

IMPACTO DA PREEMPÇÃO DE ORDENS NA LÓGICA CONWIP: UM ESTUDO BASEADO EM SIMULAÇÃO E ANÁLISE DE CENÁRIOS

Prof. Isaac Pergher, Msc.

Centro Universitário UNIVATES
eng.isaac@hotmail.com

Prof. Guilherme Luís Roehe Vaccaro, Dr.

Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas - PPGEPS
Programa de Pós-Graduação em Gestão e Negócios - PPGN
guilhermev@unisinis.br

Prof. Diego Augusto de Jesus Pacheco

Departamento de Engenharia de Produção FACCAT
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção – UFRGS
profdajp@gmail.com

Resumo

Este artigo tem por finalidade explorar os possíveis impactos do uso de regras de preempção na abordagem *Conwip*. Para tanto são utilizadas técnicas de Simulação Computacional, Análise de Variância ANOVA, teste não-paramétrico de Kruskal-Wallis, Análises *post-hoc* pelo Teste de Tukey e intervalos de confiança para a média. Os dados usados para modelagem são procedentes de um ambiente real de produção, o qual é formado por nove estações de trabalho que realizam processos de usinagem e montagem, com fluxo de materiais do tipo A. Um modelo de simulação por eventos discretos foi desenvolvido para representar o ambiente em estudo, sendo analisados diferentes quatro cenários. Os resultados obtidos fazem menção aos possíveis impactos nos indicadores de Taxa de atendimento, Taxa de produção efetiva (*TH*), Ganho \$ dias em atraso e *Lead time* de produção (*CT*), ocasionados pela preempção de ordens e por alterações no volume de *WIP*.

Palavras-Chave: Simulação Computacional; *Conwip*; Kruskal-Wallis; Preempção; ANOVA

Abstract

This paper explores the possible impacts of preemption rules on a *Conwip* based production system. The techniques applied were Computer Simulation, Analysis of Variance, Kruskal-Wallis test, Tukey post-hoc analysis and confidence intervals for the mean. Data used for modeling came from a real production environment with nine workstations that perform basically machining processes and assembly with convergent (type A) materials flow. A computer model was developed to represent the production environment being analyzed in four different scenarios. The results show the possible impacts on the indicators of service rate, effective production rate (*TH*), Gain \$ days overdue and Production lead time (*CT*), caused by the preemption of orders and changes in the work in process level.

Keywords: Discrete event simulation; *Conwip*; Kruskal-Wallis; Preemption; ANOVA

1. Introdução

A pressão por eficiência produtiva, originada pela concorrência, pelo desejo de aumento de efetividade e redução de impactos ambientais, tem levado as organizações a buscarem alternativas ligadas ao avanço da tecnologia, à virtualização de processos, à

globalização de operações e a alterações nas cadeias de produção. Tais movimentos buscam concretizar conceitos como vantagem competitiva ou redução de desperdícios. Neste sentido, um dos aspectos que pode contribuir com a capacidade de geração de valor da organização, diz respeito ao modo pelo qual, são gerenciadas as operações de produção à luz da estratégia de produção. Na composição da estratégia de produção são definidos, entre outros elementos, os volumes de estoques, planos de capacidade, definição da abordagem para gerir o fluxo de materiais, localização de novas plantas, cronograma de investimentos, entre outros.

Ao considerar ambientes produtivos intermitentes com fluxo convergente tipo A (UMBLE; UMBLE, 1999), um dos elementos que pode contribuir com o aumento na capacidade de competição da organização, bem como, tornar complexa a gestão de ambientes produtivos, refere-se à abordagem utilizada para gerir o fluxo de materiais. Isto se deve às diferentes premissas e pressupostos de operação, intrínsecas em cada proposta. Nesse contexto é possível destacar *MRP (Material Resources Planning)*, *Kanban*, *Conwip (Constant work-in-process)* e *DBR (Drum-Buffer-Rope)* como abordagens potenciais. Focalizando exclusivamente na abordagem *Conwip*, Hopp e Spearman (2000) destacam que o *Conwip* se caracteriza por manter constante o volume de estoque em processo (*WIP*) entre pontos específicos do processo e por permitir a entrada de um ‘novo trabalho’ na linha de produção apenas no instante em que ocorre a saída de um ‘trabalho pronto’. No que tange ao *WIP*, cabe observar que os mesmos autores propõem o uso da Lei de Little (LITTLE, 1961) para estimar o desempenho do sistema de produção quanto ao *WIP*, à taxa de produção efetiva do sistema ou *throughput (TH)* e ao *lead time* de produção (*CT*).

Entretanto, previamente à liberação de um ‘novo trabalho’ para a linha de produção, é necessário estabelecer o sequenciamento dos trabalhos existentes, de modo a atender, entre outros aspectos, os prazos de entrega exigidos pelos clientes. Neste âmbito podem ser utilizadas diferentes regras de sequenciamento, como por exemplo: *Critical ratio*, *Earliest due date*, *Shortest process time*, entre outras. Após ocorrer a decisão de qual ordem deve entrar na linha (por meio do sequenciamento), Hopp e Spearman (2000) propõem o uso da regra FIFO (*first-in-first-out*) para o fluxo de trabalhos à jusante, no intuito de minimizar a ação da variabilidade na linha de produção e melhorar a previsão de conclusão dos trabalhos. Contudo, em situações em que seja necessária a preempção de ordens em processo, a literatura concernente ao tema *Conwip* não esclarece qual deve ser o procedimento a ser executado, visto que alterações no sequenciamento das mesmas podem ser feitas unicamente no instante de liberação de uma nova ordem de produção.

