014

RECEBIDO EM 17/09/2012. ACEITO EM 22/08/2013.

Alternativas para aumento de produtividade em uma célula de manufatura com uso das técnicas do sistema Toyota de produção: análise através da modelagem e simulação computacional

Peter Bent Hansen

Pontifícia Universidade Católica do RS – PUCRS

peter.hansen@pucrs.br

Rodrigo Gomes da Rocha

Parker Hydraulics

rodrigogomesdarocho@yahoo.com.br

Fernando de Oliviera Lemos

Pontifícia Universidade Católica do RS – PUCRS

fernando.lemos@pucrs.br

RESUMO

As mudanças que afetaram o segmento industrial nas últimas décadas conduziram ao desenvolvimento de técnicas destinadas ao aumento de produtividade e eliminação de perdas, entre as quais o Sistema Toyota de Produção (STP). Porém, o STP pode apresentar resultados diferenciados dependendo do ambiente onde é aplicado. O objetivo desta pesquisa é analisar os potenciais resultados e melhorias de produtividade passíveis de se alcançar pela aplicação de conceitos e técnicas do Sistema Toyota de Produção em uma célula de manufatura de uma empresa metal-mecânica, através da simulação computacional. O estudo constitui uma pesquisa aplicada, qualitativa e se caracteriza como um estudo de caso. Foram realizados 3 tipos de experimentos de aplicações de técnicas do STP via simulação computacional, tendo-se constatado que os mesmos produzem efeitos diferenciados em termos de produtividade, *lead time*, *work-in-process* e ociosidade dos operadores, apesar de todos convergirem para o aumento de produtividade da célula conforme esperado, porém em diferentes graus.

Palavras-chave: Sistema Toyota de Produção; Modelagem e Simulação Computacional; Produtividade.

ABSTRACT

The global changes that had affected the industrial sector in the last decades had lead to the development of techniques focused on the increase of productivity and elimination of processes losses. Between these techniques, one stands out: the Toyota Production System (TPS). However, the TPS may produce different results levels depending on the environment where it is applied. Thus the objective of this research is to analyze the potential productivity improvements, possible to be obtained by the application of some TPS techniques in a metal-mechanic company manufacture cell, evaluated through computer simulation. This study is an applied, qualitative research and a case study. Three experiments had been carried out through computer simulation and it was evidenced that the tested techniques produce different effects in the cell productivity, in its lead time, work-in-process

and operators idleness, but all the experiments converged to an increased productivity of the cell as expected, however in different degrees.

Keywords: Toyota Production System (TPS); Modeling and Computer Simulation; Productivity.

1 Introdução

Nas últimas décadas a globalização e a abertura dos mercados domésticos à competição em nível internacional fizeram e continuam fazendo com que estes ambientes se tornassem mais competitivos, estimulando a busca de eficiência dos processos e operações como forma de manutenção dos negócios. Há casos de empresas que antes dominavam absolutas seus mercados, ou no máximo competindo na forma de oligopólios, as quais perderam grande parte de seus espaços econômicos privilegiados (TIGRE, 1998; CHEN *et al.*, 2009).

Considerando estas novas condições, as empresas necessitaram buscar novas formas de organização e gestão que garantissem maior flexibilidade, aproveitamento de recursos e velocidade para acompanhar a demanda e as mudanças do mercado. Neste contexto um dos sistemas de produção que mais contribuiu para alcançar esses critérios ao longo das últimas décadas foi o Sistema Toyota de Produção (STP) (PASA, 1998).

Ohno (1997) cita que o STP foi desenvolvido pela imposição de certas restrições às empresas pelo mercado, como a produção de pequenas quantidades de produtos de muitas variedades sob condições de baixa demanda. Womack e Jones (2004), por sua vez, abordam que o termo produção enxuta, derivado do STP, foi criado justamente porque o sistema necessita da metade dos esforços, metade do tempo e metade do espaço da fabricação quando comparado ao sistema de produção em massa tradicional, o qual tinha outra abordagem de competição no mercado; seu objetivo principal era atingir os ganhos de escala, numa época em que a demanda era estável e superior à oferta.

Considerando por outro lado o caso específico da indústria automotiva, incluindo-se aí máquinas agrícolas auto-propenidas, veículos pesados, veículos leves, reboques de transporte e outros similares, além dos veículos leves em si, as empresas à montante da cadeia de suprimentos do setor, ou seja, as empresas que fornecem componentes para esta indústria são submetidas às mesmas condições de produção que as verificadas na indústria focal (montadora de veículos). Desta forma, se a demanda do setor automotivo torna-se incerta, se os produtos tornam-se obsoletos cada vez mais cedo, é de se esperar que as empresas fornecedoras também sofram, com certo retardo de tempo, as mesmas mudanças, implicando na necessidade de maior flexibilidade.

De maneira particular as empresas do setor metal-mecânico que fornecem diretamente para indústria automotiva e de implementos agrícolas estão se defrontando, desde fins da década dos anos 90 no País, com um ambiente de maior competitividade com consumidores mais exigentes e necessitam atender de forma simultânea aos objetivos básicos de desempenho, a saber: custo, qualidade, flexibilidade, entrega e serviço (MAIA *et al.*, 2006).

Sob esse prisma, Jugent *et al.* (2005) argumentam que a utilização do STP na indústria, de uma forma geral, permite o alcance dos objetivos de desempenho acima mencionados pela aplicação de suas técnicas específicas. Porém, apesar dos benefícios propiciados pela utilização do STP, Standridge e Marvel (2006) argumentam que há o risco de fracasso na aplicação destas técnicas, principalmente quando estas são empregadas de forma isolada nos sistemas produtivos. Assim os autores apresentam e propõem a simulação computacional como um recurso adicional para análise dos sistemas produtivos, de forma a permitir verificações antecipadas, antes da aplicação prática, das técnicas do STP no chão-de-fábrica.

Adicionalmente a este ponto, há ainda a possibilidade oferecida pela simulação computacional, ao menos em tese, de permitir a comparação de diferentes alternativas de mudanças nos processos produtivos, considerando simultaneamente diversos critérios, permitindo assim uma análise mais integrada das opções.

O presente estudo foi desenvolvido em uma empresa que pertence ao setor metal-mecânico. A mesma tem como principal mercado a indústria de implementos agrícolas e máquinas mecânicas pesadas. O estudo trata da análise de uma célula de produção de um dos produtos-chave desta empresa, as válvulas hidráulicas, visando o aumento de produtividade desta célula.

De forma não diferente de outros setores da indústria ao longo dos anos a partir de 2000, a empresa sob estudo passa por períodos de grande oscilação na demanda. Fatores como período de safra, preços dos produtos agrícolas, investimento no fomento ou não do governo nos setores da construção civil e agricultura, entre outros aspectos, causam profundas alterações na demanda. Desta forma, quando a demanda está em alta, não raro se identifica a limitação da capacidade produtiva desta célula da empresa e a necessidade de aumento significativo de horas-extras e de quantidade de operadores para atendimento da produção. Posteriormente, em um curto espaço de tempo, como poucos meses, esta demanda se reduz acentuadamente, levando à ociosidade dos operadores e, em casos extremos, à demissão de parte destes acarretando todos os problemas daí decorrentes além de outros passíveis de imaginação.

Neste contexto, o que se busca identificar são meios alternativos de aumento da produtividade sem incorrer em elevação dos custos de produção. Entre as técnicas de gestão disponíveis, a empresa poderia buscar, por exemplo, no STP e nas suas técnicas procedimentos para aumentar a produtividade de suas operações, reduzindo ao máximo possível as perdas no processo de manufatura. Com este enfoque, parece adequado testar os impactos das mudanças que o STP potencialmente pode produzir, através da utilização da simulação computacional do ambiente de produção focalizado.

Desta forma o presente estudo buscará responder à questão relativa à “Escolha da alternativa para aumentar a produtividade de uma célula de manufatura de uma empresa, a partir de experimentos realizados com base nas técnicas do STP e testados via modelagem e simulação computacional”. Visa-se, desta forma, entender as diversas implicações decorrentes da aplicação das técnicas do STP neste ambiente produtivo. Deve ainda ser lembrado que, diferentemente de outras técnicas, a simulação computacional permite modelar a variabilidade de diversos parâmetros operacionais simultaneamente.

Nas próximas seções deste trabalho são abordadas a fundamentação teórica sobre os temas relevantes para o estudo, os procedimentos metodológicos da pesquisa, a contextualização do caso estudado, a descrição e análise dos resultados obtidos na pesquisa e, por fim, as considerações finais.

2 Fundamentação teórica

Nesta seção encontra-se o referencial que fornece o subsídio teórico para o trabalho, a saber: (i) revisão das características do Sistema Toyota de Produção (STP); (ii) identificação das formas de aplicação do STP e suas principais técnicas; e (iii) modelagem e simulação dos sistemas de produção, como ferramenta de análise dos impactos produzidos pela implementação de técnicas do STP no chão-de-fábrica.

2.1 Sistema Toyota de Produção (STP)

Embora o Sistema Toyota de Produção tenha sido criado há mais de 50 anos, suas vantagens ainda demonstram ser suficientes para se manter entre os temas mais investigados no meio acadêmico da engenharia de produção (PASA, 1998; GLASER-SEGURA *et al.*, 2011).

Grandes empresas ao redor do mundo adotaram com sucesso o STP, muitas vezes adaptado e renomeado sob os moldes de suas próprias marcas; porém os conceitos utilizados representam, em sua essência, os mesmos conceitos e sistema. Confirma-se isso pelos estudos de Sampaio e Filho (2008) e Batista *et al.* (2008).

O STP surgiu com o objetivo principal de eliminar custos através da eliminação das perdas e desperdícios, ou seja, de atividades que geram custo e não agregam valor ao produto (KARLSSON; AHLSTRÖM, 1996). Segundo Womack e Jones (2004), o STP é hoje também conhecido como Produção Enxuta (PE), ou Lean Manufacturing, por utilizar menor quantidade de recursos em comparação com a produção em massa, além de enfatizar métodos de identificação e eliminação das perdas ao longo de todo o fluxo de valor dos produtos, não se limitando às fronteiras da organização mas estendendo-se através e além dela (BOYLE; RATHJE, 2009). Deve ser observado que a Produção Enxuta (PE) constitui uma filosofia ampla de gestão da produção, que engloba os conceitos e técnicas do sistema de produção internacionalmente reconhecido como Just-In-Time (JIT).

