

**DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO DE UM MODELO DE ENSINO  
DA TEORIA DAS RESTRIÇÕES COM BASE EM UMA ABORDAGEM  
MULTIAGENTE**

***DEVELOPMENT AND APPLICATION OF A MODEL FOR  
TEACHING THEORY OF CONSTRAINTSBASED IN A MULTIAGENT APPROACH***

**Júlio César Bastos de Figueiredo (Escola Superior de Propaganda e Marketing) *jjfigueiredo@espm.br***

**Susana Carla Farias Pereira (Fundação Getúlio Vargas) *susana.pereira@fgv.br***

**Luis Henrique Rigato Vasconcellos (Fundação Getúlio Vargas) *luis.vasconcellos@fgv.br***

Endereço Eletrônico deste artigo: <http://www.raunimep.com.br/ojs/index.php/regen/editor/submissionEditing/450>

---

## **Resumo**

O objetivo deste trabalho é apresentar um modelo computacional, baseado no paradigma da programação multiagentes, para o ensino e estudo de tópicos ligados à Teoria das Restrições dentro dos cursos de Administração. O modelo desenvolvido pode servir como instrumento de ensino para o estudante de graduação e pós-graduação que se depara com esse tópico nas disciplinas de Gestão de Operações. O fato de ser desenvolvido em plataforma de software gratuita, e de ter seu código fonte aberto, permitirá que o modelo possa ser modificado e estendido por professores e alunos, incentivando ainda mais o aprendizado deste assunto por meio da construção de novos conhecimentos.

**Palavras-chave:** teoria das restrições, simulação, ensino.

## **Abstract**

This paper presents the development and application of a computational model based on multi-agent programming paradigm. The goal is to create an instrument of education for the undergraduate and graduate students that comes across with this topic in the Operations Management classes. The fact of being developed in a free software platform, and of having its source code opened, will allow that the model can be changed and extended by professors and students, stimulating moreover the learning of this subject through the construction of new knowledge.

**Keywords:** theory of constraints, simulation, education.

Artigo recebido em: 27/03/2012

Artigo aprovado em: 28/11/2012

---

## 1. Introdução

O ensino de Gestão de Operações tem representado um desafio constante para os educadores no campo da administração. Segundo Bouyer, Sznelvar e Costa (2005), uma análise recente do ensino de operações mostra que os professores tem se preocupado muito com os métodos de ensino e com os recursos didáticos nessa área. Essa preocupação é justificada pelo fato da disciplina, encarada como sendo de foco predominantemente prático, estar hoje presa a condições metodológicas que a desviam em parte de seus objetivos. Nas palavras dos autores:

*“Repleta de fluxogramas, setas, esquemas teóricos, diagramas, etc., a disciplina, conforme expressa nos livros, mostra-se excessivamente normativa na aplicação de seus conceitos. Os Conceitos, então, dantes entendidos como instrumentos para ação eficaz numa realidade prática, correm o risco de se tornarem abstratos e descontextualizados, sem referência na singularidade das situações que visam incidir. O desafio, portanto, que se coloca diante da educação em GOP é gerar conhecimento que permita aprofundar numa dada realidade, adequando os métodos desenvolvidos alhures aos contextos específicos de atuação do estudante e futuro profissional.”(BOUYER; SZNELWAR; COSTA, 2005)*

Além disso, deve-se considerar a pressão cada vez maior pela qualidade na concepção e na formação dos alunos dos cursos de administração (MAÑAS, 1996) e por uma formação que possibilite o desenvolvimento de uma consciência crítica e leve a uma melhor compreensão do fenômeno organizacional e suas consequências (NICOLINI, 2003). Em um ambiente que, segundo Bacellar(2005), requer a escolha de diferentes métodos de ensino e recursos didáticos que procurem atender a diferenças cada vez mais marcantes entre os estilos de aprendizagem dos alunos. Mesmo com alguma eficiência dos recursos didáticos tradicionais tais como filmes, estudos de casos, gráficos, esquemas e figuras, o desenvolvimento de novos instrumentos de ensino pode auxiliar no processo de aprendizagem. Esse conceito é reforçado por Jarvis(1995) para quem a abundância de recursos assegura o aprendizado, pois os alunos podem aprender respeitando seus próprios estilos pessoais de aprendizagem e quanto maior a variedade de recursos usados pelos professores, mais enriquecida será a experiência de aprendizagem por parte dos alunos.

