

UM MÉTODO PARA QUANTIFICAR O ESTOQUE EM PROCESSO À LUZ DA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL E DO ELECTRE TRI

Isaac Pergher, Msc.
eng.isaac@hotmail.com

Guilherme Luís Roeh Vaccaro, Dr.
Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS
guilhermev@unisinos.br

Resumo

Este trabalho apresenta um método que utiliza as abordagens de Simulação Computacional e o método de apoio multicritério ELECTRE TRI para subsidiar a determinação do nível de estoque em processo, de modo a permitir o alinhamento dos estoques aos planos de demanda e capacidade, considerando um ambiente produtivo que gerencia o fluxo de materiais por meio do *Conwip*. O método foi elaborado com base em resultados relatados em periódicos nacionais e internacionais, compilados por meio da constituição de um referencial teórico, e posteriormente submetido à avaliação de especialistas. Também é relatada brevemente a aplicação desta proposta em um sistema real. Como principais contribuições, o artigo provê, do ponto de vista conceitual, uma possível abordagem de associação entre simulação e suporte à decisão, bem como um método sistemático para a melhoria do processo decisório concernente ao dimensionamento do estoque em processo em ambientes industriais.

Palavras-chave: Simulação Computacional; *Work in Process*; *WIP*; ELECTRE TRI

Abstract

This research show a method which uses Computer Simulation and Support Multicriteria Method ELECTRE TRI approaches to support the determination of the work in process level in order to allow the alignment of inventory to demand and capacity plans, considering that the productive system applying Conwip to manages the flow of materials. The method was based on results reported in national and international journals, compiled by the establishment of a theoretical framework, and further evaluation by specialists. It is also reported the implementation of this proposal in a real system. As main contributions, the article provides, from a conceptual standpoint, a possible approach to associate simulation with decision support methods, as well as a systematic method for the improvement of decision-making process concerning the sizing of the work in process in industrial environments

Key-words: Computational Simulation; *Work in Process*; *WIP*; ELECTRE TRI

1. Introdução

Nos sistemas produtivos intermitentes que operam sob a ótica *MTS*, com fluxo convergente (tipo A), a possibilidade de formar estoques em processo (*WIP*), de produtos prontos, ou matérias-primas, tende a aumentar a complexidade na gestão dos estoques, tendo em vista a necessidade de utilizar procedimentos de controle distintos, para gerenciar cada um dos diferentes tipos de estoque (SIMCHI-LEVI; KAMINSKY; SIMCHI-LEVI, 2003). Ainda neste contexto, outro aspecto que pode se tornar significativo à complexidade da gestão de estoques é a abordagem utilizada para gerir o fluxo de materiais, por causa das diferentes premissas e pressupostos de operação, intrínsecas em cada proposta.

Ao focalizar no alinhamento da gestão dos estoques aos planos de demanda e capacidade, considerando um ambiente produtivo que opera na abordagem *Constant Work-in-process* (*Conwip*) (HOPP; SPEARMAN, 2000) para gerir o fluxo de materiais, o uso de ferramentas que

subsidiem o processo decisório, como Simulação Computacional e Métodos de Apoio Multicritério à Decisão podem contribuir com o desenvolvimento de ações voltadas à gestão de estoques, visando proporcionar ganhos significativos, em termos de obtenção de vantagem competitiva. Neste sentido, o presente artigo tem por finalidade, propor um método que possibilite quantificar o nível de *WIP*, a partir das abordagens Simulação Computacional e do método de Apoio Multicritério ELECTRE TRI.

Considerando as pesquisas que contemplam no seu escopo o *WIP* e *Conwip*, disponíveis nas bases de dados: *Winter Simulation Conference*; *Manufacturing Technology Management*; *Annals of Operations Research*; *Productivity and Performance Management*; *Management Science*; *Advanced Manufacturing Technology*; *Production Research*; *Production Economics*; e *Intelligent Manufacturing*, é possível observar a utilização da Simulação por Eventos Discretos, Simulação Dinâmica, Cadeias de Markov, Redes de Petri ou Teoria das Filas, visando entre outros objetivos, quantificar o *WIP*. Entretanto, é constatada, na consulta realizada no horizonte temporal de 2005 a 2011, a ausência de uma técnica de norteie a tomada de decisão, no que tange a avaliação dos resultados obtidos no experimento de pesquisa. Assim sendo, a proposta da presente pesquisa tem como relevância, o emprego de uma ferramenta para assessorar a tomada de decisão.

As demais seções são apresentadas da seguinte forma: a seção 2 apresenta um extrato do referencial teórico utilizado na pesquisa; a seção 3 apresenta uma breve descrição da metodologia adotada para este trabalho; a seção 4 apresenta o método proposto neste estudo; por fim, é apresentado na seção 5, as conclusões e considerações sobre a pesquisa.

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. 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. A simulação pode ser utilizada tanto para projeto e avaliação de novos sistemas como para reconfiguração física de *layout* ou ainda para analisar mudanças no controle ou em regras de operação de sistemas existentes. As suas aplicações têm crescido em todas as áreas, auxiliando os gestores na tomada de decisão em problemas complexos e possibilitando um melhor conhecimento dos processos nas organizações (SAKURADA; MIYAKE, 2009).

No entanto, o sucesso de um projeto subsidiado pela Simulação Computacional pode ser obtido, por meio do emprego de um método que gerencie todas as atividades envolvidas no estudo. Este procedimento deve conectar todas as etapas, de forma ordenada e sistemática, partindo da concepção do problema até a avaliação e apresentação dos resultados obtidos. Alguns exemplos de métodos de condução de projetos de simulação, que podem ser observados na literatura são: 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 desta 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 desta pesquisa. Exemplos de pesquisas que utilizaram este método em ambientes produtivos são: Boeira (2008); Pergher e Vaccaro (2009); Pergher, Deus e Rossi Filho (2009); e Souto Junior, Loch e Moita (2009). O método empregado neste estudo é composto por uma sequência de 10 etapas sistemáticas, que são detalhadas em Law e Kelton (2000).