Os sete tipos de perdas identificados pelo STP e, conseqüentemente, pela PE, são (SHINGO, 1996): superprodução, espera, transporte, (aquelas inerentes ao) processamento, estoque,

movimentação e má-qualidade. Dentro da lógica de identificação de perdas nos processos produtivos e relacionamento das mesmas com as técnicas da PE que permitam sua eliminação, Menegon *et al.* (2003) e Shah e Ward (2003) propõem uma abordagem das perdas e técnicas a serem aplicadas numa empresa que pretenda operar com a PE. O estudo relaciona as Sete Perdas de Shingo (2000) com as técnicas da PE, conforme o Quadro 1.

Menegon *et al.* (2003) e Shah e Ward (2003) apresentam os prováveis relacionamentos existentes entre as perdas e as técnicas utilizadas para a implementação de conceitos de PE. A primeira das perdas e, que de certa forma acaba contribuindo para ocorrência das demais, a superprodução, relaciona-se com quase todas as técnicas da PE. Assim, a redução do tamanho do lote (de produção ou processamento) contribui para diminuição da superprodução, pois as peças são trabalhadas em lotes menores conforme a demanda, envolvendo a peça certa, na quantidade certa, no momento certo.

Quadro 1 - Relação entre as ferramentas do sistema de PE e as perdas dos processos de produção

Técnicas	Perdas						
	Superprodução	Espera	Transporte	Processamento	Estoque	Movimentação	Produtos Defeituosos
Redução do tamanho dos lotes	SIM	SIM	SIM	TALVEZ	SIM	SIM	SIM
Balanceamento das atividades	SIM	SIM	SIM	NÃO	SIM	SIM	NÃO
Sistema puxado	SIM	NÃO	NÃO	NÃO	SIM	NÃO	SIM
Manufatura celular	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
Redução nos tempos de ciclos	NÃO	SIM	NÃO	SIM	TALVEZ	NÃO	NÃO
Troca rápida de ferramentas	SIM	SIM	SIM	NÃO	NÃO	SIM	SIM
Gestão de recurso gargalo e remoção de restrições	SIM	SIM	NÃO	NÃO	SIM	NÃO	NÃO

Fonte: Adaptado de Menegon *et al.* (2003) e Shah e Ward (2003).

A mesma interpretação pode ser feita com as demais técnicas e perdas do Quadro 1, evidenciando o relacionamento existente entre os elementos. Ainda observando-se o Quadro 1, verifica-se que algumas técnicas possuem efeitos mais amplos sobre as perdas, como a manufatura celular, a redução do tamanho de lotes e o balanceamento de atividades.

De modo a investigar as principais técnicas do STP que contribuem para eliminação das perdas nos sistemas de produção e conversão destas perdas em aumento de produtividade, são detalhadas a seguir algumas das técnicas apresentadas no Quadro 1, como a gestão do ciclo do recurso gargalo (bottleneck) via Teoria das Restrições (*TOC – Theory of Constraints*); Redução do tamanho dos lotes de produção (processamento) do recurso gargalo; e Balanceamento (dos tempos) das atividades dos processos.

Considerando a gestão do gargalo produtivo, esta é relevante em um processo em que se deseja eliminar perdas por superprodução, por espera e por estoque (MENEGON *et al.*, 2003; SHAH; WARD, 2003). Gargalo, por sua vez, constitui o recurso produtivo que impede o aumento dos ganhos do sistema, e nenhum aumento de produção pode ser levado a cabo sem a análise do sistema e o deslocamento do recurso gargalo (PAVONI *et al.*, 2004). A Teoria das Restrições se baseia no gerenciamento do recurso gargalo, o qual dificilmente será eliminado; no máximo o gargalo atual do sistema de produção passará a ser desempenhado por outro recurso, após alguma melhoria em termos de redução de tempo de ciclo e tempo de setup do recurso gargalo presente (GOLDRATT; COX, 2003).

Goldratt e Cox (2003) citam, com base na *TOC* e na abordagem de produção Tambor, Pulmão e Corda (TPC), que os demais recursos do sistema devem estar alinhados ao gargalo em termos de

capacidade, pois este ditará o ritmo da produção global do sistema. Esta observação não deixa de se assemelhar às técnicas de balanceamento de operações propostas no STP, na medida em que se busca nivelar a carga de trabalho entre os postos e atividades. Ambas as teorias chegam a considerações semelhantes por abordagens diferentes. Em muitos casos há dificuldade em nivelar os tempos de ciclo entre diferentes máquinas, compostas por equipamentos semi-automáticos. Desta forma, quando se trata do tempo total da operação, isto é, tempo de ciclo da operação mais atividades de carga e descarga dos materiais executadas pelo operador, o balanceamento das operações continua a ser uma das técnicas empregadas para aumento de produtividade.

Em sistemas de produção mais complexos, que envolvam equipamentos que façam operações sobre peças individuais e também equipamentos que realizem operações sobre lotes de peças, a análise das formas de elevar a produtividade pode implicar em outros aspectos. Assim, mesmo que um sistema produtivo tenha um equipamento gargalo claramente identificado (aquele de tempo de ciclo mais longo para operação sobre uma peça), a existência de um equipamento de operação em lote de peças pode sobrepujar esta situação, mesmo que tenha um tempo de ciclo de operação mais curto por peça, em função do período de tempo necessário ao seu enchimento ou formação do lote para início da operação em si. Neste caso a análise do tamanho do lote de produção (processamento) deste equipamento com capacidade acima da unitária pode se mostrar uma questão básica e relevante (SHINGO, 1996).

Aborda-se agora a redução do tempo de ciclo, o qual constitui o tempo necessário para que o operador/máquina execute as operações alocadas a ele sobre um material ou componente (SHINGO, 1996). No STP, o tempo de ciclo está intimamente ligado ao *takt-time* (tempo decorrido entre a produção de duas peças/produtos em seqüência). Porém, não se deve interpretar erroneamente estes tempos: o primeiro diz respeito ao tempo combinado, máquina mais operador; o segundo está associado à demanda e tempo disponível para produção (INVERNIZZI, 2006).

Em equipamentos de produção modernos tais como máquinas operatrizes automáticas ou semi-automáticas, a redução do tempo de ciclo das operações também pode ser obtida de outras formas, como adição de tecnologias, utilização de ferramentas mais rápidas e duráveis, entre outros aspectos (SIHVO; VARIS, 2008).

Por outro lado, o problema de balanceamento de linhas de produção refere-se à alocação das atividades de transformação e/ou montagem em postos de trabalho, de modo que se obtenha o menor número de postos capaz de satisfazer a demanda, com o menor tempo de ciclo possível (MAYERLE; SANTOS, 2003).

Liker e Meyer (2007) citam que o parâmetro principal na análise de balanceamento de operações é o *takt-time* necessário para atender a demanda (tempo por peça/componente). Qualquer tentativa fora desta condição representaria perdas, segundo os autores.

Segundo Liker e Meyer (2007) os gráficos de balanceamento de operações constituem ótimas ferramentas de análise. Através destes gráficos podem-se identificar as restrições no atendimento à demanda. É neste momento que se integram as técnicas anteriores (gestão de recurso gargalo, redução dos tamanhos dos lotes e redução do seu tempo de ciclo), pois no caso de haver recurso com tempo de ciclo superior ao *takt-time*, os meios de balancear os tempos de ciclo entre postos de trabalho provavelmente envolverão as técnicas abordadas anteriormente.

Quando o sistema de produção apresenta certa complexidade e existe incerteza quanto aos impactos diversos que melhorias poderão acarretar no mesmo, ou mesmo dificuldades para identificar as vantagens possíveis de obter antes da aplicação propriamente dita das técnicas do STP, pode-se utilizar, entre poucas outras técnicas em função da complexidade envolvida, a modelagem e simulação computacional. A simulação computacional vem sendo aplicada com sucesso, gerando resultados satisfatórios em estudos de melhoria de processos, auxiliando a tomada de decisão na identificação e tratamento dos gargalos produtivos, na avaliação de redução de tempos de ciclo e no balanceamento de operações (WILLIAMS; CELIK, 1998; JUNQUEIRA; MIYAGI, 2009).

2.2 Modelagem e simulação de sistemas de produção

Conforme Jahangirian *et al.* (2010), a simulação é usada nos mais diversos setores, principalmente na indústria, estendendo-se também até a área de saúde. A simulação computacional

permitiu que mudanças nos sistemas produtivos pudessem ser avaliadas de maneira quantitativa pela adequação, pertinência e relevância desta abordagem às variáveis analisadas.

A aplicação da modelagem e simulação normalmente é vinculada à abordagem de sistemas, entre os quais os sistemas produtivos. Assim, um sistema pode ser definido, segundo Banks *et al.* (1996) *apud* Gavira (2003), como um grupo de objetos que são reunidos em alguma interação ou interdependência regular, a fim de se alcançar algum propósito. A definição de sistema é algo que parte do autor que o define; ou seja, um sistema pode fazer parte de um sistema maior e, nesse caso, o primeiro seria um subsistema do último. É básica a definição de sistema (seus limites e seu escopo), pois é a partir dela que se parte para a modelagem, simulação e análise de melhoria nas atividades de produção nele inseridas. As atividades de produção, por sua vez, quando agrupadas também correspondem a um sistema, nesse caso de produção.

Na maioria das vezes não é economicamente viável utilizar o sistema real para testar melhorias ou alternativas de funcionamento do sistema ou processo produtivo. Em um mundo crescentemente interconectado parece ser vital encontrar maneiras de explorar as possíveis consequências das decisões e planos antes de realizar qualquer ação (PIDD, 1998).

Por outro lado, não é possível desenvolver uma simulação sem antes haver um modelo que descreva como o sistema opera. É para isso que existem os modelos. Modelos são formas de representação da realidade, os quais, conforme Harrel *et al.* (2002), dividem-se em (i) modelos de opinião, (ii) modelos matemáticos determinísticos e (iii) modelos estocásticos de simulação. Os modelos estocásticos de simulação são modelos matemáticos orientados a eventos, que empregam o uso de equações numéricas para descrever características operacionais do sistema.

No entender de Harrel *et al.* (2002), a simulação serve para que as pessoas enxerguem o modo como os processos produtivos operam e como estes responderão às mudanças que se desejam fazer. A simulação é o caminho mais prático, concreto e robusto, apesar de virtual, de avaliar as mudanças nos sistemas de produção (CARLSON; YAO, 2008). Conforme Chung (2003), a simulação é o processo de criação e experimentação do sistema físico através dos modelos matemáticos. Consiste no emprego de técnicas matemáticas em computadores com o propósito de imitar um processo ou operação do mundo real. Por isso há a necessidade de inclusão de um modelo que corresponda à situação real que se deseja simular.