Considerando os elementos destacados no parágrafo anterior, diante da necessidade de início imediato do processamento de ordens classificadas como urgentes, sob a ótica do *Conwip*, este trabalho entrará na linha de produção somente após a finalização de outros trabalhos em andamento. O trabalho urgente será empurrado entre as diferentes estações de trabalho à jusante, sob a regra FIFO, podendo essa condição, ocasionar um aumento no tempo de sua conclusão, o que provoca atrasos na data de entrega. A manutenção da regra FIFO diante da preempção de trabalhos faz com que o ‘trabalho urgente’ aguarde o processamento de todos os trabalhos que estão na fila do recurso gargalo, os quais foram liberados em um período temporal que antecede a preempção dos trabalhos. Por outro lado, a simples interrupção dos trabalhos existentes sem uma análise adequada também pode gerar consequências não adequadas para o sistema produtivo. Esses efeitos indesejáveis podem ser causados pela ausência de um procedimento que execute alterações adequadas no sequenciamento dos trabalhos que estão aguardando o processamento na fila do recurso gargalo. Identifica-se, portanto, uma lacuna sobre como tratar a necessidade de priorizar ordens de produção em ambientes *Conwip*, não sendo uma prática tratada, na bibliografia consultada, a realização de alterações na sequência dos trabalhos que estão dentro da linha de produção.

Sob este enfoque o presente artigo tem por objetivo abordar os possíveis impactos do uso de regras de preempção na abordagem *Conwip*. Para tanto foram utilizados nesta pesquisa

caracterizada como experimental, dados procedentes de um ambiente real de produção, bem como técnicas de Simulação Computacional, Análise de Variância ANOVA, teste não-paramétrico de Kruskal-Wallis, Análises *post-hoc* (Teste de Tukey) e intervalos de confiança para a média. Para atender ao escopo proposto foram configurados quatro cenários distintos que recomendam as seguintes condições operacionais:

- a) variação no nível de *WIP*, sendo que os valores alternativos utilizados foram apontados por meio da Lei de Little;
- b) alteração da sequência dos trabalhos a serem liberados para entrar na linha de produção, frente a chegada de um ‘trabalho urgente’; e
- c) mudança na sequência dos trabalhos que estão na fila do recurso gargalo, frente à chegada de um ‘trabalho urgente’. Desse modo ocorre a suspensão da regra FIFO para controle da fila no gargalo, no instante em que ocorrer uma preempção.

As demais seções são apresentadas da seguinte forma: a seção 2 apresenta um extrato do referencial teórico utilizado na pesquisa; a seção 3 traz uma breve descrição da metodologia empregada para a realização do estudo; a seção 4 aborda características referentes ao ambiente produtivo que assessora esta análise, bem como, detalhes alusivos ao desenvolvimento e validação do modelo computacional. Esta mesma seção é finalizada com a apresentação dos resultados obtidos à luz da configuração de cada um dos cenários testados; por fim, a seção 5 apresenta conclusões e considerações sobre o estudo realizado.

2. Referencial teórico

2.1. Simulação Computacional

Conforme Pidd (1998), a Simulação Computacional consiste na aplicação de um modelo como base para exploração e experimentação da realidade. Ao focalizar na Simulação por Eventos Discretos, Law e Kelton (2000) apresentam este conceito referindo-se à modelagem de sistema que evolui ao longo do tempo por uma representação em que o estado das variáveis sofre alterações, apenas em função do tempo. Os intervalos de tempo são aqueles em que um evento ocorre e quando é definido para ser uma ocorrência instantânea que pode mudar o estado de um sistema. Schunk (2000) afirma que a Simulação por Eventos Discretos tem sido uma técnica padrão de análise de sistemas de manufatura que avalia alternativas de reduzir custos em mercados competitivos

Assim como em outras metodologias de modelagem, a simulação é utilizada em função da redução de risco, segurança e rapidez que pode proporcionar em comparação com a realização de experimentações na realidade. Nesse sentido, a simulação tem sido utilizada no contexto industrial para, por exemplo, definir a melhor estratégia de tamanho de lotes (MEHRA; INMAN; TUITES, 2006; GODINHO FILHO; USZOY, 2010), para analisar o impacto da estratégia de redução de variabilidade e de tempos de setup (LI, 2003); e avaliar estratégias de implementação do *Lean Manufacturing* (SHANNON; KRUMWIEDE, STREET, 2010). Corroborando as afirmações referentes à aplicabilidade da simulação, apresentam-se os seguintes estudos: (i) Pergher e Vaccaro (2009); (ii) Kenyon *et al.* (2005); (iii) Pergher, Deus e Rossi Filho (2009); (iv) Choi e Enns (2004); (v) Pergher e Vaccaro (2011); (vi) Tako e Robinson (2012); (vii) Vaccaro *et. al* (2010); (viii) Jahn *et al.* (2010); e (ix) Pergher, Vaccaro e Pradella (2013).

No entanto, o sucesso de um projeto assistido pela Simulação Computacional pode ser atribuído ao método utilizado para nortear as atividades envolvidas rumo ao escopo da pesquisa. O método de condução de projetos de simulação tem por finalidade conectar todas as etapas, de maneira ordenada e sistemática, partindo da concepção do problema até a avaliação e apresentação dos resultados obtidos. Neste sentido, alguns exemplos de métodos de condução que podem ser observados na literatura são os seguintes: Pritsker, Sigal e Hammesfahr (1989); Gogg e Mott (1992); Law e Kelton (2000); Balci (1998); e Banks (1998). Sob este enfoque, para conduzir o experimento de simulação utilizado nesta pesquisa,

optou-se pelo uso da abordagem proposta por Law e Kelton (2000), por ser um método difundido na literatura e apresentar uma estrutura que se adapta ao escopo preconizado nesta pesquisa.