2.2. O método multicritério ELECTRE TRI

Segundo Costa *et al.* (2007), o ELECTRE TRI (preconizado por Wei Yu), tem por objetivo resolver problemas de classificação ordenada, ou seja, busca classificar alternativas presentes no conjunto de alternativas viáveis em classes que mantêm uma relação de preferência entre si. Para Gomes, Araya e Carignano (2004), o ELECTRE TRI classifica as diversas alternativas para a solução de um problema por meio da comparação de cada alternativa potencial com uma alternativa de referência. Referente à aplicação do ELECTRE TRI, é possível encontrar nos estudos de: (a) Costa, Soares e Oliveira (2004); (b) Szajubok, Alencar e Almeida (2006); (c) Costa *et al.* (2007); (d) Freitas e Costa (2000); (e) Neves e Costa (2006); (f) Freitas e Costa (2003); (g) Gomes e Costa (2008); (h) Dias e Mousseau (2002); (i) Miranda e Almeida (2003); (j) Costa, Santafé Júnior e Haddad (2007); e (k) Neves e Costa (2010), o emprego desta abordagem ELECTRE TRI em diferentes ambientes, bem como, seu relacionamento com outras abordagens.

A classificação das alternativas é realizada pelo ELECTRE TRI seguindo dois passos (COSTA *et al.*, 2007): (i) construção de uma relação de subordinação S , que caracteriza como as alternativas são comparadas aos limites das classes; e (ii) exploração (através de procedimentos de classificação) da relação S . Para Costa, Soares e Oliveira (2004), a relação de subordinação S é construída para tornar possível a comparação de uma alternativa 'a' com um limite padrão (alternativa de referência) b_h . Segundo Miranda e Almeida (2003), na validação da afirmação aSb_h (ou b_hSa), devem-se examinar duas condições: (i) Concordância: para que aSb_h (ou b_hSa) seja aceita, a maioria dos critérios deve estar a favor desta afirmação; e (ii) Não-discordância: quando a condição de concordância não for atendida, nenhum dos critérios deve opor-se à afirmação aSb_h (ou b_hSa).

Referente aos procedimentos utilizados para construir a relação de subordinação aSb_h e b_hSa , ressalta-se que podem ser encontrados em: Costa, Santafé Júnior e Haddad (2007); Gomes, Araya e Carignano (2004); Costa, Soares e Oliveira (2004).

3. Metodologia

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; (ii) os indicadores de desempenho; (iii) a técnica de apoio multicritério à decisão; e (iv) os critérios de decisão. Esses elementos levaram à construção da versão preliminar do método proposto neste trabalho e das premissas necessárias para sua aplicação. O método foi posto à prova, primeiramente, por meio da avaliação de especialistas nos temas correlatos a esta pesquisa. Em seguida, por meio da aplicação em um caso real. Ambas as etapas de teste foram sucedidas por etapas de refinamento da proposta. Após essas etapas, o método foi consolidado, sendo apresentado como segue neste trabalho. A pesquisa como um todo levou aproximadamente 8 meses, tendo sido envolvidos, além dos pesquisadores, 7 especialistas e 3 profissionais da empresa no qual foi aplicado.

4. Apresentação do método proposto para quantificar o *WIP*

Nesta seção, o método proposto por este trabalho é apresentado. A Figura 1 ilustra a estrutura que articula todas as etapas do método de determinação do *WIP*. A seguir, cada etapa é brevemente detalhada.

1) Acordo inicial do método

A primeira etapa consiste em descrever os elementos inflexíveis que constituem o método

de quantificação do *WIP*, enfatizando o uso das abordagens delineadas pela Figura 1. Destacam-se dois aspectos: (i) a proposta permite, agregar critérios específicos ao processo produtivo em estudo ao quadro de critérios sugerido pelo método, sendo esta condição discutida na etapa 2; e (ii) a determinação dos custos sugerida por esta pesquisa é norteada pelas premissas da Teoria das Restrições. No entanto, os custos relativos: (i) ao estoque de produtos prontos (aproveitado no medidor ‘estoque \$ dias’); e (ii) ao estoque em processo (análogo ao indicador ‘Investimento em *WIP*’); podem ser determinados com base no princípio de custeio praticado pela organização que fará uso de método proposto por esta pesquisa.