Chritensen et al (2009) afirmam que as necessidades dos alunos diferem e por isso, cada estudante aprende de diferentes formas. Esses autores defendem que o ensino precisa ser customizado, com abordagem modular centrada no aluno e que a tecnologia, sobretudo as centradas no aluno como uso de computador com softwares, é importante para assegurar a implementação dessa nova abordagem de ensino.

A tecnologia tem tido um papel cada vez maior no apoio ao ensino da administração de empresas. Abordagens baseadas em ferramentas computacionais, técnicas multimídia e de jogos de empresas, aliadas aos métodos clássicos, tem demonstrado que a realidade prática do mercado pode ser trazida, em certa medida, para o ensino (LACRUZ, 2004).

Hoje em dia as ferramentas computacionais voltadas para a simulação permitem que possam ser criados ambientes artificiais chamados de "simuladores de voo" ou "jogos de empresas". Nestes jogos de empresas o espaço e o tempo podem ser facilmente comprimidos para tornar mais ágil o desenrolar de eventos que se quer analisar. Também se pode diminuir a velocidade dos processos para poder melhor estudá-los. Podem-se experimentar os efeitos colaterais de longo prazo de decisões tomadas e sistematicamente explorar novas estratégias e pode-se, por fim, desenvolver toda uma compreensão sobre a complexidade dos sistemas sobre o qual se busca a compreensão. Os alunos aprendem a reconhecer e a lidar com situações nas quais intervenções nas políticas vigentes levam a mudanças que só serão sentidas após muito tempo, e que podem se diluir antes de atingir os resultados esperados. Ou mesmo serem derrotadas por reações inesperadas ou efeitos colaterais.

Tanto na forma de jogos de empresas, nos quais os alunos vivenciam situações em ambientes empresariais específicos, ou por meio de ferramentas de construção de modelos organizacionais e simulações destes modelos, as ferramentas computacionais voltadas para a simulação possibilitam que os participantes possam aprender por meio de um processo em que eles atuam como atores principais do aprendizado. Este tipo de abordagem possibilita ao aluno explorar, sob seu controle, fatos, conceitos e procedimentos.

Neste trabalho será apresentado um modelo computacional, baseado em programação multiagente, que poderá ser utilizado para o ensino e estudo de tópicos ligados à Teoria das Restrições dentro dos cursos de Administração. A escolha do tópico de Teoria das Restrições está relacionada ao fato de que o conjunto de técnicas que compõe o arcabouço desta teoria

**Júlio César Bastos de Figueiredo, Susana Carla Farias Pereira, Luis Henrique Rigato Vasconcellos** tem papel importante dentro da otimização da produção. Tais aspectos serão discutidos na próxima seção.

## **2. Aspectos Básicos da Teoria das Restrições**

Em grande parte dos cursos de administração que abordam o tópico de Gestão de Operações, ao se deparar com o estudo de técnicas de gerenciamento da manufatura e melhoria da eficiência da produção, o aluno é conduzido até o estudo da Teoria das Restrições (Theory of Constraints – TOC) de Eliyahu Goldratt (GOLDRATT, 1990).

Importante como metodologia de gestão dos processos produtivos, a Teoria das Restrições tem como aspecto fundamental o fato de encarar a empresa como um sistema. Ou seja, um conjunto de elementos entre os quais há alguma relação de interdependência e cujo desempenho dependerá dos esforços conjuntos de todos os elementos do sistema. Esse aspecto é reforçado por Mabin e Balderstone (2003) que definem TOC como uma metodologia sistêmica de estruturação e solução de problemas que teve seu escopo ampliado, com a inclusão de processos ou padrões de pensamento (*thinking process*, TPs), para a perspectiva organizacional e incluindo as mudanças no pensamento e comportamento das pessoas em processos de mudança organizacional. Por exemplo, Sellito (2005) apresenta o uso dos processos de pensamento da TOC para a análise sistêmica em uma organização de saúde pública no Brasil. Em artigo mais recente, Gupta e Boyd (2008) afirmam que a TOC promove uma visão sistêmica e integrada.