2.2. Constant Work in Process (*Conwip*)

O *Conwip* endereça uma política de produção que busca manter constante o *Work-in-Process* entre pontos específicos de um sistema de produção, utilizando uma política de liberação controlada de ordens a partir do desempenho do sistema. Para tal, o *Conwip* prevê a utilização simultânea de procedimentos de ‘puxar’ e ‘empurrar’ a produção – o conceito relativo à produção puxada e empurrada pode ser visto em Nahmias (2001). Deste modo, quando uma ordem de produção sai da rede de atividades, a informação derivada desta saída puxa a entrada de uma nova ordem, sendo este, empurrado à jusante, ao longo dos diferentes níveis operacionais pertencentes à rede, até o próximo ponto de checagem ou sua saída do sistema, gerando novamente a informação que puxará a entrada de uma nova ordem. O *Conwip* considera a premissa de que é possível estabelecer uma equivalência entre as ordens de produção que circulam no sistema de produção, tendo como resultado uma taxa de saída de produtos prontos equivalente à taxa de entrada de matéria-prima na rede, mantendo-se constante o nível de *WIP*. Em ambientes produtivos que empregam o *Conwip* para gerir o fluxo de materiais, dois problemas podem ser destacados (HOPP; SPEARMAN, 2000): (i) ociosidade no recurso gargalo, gerada por paradas não planejadas nos recursos subsequentes ao gargalo, tendo como resultado principal, o bloqueio da entrada de materiais para o sistema; (ii) liberação prematura das ordens de produção, visando manter constante o *WIP*, podendo esta prática, ocasionar redução da flexibilidade no atendimento a ordens de produção inesperadas; e (iii) conforme Enns e Rogers (2008) o *Conwip* pode apresentar limitações no que diz respeito ao controle de transferência dos trabalhos entre cada uma das distintas operações que compõem a rede de atividades.

Para conduzir a entrada e saída de ordens de produção no ambiente de produção é possível utilizar cartões (os quais acompanham a ordem até o instante de saída da rede) ou ainda, sistemas automatizados de contagem. O controle de entrada e saída tem por objetivo auxiliar na estabilização do volume de *WIP*, que pode ser apontado por meio da Lei de Little (HOPP; SPEARMAN, 2000), bem como, assessorar o procedimento de liberação, no que tange à determinação do instante temporal que uma nova ordem deve entrar no ambiente de produção. Em paralelo à informação relativa ao momento de liberação, faz-se necessário também, determinar a sequência em que cada um dos diferentes tipos de ordens serão liberados à luz dos critérios que admitem sua entrada na rede (sequenciamento de entrada). Vale destacar que o sequenciamento de entrada pode ser determinado a partir da informação referente à data de entrega de cada um diferentes tipos de ordens.

Na abordagem *Conwip* a determinação do sequenciamento de entrada ocorre antecipadamente ao instante em que uma nova ordem necessita ser liberada. Deste modo, após a entrada da ordem na rede de atividades, nenhum tipo de modificação é realizada na sequência que foi estabelecida previamente. Corroborando com esses argumentos, Hopp e Spearman (2000) propõem a aplicação da regra FIFO (*first-in-first-out*) para manutenção do fluxo de trabalhos à jusante, a fim de manter o sequenciamento estabelecido no instante de liberação e melhorar a previsão de conclusão dos trabalhos. Neste sentido, frente à ocorrência de priorizações, apenas o sequenciamento de entrada sofrerá alterações, de modo a liberar inicialmente as novas ordens que apresentam um grau de prioridade superior. Entretanto essa prática poderá provocar aumento no tempo de conclusão de ‘ordens urgentes’, ocasionando atrasos na entrega, visto a manutenção da regra FIFO para o controle do fluxo à jusante.

Com base nos elementos destacados no parágrafo anterior, esta pesquisa busca discutir, em paralelo ao sequenciamento de entrada, a execução de um sequenciamento que se restringe apenas aos trabalhos que estão na fila do recurso gargalo, conforme a priorização das ordens. Deste modo, se ocorrer uma preempção, o sequenciamento de entrada deverá ser

modificado de modo a permitir o ingresso das ordens caracterizadas como urgentes. Sob a mesma perspectiva, o sequenciamento das ordens que aguardam o processamento no recurso gargalo deverá priorizar as urgentes, não sendo utilizada apenas a regra FIFO para o controle do fluxo.

2.3. Lei de Little e Indicadores de Desempenho

Segundo Little (1961), para um processo de fila em equilíbrio (o número de chegadas é igual ao número de saídas), o número esperado de ‘unidades’ no sistema (L) é dado pela multiplicação do tempo gasto por uma ‘unidade’ no sistema (W), com o valor de tempo entre duas chegadas consecutivas (λ) no sistema. Sendo essas três médias finitas e correspondentes a um processo estocástico estacionário (a distribuição de probabilidade não muda com o tempo), com processo de chegadas transitivo com média diferente de zero, torna-se possível escrevê-lo segundo a ‘Lei de Little’. Focalizando em ambientes de manufatura, Hopp e Spearman (2000) descrevem esta lei por meio da Equação 1:

$$WIP = TH \times CT \quad (1)$$

sendo: WIP – Estoques de materiais em processo; TH – Taxa de produção efetiva ou *throughput*, a média de saída de ‘trabalhos’ (que atendem os requisitos de qualidade) da linha de produção por unidade de tempo; e CT – *Lead time* efetivo ou *lead time* de produção, tempo médio que um ‘trabalho’ consome para percorrer seu o roteiro de produção, considerando os procedimentos de liberação. Detalhes adicionais sobre a Lei de Little podem ser obtidos em Little (2011) o qual apresenta uma discussão quanto a sua utilização, considerando 50 anos de estudos de casos realizados em diferentes áreas do conhecimento.