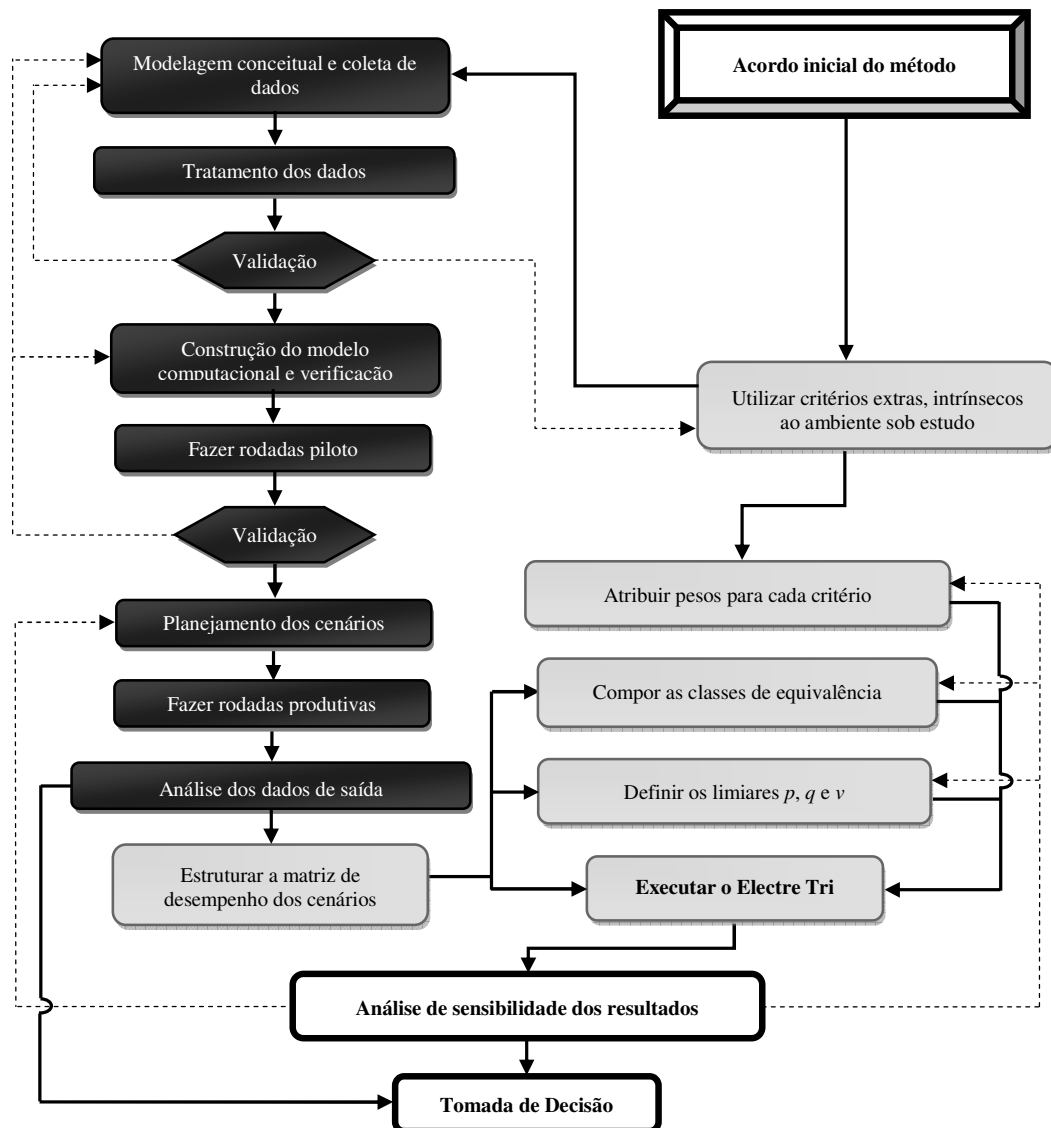


Figura 1 – Estrutura do Método de determinação do *WIP*.

2) Utilizar critérios extras, intrínsecos ao ambiente sob estudo

Nesta etapa recomenda-se que os decisores (grupo de pessoas que proporcionam o juízo de valor final) e os analistas (responsáveis por efetivar o modelo de simulação computacional e fazer recomendações relativas ao processo de decisão) ponderem a seguinte questão: é necessário, incrementar o conjunto de critérios preconizado pelo método, utilizando critérios específicos ao ambiente produtivo em estudo? A importância desta análise pode ser justificável,

diante de situações em que os decisores desejam considerar no processo decisório, critérios particulares ao sistema de produção. No entanto, durante a seleção dos novos critérios, que serão vinculados aos critérios propostos pelo método, é necessário acatar aos axiomas de (GOMES; GOMES; ALMEIDA, 2002): (i) representatividade dos atributos relevantes ao estudo; (ii) ausência de redundância; e (iii) independência. No âmbito desta pesquisa, os critérios de decisão referem-se ao conjunto de regras que são atribuídas aos indicadores de desempenho, visando elucidar as preferências e ou importâncias para o decisor, diante de um grupo de cenários à escolha. Em síntese, para cada critério de decisão estabelecido, existe um indicador de desempenho relativo, que precisa ser incorporado ao modelo de simulação.

Conforme ilustrado na Figura 1, ao finalizar a análise sugerida na etapa 2, é recomendado pelo método, determinar os coeficientes de importância (pesos) para os critérios k_j (etapa 13), enquanto são executadas, as atividades de: (a) desenvolvimento do modelo de simulação computacional; (b) planejamento dos cenários; (c) análise dos dados de saída; e (d) estruturação da matriz de desempenho dos cenários, as quais são esclarecidas nas etapas subsequentes.

3) Modelagem conceitual de coleta de dados

É recomendado nesta etapa: (a) arquitetar o modelo conceitual; e (b) realizar a coleta dos dados. Para assessorar a modelagem conceitual, o método recomenda um conjunto de parâmetros que visam auxiliar na delimitação das principais características do sistema real, a serem consideradas no modelo conceitual. Neste sentido, as características abordadas no modelo conceitual devem: (i) possibilitar o uso dos seguintes medidores de desempenho: Lei de Little (LITTLE, 1961), taxa de atendimento da demanda (HOPP; SPEARMAN, 2000), investimento em *WIP*, ganho \$ dias em atraso (KENDALL, 2007), estoque \$ dias (KENDALL, 2007), giro do estoque de produtos prontos (HOPP; SPEARMAN, 2000) e giro do *WIP* (HOPP; SPEARMAN, 2000); (ii) considerar as variáveis: disponibilidade dos equipamentos (especificamente as distribuições de *TTF* e *TTR*), capacidade dos recursos produtivos e volume do estoque de produtos prontos; (iii) sequenciar as ordens de produção sob a condição *first-come, first-served* (HOPP; SPEARMAN, 2000) ou outra mais adequada ao contexto; (iv) utilizar o *Conwip*, como abordagem para gerenciar o fluxo de materiais, considerando a teoria apresentada em Hopp e Spearman (2000); e (v) respeitar o prazo de execução do estudo, bem como o orçamento previsto. Isto porque, o nível de detalhamento das características pode provocar aumento no tempo de modelagem, bem como, requisitar mão-de-obra especializada, podendo assim, acrescer o orçamento inicial. A definição das características a serem modeladas é balizada por restrições computacionais, sendo uma das condições limitantes do método a discussão deste tópico. Ao optar pelo uso de critérios específicos ao ambiente em estudo (conforme etapa 2), devem também ser caracterizados os medidores relativos aos novos critérios.