Goldratt (1990) faz uma analogia entre uma empresa e uma corrente para descrever esse caráter sistêmico das relações. Quando se traciona uma corrente ela sempre se romperá em seu elo mais fraco, ou seja, no elo que apresentar a maior restrição de força. Logo, se queremos aumentar a resistência da corrente devemos concentrar esforços para reforçar o elo mais fraco. Nas palavras de Goldratt (1990), isso significa “elevar a restrição”. Segundo Goldratt (1990), a restrição “é qualquer coisa que impede um sistema de atingir um desempenho maior em relação à sua meta”. Rahman (1998) resume o conceito de TOC afirmando que “todo sistema deve ter pelo menos uma restrição” e que “a existência de restrições representa oportunidades de melhoria”.

A restrição de um sistema define seu desempenho. Para aumentar o desempenho do sistema é necessário então primeiro identificar a restrição e então explorá-la para que possa ser elevada. Aumentar a resistência de qualquer outro elo da corrente, que não a restrição, não

irá gerar melhoria na capacidade da corrente em sustentar carga, ou seja, não se estará gerando melhoria no sistema (GOLDRATT, 1990).

Essa analogia pode ser aplicada de maneira direta a uma linha de produção. Cada elo da corrente corresponde a uma máquina ou recurso produtivo. Uma “máquina gargalo” ou um “recurso gargalo” é um recurso da produção cuja capacidade produtiva não é capaz de atender a demanda, e por isso é chamado de restrição. Uma restrição é um ponto de estrangulamento do processo produtivo. Já um recurso não gargalo, em geral, possui capacidade ociosa em relação ao que seria necessário para atender a demanda. O sistema pode possuir também recursos que não tem capacidade inferior à demanda, e por isso não são gargalos, mas que possuem uma capacidade menor do que os demais recursos do sistema. Estes recursos são chamados de “recursos com restrição de capacidade” e potencialmente podem se tornar gargalos, dependendo da demanda e das condições do processo produtivo.

O foco para o melhoramento (MABIN e BALDERSTONE, 2003), sob a ótica da Teoria das restrições, deve ser o balanceamento do fluxo e não da capacidade produtiva. Este balanceamento só pode ser feito se os gargalos que limitam o fluxo do sistema forem identificados para que então se possa “submeter” o restante da produção a eles. Podem ser utilizadas algumas técnicas para identificação das restrições, tais como a observação dos níveis de estoque em cada estágio ou a medição dos ciclos de utilização do tempo de cada recurso (GOLDRATT, 1990; RAHMAN, 1998).

Alguns dos principais livros-textos de Gestão de Operações adotados no Brasil (CORREA e CORREA, 2008; CHASE et al, 2006; SLACK et al, 2008; STEVENSON, 2005; KRAJEWSKI et al, 2009) procuram explicar de forma didática e simplificada algumas das principais ideias da TOC: indicando que em um processo produtivo é necessário tirar o maior proveito da restrição; que os outros recursos devem trabalhar em função do ritmo da restrição; e que ao se elevar um elo fraco, desfazendo uma restrição, o próximo elo fraco se tornará a restrição do sistema.

Além disso, esses livros-texto explicam e ilustram as implicações da busca da eficiência em recursos não-gargalos. Qualquer recurso que produza a uma taxa superior a taxa de produção necessária para alimentar o recurso gargalo só irá gerar estoque. Logo, para que estoques desnecessários não sejam gerados, a capacidade da fábrica deverá ser igual à capacidade do gargalo. Logo, os gargalos não definem apenas o fluxo da produção, mas também os seus estoques. Gupta e Boyd (2008) afirmam que uma das principais lições da

TOC é que investimentos e esforços feitos com objetivo de aumentar a eficiência de recursos não-gargalos são um desperdício e geram excesso de estoque.