Considerando as abordagens anteriores como premissas, a simulação foi a maneira escolhida para testar como as mudanças propostas, com base nas técnicas do STP, impactam os resultados e o desempenho (produtividade) do sistema produtivo abordado neste estudo.

Do ponto de vista dos sistemas virtuais ou representativos (modelos), criados para representar um sistema real e para posterior simulação computacional do mesmo, seis componentes ou elementos principais devem ser desenvolvidos (GAVIRA, 2003): (i) Entidades: são os objetos sobre os quais são realizadas as atividades; (ii) Locais: são os locais onde são realizadas ações sobre a entidade; (iii) Recursos: são, por exemplo, os operadores, empilhadeiras e veículos, que operam no sistema fazendo a interface entidade-local; (iv) Atributos: são as características do sistema; no caso de uma célula de produção, um atributo pode ser o *lead time* (tempo de atravessamento) da célula; (v) Atividades (ou Processos): são aqueles que são executados no sistema pelos locais e recursos; e (vi) Eventos (ou Chegadas): é o que ocorre no sistema em determinado momento. A análise de Gavira (2003) baseia-se na estruturação do Software ProModel, o qual foi o utilizado por este autor em seus estudos.

O desenvolvimento de modelos e projetos de simulação envolve a realização de uma série de passos e etapas, incluindo aspectos como definição de objetivos e escopo, construção de modelos conceitual e computacional, simulação computacional, sua verificação do comportamento e validação dos resultados, experimentação de cenários, avaliação dos resultados frente aos objetivos, estabelecimento de conclusões e posterior implantação prática dos resultados e conclusões (ROBINSON, 1964; HARREL *et al.*, 2002). No caso específico deste estudo a metodologia empregada é apresentada oportunamente na sequência do trabalho.

Entre as vantagens que se obtêm com o uso da simulação encontram-se: experimentos em menor tempo, com menores custos e com melhores condições de controle das variáveis (ROBINSON, 1964). Através da simulação não é possível obter, diretamente, resultados que levem à otimização do sistema. Ou seja, não se trata de modelos de otimização. Entretanto, a simulação fornece meios de

testar possibilidades e, posteriormente, escolher entre essas as que mais se adequam às condições reais do sistema (GAVIRA, 2003).

Discute-se a seguir a metodologia empregada nesta pesquisa.

3 Procedimentos metodológicos da pesquisa

Nesta seção é apresentada a metodologia de pesquisa empregada neste trabalho. Inicialmente é caracterizada a presente pesquisa; após, são apresentadas as etapas que foram desenvolvidas na construção dos modelos computacionais e nos experimentos de simulação realizados, bem como nas posteriores análises.

A célula de manufatura em estudo constitui apenas uma parte do processo de fabricação e montagem do produto final; porém, trata-se do gargalo de capacidade do mesmo. Por esta razão, não serão aqui analisadas as operações anteriores e posteriores à célula de produção. Também não serão abordadas questões como qualificação de pessoal, manutenção de máquinas, análise de custos e questões vinculadas à gestão da organização.

Considerando que a célula de manufatura encontra-se atualmente em operação, não serão consideradas no estudo possíveis mudanças físicas (alterações de *layout*) dos locais efetivos de produção. Restrições de sequenciamento de operações também podem inviabilizar certos arranjos de balanceamento das operações, razão pela qual não serão levados em conta. Assim considerar-se-á possíveis soluções dentro do conjunto de restrições hoje existentes na instalação física.

Apesar das variações da demanda verificadas nesta empresa, devido a fatores coincidentes em diferentes mercados consumidores dos produtos (i.e. taxa de juros ao consumidor), e variações de demanda devido a outros fatores particulares ao produto da empresa (i.e. preço da *commodity* ou de alguma matéria-prima), não serão consideradas estas variações no estudo e nem os impactos que elas poderiam gerar nos níveis de estoque e utilização dos equipamentos e recursos (operadores em termos de modelagem).

De modo a não ultrapassar o escopo proposto para este estudo, considerar-se-á somente as principais técnicas do STP com o foco no aumento de produtividade desta célula de manufatura, como redução do tamanho do lote e gestão (do tempo de ciclo) da operação (posto) gargalo e balanceamento das operações do sistema produtivo, cuja avaliação será feita à luz da simulação computacional do sistema em análise.

De acordo com Silva e Menezes (2000), o presente estudo se caracteriza como uma pesquisa científica aplicada, pois se pretende solucionar o problema de pesquisa específico da empresa analisada. É de caráter qualitativo, pois apesar de análise se dar com apoio da modelagem e simulação, com modelos estocásticos e distribuições de probabilidade, o sistema envolve muitas interações de caráter qualitativo, ou seja, somente parte do problema será analisada de maneira quantitativa. As conclusões obtidas dos modelos de simulação foram tomadas como base para a interpretação dos autores deste trabalho.

A pesquisa também é de caráter exploratório, pois, para se buscar melhor entendimento do problema e das possíveis soluções foi realizada pesquisa bibliográfica e coleta de dados, assim como a observação não participante do sistema de produção, cujo comportamento ainda não é conhecido de forma satisfatória. Com relação aos procedimentos técnicos, a pesquisa foi realizada por meio da estratégia de estudo de caso, onde o que se objetiva é o estudo detalhado e em profundidade do problema com vistas a um entendimento claro das alternativas e resultados possíveis.

O fenômeno pesquisado se limita às fronteiras da célula de produção em estudo, considerando algumas características relevantes exteriores à célula de produção que devem ser levadas em conta pelas suas influências sobre a mesma, como a frequência de chegada de peças até a célula e os turnos de trabalho dos setores que precedem a célula.

Para a aplicação da técnica de modelagem e simulação computacional foram realizadas as etapas discriminadas no fluxograma apresentado na Figura 1. Tal fluxograma tomou como base a proposta de Robinson (1964), que constitui um trabalho seminal sobre o tema metodologia de modelagem e simulação computacional.

As etapas do método de desenvolvimento do trabalho estão indicadas pelos algarismos situados nas caixas externas ao fluxograma da Figura 1. Assim, o primeiro passo foi a identificação do

problema de pesquisa; após foi realizada a caracterização do problema e a contextualização do mesmo conforme apresentado na introdução. Com base nas características específicas do problema, foram definidos os objetivos do trabalho; estas atividades correspondem a Etapa 1 da metodologia utilizada. Na sequência, foram levantadas alternativas para se solucionar o problema, com base nas técnicas do STP (Etapa 2).

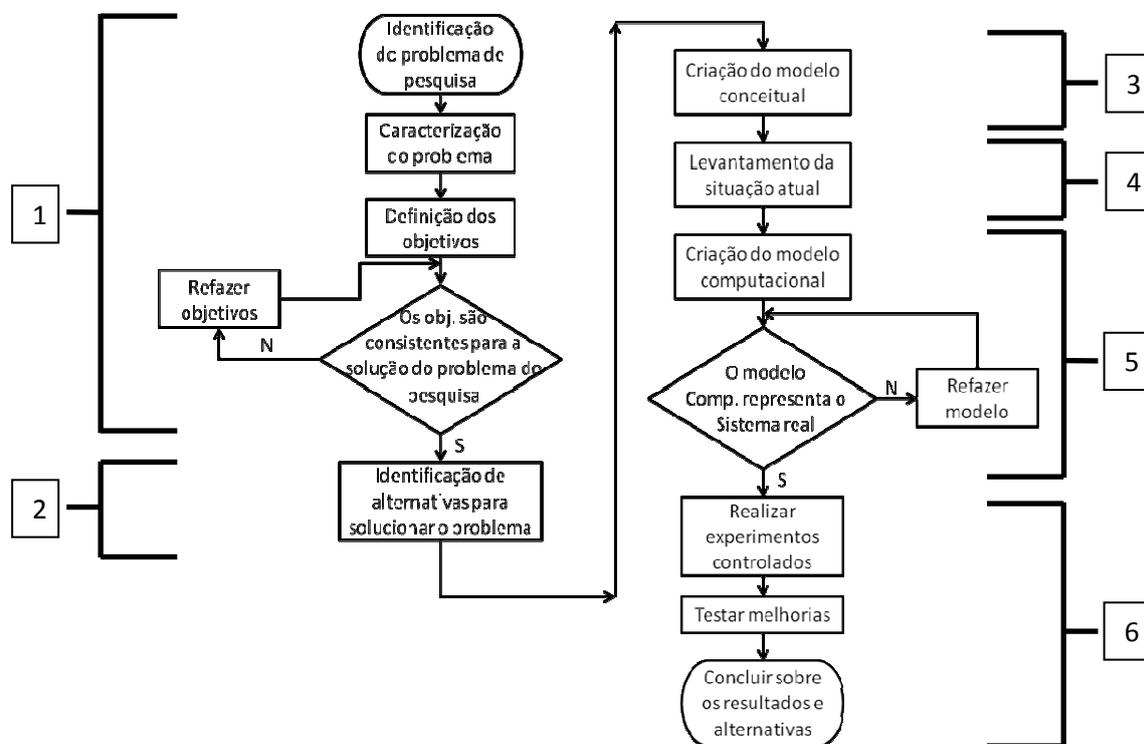


Figura 1 – Fluxograma das etapas do método de trabalho do estudo.

Fonte: Adaptado pelos autores a partir de Robinson (1964).

Depois de identificadas as alternativas potenciais de resolução da questão de pesquisa foi construído o modelo conceitual, como forma de representação do sistema real e, principalmente, como uma forma de identificar as variáveis que influem no comportamento do modelo a ser analisado (Etapa 3). Posteriormente foi realizado o levantamento da situação atual em termos de tempo-máquina e tempo-homem, produtividade (peças/h/operador), entre outras informações do processo produtivo (Etapa 4).

As fontes primárias de informações quantitativas, dos equipamentos e operadores, foram constituídas por cronoanálises, com número de medições de diferentes parâmetros variando em função da variabilidade amostral, precisão desejada e nível de confiança desejado. Destaca-se que foram considerados fatores que interferiram ao longo do tempo nessas medidas, como fadiga e habilidade dos operadores. Além desses instrumentos foram utilizadas como fonte secundária de informações, formulários e relatórios que estavam disponíveis nos sistemas da empresa estudada, considerando sempre a veracidade destas informações. Após a coleta dos dados foi realizada a construção do modelo de simulação que representa o sistema produtivo (a célula) em estudo.