Efetiva-se assim a modelagem conceitual, visando delinear as características necessárias provenientes do ambiente real, que permitam quantificar o *WIP*. Uma vez efetivado o modelo conceitual, o próximo ponto a ser tratado nesta etapa, diz respeito à coleta dos dados, que formam o conjunto das informações necessárias, para parametrizar as variáveis do modelo de simulação, bem como, validá-lo (etapa 8) em termos de representatividade da parcela do ambiente real considerado no estudo à luz das características modeladas. Neste contexto, é recomendada a coleta dos: (i) **dados da demanda do mix de produtos** – expressam a demanda dos produtos em função do período temporal; (ii) **dados específicos do processo produtivo** – fornecem elementos que assessoram a parametrização das variáveis determinísticas e aleatórias, tais como: tempo de processamento ou (tempo de ciclo), número de operadores, distribuição de *TTF* (entre outras, dependendo das particularidades delineadas no modelo conceitual); e (iii) **dados para validar o modelo computacional**.

Para determinar os dados referentes à demanda do *mix* de produtos, é sugerido o uso das

informações contidas no plano agregado de produção. Por conseguinte, para coletar os dados relativos ao processo produtivo é indicado o uso das técnicas descritas no estudo de ‘Tempos e Métodos’ conforme Barnes (1995). Por fim, é recomendada a composição de uma base de dados, que será aproveitada unicamente para validar o modelo computacional na etapa 8 e que pode ser efetivada por meio da construção de intervalos de confiança (LAW; KELTON, 2000) ou através de uma análise qualitativa, comparando as saídas do modelo computacional, com dados coletados no ambiente real. Compete ressaltar que o método proposto por esta pesquisa não recomenda uma técnica específica para a validação do modelo computacional.

4) Tratamento dos dados

É executado nesta etapa, somente para as variáveis aleatórias, o ajuste das distribuições de probabilidade, com os respectivos parâmetros estatísticos. Para as variáveis determinísticas, as informações concernentes podem ser incorporadas diretamente no modelo computacional, durante a efetivação da etapa 6.

5) Validação

O primeiro ponto de validação consiste em aferir o modelo conceitual, em termos de representatividade das características do ambiente real. Neste sentido, é proposta a efetivação de uma análise de aderência, a qual visa confrontar o modelo conceitual ao conjunto de requisitos apresentado no Quadro 1.

Pergunta guia: o modelo conceitual, $\forall \delta=[1;10]$	
δ	Requisitos para conduzir a análise de aderência
1	contribui para o objetivo do estudo (determinação do <i>WIP</i>)?
2	considera as variáveis: (i) disponibilidade dos equipamentos; (ii) capacidade dos recursos produtivos; e (iii) volume do estoque de produtos prontos?
3	possibilita o uso dos medidores: (i) Lei de Little (LITTLE, 1961); (ii) taxa de atendimento (HOPP; SPEARMAN, 2000); (iii) investimento em <i>WIP</i> ; (iv) ganho \$ dias em atraso (KENDALL, 2007); (v) estoque \$ dias (KENDALL, 2007); (vi) giro do estoque de produtos pronto (HOPP; SPEARMAN, 2000); e (vii) giro do <i>WIP</i> (HOPP; SPEARMAN, 2000)?
4	utiliza o <i>Conwip</i> para gerenciar o fluxo de materiais?
5	configura o <i>Conwip</i> e a liberação de cartões, segundo a teoria apresentada em Hopp e Spearman (2000)?
6	conduz o sequenciamento das ordens de produção, na regra <i>first-come, first-served</i> ?
7	comporta a vinculação dos medidores referentes aos critérios complementares, frente à opção por utilizá-los (etapa 2)?
8	possui um período temporal delimitado (concernente ao horizonte que será representado pelo modelo de simulação)?
9	descreve a função de cada variável determinística e aleatória?
10	expõe detalhadamente, as especificações dos dados que devem ser coletados?

Quadro 1 – Requisitos para aderência do modelo conceitual.

Dependendo do resultado obtido na análise, três possíveis caminhos podem ser apontados, conforme a Figura 1: (i) inicia-se a construção do modelo de simulação, recomendado pela etapa 6, quando as informações relativas ao modelo conceitual, bem como, a coleta de dados de entrada, estão consistentes com as proposições sugeridas nas etapas anteriores; (ii) retorna-se para a etapa 2, frente à necessidade de reavaliar ou modificar, o quadro de critérios complementares (quando utilizados), no entanto, cabe observar que esta prática influenciará a definição dos pesos para os critérios k_j . Por conseguinte, durante o período de reavaliação do quadro de critérios complementares, o método recomenda a paralisação do procedimento indicado na etapa 13; e (iii) sendo necessário executar qualquer tipo de alteração no modelo conceitual e ou realizar novos procedimentos de coleta de dados, deve-ser retroceder para a etapa 3.

6) Construção do modelo computacional e verificação

Esta etapa tem por finalidade, transcrever as características delineadas no modelo

conceitual, em um modelo computacional, sendo utilizadas as seguintes entradas: (i) dados da demanda do *mix* de produtos; (ii) dados específicos do processo de produção; e (iii) para as variáveis aleatórias, parâmetros estatísticos que foram determinados na etapa 4.

7) Fazer rodadas piloto

São realizadas corridas piloto com o modelo computacional, no intuito de gerar dados de saídas, que serão aproveitados na etapa 8 para validar modelo. Ainda nesta etapa, deve ser definido o tempo de *warm up* (caso seja necessário) visando evitar distorções nos dados de saída, que pode ser causadas pelo estado inicial do modelo de simulação.

8) Validação

Segundo Law (2005), a validação de um modelo computacional pode ser obtida através da comparação entre as observações no ambiente real com os resultados da simulação, podendo ser assistida por técnicas estatísticas. Sob este enfoque, a construção de intervalos de confiança é um dos procedimentos estatísticos que pode ser aplicado, conforme apontado por Balci (1998), Law e Kelton, (2000), e Sargent (2009). Neste sentido, vale ressaltar que são apresentadas em Chung (2003), outras técnicas estatísticas que também visam subsidiar o processo de validação do modelo computacional.