A informação gerada pela Lei de Little é empregada no âmbito desta pesquisa, para assessorar a configuração de distintos cenários, os quais são avaliados com o objetivo de examinar a ocorrência de diferenças significativas à luz do escopo apresentado na Seção 1.

3. Metodologia

Este estudo tem por desígnio abordar os possíveis impactos do uso de regras de preempção exclusivamente para a abordagem *Conwip*. Para tanto são utilizados nesta pesquisa de cunho experimental, dados procedentes de um ambiente real de produção e, ainda, técnicas de Simulação Computacional e Estatística Inferencial. Neste sentido, é possível caracterizar a proposta da seguinte maneira: (i) Pesquisa Quantitativa, caracterizada pelo emprego da quantificação, na coleta ou no tratamento de informações, através do uso de técnicas estatísticas (RICHARDSON, 1999); e (ii) Simulação Computacional, que possibilita a construção de modelos que representam uma fração da realidade do ambiente central de estudo, visando analisar cenários alternativos, que contribuam para minimizar os riscos de tomada de decisão. Para Pidd (1998), a Simulação Computacional é a aplicação de um modelo como base para exploração e experimentação da realidade tendo como foco, tornar o modelo computacional, um veículo para interferir em questões do tipo ‘o que aconteceria se...?’.

Esta pesquisa foi desenvolvida com base em pesquisas bibliográficas, que levaram à construção de um referencial teórico, o qual permitiu definir: (i) o método de condução de projetos de simulação; e (ii) os indicadores de desempenho. Em conjunto com os dados provenientes de um ambiente real de produção, esses elementos auxiliaram o desenvolvimento de um modelo computacional de simulação, o qual possibilitou gerar informações relativas ao desempenho de cada um dos cenários testados, sem a necessidade de experimentação prática no ambiente produtivo. Em seguida, as informações geradas foram analisadas à luz da Estatística Inferencial. Por fim, ocorreu a apresentação dos resultados obtidos e consolidação das considerações finais. Maiores detalhes alusivos aos procedimentos metodológicos serão apresentados juntamente com o estudo, na próxima seção.

4. **Apresentação do estudo e discussão dos resultados gerados**

O ambiente produtivo que subsidia o desenvolvimento desta pesquisa é composto por uma célula de manufatura que possui um total de 9 estações de trabalho (sendo 5 estações de trabalho precedentes ao recurso apontado como gargalo) formadas por processos de usinagem e montagem, com fluxo convergente do tipo A. A programação das ordens de produção desta célula é feita com base em pedidos firmes, já confirmados pelos clientes (MTO), contudo, em situações de ausência de pedidos firmes, ocorre a programação de ordens de produção para estoque. Nesta condição, após a conclusão das ordens de produção para estoque, os produtos finalizados permanecem no estoque para atender a chegada de pedidos firmes. No que tange ao fluxo de materiais dentro da célula, os materiais percorrem o roteiro de fabricação em lotes à luz do conceito ‘produção empurrada’. Os lotes possuem um tamanho padrão por tipo de produto, que é delimitado por meio de contenedores. Neste sentido, a unidade de medida empregada para gerenciar e programar a célula é ‘quantidade de contenedores por tipo de produto’. Cabe observar que neste enfoque, cada entidade que percorre o modelo computacional de simulação representa um contenedor padrão a um tipo de produto.

Para o desenvolvimento do modelo de simulação por eventos discretos foi considerado um período temporal típico, de 7 dias de trabalho, em que foram produzidos 4 diferentes tipos de produtos distribuídos em 5 ordens de produção (que alude ao termo ‘trabalhos’ citado nas seções iniciais deste estudo). Compete observar que no período temporal considerado nesta pesquisa, não ocorreu a programação de ordens de produção para estoque. Previamente à etapa de desenvolvimento do modelo computacional foi construído um modelo conceitual, por meio da técnica de mapeamento do estado atual, procedente da metodologia Mapeamento do Fluxo de Valor (ROTHER; SHOOK, 1999). O desenvolvimento do modelo conceitual tem por finalidade gerar entendimento referente ao ambiente em estudo, bem como, subsidiar o desenvolvimento do modelo computacional. Por meio do mapeamento, foi possível observar e entender o fluxo dos materiais e de informações ao longo das distintas estações de trabalho, auxiliando na identificação de esperas, pontos em que ocorrem a formação *WIP*, entre outros elementos. No que se refere aos tempos de processamento em cada estação de trabalho, diante da ausência de uma base de dados atualizada para cada tipo de produto, foi realizada a coleta de dados relativos aos tempos de processo, considerando um tamanho de amostra igual a 30 dados.

Ainda nesta fase foram também coletados, os índices referentes aos indicadores de desempenho do sistema. Foram utilizados os indicadores que compõem a Lei de Little, a ‘Taxa de atendimento da demanda’ e o ‘Ganho \$ dias em atraso’. Cabe observar que foram gastos um total de 17 dias úteis para realizar as atividades de: coleta de dados, desenvolvimento do modelo conceitual e rodadas de validação. A análise dos resultados gerados com o modelo de simulação foi apoiada nos indicadores citados anteriormente, os quais foram selecionados considerando os seguintes aspectos: (i) foco global para agregar informação, permitindo concentrar em poucos indicadores, a análise relativa ao desempenho do modelo de simulação, frente aos distintos cenários configurados com base no escopo desta pesquisa; (ii) ausência de redundância; e (iii) independência.