Análises quantitativas foram efetuadas com base na construção, verificação e validação do modelo no software de simulação PROMODEL® Professional 7.0 (Etapa 5). Em etapa posterior à criação do modelo foram realizados os experimentos, os testes das alternativas de melhorias e foram feitas as devidas considerações para cada experimento, com base nas técnicas do STP (Etapa 6).

4 Análise dos resultados dos experimentos realizados na célula de produção

As etapas da metodologia do trabalho, apresentadas no fluxograma da Figura 1, são detalhadas nos próximos tópicos, bem como os resultados obtidos com os experimentos e as análises correspondentes.

4.1 Desenvolvimento dos modelos computacionais

Na Etapa 1 da pesquisa, foi identificado o problema de pesquisa, o qual buscava analisar meios alternativos de aumento da produtividade de uma célula de manufatura, sem incorrer em elevação dos custos de produção. Um esquema do fluxo produtivo da célula de manufatura estudada é apresentado na Figura 2. Dentro deste contexto as técnicas do STP poderiam ser aplicadas para aumentar a produtividade das operações reduzindo ao máximo possível as perdas no processo de manufatura. Esta célula apresenta problemas relativos à baixa produtividade, agravada por situações de oscilação acentuada de demanda.

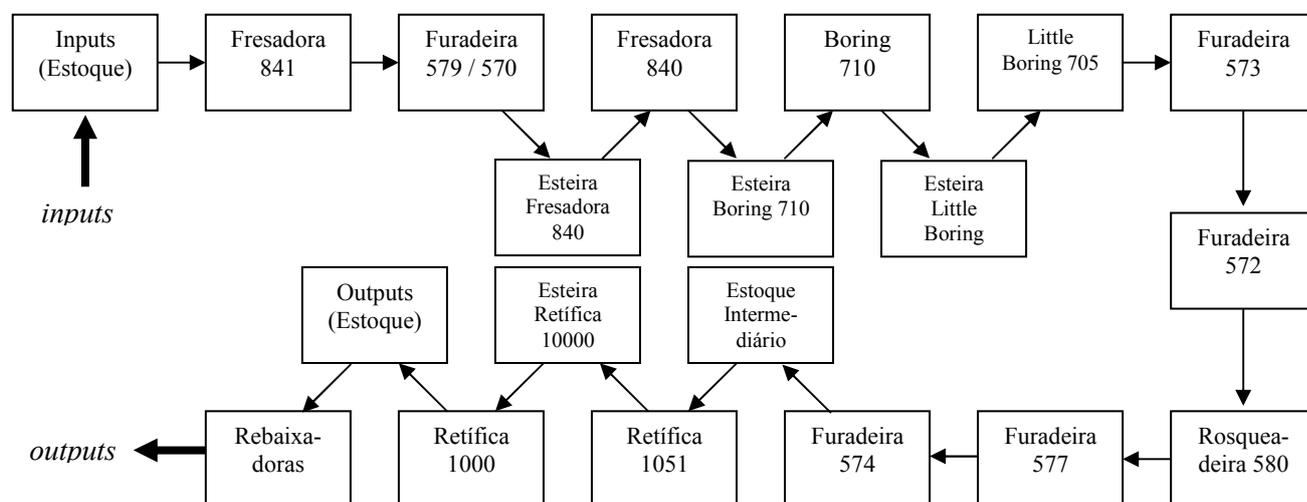


Figura 2 – Esquema da célula de manufatura e fluxo de materiais e componentes.

Fonte: Elaborado pelos autores.

Com base nas técnicas do STP vistas na seção de Fundamentação Teórica, na Etapa 2 foram definidos os experimentos a serem simulados no modelo computacional, com objetivo de aumentar a produtividade da célula e verificar os relacionamentos e efeitos sobre as demais variáveis de desempenho deste processo. Os experimentos realizados foram: (i) avaliação do lote de processamento ótimo na operação gargalo que maximizaria a produtividade da célula; (ii) balanceamento das operações em duas famílias de peças; e (iii) redução do tempo de ciclo ou gestão do tempo de operação do equipamento gargalo. As famílias de peças foram selecionadas, para fins de análise, por serem as mais relevantes em termos de produção na empresa sob estudo, para atender sua demanda.

De forma a identificar os relacionamentos entre as entradas (inputs) e as saídas (outputs) do sistema analisado, é apresentado no Quadro 2 um modelo conceitual com exemplos de variáveis de entrada e variáveis de saída e seus potenciais relacionamentos, sendo que, efetivamente, eles serviram de base para realização dos experimentos e testes com o modelo computacional.

Quadro 2 – Modelo conceitual de relacionamento entre variáveis *inputs* e *outputs* do sistema produtivo.

Inputs	Eficiência do Balanceamento das Atividades	Gestão ou Deslocamento (Redução do Tempo) do Gargalo	Redução do Tamanho dos Lotes de Produção
Outputs			

Produtividade	Relação Forte	Relação Forte	Relação Forte
Ociosidade dos Operadores	Relação Forte	Relação Fraca	Relação Média
Work-In-Process*	Relação Forte	Relação Média	Relação Forte
Lead Time**	Relação Média	Relação Forte	Relação Forte

* - Estoque em Processamento

** - Tempo de Atravessamento

Fonte: Elaborado pelos autores.

Assim, por exemplo, se considera que exista um forte relacionamento entre deslocamento do gargalo (gestão do equipamento gargalo) e a produtividade total da célula; em outras palavras, a redução do tempo de ciclo do equipamento de maior tempo por peça (gargalo), considerando uma análise sistêmica do processo produtivo (limitada à célula analisada), tende a acarretar um aumento no volume de produção da célula com a utilização dos mesmos recursos anteriores. De outro modo é provável que exista um relacionamento fraco entre o deslocamento do gargalo e a ociosidade dos operadores, pois, apesar de uma maior utilização do equipamento gargalo e, provavelmente, um maior volume de trabalho do operador responsável pela atividade, isto não ocorrerá nos recursos não-gargalo e nos operadores destes recursos. Os demais relacionamentos seguem a mesma lógica de raciocínio; estes relacionamentos foram definidos com base nas abordagens dos autores citados no referencial teórico. Os relacionamentos definidos neste modelo conceitual (Quadro 2) serão analisados, após a realização dos experimentos, a partir das variáveis outputs do modelo de simulação computacional.

Para realização deste estudo foram selecionadas duas famílias de produtos cujos componentes são produzidos nesta célula, as quais correspondem a 80% da demanda; são as famílias Y e Z. A célula é composta por 15 máquinas e 4 operadores fixos. As operações realizadas na célula em questão são operações de usinagem como furação, fresamento e retificação.

A Figura 3 ilustra o *layout* da célula (desenvolvido no software de simulação) com os respectivos operadores.

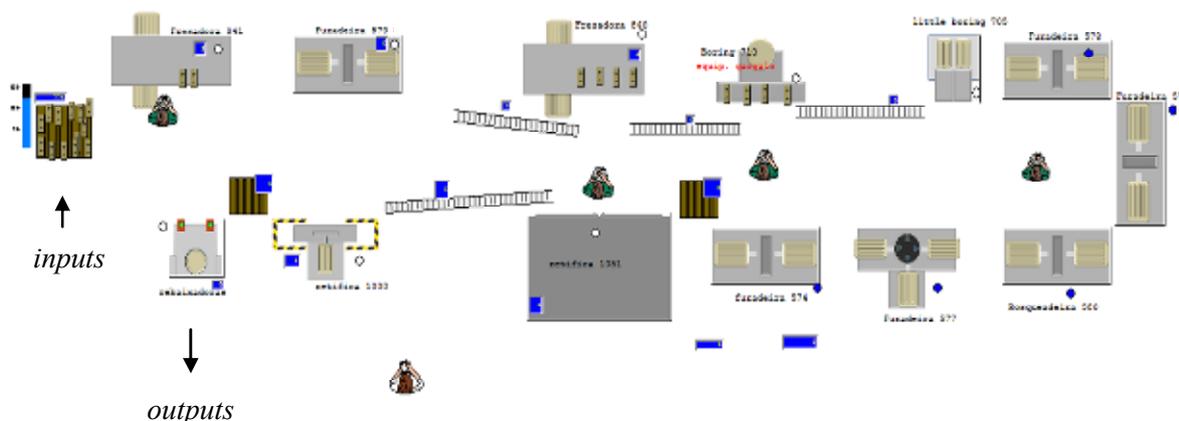


Figura 3 – Layout da célula de manufatura

Fonte: Elaborado pelos autores.

As últimas 3 máquinas (rebaixadoras) foram agrupadas em uma única representação gráfica por apresentarem características semelhantes de operação e com intuito de facilitar a elaboração do modelo e sua posterior análise. O operador fora da célula representa o mecânico que realiza as manutenções nas máquinas.

A disponibilidade dos equipamentos também foi considerada na construção do modelo computacional, a qual depende da eficiência do processo de manutenção da célula.

Considerando a ordem em que os diversos equipamentos estão posicionados no layout apresentado, os operadores indicados na Figura 3 atuam da seguinte forma: um operador atua sobre os 3 primeiros equipamentos (duas fresadora - 840 e 841 - e uma furadeira 579); um segundo operador atua sobre os equipamentos boring, little boring e furadeira 573; o terceiro operador atua nos equipamentos rosqueadeira e em três furadeiras (572, 577 e 580); o quarto operador atua nos

equipamentos furadeira 574, retíficas (1000 e 1051) e rebaixadoras; e o último operador, como mencionado anteriormente, atua na manutenção dos diversos equipamentos.

O modelo computacional foi construído em escala, composto pelos 15 equipamentos (considerando a simplificação já mencionada no número de equipamentos para facilitar a análise) e recursos humanos atuantes no processo produtivo.

Para a construção, verificação e validação do modelo computacional foi utilizado o software de simulação PROMODEL® Professional 7.0. Foram considerados os fluxos de produção referentes às duas famílias de peças (as famílias Y e Z possuem roteiros de fabricação distintos dentro da célula) e foram estabelecidos os relacionamentos entre os operadores e as operações produtivas. Para efeitos de simulação foram consideradas as mesmas sequências de produção utilizadas na empresa e um período de simulação de uma semana.