Com base nos resultados obtidos nesta etapa, três possíveis caminhos são apontados, conforme a Figura 1: (i) frente a problemas de programação ou *bugs*, é necessário retroceder até a etapa 6 e corrigir as inconsistências. Posteriormente, deve-se realizar procedimento de aferição; (ii) sendo validado o modelo computacional, é iniciada a etapa de planejamento de cenários; e (iii) recua-se para a etapa 3, diante de situações que envolvam modificações mais expressivas, que iniciam a partir da modelagem conceitual.

9) Planejamento dos cenários

Na etapa 9, a estruturação dos cenários deve ser norteada pelas seguintes variáveis independentes: (i) nível de *WIP* do processo; e (ii) quantidade de estoque de produtos prontos, considerando o *mix* de produto estudado. Entretanto, compete ainda ressaltar a possibilidade de aproveitar as variáveis: disponibilidade dos equipamentos, demanda do *mix* de venda e capacidade produtiva, para incrementar a configuração dos cenários, caso seja factível ao escopo em estudo.

Por fim, devem ser definidos os seguintes parâmetros para cada um dos cenários simulados (LAW; KELTON, 2000): número de replicações de cada cenário, número de cenários, condições de início e número de simulações independentes, utilizando diferentes números aleatórios e nível de significância para a convergência de estatísticas.

10) Fazer rodadas produtivas

Consiste na execução do plano de cenários, instituído na etapa 9. Deste modo, para cada um dos diferentes cenários que foram instituídos, é necessário ajustar os parâmetros do modelo de simulação, conforme as particularidades propostas e após, realizar as rodadas produtivas. Ao finalizar as replicações, coletam-se os dados de saída de cada um dos indicadores de desempenho à luz da proposta do cenário simulado, sendo estes, analisadas na etapa seguinte.

11) Análise dos dados de saída

Na etapa 11 é sugerida a aplicação de técnicas estatísticas como a Análise Univariada de Variância (ANOVA) (HAIR *et al.*, 2009) e o teste não-paramétrico de Kruskal-Wallis, para examinar a ocorrência de diferenças significativas nas médias dos dados de saída que foram

gerados pelos seguintes medidores (variáveis dependentes): (i) *lead time* de produção (*CT*) (LITTLE, 1961); (ii) taxa de produção efetiva ou *throughput* (LITTLE, 1961); (iii) investimento em *WIP*; (iv) taxa de atendimento da demanda (HOPP; SPEARMAN, 2000); (v) ganho \$ dias em atraso (KENDALL, 2007); (vi) estoque \$ dias (KENDALL, 2007); (vii) giro do estoque de produtos pronto (HOPP; SPEARMAN, 2000); (viii) giro do *WIP* (HOPP; SPEARMAN, 2000); e (ix) indicadores que representam os critérios complementares (conforme etapa 2), considerando os diferentes cenários simulados, como variável independente.

Conforme a Figura 1, ao final da análise dos dados de saída, dois caminhos distintos podem ser seguidos: (i) diante da falta de evidências para afirmar que as médias de todos os cenários simulados apresentam diferenças significativas (para todos os indicadores de desempenho), o próximo procedimento que deverá a ser efetivado, diz respeito à tomada de decisão (etapa 18); e (ii) sendo possível afirmar que as médias dos diferentes cenários são significativamente diferentes (ao menos para dois indicadores de desempenho), unicamente sob este resultado, executam-se as etapas concernentes a tomada de decisão, assistida pelo método ELECTRE TRI.

12) Estruturar a matriz de desempenho dos cenários

A etapa 12 foca na composição da matriz de desempenho dos cenários, que consiste em uma tabela que descreve o resultado (desempenho) de cada cenário simulado, em termos de medidas de tendência central (oriundas da Estatística Descritiva), apuradas com base nos dados de saída gerados na etapa 10 à luz do seguinte quadro de indicadores: (i) taxa de produção efetiva ou *throughput*; (ii) investimento em *WIP*; (iii) giro do estoque de produtos prontos; (iv) ganho \$ dias em atraso; (v) estoque \$ dias; e (vi) indicadores referentes aos critérios complementares (etapa 2). No Quadro 2 é apresentada a estrutura da matriz de desempenho dos cenários que deve ser resultado da etapa 12.

Matriz de desempenho dos cenários						
Cenários simulados	Indicadores de desempenho					
	Taxa de produção efetiva	Investimento em <i>WIP</i>	Giro do estoque de produtos prontos	Ganho \$ dias em atraso	Estoque \$ dias	Indicadores complementares (etapa 2)
a_1	g_{11}	g_{21}	g_{31}	g_{41}	g_{51}	g_{j1}
a_2	g_{12}	g_{22}	g_{32}	g_{42}	g_{52}	g_{j2}
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
a_t	g_{1t}	g_{2t}	g_{3t}	g_{4t}	g_{5t}	g_{jt}

Quadro 2 – Matriz de desempenho dos cenários.

Para construir a matriz ilustrada no Quadro 2, é calculado inicialmente o coeficiente de variação C_v , dos dados de saída que aludem a cada um dos indicadores de desempenho g_j (sendo $g=1, \dots, j$ indicadores de desempenho), distinguindo o tratamento, conforme o fator cenário a_t (para $a=1, \dots, t$ cenários testados). Em seguida, com base nos índices de C_v obtidos em cada vetor $g_j a_t$, são nomeadas as medidas de tendência central, observado a condição seguinte: (a) para um valor de $C_v > 0,3$ sugere-se utilizar a mediana para representar cada grupo de dados de saída, gerados no experimento de simulação; e (b) em caso contrário, sugere-se empregar a média. Posteriormente, são calculadas as medidas estatísticas (média ou mediana) selecionadas para cada $g_j a_t$ à luz de C_v obtido. Por fim, os resultados obtidos são esquematizados na matriz de desempenho, considerando os eixos de alocação: (a) indicadores de desempenho g_j ; e (b) cenários testados a_t .