A ilustração destes conceitos e princípios em sala de aula pode ser feita por meio de gráficos e esquemas. Algumas vezes pode-se utilizar o apoio de vídeos ou animações, mas em raras situações o aluno tem a oportunidade visualizar e interagir com a dinâmica deste processo. Dinâmicas de grupo podem cumprir este papel, todavia, ficam comprometidas quando o número de alunos é muito grande e o tempo em sala de aula escasso.

É neste contexto que a simulação computacional apresentada neste trabalho pode desempenhar um papel diferenciado, ajudando a ilustrar de forma prática diversas das concepções teóricas envolvidas no estudo da Teoria das Restrições. Por exemplo, o problema da acumulação de estoques, da dependência da produção em relação ao recurso gargalo, do balanceamento do fluxo e às variações da demanda. O fato de ser desenvolvido em plataforma de software gratuita, e de ter seu código fonte totalmente aberto, permitirá ainda que o modelo de simulação possa ser modificado e estendido por professores e alunos incorporando, por exemplo, outros conceitos e problemas ligados a Teoria das Restrições, tais como a Contabilidade de Ganhos (CORBETT NETO, 1997), os princípios da Optimized Production Technology – OPT (SPENCER; COX, 1995) e o paradigma logístico da TOC derivado do OPT e sua implementação com base na metodologia do tambor-pulmão-corda (TPC) gerenciado pelo uso de *time-buffers* (RAHMAN, 1998). A ideia é incentivar ainda mais o aprendizado destes assuntos por meio da construção de novos conhecimentos compartilhados.

## **2. Metodologia: Simulação Baseada em Agentes**

Este trabalho pode ser caracterizado como um estudo aplicado, já que visa gerar conhecimentos e modelos para aplicação em situações práticas. No que se refere ao método analítico, esta proposta pode ser classificada como hipotético-dedutiva, pois o método consistirá na construção de conjecturas ou hipóteses representadas por modelos matemáticos e de simulação. Das hipóteses formuladas, deduzem-se consequências que eventualmente podem ser testadas ou falseadas por meio da comparação do comportamento dos modelos propostos frente à realidade.

A simulação numérica e computacional gera dados que podem ser analisados indutivamente. Ao contrário dos processos típicos de indução, os dados simulados provêm de um conjunto de regras, especificadas rigorosamente, e não da medida direta do mundo real

**Júlio César Bastos de Figueiredo, Susana Carla Farias Pereira, Luis Henrique Rigato Vasconcellos** (BERENDS e ROMME, 1999). A metodologia para a construção do modelo teórico será a modelagem baseada em agentes.

Agentes podem ser definidos como os elementos autônomos de software criados para desempenhar tarefas predefinidas dentro de um sistema. Por meio da modelagem baseada em agentes é possível observar como agentes individuais (pessoas, organizações ou mesmo nações) interagem entre si e com seu ambiente (AXELROD, 1997). A simulação no computador é usada para descobrir propriedades emergentes do modelo e assim ganhar entendimento dentro de um processo dinâmico, o que seria muito difícil de modelar com técnicas matemáticas usuais. Deve-se então dispor de ferramentas capazes de criar, no computador, simulações de fenômenos complexos e modelos descentralizados (FIGUEIREDO, 2012a). Existem vários ambientes de programação especificamente projetados para modelagem baseada em agentes. Dentre eles, um dos mais conhecidos e utilizados é o software NetLogo (TISUE e WILENSKY, 2004).

O NetLogo é um ambiente de modelagem programável utilizado para explorar o comportamento de sistemas descentralizados complexos. Por ser gratuito, possui grande penetração na área acadêmica e de pesquisa. É particularmente bem conceituado para modelagem de sistemas de agentes. O NetLogo fornece um modo fácil programar e controlar um modelo baseado em agentes. Permite que o modelador, por meio de interfaces intuitivas, possa dar, simultaneamente, instruções a centenas ou milhares de agentes independentes que trabalham paralelamente, tornando possível explorar as conexões entre o comportamento de micro níveis e os de modelos de macro níveis que emergem das interações de muitos indivíduos.