Após a construção do modelo computacional foi verificado se o mesmo representava o comportamento do sistema real. Para isso foi investigado, através do layout da planta, o posicionamento dos equipamentos e a lógica de trabalho dos operadores e sua sequência de execução das tarefas. A validação do modelo foi realizada após a inserção de todas as informações pertinentes ao processo produtivo estudado. Para validação do modelo computacional, foram definidos como parâmetros: produtividade diária da célula (peças/operador/hora); *lead time*; *WIP*; e ociosidade dos operadores. A simulação realizada considerou um período de uma semana, tomando por base autores da revisão bibliográfica (HARREL *et al.*, 2002; GAVIRA, 2003).

A Tabela 1 mostra os valores médios das variáveis *outputs* (resultados) do modelo computacional após as rodadas de simulação para as famílias Y e Z.

Tabela 1 - *Outputs* das rodadas (média das replicações das simulações) de validação do modelo computacional

Variáveis <i>outputs</i>	Familia Y	Familia Z
Produtividade (pçs/op/h)	12.5	7.7
<i>Lead time</i> (min)	389	289
<i>Work-in-process</i> (pçs)	113	69
Ociosidade dos operadores (%)	59.56	76.4

Fonte: Elaborado pelos autores

O modelo computacional foi replicado 3 vezes, seguindo as orientações de Robinson (1964) e Harrel *et al.*(2002), e os valores de produtividade do modelo foram comparados através de um teste de hipótese com os valores do sistema real. Foi realizado o teste *t* de Student para duas médias com variância desconhecida para as duas famílias de peças Y e Z.

O valor de *p* encontrado, com a aplicação do teste *t* de Student, para a família Y foi de 0,799 e para família Z o valor de *p* foi de 0,519; em termos práticos, não há evidência de que exista diferença entre as médias de produtividade do sistema real e a média de produtividade do modelo computacional. Em termos de exatidão, isto é, o grau de concordância entre a média de produtividade do sistema real e a média de produtividade do modelo computacional foi de 99% (produção do modelo de 2.227 peças contra 2.250 peças de produção real) para a família Y e 96% (produção do modelo de 1.330 peças contra 1.386 peças de produção real) para a família Z. A mesma análise foi feita em relação aos outros indicadores, sendo que, para o *lead time* e o *WIP*, também não foram encontradas evidências de que exista diferença entre as médias destes parâmetros no sistema real e a média dos mesmos obtida no modelo computacional. Considerando-se agora a ociosidade dos operadores, os resultados da simulação não puderam ser validados, pela falta de detalhamento dos dados disponíveis na empresa analisada (categorização das diferentes atividades dos operadores, como em atividade, parado ou ocioso, aguardando, em movimento transportando, em movimento voltando, em descanso). Analisando os resultados obtidos na produtividade, *lead time* e *WIP*, considerou-se que o modelo computacional retrata adequadamente o sistema produtivo físico que está sendo estudado, validando portanto o modelo desenvolvido.

4.2 Realização dos experimentos controlados através da simulação

As próximas seções apresentam a realização dos experimentos e as análises realizadas sobre os mesmos. Em cada experimento é analisado o aumento de produtividade e o impacto das mudanças realizadas no experimento em relação à situação original sobre as demais variáveis (*outputs*) definidas no processo de simulação da célula analisada. Em função do volume de experimentos que seriam necessários e, em função do maior volume de dados disponíveis e confiáveis na empresa para uma das famílias de peças, optou-se por concentrar a análise nesta. A delimitação dos experimentos, considerando somente a produção de uma família de peças, não prejudica as análises, visto que o objetivo dos experimentos é avaliar se as técnicas do STP selecionadas neste estudo efetivamente minimizam ou eliminam as perdas de produção discriminadas na literatura (Quadro 1) e melhoram os indicadores operacionais (Quadro 2).

4.2.1 Avaliação do tamanho de lote ótimo de processamento da família de peças analisada em um equipamento de capacidade múltipla (experimento 1)

Na célula analisada, uma possível fonte de perdas era representada pelo tamanho do lote de processamento utilizado na Retífica 1051. A retífica é um equipamento de capacidade múltipla e, por se tratar de uma retífica plana, varia sua capacidade de processamento em função da diferença de tamanho das peças. Para exemplificar a aplicação da sistemática proposta, foi utilizada a produção dos itens de uma família de peças. No processamento de peças desta família, a capacidade da retífica é de 88 peças/ciclo, tamanho de lote utilizado por batelada de produção, devido ao alto tempo de ciclo do equipamento (23 minutos em média) e ao fato da empresa ter como meta utilizar o menor número de *setups* possíveis.

Dentro da filosofia do STP, grandes lotes de operação e transferência prejudicam o fluxo da linha, a utilização dos recursos e a produtividade. Porém, dado que o tempo de ciclo do equipamento é alto, buscou-se analisar o tamanho de lote ótimo de processamento na retífica 1051 para permitir a maior produtividade na célula.

Simulando o funcionamento da célula de manufatura durante a usinagem da família selecionada e considerando, para cada rodada de simulação, uma redução no tamanho do lote de processamento (em blocos de 10 peças), conseguiu-se chegar a um tamanho de lote ótimo.

A definição sobre as reduções do tamanho de lote em blocos de 10 peças constituiu uma solicitação da própria empresa, por motivo de facilidade de planejamento segundo os funcionários da mesma. Conforme apresentado na Figura 4, o lote com 38 peças, para a família de peças estudada, seria a quantidade ideal de processamento que permitiria alcançar a produtividade de 14 peças/operador/hora (unidade identificada nas tabelas posteriores como *pçs/op/h* em média).

Comparando com a média anterior de produtividade, ou seja, aquela que é obtida com a configuração atual da célula, que era de 12,5 peças/operador/h, isto representa um aumento de 12% na produtividade. Vale mencionar que este aumento de produtividade é considerado significativo e a implementação do lote ótimo de produção seria, em tese, uma alteração relativamente fácil de realizar.

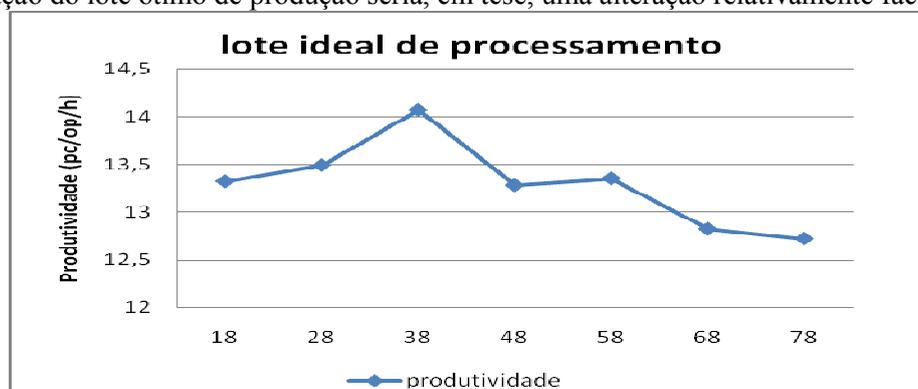


Figura 4 - Lote ótimo de processamento da retífica 1051.

Fonte: Elaborado pelos autores.

Deve ser observado que, na Figura 4, o eixo vertical representa a produtividade da célula em peças/operador/h, enquanto o eixo horizontal representa o número de peças (tamanho) por lote de produção e transferência. Ainda merece destaque o fato de que, considerando que as alternativas de lotes de produção e transferência sofreram variações em blocos de 10 peças, é possível que haja uma alternativa intermediária entre as avaliadas que apresente um resultado melhor em termos de produtividade, mesmo que de forma marginal.

Considerou-se a seguir o impacto que a alteração do tamanho do lote de processamento pode causar nas outras variáveis operacionais da célula. Os indicadores analisados para avaliar o impacto do tamanho do lote na célula e os valores obtidos nas simulações são apresentados na Tabela 2.

A Tabela 2 indica uma relação positiva entre redução do tamanho do lote e os indicadores de *lead time* e *work-in-process (WIP)*, ou seja, quanto menor o tamanho do lote de produção da retífica menores os valores de *lead time* e *work-in-process* da célula. A ociosidade permaneceu quase inalterada, apresentando pequenas variações em torno de um valor médio de 59,6%. Isto se deve, em grande parte, ao fato de não haverem sido alteradas as composições das tarefas dos operadores; ou seja, eles realizam aproximadamente a mesma tarefa por peça processada. Como a principal variável de estudo é a produtividade, o valor de tamanho de lote de 38 peças é o escolhido como mais adequado, mesmo identificando que os valores de *WIP* e *lead time* continuam diminuindo conforme se reduz o tamanho do lote. Este resultado de *WIP* e *lead time* era esperado no estudo realizado (Quadro 2), impactando diretamente na redução de perdas por espera e por estoque, respectivamente (Quadro 1), o que confirma a posição dos autores pesquisados.

Tabela 2 - Comparativo dos diversos tamanhos de lote de processamento e seus impactos sobre os indicadores de produção

Tamanho do lote (pçs)	Produtividade (pçs/op/h)	Lead time (min)	Work-in-process (pçs)	Ociosidade dos operadores (%)
88	12.5	389	113	59.56
78	12.64	354	94	60.61
68	12.75	339	83	59.02
58	13.4	337	82	59.54
48	13.35	282	80	59.45
38	14.07	272	64	60.22
28	13.5	258	59	59.06
18	13.4	234	55	59.25

Fonte: Elaborado pelos autores

4.2.2 Balanceamento das operações para produção da família de peças analisada (experimento 2)

Para realização deste experimento partiu-se da condição original (atual) da célula de manufatura. Assim, uma das técnicas usadas em linhas de montagem e células de produção para se atingir o nivelamento entre o *takt-time* (tempo de produção calculado com base na demanda do cliente e no tempo disponível para produção) e o tempo de ciclo das operações componentes da linha ou célula, é o balanceamento das operações entre os equipamentos e os operadores componentes do sistema produtivo analisado. Apesar do objetivo do balanceamento ser o ajuste dos tempos de ciclo das operações com o *takt-time* exigido do processo para atender a demanda, neste estudo o balanceamento foi utilizado com o objetivo de se obter uma maior utilização dos recursos, principalmente do recurso gargalo, visando uma maior produtividade total da célula. Desta forma não foram analisados padrões de demanda para a célula e, em consequência, não foram levantados os respectivos *takt-times* necessários para as demandas futuras projetadas.