13) Atribuir pesos para cada critério

Nesta etapa, é estabelecido à luz das preferências do grupo de decisores, o coeficiente de

importância (peso) para cada um dos seguintes critérios de decisão: (i) giro do estoque de produtos prontos; (ii) ganho \$ dias em atraso; (iii) estoque \$ dias; (iv) investimento em *WIP*; (v) taxa de produção efetiva ou *throughput* (*TH*); e (vi) indicadores referentes aos critérios complementares (etapa 2).

14) Compor as classes de equivalência (ou conjunto de categorias)

Consiste na definição dos limites das classes de equivalência (ou conjunto de categorias), que servem de indicativo para o ELECTRE TRI classificar os cenários à luz de múltiplos critérios. Neste contexto, é sugerida a composição de três classes denominadas 1, 2 e 3 ordenadas preferencialmente, de modo que a classe 1 aluda aos cenários que possuem os piores resultados (desempenho) à luz dos critérios mais importantes.

Para estabelecer as três classes de equivalência, é necessário, apontar os limites superiores e inferiores a cada classe, para todos os critérios de decisão. Neste sentido, os analistas podem ajustar os índices de modo empírico, considerando os resultados delineados na matriz de desempenho dos cenários (efetivada na etapa 12) à luz de informações provenientes de: (a) *padrões históricos* – mencionam resultados alcançados no passado; (b) *padrões alvos* – representa níveis de desempenho que é visto com adequado ou admissível; e (c) *padrões de desempenho da concorrência* – que consistem em parâmetros de desempenho praticados pelos concorrentes da organização.

15) Definir os limiares de preferência (p), indiferença (q) e veto (v)

Esta etapa propõe a determinação dos valores referentes aos limiares de preferência (p), indiferença (q) e veto (v), para cada perfil de referência estabelecido na etapa anterior. No entanto, com base em Gomes, Araya e Carignano (2004), Gomes e Costa (2008), Neves e Costa (2010) e Hora *et al.* (2008), é possível observar que esses autores não apresentam uma metodologia estruturada que norteie a determinação dos limiares de p , q e v . Assim, o método sugere que os resultados iniciais sejam gerados por meio do uso de critérios verdade. Posteriormente, esses limiares podem ser refinados de modo subjetivo, considerando: (i) o embasamento teórico descrito na Seção 2.2; (ii) a matriz de desempenho dos cenários (etapa 12); (iii) os limiares das classes de equivalência (definidos na etapa 14); e (iv) o impacto causado no comportamento do modelo à decisão (em termos de alterações nas classificações), o qual poderá ser ponderado através de uma análise de sensibilidade, recomendada na etapa 17.

16) Executar o algoritmo ELECTRE TRI

Nesta etapa, é executada a classificação dos diferentes cenários simulados à luz dos parâmetros apontados nas etapas 13, 14 e 15 e, da matriz de desempenho dos cenários efetivada na etapa 12, conforme esquematizado na Figura 1. No entanto, é sugerido que os resultados iniciais sejam obtidos, considerando um nível de corte λ igual a 0,5 sendo este, posteriormente incrementado à luz da análise de sensibilidade (etapa 17).

17) Análise de sensibilidade dos resultados

Com base nas classificações obtidas na etapa anterior, é recomendada na etapa 17 a efetivação de uma análise de sensibilidade, tendo por objetivos: (a) verificar a robustez do modelo quanto às alterações impostas; e (b) prover elementos que subsidiem o ajuste dos parâmetros apresentados nas etapas 13, 14 e 15. Deste modo, a análise de sensibilidade propõe que os decisores, avaliem os resultados providos pelo modelo à decisão, frente a mudanças propositais, nos valores dos seguintes parâmetros: (i) nível de corte λ , para $\lambda \in [0,5;1]$; (ii) limites das classes de equivalência; (iii) pesos dos critérios k_j ; e (iv) limiares p , q e v . Neste

contexto, destacam-se como exemplo (MIRANDA; ALMEIDA, 2003): (a) alterar o nível de corte λ de 0,5 para 0,6; (b) aumentar os limites das classes $g_j(b_1)$ e $g_j(b_2)$ em 5%; e (c) variar em 20% o peso de cada critério utilizado no estudo. Neste sentido, uma nova replicação poderá ser executada (etapa 16), sob novos parâmetros, os quais são deliberados de modo subjetivo, a partir das classificações obtidas e dos parâmetros utilizados na replicação n , sendo, por conseguinte, os novos resultados ajuizados pelos decisores. Ainda, conforme apresentado na Figura 1, a etapa 17 tem uma ligação com a etapa 9 (planejamento dos cenários), o que torna possível a composição de cenários alternativos, que podem ser estabelecidos frente à ocorrência de incomparabilidades.

Ao finalizar a análise de sensibilidade, tem-se como principal saída, um plano de resultados que caracteriza os distintos cenários simulados à luz das classes de equivalência 1, 2 e 3, sendo este, utilizado na etapa 18 para nortear a tomada de decisão.

18) Tomada de decisão

Nesta etapa final, é determinada a configuração do cenário que será empregada no ambiente de produção, considerando unicamente dois subsídios: (i) o plano de resultados gerado na etapa 17 em conjunto com as informações provenientes dos indicadores CT para de cada tipo de produto, giro do WIP e taxa de atendimento da demanda; e (ii) os resultados obtidos na etapa 11 (referentes à falta de evidências que afirmam diferenças significativas para todos os indicadores de desempenho, em todos os cenários). Em especial nessa última situação, os decisores podem escolher a configuração de cenário a ser implantada no sistema, considerando o custo do WIP .

Esta etapa finaliza o método proposto e esta seção. A próxima seção apresenta brevemente a aplicação realizada, como forma de ilustração da aplicação do método proposto.