No que diz respeito à ‘Taxa de atendimento da demanda’ este indicador expressa a porção da demanda atendida no prazo acordado com o cliente, calculado pela razão entre o número de pedidos atendidos no prazo e o total de pedidos examinado. Visando analisar o comportamento dos pedidos entregues no prazo durante o experimento de simulação, optou-se pelo emprego do indicador ‘Ganho \$ dias em atraso’, o qual também é empregado para subsidiar a Gestão de Cadeia de Suprimentos à luz das premissas da Teoria das Restrições. Kendall (2007) relata que o ‘Ganho \$ dias em atraso’ multiplica o valor do ganho avaliado no pronto de venda, pelo intervalo temporal concernente ao atraso no atendimento da demanda. A quantificação do ganho avaliado no pronto de venda é obtida, por meio da multiplicação entre o ganho unitário do produto final, pela quantidade vendida deste produto. Compete ressaltar que, diante da falta de um item no pedido, o indicador ‘Ganho \$ dias em atraso’ é

calculado com base no valor do pedido total, reconhecendo a irritação do cliente. O emprego deste indicador de desempenho no escopo desta pesquisa tem por intuito a geração de informações relativas ao prejuízo causado pelo não atendimento da demanda no prazo acordado com o cliente, podendo ser utilizado de modo complementar, em planos táticos que objetivam promover uma melhor taxa de atendimento. Compete observar que nesta pesquisa, o custo da matéria-prima para cálculo deste indicador é feita com base nas premissas da Teoria das Restrições.

Ao concluir a coleta dos dados foi realizado o ajuste das distribuições estatísticas dos dados por meio do software Minitab versão 16, utilizando um nível de significância igual a 5%. As distribuições estatísticas que apresentaram características mais adequadas com as informações coletadas foram utilizadas no modelo de simulação. Após a conclusão do tratamento dos dados coletados e do modelo conceitual, procedeu-se uma reunião com os especialistas e supervisores da célula, visando obter uma avaliação das informações coletadas. Posterior a avaliação subjetiva das informações coletadas pela equipe da empresa foi iniciado o desenvolvimento do modelo computacional. Para esta etapa foi utilizado o software Micro Saint versão 3.2, o qual permitiu esquematizar em um modelo computacional, as informações coletadas e apresentadas no parágrafo anterior. Vale salientar que outros indicadores de desempenho também necessitaram ser incorporados ao modelo, como por exemplo: *Lead time* de fabricação por tipo de produto, Taxa de produção efetiva, Quantidade produzida por intervalo temporal em função do tipo de produto, Utilização da capacidade do recurso gargalo, tendo por finalidade subsidiar a etapa de validação do modelo. O modelo base foi desenvolvido ao longo de 6 dias úteis, passando por 2 versões tentativas até que as informações de saída geradas pelo modelo computacional pudessem ser válidas no que se refere à representatividade ambiente produtivo em análise.

Durante o desenvolvimento do modelo, diversas regras referentes ao fluxo dos lotes entre as estações de trabalho, bem como, das ordens de produção necessitaram ser especificadas. Ao focalizar exclusivamente no sequenciamento das ordens de produção, o modelo computacional cumpre o seguinte procedimento, arbitrado para permitir a comparação de cenários: 5 ordens de produção são planejadas; a ordem de produção 1 é executada inicialmente; durante o processamento da ordem 1 na célula em estudo, ocorre a chegada da ordem 2, a qual é caracterizada como ‘prioridade’, incidindo deste modo uma preempção que gera como resultado a paralização da ordem 1, para início imediato da ordem 2; somente após concluir a ordem de produção 2, é admitido iniciar novamente a execução da ordem 1; em seguida ocorre a chegada da ordem 3, sendo iniciado o processamento posteriormente a conclusão da ordem de produção 1; durante a execução da ordem 3 acontece a chegada a ordem 4, que é distinguida como ‘prioridade’, ocorrendo novamente uma preempção para início imediato da ordem 4; o retorno a execução da ordem 3 ocorre após a conclusão da ordem de produção 4; por fim, ocorre a chegada da ordem de produção 5, sendo esta executada unicamente após a conclusão da ordem 3. Cabe observar que o recurso gargalo não é parado imediatamente diante de uma preempção, ou seja, ele finaliza a produção da quantidade de peças de um contenedor padrão e posteriormente, inicia a produção da ordem caracterizada como prioridade.

Conforme apontado em Law e Kelton (2000), após a etapa de desenvolvimento do modelo computacional faz-se necessário realizar rodadas piloto com o modelo. Nesta pesquisa foram realizadas 30 replicações piloto com o modelo computacional, considerando um cenário base fundamentado nas características observadas e mapeadas durante a coleta de informações. Depois de executar as rodadas piloto foi realizada a validação do modelo computacional, que consistiu em uma análise comparativa (qualitativa) os dados obtidos por observações no sistema real, com as saídas geradas na etapa de rodadas piloto. A análise comparativa foi efetivada em uma reunião com o grupo formado por especialistas e supervisores da célula, havendo uma concordância entre os integrantes, quanto à habilidade do modelo em representar as características modeladas.

Posterior à validação do modelo foram configurados os cenários a serem analisados. Para esta pesquisa foram desenvolvidos quatro cenários. Detalhes referentes a cada um dos cenários testados são apresentados no Quadro 1.

Cenário	Nível de <i>WIP</i> (Lotes)	Sequenciamento de entrada	Sequenciamento no gargalo
1	10	Sim	Não
2			Sim
3	7		Não
4			Sim

Quadro 1 – Cenários testados.
Fonte: autores (2013).