O balanceamento foi realizado tomando como base a utilização nivelada dos operadores, e considerando o fato de que aliviando a carga de trabalho nos recursos com plena ocupação a utilização geral dos recursos do sistema tende a crescer. A análise de balanceamento permitiu identificar

subutilizações expressivas de parte de alguns operadores. Teoricamente, nesses casos deve-se ajustar o número de recursos disponíveis (operadores) no sistema pela redistribuição das operações entre os operadores que se mantêm no sistema, sempre respeitando as restrições do processo como um todo, e buscando a alocação de atividades aos locais mais próximos dos operadores. Desta forma não foram alocadas atividades em locais distantes dos operadores, mesmo que isto permitisse um maior equilíbrio no balanceamento do volume de trabalho executado, pela possível dificuldade prática de implantação das alternativas identificadas.

De modo a permitir uma melhor visualização dos resultados, a análise de balanceamento é feita através do GBO (Gráfico de Balanceamento das Operações), apresentado na Figura 5. O gráfico apresenta os estados dos recursos (operadores) antes do balanceamento (situação original/atuais), considerando novamente uma simulação do modelo durante um período de produção de 1 semana. As cores do gráfico (da esquerda para direita das barras) possuem as seguintes convenções: verde = % em uso; amarelo = % movimentando transportando; azul claro = % movimentando retornando; azul escuro = % ocioso; vermelho = % fora de trabalho.

A primeira observação que deve ser feita é quanto à utilização dos recursos. A situação antes do balanceamento era crítica, pois os operadores eram utilizados em média 35,3% do tempo disponível, considerando como utilização, o tempo que o operador está trabalhando mais o tempo de deslocamento entre os locais. Além disso, identificou-se grande variação entre as utilizações dos recursos, sendo que um dos operadores apresentou um percentual de utilização de apenas 15,6%.

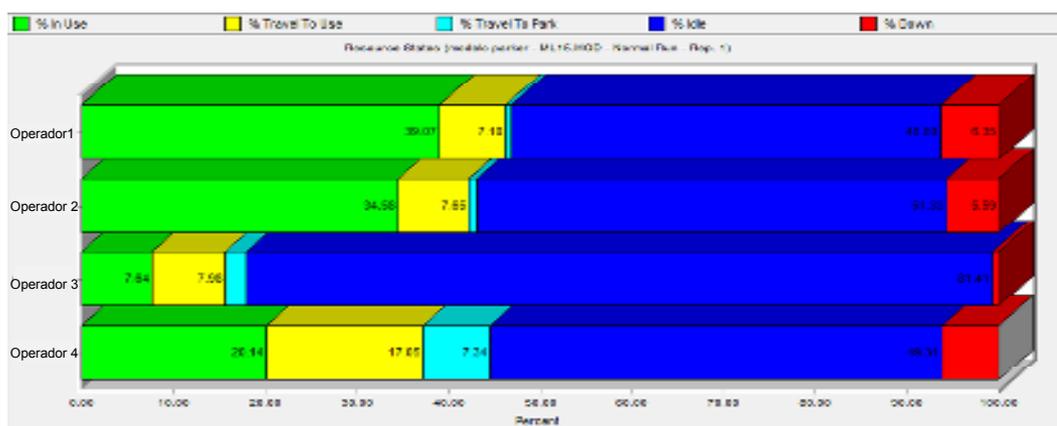


Figura 5- Estado dos recursos antes do balanceamento (situação original).

Fonte: Elaborado pelos autores.

O nível mínimo de utilização dos operadores, de uma forma geral, varia de empresa para empresa em função das operações que são realizadas e pelo esforço demandado dos operadores no processamento. Neste estudo se considerou o nível de utilização dos operadores bastante baixo neste caso. Levando em conta esta situação e a demanda da empresa por uma melhor utilização de seus operadores, estabeleceu-se como meta um nível mínimo de utilização dos operadores de cerca de 50%.

Objetivando o balanceamento dos recursos, foi retirado um operador e foram redistribuídas as tarefas entre os demais. A Figura 6 apresenta o GBO da célula após o balanceamento, considerando uma simulação do modelo durante um período de produção de 1 semana.

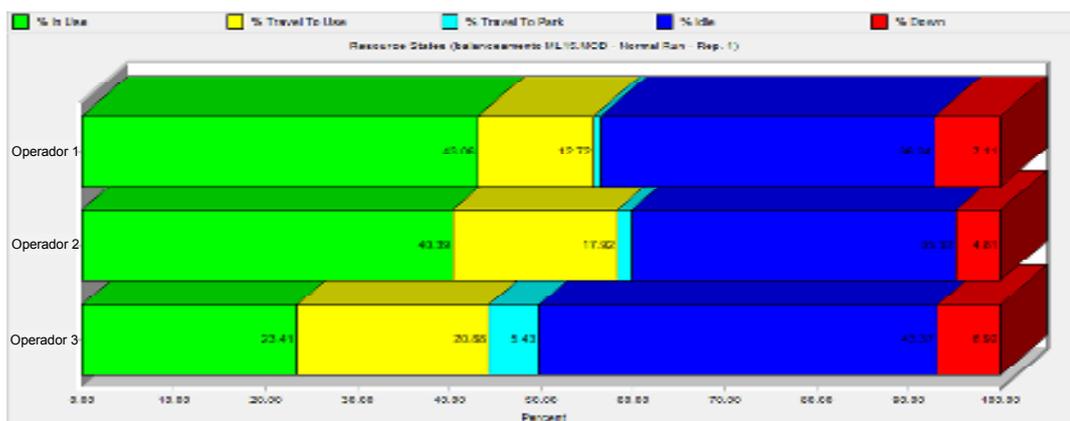


Figura 6 – Estado dos recursos depois do balanceamento.

Fonte: Elaborado pelos autores.

Após o balanceamento os operadores passaram a ter uma utilização média de 52,79%, considerando a utilização como o tempo que os operadores estão realizando trabalho efetivo (em uso) mais o tempo de deslocamento (movimentando transportando) entre os locais. O operador menos utilizado apresentou um percentual de utilização de 44,3%. Obteve-se uma redução na mão-de-obra empregada (e potencialmente em seus custos) pela eliminação de um operador e um aumento na utilização dos demais, com um nível de produtividade dos operadores maior que na configuração original. Na Tabela 3 são apresentados os resultados dos indicadores analisados antes e após o balanceamento da célula.

Tabela 3 - Resultados dos indicadores antes e depois do balanceamento

Balanceamento	Utilização dos operadores(%)	Produtividade (pçs/op/h)	WIP (pçs)	Lead time (min)
Antes	35,3	12,5	113	389
Depois	52,79	14,78	118	220

Fonte: Elaborado pelos autores

Com relação ao indicador de produtividade este passou de uma média de 12,5 peças/operador/h para 14,78 peças/operador/h, um aumento de 18,24% na produtividade. Este indicador foi selecionado para avaliar a produtividade média dos operadores e não o volume de produção. Assim, a produtividade por operador aumentou, como era esperado (Quadro 2). Cabe salientar que, atualmente, a empresa não enfrenta problemas para atendimento de sua demanda, sendo que o presente estudo propõe a análise de alternativas futuras visando atender sazonalidades e previsíveis aumentos de demanda.

Com relação ao *lead time*, este passou de 389 minutos para 220 minutos, apresentando uma redução bastante significativa. O *work-in-process (WIP)* passou de um valor médio de 113 peças para 118 peças, um aumento de 4,4%; esse pequeno aumento é devido ao aumento da quantidade de tarefas por operador, o que fez com que as peças permaneçam mais tempo nos buffers (estoque em processo), aumentando a perda por espera na célula. Estes resultados não eram esperados, pois, conforme apresentado nos Quadros 1 e 2, a tendência do balanceamento é favorecer a redução do *WIP* e a redução de perdas por espera e estoques, de acordo com os autores utilizados como base para este estudo. No entanto, estima-se que a redução do número de operadores realizada neste experimento tenha impactado nos resultados de forma um pouco diferenciada em relação a um simples e puro balanceamento das operações com efeitos nas perdas de espera, transporte e movimentação.

Os resultados comprovam que o balanceamento das operações permite utilizar os operadores de melhor forma, permitindo que eles rendam mais e impactando de formas diferenciadas nos demais indicadores, mormente se houver alteração na sua quantidade.

4.2.3 Redução do tempo de ciclo do equipamento gargalo de capacidade unitária para a família selecionada de peças (experimento 3)

Em operações de usinagem em máquinas operatrizes semi-automáticas, reduções nos tempos de ciclo são conseguidas pela utilização de ferramentas que suportem parâmetros de usinagem mais robustos, dependendo para isso do suporte de máquinas e dispositivos que consigam atender a essas solicitações. Para a redução do tempo de ciclo utilizam-se ferramentas de metal-duro em substituição a ferramentas de aço rápido. Porém a substituição depende da máquina e do dispositivo suportarem as exigências em termos de força de fixação, no caso do dispositivo, e potência e rigidez, no caso da máquina (SIHVO; VARIS, 2008).

No caso da célula de manufatura em análise neste trabalho, suas máquinas operatrizes semi-automáticas apresentam necessidade de ajuste dos parâmetros de usinagem. Muitas vezes, pelo desconhecimento do assunto por parte dos operadores, ou falta de procedimentos adequados, os parâmetros são subestimados. Esta subestimação de parâmetros pode levar a um mau aproveitamento da ferramenta e, principalmente, pode afetar o fluxo de peças na célula. Para investigar a alteração de produtividade da célula pela alteração do avanço da ferramenta (*av*) usada no Equipamento Boring (710), que é o equipamento de capacidade unitária gargalo da célula, foi realizado este experimento considerando como a principal variável de resposta a produtividade total da célula na fabricação das peças da família selecionada durante uma semana.

Uma análise da disponibilidade real do equipamento poderia contribuir para uma melhor análise do desempenho do mesmo e seu impacto na produtividade da célula como um todo. Porém a empresa não dispunha destes dados quando da realização deste trabalho.