5. Aplicação do método em um caso prático

O método proposto foi aplicado em uma linha produtiva de uma empresa metal-mecânica, dedicada à fabricação de 4 produtos e constituída essencialmente por 6 operações. Ao focalizar no ambiente em estudo, é possível destacar as seguintes particularidades: (i) a empresa desenvolve um plano agregado semestral que especifica para um total de 23 produtos (incluindo os 4 produtos analisados neste trabalho) a demanda mensal de cada tipo de produto; (ii) com base no plano semestral, o setor de Planejamento, Programação e Controle da Produção (PPCP) executa a programação semanal da linha; e (iii) os itens são produzidos e estocados em lotes com quantidade padrão, que fluem ao longo das etapas do processo para o estoque final por meio de contenedores, os quais comportam quantidades específicas para cada produto.

Neste sentido, o Quadro 3 apresenta os valores que limitam cada uma das 3 classes de equivalência. Os dados apresentados nos Quadros 3,4 e 5 foram modelados no software IRIS (utilizando um nível de corte igual a 0,95), sendo os cenários 8 e 10 categorizados na classe 2 e os demais na classe 1.

<i>Limite das classes</i>	<i>Taxa de produção efetiva</i>	<i>Investimento em WIP</i>	<i>Giro do estoque de produtos prontos</i>	<i>Ganho \$ dias em atraso</i>	<i>Estoque \$ dias</i>
b_1	0,5833	\$ 2.640	0,0235	\$ 7.900	\$ 14.000
b_2	0,5897	\$ 1.400	0,0410	\$ 6.300	\$ 3.400

Quadro 3 – Limites das classes de referência à luz dos critérios de decisão.

O Quadro 4 apresenta a matriz de desempenho dos cenários, obtida a partir do estudo de simulação, o qual analisa 15 cenários alternativos.

<i>Cenários</i>	<i>Taxa de produção efetiva</i>	<i>Investimento em WIP</i>	<i>Giro do estoque de produtos prontos</i>	<i>Ganho \$ dia em atraso</i>	<i>Estoque \$ dia</i>
1	0,595	\$ 2.670,96	0,018	\$ 8.026,22	\$ 22.285,74
2	0,596	\$ 1.630,47	0,018	\$ 4.762,22	\$ 22.181,28
3	0,589	\$ 2.663,37	0,020	\$ 5.855,02	\$ 18.244,97
4	0,592	\$ 1.629,01	0,020	\$ 5.506,62	\$ 17.996,57
5	0,583	\$ 2.688,96	0,022	\$ 7.844,76	\$ 14.332,19
6	0,592	\$ 1.626,63	0,023	\$ 6.299,39	\$ 13.748,34
7	0,589	\$ 2.677,99	0,027	\$ 6.443,70	\$ 9.896,01
8	0,590	\$ 1.343,06	0,027	\$ 5.633,05	\$ 10.162,75
9	0,586	\$ 2.659,83	0,033	\$ 7.693,03	\$ 7.053,80
10	0,586	\$ 1.341,54	0,033	\$ 7.440,77	\$ 6.777,63
11	0,582	\$ 2.634,09	0,042	\$ 9.699,99	\$ 3.142,82
12	0,584	\$ 1.329,48	0,042	\$ 9.320,61	\$ 3.331,59
13	0,581	\$ 2.658,75	0,058	\$ 14.125,73	\$ 1.052,09
14	0,575	\$ 1.326,17	0,058	\$ 14.288,55	\$ 949,39
15	0,570	\$ 1.338,98	0,143	\$ 22.882,19	\$ 69,60

Quadro 4 – Matriz de desempenho dos cenários.

Os coeficientes de pesos dos critérios utilizados são apresentados pelo Quadro 5.

	<i>Taxa de produção efetiva</i>	<i>Investimento em WIP</i>	<i>Giro do estoque de produtos prontos</i>	<i>Ganho \$ dia em atraso</i>	<i>Estoque \$ dia</i>
Pesos k_j	0,20	0,15	0,10	0,35	0,20

Quadro 5 – Coeficiente de importância de cada critério.

Para selecionar o cenário a ser empregado, os decisores usaram as classificações propostas pelo IRIS, em conjunto com as informações geradas pelos indicadores remanescentes que são: (i) *CT* para de cada tipo de produto; (ii) giro do *WIP*; e (iii) taxa de atendimento da demanda. A partir dessas informações, os decisores optaram por empregar no ambiente produtivo em estudo o cenário 8, considerando que o mesmo apresentava *CT* menor neste cenário, desempenho superior dos medidores ‘taxa de produção efetiva (*TH*)’, ‘giro do *WIP*’, ‘taxa de atendimento da demanda’ e o ‘ganho \$ dia em atraso’ quando comparado com o cenário 10.

Observa-se assim, a despeito do esforço considerável de modelagem de simulação e aplicação da técnica de decisão multicritério, a vantagem em termos de potencial de geração de informações do método proposto para suportar o posicionamento dos decisores.

5. Conclusão

A focalizar no alinhamento da gestão dos estoques aos planos de demanda e capacidade, em sistemas produtivos intermitentes que operam sob a ótica *MTS*, com fluxo tipo A, que empregam o *Conwip* (HOPP; SPEARMAN, 2000) para gerir o fluxo de materiais, o uso de ferramentas que subsidiem o processo decisório, como a Simulação Computacional e Métodos de Apoio Multicritério à Decisão, podem contribuir com o desenvolvimento de ações voltadas à gestão de estoques.

Neste sentido, a presente pesquisa teve por intuito, apresentar um método que possibilite quantificar o nível de *WIP*, a partir das abordagens Simulação Computacional e do método de Apoio Multicritério ELECTRE TRI. Ainda nesta pesquisa, compete destacar que o esforço e tempo gastos para construir os modelos de simulação e de decisão não foram necessariamente perdidos, pois ainda é possível avaliar o *WIP* e o estoque de produtos prontos, a partir da composição de novos cenários, analisando características como: aumento da demanda, entrada de novos itens no *mix* de produtos, modificações nas distribuições probabilidade das variáveis aleatórias, alterações na capacidade produtiva, priorização de ordens, entre outros. Neste sentido,

há possibilidade de testar cenários alternativos, poderia ser um meio de auxiliar nas decisões táticas da empresa a médio e longo prazos, o que contribui para uma tomada de decisão com maior foco no objetivo.