Fundamentado nas informações apresentadas no Quadro 1, os cenários 1 e 2 preconizam um nível de *WIP* igual da 10 lotes. Este volume foi considerado pois, durante a coleta das informações que subsidiaram o desenvolvimento do modelo computacional, foi observado que havia em média 10 lotes (de diferentes tipos de produtos) dentro da célula, os quais são empurrados à jusante sob a regra FIFO, sendo a informação validada pela equipe de processo. Contudo, os cenários 3 e 4 (Quadro 1) propõem um *WIP* igual a 7 lotes, valor determinado por meio da Lei de Little (Equação 1) à luz de um volume de *WIP* igual a 10 lotes na célula. Conforme preconizado pela Lei de Little, ao considerar um *WIP* igual a zero, o aumento gradativo no nível de *WIP* ocasionará melhor desempenho para o *TH*, o qual será limitado à capacidade do recurso gargalo. No entanto, quando o valor de *TH* é igual à capacidade do(s) recurso(s) gargalo(s), o acréscimo no nível de *WIP* provocará o aumento no *lead time* de produção (*CT*). Ainda no Quadro 1, a coluna central informa que todos os cenários propõem a execução do sequenciamento das ordens de produção no instante de liberação de novas ordens para a célula, conforme indicado na teoria do *Conwip*, apresentada na seção 2 desta pesquisa. Por fim, é destacado que somente os cenários 2 e 3 realizam o sequenciamento das ordens que estão na fila do recurso apontado como gargalo.

Com base na configuração proposta por cada um dos distintos cenários foi realizada a atividade de fazer rodadas produtivas (LAW; KELTON, 2000). Para fazer as rodadas produtivas, foi calculado, com base na variabilidade dos indicadores medidos e um valor de significância igual a 5%, um número de replicações em cada cenário igual a 35.

Ao concluir a etapa de rodadas produtivas, os resultados gerados em cada um dos cenários foram analisados, conforme apresentado no Quadro 2, através da Análise de Variância (ANOVA) ou do Teste de Kruskal-Wallis, além de Análises *post-hoc* pelo Teste de Tukey, operacionalizados no software Minitab versão 16. O teste ANOVA examina a ocorrência de diferenças significativas entre as médias dos dados de saída gerados na atividade de fazer rodadas produtivas à luz de cada um dos cenários. Os resultados obtidos com a aplicação do teste ANOVA relatam a ocorrência de diferenças significativas estatisticamente entre as médias dos distintos cenários testados à luz dos indicadores de desempenho incorporados ao modelo computacional. Como requisitos, é necessário respeitar a normalidade dos dados e assegurar que as matrizes de variância-covariância sejam similares entre os diferentes tratamentos. Maiores esclarecimentos podem ser obtidos em Hair *et al.* (2009). Para verificar o pressuposto referente à homogeneidade das variâncias, nesta pesquisa foi utilizado o teste de Levene. Da mesma forma, com apoio do teste de Anderson-Darling a hipótese de normalidade dos dados não pode ser descartada ao nível de 5% de significância, permitindo deste modo, fazer uso da ANOVA. Frente a situações em que, não são acatados os pressupostos do teste ANOVA, é indicado o teste não-paramétrico de Kruskal-Wallis, como possível substituto. Para Bisquerra Alzina *et al.* (2004) este teste pode ser empregado, para verificar a ocorrência de diferenças significativas entre as médias de *k* amostras independentes. Segundo Siegel (1975), o teste de Kruskal-Wallis tem como hipótese nula, que

k amostras provenham da mesma população ou de populações idênticas com relação média, assumindo como pressuposto principal, que a variável em estudo tenha distribuição inerente contínua.

Indicadores / Cenários	Teste	<i>p-value</i>	Teste de Tukey (Grupos de cenários)
Taxa de atendimento	ANOVA	0,000	1; 2-3; 3-4
Ganho \$ dias em atraso total			1; 2-3; 2-4
<i>TH</i>		0,013	1-2-4; 3-4
<i>CT</i>	Kruskal-Wallis	0,000	1-2; 3-4

Quadro 2 – Resultados obtidos na análise dos cenários.

Fonte: autores (2013).

O Quadro 2 ilustra o valor de p (*p-value*) apontado pela análise ANOVA para os seguintes indicadores: Taxa de atendimento, Ganho \$ dias em atraso total e Taxa de produção efetiva (*TH*). Esse resultado indica a existência de diferenças significativas quando são comparadas as médias dos cenários analisados (para um nível de significância igual a 5%). Para o indicador *Lead time* de produção (*CT*) o pressuposto relativo à homogeneidade de variância não foi acatado, visto que o teste de Levene indicou um valor de $p=0,000$, desta maneira, foi utilizado o teste de Kruskal-Wallis (KW). O resultado fornecido pelo KW aponta a ocorrência de diferenças significativas nas médias dos quatro cenários. Em paralelo aos testes de ANOVA e KW também foi aplicada a Análise *post-hoc* por meio do teste de Tukey. Segundo Hair *et al.* (2009) a Análise *post-hoc* examina diferenças nas médias considerando a totalidade de combinações possíveis entre diferentes grupos. Cabe observar que neste estudo, o termo ‘grupo’ faz referência aos quatro cenários testados no modelo de simulação.