O experimento foi baseado na alteração nos níveis de avanço dentro dos padrões julgados aceitáveis pelo fabricante da ferramenta e citados no trabalho de Sihvo e Varis (2008), que investigaram o desgaste de brocas canhão em furadeiras e sua vida útil. Este experimento também partiu da situação original da célula em análise. Os níveis de avanço utilizados no experimento foram de 75 à 95 mm/min, variando 5 mm/min para cada nível (segundo sugestão daqueles autores), sendo medido o nível de produtividade horária para cada nível de avanço, assim como os demais indicadores (*WIP*, *lead time* e ociosidade dos operadores). Os resultados são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Experimento para identificar nível ótimo de avanço para ferramenta no equipamento gargalo de capacidade unitária

Avanço (mm/min)	Produtividade média (pçs/op/h)	WIP (pçs)	Lead time (min)	Ociosidade média dos operadores (%)
75	12.175	96	239.72	57.21
80	12.86	106	237.5	58.28
85	13.73	77	201.38	51.64
90	13.65	97	232.3	51.34
95	12.91	118	220.3	53.69

Fonte: Elaborado pelos autores

Teoricamente, imaginava-se que cada incremento de avanço na ferramenta pudesse gerar um incremento nos níveis de produtividade, mesmo considerando que a ferramenta teria sua vida útil reduzida, o que geraria um tempo de troca de ferramenta (*setup*) mais frequente. Foi considerada uma relação baseada no estudo de Sihvo e Varis (2008), na qual para cada incremento de avanço de 5 mm/min reduz-se em média a vida da ferramenta em 5 metros de corte, resguardadas também as devidas proporções existentes entre a liga de aço utilizada no artigo dos autores e o ferro fundido maleável, utilizado para simulação da fabricação das peças.

Entre os 5 níveis de avanço testados o que apresentou o melhor resultado em termos de produtividade foi o nível de avanço de 85 mm/min. O fato dos incrementos de avanço não representarem aumento de produtividade a partir do nível 85 mm/min, gerou três hipóteses para justificar esse fato. A primeira hipótese é de que o equipamento, com a elevação do avanço da ferramenta deixou de ser o gargalo. A segunda hipótese é que a elevação do avanço da ferramenta reduziu o tempo de ciclo e o operador 3 atingiu sua utilização máxima. A terceira é que a elevação do

avanço aumentou o desgaste da ferramenta e a frequência de troca de ferramenta. A primeira hipótese foi descartada pela análise do tempo das operações da célula e deste equipamento; o mesmo continuou constituindo-se no gargalo apesar da redução do tempo de ciclo proporcionada pela troca da ferramenta. A segunda hipótese também foi descartada pela análise da utilização do operador 3, a qual não atingiu 100%. A terceira hipótese foi comprovada pela análise dos tempos de parada para setup; estes aumentaram no período total da simulação, pelo maior número de setups realizados em função da alteração da vida útil da ferramenta.

Desta forma, o experimento comprovou um aumento de produtividade e as reduções de *WIP* e *lead time* (Quadro 2) até uma situação em que outro fator influenciou mais fortemente os resultados do que a redução do tempo de ciclo do gargalo, qual seja a vida útil da ferramenta e o consequente aumento de operações de *setup* realizadas.

4.2.4 Comparação dos resultados dos experimentos

Após a realização dos experimentos, pode-se avaliar se os resultados dos mesmos atenderam aos objetivos de identificar e analisar os efeitos de mudanças, baseadas nas técnicas do STP, sobre a produtividade, *WIP*, *lead time* e ociosidade dos operadores de uma célula de manufatura.

As mudanças na célula de produção analisada podem ser avaliadas pelos resultados discriminados na Tabela 5. Convém destacar a independência entre os experimentos realizados, a qual foi proposital, visto que o objetivo do estudo é analisar o efeito da aplicação de cada melhoria (técnicas selecionadas a partir do levantamento apresentado no Quadro 1). Este estudo não tenciona nem apresenta uma análise da aplicação conjunta de técnicas do STP.

Tabela 5 - Resumo dos resultados dos experimentos.

Parâmetros	Experimento 1 (lote de produção)	Experimento 2 (balanceamento de recursos)	Experimento 3 (tempo de ciclo do gargalo)	Original (para a família de peças selecionada)
Produtividade (pçs/op/h)	14,07	14,78	13,73	12,5
<i>Work-in-Process</i> (pçs)	64	118	77	113
<i>Lead Time</i> (min)	272	220	201,38	389
Ociosidade dos operadores (%)	60,22	47,21	51,64	59,56

Fonte: Elaborado pelos autores.

Com relação à produtividade, o Experimento 2, que aborda o balanceamento da célula de produção, é o que apresentou o melhor resultado, ao mesmo tempo em que produz o menor valor de ociosidade dos operadores (47,21%). Isto era esperado (Quadro 2) e demonstra que o balanceamento é uma técnica que elimina perdas e aumenta a utilização dos recursos nos processos produtivos, de acordo com a posição dos autores pesquisados. Deve ser observado, no entanto, que os efeitos produzidos pelo balanceamento foram acentuados pela redução realizada no experimento sobre o número de operadores.

O Experimento 1 é o que garante o menor *work-in-process* de todos os experimentos (64 peças), o que conduziu a uma redução do *lead time* em relação à situação original. O Experimento 3 por sua vez, abordou a diminuição do tempo de ciclo do equipamento gargalo de capacidade unitária, resultando no menor *lead time* (201,38 min) entre os experimentos, confirmando que o *lead time* de processamento de uma célula depende fortemente das ações sobre o tempo no equipamento gargalo. Comparando os Experimentos 1 e 3, pode-se afirmar, para o caso da célula estudada, que ações de redução do tempo de ciclo do gargalo resultam em um melhor resultado se o objetivo é a rapidez de entrega do produto (menor *lead time*).

Ainda levando em conta os resultados constantes da Tabela 5, e observando as relações apresentadas no Quadro 2, verifica-se que:

- O Experimento 1 (redução do tamanho do lote), em relação à situação original, impactou de forma visível na produtividade, no *work-in-process* e no *lead time*; em termos de ociosidade dos operadores, esta permaneceu praticamente inalterada. Tais resultados são compatíveis com a expectativa do Quadro 2 a menos da ociosidade dos operadores.

- O Experimento 2 (balanceamento das atividades dos operadores), em relação à situação original, validou as relações da técnica com os indicadores produtividade, *lead time* e ociosidade dos operadores, do Quadro 2 mas não validou a relação da técnica com o indicador *WIP*. Possivelmente as diferenças verificadas frente ao Quadro 2 devem-se à meta fixada no experimento de 50% de utilização da mão-de-obra, cujo aumento do volume de trabalho significou um aumento dos materiais em circulação na célula (*WIP*), mas também das perdas por espera.

- O Experimento 3 (gestão do gargalo – redução do tempo), comparativamente à situação original, impactou na produtividade, no *work-in-process*, no *lead time* e na ociosidade dos operadores, o que valida as relações discriminadas no Quadro 2.

A avaliação dos experimentos realizados através da simulação computacional permitiu verificar os impactos diferenciados dos mesmos sobre os parâmetros de análise considerados, ou seja, produtividade, *lead time*, *work-in-process* e ociosidade dos operadores. Assim, apesar das técnicas do STP possuírem, de forma geral, focos bem definidos para perdas específicas dos sistemas produtivos, no caso analisado produziram impactos diferenciados daqueles esperados (Quadros 1 e 2), principalmente nos experimentos que avaliaram as técnicas de lote ótimo de processamento e balanceamento dos recursos. Os motivos identificados para estes resultados foram a definição de um lote ótimo focado na maior produtividade da célula, o que afetou os outros indicadores; e um balanceamento que forçou uma utilização mínima de 50% para os operadores da célula, gerando perda por maior *WIP*.

Deve ainda ser lembrado que os Quadros 1 e 2 apresentam as relações teóricas individuais entre técnicas de melhoria e tipos de perdas e entre *Inputs* (ações) e *Outputs* (resultados) dos sistemas produtivos, e não os efeitos combinados que são possíveis de observar através da simulação computacional. Desta forma, as diferenças identificadas eram esperáveis.

Por outro lado, não foram utilizadas análises estatísticas para verificação dos resultados, uma vez que os resultados produzidos pela simulação do modelo computacional foram virtuais, não sendo assim possível sua eventual confrontação com resultados práticos reais da célula de manufatura.

Os resultados dos experimentos induzem a conclusão de que não existe, no caso analisado, uma melhor alternativa para otimização dos indicadores operacionais, mas sim alternativas mais adequadas em função dos objetivos definidos, no caso o aumento de produtividade, ou melhor, uma combinação de alternativas e técnicas que garantam determinados resultados (objetivos) minimizando ou mitigando simultaneamente efeitos ou impactos não desejados.

5 Considerações finais

Considerando o objetivo inicialmente proposto para o presente trabalho, constata-se que o mesmo foi alcançado na medida em que, através da construção de um modelo representativo da célula de manufatura em estudo e posterior simulação computacional desta, foi possível identificar a contribuição de algumas técnicas do STP para a melhoria de sua produtividade, bem como o efeito destas técnicas sobre outros parâmetros operacionais do processo produtivo, como o *lead time*, *work-in-process* e ociosidade dos operadores.

Todos os experimentos promoveram ganhos de produtividade e poderiam ser implementados no processo real, mesmo não tendo sido investigadas as interações entre os experimentos e a simulação da aplicação conjunta das diferentes técnicas.

No Experimento 1, a redução do tamanho do lote na retífica, equipamento que pode eventualmente tornar-se gargalo em função de sua capacidade múltipla e operação com lotes de produção de peças, proporcionou um aumento de produtividade e redução acentuada do *WIP*, o que confirma as afirmações de Ohno (1997), Liker e Meier (2007) e Liker (2007), os quais citam que para os sistemas de produção alcançarem a eficiência máxima deveriam mudar de um sistema de produção empurrada *MTS* (*make to stock*) para um sistema puxado com lote unitário *MTO* (*make to order*). Esta mudança é indicada sempre que os estoques representarem perdas superiores aos investimentos necessários à mudança do sistema *MTS* para o *MTO*. O que se nota no Experimento 1 é um pequeno deslocamento do processo produtivo analisado na escala do *MTS* para *MTO*, sem que o sistema deixe de ser um *MTS*.

A partir das simulações, verifica-se que o Experimento 2 apresentou resultados mais interessantes, por produzir o maior valor em termos de produtividade ao mesmo tempo em que permite alcançar uma potencial redução de custos, ao eliminar a necessidade de um operador pelo balanceamento das operações da célula. Constata-se aqui que existe convergência entre o que citam alguns autores e os resultados dos experimentos realizados. O estudo confirma a aplicabilidade do STP para melhorar a produtividade da célula de manufatura conforme apresentado no estudo de Menegon, *et al.* (2003).