Agradecimentos

Os pesquisadores agradecem à CAPES/PROSUP pelo suporte à realização da presente pesquisa.

Referências

- BALCI, Osman.** *Verification, validation and testing.* In: **BANKS, Jerry** (org). *Handbook of simulation: principles, methodology, advances, applications, and practice.* New York: John Wiley and Sons, 1998.
- BOEIRA, Leandro A.** *Introdução à utilização da Simulação Computacional em uma empresa fabricante de câmaras de ar pneumáticas.* 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção e Transportes) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Transportes. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2008.
- COSTA, H. G.; SOARES, A. C.; OLIVEIRA, P. F.** *Avaliação de transportadoras de materiais perigosos utilizando o método ELECTRE TRI.* *Gestão e Produção* v.11, n.2, p.221-229, 2004.
- COSTA, H. G.; MANSUR, A. F. U.; FREITAS, A. L. P.; CARVALHO, R. A.** *ELECTRE TRI aplicado a avaliação da satisfação de consumidores.* *Produção*, v. 17, n. 2, p. 230-245, 2007.
- COSTA, H. G.; SANTAFÉ JÚNIOR, H. P. G.; HADDAD, A. N.** *Uma contribuição do método ELECTRE TRI à obtenção da classificação de riscos industriais.* *Investigação Operacional*, vol.27, no.2, p.179-197, 2007.
- DIAS, L. C.; MOUSSEAU, V.** *IRIS: um SAD para problemas de classificação baseado em agregação multicritério.* Anais da III Conferência da Associação Portuguesa de Sistemas de Informação, Coimbra, 20-22, 2002.
- FREITAS, André L. P.; COSTA, Helder G.** *Ordenação e classificação de alternativas: uma análise multicritério.* In: XX ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 20., 2000. Anais Enegep 2000.
- FREITAS, André L. P.; COSTA, Helder G.** *Uma análise multicritério para a classificação da qualidade de serviços utilizando o método ELECTRE TRI.* In: XXIII ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 23., 2003, Ouro Preto (MG). Anais Enegep 2003. Ouro Preto (MG): 2003.
- GOGG, T; J.; MOTT, J. R.** *Improve Quality and Productivity with Simulation.* Estados Unidos, JMI Consulting Group, 1992.
- GOMES, Luiz Flavio A. M.; GONZÁLEZ ARAYA, Marcela C.; CARIGNANO, Claudia.** *Tomada de decisões em cenários complexos: Introdução aos Métodos Discretos do apoio Multicritério à Decisão.* São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2004.
- GOMES, André R.; COSTA, Helder G.** *Potencial de consumo municipal: uma abordagem Multicritério.* *Sistemas & Gestão*, v.3, n. 3, p.233-249, 2008.
- HOPP, Wallace J.; SPEARMAN, Mark L.** *Factory Physics: foundations of manufacturing management.* 2. ed. Boston: McGraw-Hill, 2000.
- KENDAL, Gerald, I.** *Visão Viável – Transformando Faturamento em Lucro Líquido.* 1. ed. Porto Alegre: Bookman, 2007.
- LAW, Averill M.; KELTON, W. D.** *Simulation modeling and analysis.* 3. ed. Boston: McGraw-Hill, 2000.
- LITTLE, John D. C.** *A Proof for the Queuing Formula: $L = \lambda W$.* *Operations Research*, v. 9, n. 3, p. 383-387, 1961.
- MIRANDA, Caroline M. G.; ALMEIDA, Adiel T.** *Avaliação de pós-graduação com método ELECTRE TRI – o caso de Engenharias III da CAPES.* *Produção*, v.13, n.3, p. 101-112, 2003.
- NEVES, Roberta B.; COSTA, Helder G.** *Avaliação do desempenho de gerenciamento de projetos utilizando o método ELECTRE TRI.* In: XIII SIMPÓSIO DE PESQUISA OPERACIONAL E LOGÍSTICA DA MARINHA, 13., 2010, Rio de Janeiro (RJ). Anais SPOLM 2010. Rio de Janeiro (RJ): 2010.
- NEVES, Roberta B.; COSTA, Helder G.** *Swot, ELECTRE TRI e sistema de avaliação da CAPES.* In: XXVI ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 26., 2006, Fortaleza, (CE). Anais Enegep 2006. Fortaleza (CE): 2006
- PERGHER, Isaac; DEUS, André D.; ROSSI FILHO, Tito 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.

PERGHER, Isaac; VACCARO, Guilherme 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.

PIDD, Michael. *Modelagem empresarial: ferramentas para tomada de decisão.* 1. ed. Porto Alegre: Bookman, 1998.

PRITSKER, A. A. B.; SIGAL, C. E.; HAMMESFAHR, R. D. J. *Modeling and Simulation Process.* Estados Unidos, SLAM II Network Models for Decision Support: Prentice Hall, 1989.

SAKURADA, Nelson; MIYAKE, Dario I. *Aplicação de simuladores de eventos discretos no processo de modelagem de sistemas de operações de serviços.* Gestão e Produção, v. 16, n. 1, p. 25-43, 2009.

SIMCHI-LEVI, Davi; KAMINSKY, Philip; SIMCHI-LEVI, Edith. *Cadeia de Suprimentos: projeto e gestão.* Porto Alegre: Bookman, 2003.

SOUTO JUNIOR, Antonio K. D.; LOCH, Gustavo V; MOITA, Marcia H. V. *Simulação computacional para o auxílio à tomada de decisão: um estudo de caso na indústria de aparelhos eletrônicos no Pólo Industrial de Manaus.* Revista INGEPRO, v. 1, n. 9, p. 48-55, 2009.

SZAJUBOK, Nadia K.; ALENCAR, Luciana H. ALMEIDA, Adiel T. *Modelo de gerenciamento de materiais na construção civil utilizando avaliação multicritério.* Produção, v. 16, n. 2, p. 303-318, 2006.