Para o indicador ‘Taxa de atendimento’ o teste de Turkey indica a ausência de evidências de diferenças significativas para os cenários 1-2, ocorrendo situação similar para os cenários 3-4. Para o indicador ‘Ganho \$ dias em atraso total’, ao considerar um nível de significância de 5%, não é possível rejeitar a hipótese de igualdade entre as médias dos cenários 2-3 e 2-4. Raciocínio similar pode ser estendido ao restante dos indicadores descritos no Quadro 2

No que tange aos resultados obtidos em cada um dos cenários testados no modelo de simulação, o Quadro 3 ilustra o intervalo de confiança para a média dos quatro cenários estudados à luz dos indicadores de desempenho. Compete observar que para o indicador ‘Ganho \$ dias em atraso’, os valores apresentados foram alterados mantendo a proporcionalidade e a escala, para preservar informações da empresa.

Cenário	<i>WIP</i> (Lotes)	Taxa de atendimento*	Ganho \$ dias em atraso total*	<i>TH</i> (Lotes/hora)	<i>CT</i> (Horas/lote)
1	10	(0,40801; 0,46056)	(47.343,00; 52.047,00)	(0,70753; 0,72534)	(12,281; 12,936)
2	10	(0,59410; 0,61733)	(35.048,00; 38.942,00)	(0,70852; 0,72927)	(12,256; 13,283)
3	7	(0,58334; 0,61666)	(33.357,00; 37.093,00)	(0,68924; 0,70806)	(9,1603; 9,6810)
4	7	(0,52752; 0,59248)	(36.974,00; 42.747,00)	(0,69657; 0,71716)	(9,2336; 9,5723)

* Intervalo de Confiança para a Média (95%)

Quadro 3 – Resultados obtidos.

Fonte: autores (2013).

Com base nas análises realizadas, observa-se que a redução de *WIP* traz consequências significantes (cenários 3-4), aumentando a ‘Taxa de atendimento’ em relação ao cenário 1 e 2. A preempção de ordens com sequenciamento no gargalo também provoca resultados significantes em relação ao cenário 1 quanto a esse indicador.

Para o indicador ‘Ganho \$ dias em atraso’, observa-se que a preempção de ordens com sequenciamento no gargalo tende a produzir resultados melhores, observando-se que a redução de *WIP* também tende a produzir resultados melhores (grupos de cenários 2-3; 2-4), dadas as condições simuladas.

Com relação a Taxa de produção efetiva (*TH*), as diferenças significantes mostram-se principalmente em relação à proposta do cenário 3 (grupo de cenários 3-4). No qual é percebido uma redução do mesmo, ocasionada pela redução de *WIP*. No entanto, observa-se que os cenários 1-2-4 não diferem em relação a esse indicador, não indicando prejuízos no uso de preempção no contexto sob estudo.

Ao considerar o *Lead time* de produção (*CT*) o volume de *WIP* provocou resultados que se diferem significativamente, sendo observado um melhor desempenho para os índices gerados pelos cenários 3 e 4, os quais propõem um volume reduzido para o *WIP* em relação aos cenários 1 e 2. No que tange a preempção, é observa-se que os cenários 1-2 e 3-4 foram agrupado pelo teste de Tukey, não indicando desta maneira prejuízos para desempenho do *CT*.

5. Considerações Finais

Este artigo teve por designo abordar os possíveis impactos do uso de regras de preempção na abordagem *Conwip*, por meio de uma pesquisa definida como experimental. Para tanto foram utilizados dados procedentes de um ambiente real de produção, bem como técnicas de Simulação Computacional e Estatística Inferencial. Como observação geral, é percebido, no contexto estudado, que o uso de preempção pode ser benéfico para o atendimento de ordens urgentes (Taxa de atendimento), sem que haja prejuízo no desempenho do sistema (*TH*, Ganho \$ dias em atraso e *CT*). Esses benefícios podem ser potencializados caso seja incorporada à decisão, a métrica estabelecida pela Lei de Little (1961), como preconizado por Hopp e Spearman (2000), observando-se que a elevação de *WIP* somente promove aumento de *TH* até o atingimento da capacidade do recurso gargalo. A partir de então, o efeito de sua elevação passa a ser a elevação do *CT*.

Mantendo o foco no escopo tratado, ressalta-se ainda necessidade de aprofundar a análise preliminar apresentada nesta pesquisa, por meio do desenvolvimento de cenários complementares, os quais podem sugerir entre outros aspectos: mudanças no tempo de setup, parada imediata do recurso gargalo frente a uma preempção para início imediato da produção, parâmetros de confiabilidade, ou ainda, incrementar o quadro de indicadores de desempenho. Ainda neste contexto, a aplicação de Métodos multicritério para a tomada de decisão, bem como, da Análise de variância MANOVA podem contribuir com uma análise complementar no que tange a preempção na abordagem *Conwip*. Observa-se, por fim, que estudos baseados em simulação não possuem caráter explicativo definitivo sobre um problema. No entanto, seu desenvolvimento produz compreensão e *insights* relevantes sobre o problema, permitindo a proposição de hipóteses e a realização de análises exploratórias que possam sustentar propostas de ação no mundo real.

Bibliografia

- [1] BALCI, O. Verification, validation and testing. In: BANKS, J. (org). **Handbook of simulation: principles, methodology, advances, applications, and practice**. New York: John Wiley and Sons, 1998.
- [2] BISQUERRA ALZINA, R.; CASTELLÁ SARRIERA, J.; MARTÍNEZ, F. **Introdução à estatística: enfoque informático com o pacote estatístico SPSS**. Porto Alegre: Artmed, 2004.