O Experimento 3 representa a investigação, relativamente ao que citam Goldratt e Cox (2003), sobre a teoria das restrições. Aqui confirmaram-se os princípios citados pelos autores, pois as reduções de tempo de ciclo no equipamento gargalo conferem incrementos de produtividade na célula analisada. O Experimento 3 permitiu a análise sobre um modo de se reduzir o tempo de ciclo, que foi a otimização dos parâmetros de corte da ferramenta no equipamento gargalo. O que se observou é que a mudança nos parâmetros de corte interage com outras variáveis que influenciam na produtividade. Conclui-se que esse experimento necessita ser mais bem investigado, por sua aplicação estar vinculada à análise de fatores fora do escopo do trabalho.

Outro aspecto, identificado a partir dos resultados da simulação dos experimentos, é o fato de que quando se busca uma melhoria em um parâmetro de um sistema ou processo produtivo, através de uma mudança específica, os impactos sobre outros parâmetros deste processo não necessariamente representam otimizações dos mesmos, podendo implicar tanto em melhorias como perdas em termos de resultados do processo. Assim, haveria necessidade, caso se deseje melhorar ou otimizar simultaneamente diversos parâmetros operacionais do processo, simular combinações dos experimentos (mudanças no processo) para que se obtenha os resultados desejados nos parâmetros analisados. Ou seja, a simulação contribui para uma análise sistêmica dos efeitos combinados e resultados da aplicação de técnicas do STP em uma célula de manufatura, o que dificilmente seria possível através de outras formas de análise. Assim, a simulação permitiu uma maior compreensão do comportamento do sistema em estudo, confirmando as afirmações de Gavira (2003), Chung (2003) e Carlson e Yao (2008). A simulação também demonstrou ser viável na aplicação conjunta com as técnicas do STP, indo ao encontro dos resultados de trabalhos como o de Filho e Tubino (2001).

O estudo ainda confirma a aplicabilidade do STP para melhorar a produtividade da célula de manufatura pesquisada conforme o estudo de Menegon *et al.* (2003).

Comparando o modelo conceitual proposto com os resultados dos experimentos, estes retornaram valores coerentes, considerando-se as devidas proporções nas comparações, pois o modelo conceitual trata de relações qualitativas e os resultados dos experimentos apresentaram valores quantitativos. O modelo conceitual foi considerado válido na medida em que direcionou os esforços de realização dos experimentos. Por exemplo, de acordo com os autores pesquisados (SHINGO, 1996), estimava-se que existiria um forte relacionamento entre a redução do lote de produção na retífica da célula de manufatura com a redução do *WIP* na mesma, o que se confirmou através dos resultados da simulação.

Ainda, a simulação permitiu evidenciar que as várias técnicas do STP têm seus focos claramente definidos em termos de impactos sobre as perdas existentes nos processos produtivos. Porém, apresentam também outros efeitos e impactos paralelos sobre outros parâmetros e elementos operacionais que precisam ser claramente compreendidos e avaliados na busca dos objetivos definidos.

Sob o ponto de vista gerencial o estudo demonstrou ser interessante, por proporcionar uma investigação real e precisa de objetivos da empresa analisada, como conquistar ganhos de produtividade com o uso de técnicas que atendam os objetivos de melhoria buscados. Como sugestão para trabalhos futuros, pode-se avaliar os experimentos sob o ponto de vista dos custos do processo produtivo, e simular computacionalmente a aplicação de outros conceitos e técnicas do STP.

Referências

BANKS, J; CARSON II, J.S.; NELSON, B.L. **Discrete-Event System Simulation**. 2d. Edition, New Jersey:Prentice-Hall, 1996.

- BATISTA, J. B., MUNIZ, J., JUNIOR, E. D. B. *Análise do sistema Toyota de produção: estudo exploratório em empresas brasileiras do grupo Toyota*. Anais. XXVIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção – ENEGEP 2008. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2008.
- BOYLE, T. A., RATHJE, M. S. *An empirical examination of the best practices to ensure manufacturing flexibility*. Journal of Manufacturing Technology Management, vol. 20, n. 3, 2009, pp. 348-366.
- CARLSON, J. G. H., YAO, A. C. *Simulating an agile, synchronized. manufacturing system*. International Journal Production Economics, vol. 112, 2008, pp.714–722.
- CHEN, N., IMBS, J., SCOTT, A. *The dynamics of trade and competition*. Journal of International Economics. vol. 77, 2009, pp. 50-62.
- CHUNG, C. A. *Simulation modeling handbook: a practical approach*. New York. CRC press, USA, 2003.
- FILHO, S. A. B., TUBINO, D. F. *Um modelo de simulação computacional apresentando as vantagens da polivalência*. Anais. XXI Encontro Nacional de Engenharia de Produção – ENEGEP 2001. Salvador, BA, Brasil, 2001.
- GAVIRA, M. O. *Simulação Computacional como uma Ferramenta de Aquisição de Conhecimento*. 2003, 163f, Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – UFSCAR, São Carlos, SP, 2003.
- GLASER-SEGURA, D.A., PEINADO, J., GRAEML, A.R., *Fatores Influenciadores do Sucesso da Produção Enxuta: uma análise da Indústria de três países de Economia Emergente*. RAUSP – Revista de Administração, São Paulo, v.46, n.4, p.423-436, out/nov/dez 2011.
- GOLDRATT, E. M., COX, J. *A Meta: um processo de melhoria contínua*. 2a. Ed. São Paulo: Nobel, 2003, 365p.
- HARREL, C. R., MOTT, J. R. A., BATEMAN, R. E., BOWDEN, R. G., GOGG, T. J. *Simulação: otimizando os sistemas*. 2a. Ed. São Paulo: IMAM, 2002, 136p.
- INVERNIZZI G., *O Sistema Lean de Manufatura aplicado em uma Indústria de Autopeças produtora de Filtros Automotivos*. 2006, Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) UNICAMP, Campinas, SP, 2006.
- JAHANGIRIAN, M., ELDABI, T., NASEER, A., STERGILOULAS, L. K., YOUNG, T. *Simulation in manufacturing and business: A review*. European Journal of Operational Research, vol. 203, 2010, pp.1–13.
- JUGENT, D., NOGUEIRA, E., SILVA, S. L. *Estratégia de operações e prioridades competitivas: estudo de caso em uma empresa*. Anais. Simpósio de Administração da Produção, Logística e Operações Internacionais – SIMPOI 2005. FGV – EASP, São Paulo, SP, 2005.
- JUNQUEIRA, F., MIYAGI, P.E.. *Modelagem e Simulação Distribuída de Sistema Produtivo baseados em Rede de Petri*. Revista Controle e Automação, São Paulo, v.20, n.1, jan/fev/mar 2009.
- KARLSSON, C., AHLSTRÖM, P. - *Assessing changes towards lean production*. International Journal of Operations & Production Management. vol.16, n.2, 1996, p. 24-41.
- LIKER, J. K., MEIER, D. *O Modelo Toyota: manual de aplicação*. 2a. Ed., Bookman: Porto Alegre, 2007, 432 p.
- LIKER, J. K. *Modelo Toyota, Os 14 princípios de Gestão do Maior Fabricante do Mundo*. 2a. Ed. Porto Alegre: Bookman, 2007, 320 p.
- MAIA, J. L., CERRA, A. L., FILHO, A. G. A. *Estratégia de operações na indústria automotiva: os casos de duas montadoras de motores instaladas no Brasil*. Anais. Simpósio de Administração da Produção, Logística e Operações Internacionais – SIMPOI 2006. FGV – EASP, São Paulo, SP, 2006.

- MAYERLE, S. F., SANTOS R. N., *Algoritmo genético para o balanceamento de linhas de produção*. Anais. XXIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção – ENEGEP 2003 . Ouro Preto, MG, Brasil, 2003.
- MENEGON, D., NAZARENO, R. R., RENTES, A. F. *Relacionamento entre desperdícios e técnicas a serem adotadas em um Sistema de Produção Enxuta*. Anais. XXIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção – ENEGEP 2003. Ouro Preto, MG, Brasil, 2003.
- OHNO, T. *O sistema Toyota de produção: além da produção em larga escala*. Porto Alegre: Bookman, 1997, 149 p.
- PASA, G. S. *Discussão sobre a relevância e o caráter científico do estudo dos princípios do sistema Toyota de produção e da aplicabilidade dos mesmos*. Anais. XVIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção – ENEGEP 1998. Niterói, RJ, Brasil, 1998.
- PAVONI, E. T., HILLIG, É., SCHNEIDER, V. E. *A sincronização da produção segundo a Teoria das Restrições aplicada a uma indústria de embalagens plásticas – um caso de sucesso*. Anais. XXIV Encontro Nacional de Engenharia de Produção – ENEGEP 2004. Florianópolis, SC, Brasil, 2004.
- PIDD, M. *Modelagem empresarial: Ferramentas para tomada de decisão*. Porto Alegre: Bookman, 1998, 314 p.
- ROBINSON, S. *Simulation: the practice of model development and use*. Chichester: John Wiley & Sons, 1964, 339 p.
- SAMPAIO, P. S., FILHO, J. R. F. *A hibridização de um sistema de produção- O caso da fábrica de automóveis Daimler-Chrysler de Juiz de Fora*. Anais. XXVIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção – ENEGEP 2008. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2008.
- SHAH, R., WARD, P. T., *Lean manufacturing: context, practice bundles, and performance*. Journal of Operations Management. vol. 21, 2003, pp.129–149.
- SHINGO, S. *O Sistema Toyota de Produção: do ponto de vista da Engenharia de Produção*. 2ª Ed., Porto Alegre: Bookman, 1996.
- SHINGO, S. *Study of Toyota Production System from industrial engineering viewpoint*. Cambridge: Productivity Press, 2000, 291 p.
- SIHVO, I., VARIS, J. *The wear of single flute gun drill and tool life tests*. Mechanika, vol. 53, n. 5, 2008, pp.59-64.
- SILVA, E. L., MENEZES, E. M., *Metodologia de pesquisa e elaboração de dissertação*. Florianópolis: Laboratório de ensino a distância da UFSC, 2000, 118 p.
- STANDRIDGE, C. R., MARVEL J. H., *Why Lean needs simulation*. Anais. Winter Simulation Conference, USA, 2006, pp. 1907-1912.
- TIGRE, P. B. *Inovação e teoria da firma em três paradigmas*. Revista Economia Contemporânea, n. 3, Jan. – Jun. de 1998.
- WILLIAMS, E. J., CELIK, H. *Analysis of conveyor systems within automotive final assembly*. Anais. Winter Simulation Conference, Proceedings, USA, 1998, 1512-1518.
- WOMACK, J. P., JONES D. T., *A máquina que mudou o mundo*. 13a. Ed., Rio de Janeiro: Campus, 2004, 342 p.