- [3] CHOI, S.; ENNS, S. T. **Multi-product capacity-constrained lot sizing with economic objectives**. International Journal of Production Economics, V. 91, 47-62, 2004.
- [4] ENNS, S. T.; ROGERS, P. **Clarifying Conwip versus push system behavior using Simulation**. In: Proceedings of the conference on winter simulation, 40., 2008. Anais do Winter Simulation.
- [5] GODINHO FILHO, M.; UZSOY, R. **Estudo do efeito de programas de melhoria contínua em variáveis do chão de fábrica na relação entre tamanho de lote de produção e lead time**. Gestão de Produção, v. 17, 1, 137-148, 2010.
- [6] HAIR JUNIOR, J. F.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L.; BLACK, W. C. **Análise multivariada de dados**. 9. ed. Porto Alegre: Bookman, 2009.
- [7] HAYES, R. H.; PISANO, G. P.; UPTON, D. M.; WHEELWRIGHT, S. C. **Produção, estratégia e tecnologia: em busca da vantagem competitiva**. Porto Alegre: Bookman, 2008.
- [8] HOPP, W. J.; SPEARMAN, M. L. **Factory Physics: foundations of manufacturing management**. 2. ed. Boston: McGraw-Hill, 2000.
- [9] JAHN, B.; THEURL, E.; SIEBERT, U.; PFEIFFER, K. **Tutorial in Medical Decision Modeling Incorporating Waiting Lines and Queues Using Discrete Event Simulation**. Value in Health, v 13, 4, 501-506, 2010.
- [10] KENYON, G.; CANELB, C.; NEUREUTHER, B. D. **The impact of lot-sizing on net profits and cycle times in the n-job, m-machine job shop with both discrete and batch processing**. Production Economics, v. 97, 263-278, 2005.
- [11] LAW, A. M.; KELTON, W. D. **Simulation modeling and analysis**. 3. ed. Boston: McGraw-Hill, 2000.
- [12] LI, J. **Improving the performance of job shop manufacturing with demand-pull production control by reducing set-up/processing time variability**, Production Economics, v 84, 3, 255-270, 2003.
- [13] LITTLE, J. D. C. **A Proof for the Queuing Formula: $L = \lambda W$** . Operations Research, v. 9, n. 3, p. 383-387, 1961.
- [14] LITTLE, J. D. C. **Little's Law as Viewed on Its 50th Anniversary**. Operation Research, v. 59, 3, 536-549, 2011.
- [15] MEHRA S. Y.; INMAN, R. A.; TUIITE, G. **A simulation-based comparison of batch sizes in a continuous processing industry**. Production Planning & Control, v 17, 1, 2006.
- [16] NAHMIA, S. **Production and operations analysis**. 4. ed. New York: McGraw-Hill, 2001.
- [17] PERGHER, I.; DEUS, A. D. de; ROSSI FILHO, T. A. **Aplicação da Simulação Computacional em um processo de medição de produtos em máquinas por coordenadas: Estudo de Caso**. In: XVI SIMPÓSIO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 16., 2009, Bauru (SP). **Anais Simpep 2009**. Bauru (SP): 2009.
- [18] PERGHER, I.; VACCARO, G. L. R. **Determinação da capacidade produtiva de uma empresa de alimentos por meio da aplicação da Simulação Computacional**. In: XII SIMPÓSIO DE PESQUISA OPERACIONAL E LOGÍSTICA DA MARINHA, 11., 2009, Rio de Janeiro (RJ). **Anais SPOLM 2009**. Rio de Janeiro (RJ): 2009.
- [19] PERGHER, I.; VACCARO, G. L. R. **Um método para quantificar o estoque em processo à luz da Simulação Computacional e do Electre Tri**. In: XII SIMPÓSIO DE PESQUISA OPERACIONAL E LOGÍSTICA DA MARINHA, 13., 2011, Rio de Janeiro (RJ). **Anais SPOLM 2011**. Rio de Janeiro (RJ): 2011.
- [20] PIDD, M. **Modelagem empresarial: ferramentas para tomada de decisão**. 1. ed. Porto Alegre: Bookman, 1998.
- [21] PRITSKER, A. A. B. Principles of Simulation Modeling. In: BANKS, J. (org). **Handbook of simulation: principles, methodology, advances, applications, and practice**. New York: John Wiley and Sons, 1998.
- [22] RICHARDSON, R. J. **Pesquisa social: métodos e técnicas**. 3. ed. São Paulo: Atlas, 1999.

- [23] ROTHER, M.; SHOOK, J. **Aprendendo a Enxergar** – Mapeando o fluxo de valor para agregar valor e eliminar o desperdício. São Paulo: Lean Institute Brasil, 1999.
- [24] SCHUNK, D. **Modeling with the Micro Saint simulation package**. In: Proceedings of the conference on winter simulation, 32., 2000. Anais do Winter Simulation.
- [25] SIEGEL, S. **Estatística não-paramétrica (para as Ciências do comportamento)**. São Paulo: McGraw-Hill, 1975.
- [26] SHANNON, P. W.; KRUMWIEDE, K. R.; STREET, J. N. **Using Simulation to Explore Lean Manufacturing Implementation Strategies**. Journal of Management Education, v. 34, 2, 280–302, 2010.
- [27] TAKO, A.A.; Robinson, S. **The application of discrete event simulation and system dynamics in the logistics and supply chain context**. Decision Support Systems, v 52, 4, 802-815, 2012.
- [28] UMBLE, M. M.; UMBLE, E. J. **Drum-Buffer-Rope for Lower Inventory**. Industrial Management, p.24-33, 1999.
- [29] VACCARO, G. L. R.; SILVA, D. O; PERGHER, I.; SILVA, D. D. **Estruturação de uma nova unidade de diagnóstico PET/CT através da aplicação da Simulação Computacional**. XII SIMPÓSIO DE PESQUISA OPERACIONAL E LOGÍSTICA DA MARINHA, 12., 2010, Rio de Janeiro (RJ). **Anais SPOLM 2010**. Rio de Janeiro (RJ): 2010.