A modelagem baseada em agentes é nova tecnologia para modelagem que têm crescido em uso nos últimos anos (TESFATSION e JUDD, 2006). Os modelos são criados para identificar, aperfeiçoar e antecipar comportamentos. Os agentes podem ser definidos como assistentes que têm a capacidade de aprendizagem, por isso são chamados por alguns autores de “agentes inteligentes”. São definidas quatro características principais de um agente (WEISS, 1999; ANUMBA, UGWU *et al.*, 2001):

**Autonomia:** os agentes comportam-se sem a intervenção direta de seres humanos. Têm-se apenas algum tipo do controle sobre suas regras de comportamento e sobre seu estado interno. Por causa do caráter autônomo do agente, resultados específicos de suas tarefas não podem ser garantidos de antemão.

**Orientação a metas:** os agentes são instruídos de acordo com metas e prioridades específicas para realizar um objetivo predeterminado. Os agentes não atuam simplesmente em resposta a seu ambiente, eles podem exibir comportamento que seja orientado para um determinado objetivo.

**Habilidade social:** os agentes interagem uns com outros agentes por meio de algum processo de comunicação e troca de informações. Só dessa maneira um ambiente multiagente pode existir.

**Assincronismo:** os agentes podem operar de forma independente e ao mesmo tempo comunicar-se com outros agentes de forma assíncrona. Isto é, a comunicação e a ação ocorrem ao longo do tempo não seguindo nenhuma sequência ou ordem pré-determinada. Isto significa também que um processo de negociação de um agente “a” com outro agente “b” pode ocorrer ao mesmo tempo em que estes negociam com outros agentes.

**Reatividade:** os agentes percebem seu ambiente e respondem às mudanças que ocorrem nele.

**Pró-atividade:** os agentes não atuam simplesmente em resposta ao seu ambiente, eles podem exibir comportamento orientado por metas, tomando a iniciativa. Os agentes têm estados internos e objetivos individuais, e atuam para atingir seus objetivos em nome de seu usuário.

Os sistemas multiagente são especialmente adaptados para representar problemas com múltiplas possibilidades de solução, perspectivas e entidades. Estes sistemas possuem capacidade para resolver problemas tradicionalmente distribuídos e possibilitam sofisticados padrões de interação: cooperação (trabalhar em conjunto para um objetivo comum), coordenação (organizando a resolução de problemas por meio da exploração de interações benéficas e evitando interações prejudiciais) e negociação (tentando atingir um acordo que seja aceitável para todas as partes envolvidas). A flexibilidade e o alto nível das interações são a base deste potente paradigma e distinguem os sistemas multiagente de outras abordagens (JENNINGS, SYCARA *et al.*, 1998).

O uso dos métodos tradicionais de modelagem, como a modelagem por equações diferenciais, possuem limitações que tem de ser vencidas neste projeto. Algumas destas limitações são apontadas por Colella, *et al.* (1998). Segundo este autor, os métodos tradicionais:

- Podem descrever propriedades macroscópicas de um sistema que já são conhecidas, mas não explicam a origem dessas propriedades.



**Júlio César Bastos de Figueiredo, Susana Carla Farias Pereira, Luis Henrique Rigato Vasconcellos**

- Não podem ser facilmente extrapolados além do âmbito das equações.
- Não suportam bem sistemas descontínuos.
- Não suportam bem populações heterogêneas.

Um projeto na perspectiva multiagente pode oferecer um profundo entendimento de um fenômeno científico relevante além destas limitações. Por meio de um pequeno número de regras locais é possível capturar estruturas fundamentais subjacentes ao comportamento complexo dentro de um domínio. Com a simulação multiagente é possível fazer com que os processos possam ser visualizados em caráter micro – por meio de relações definidas por regras simples.

Neste trabalho os agentes corresponderão aos produtos que fluem através de uma linha de montagem de uma fábrica de automóveis. O ambiente dos agentes corresponderá ao conjunto de estágios de trabalho que cada produto tem de atravessar na linha de montagem. A interação entre os agentes e o ambiente será mediada pela capacidade de produção e armazenamento de cada estágio, e o comportamento emergente será decorrente dessa interação, com alterações na velocidade de produção e nos níveis de estoque dos estágios.

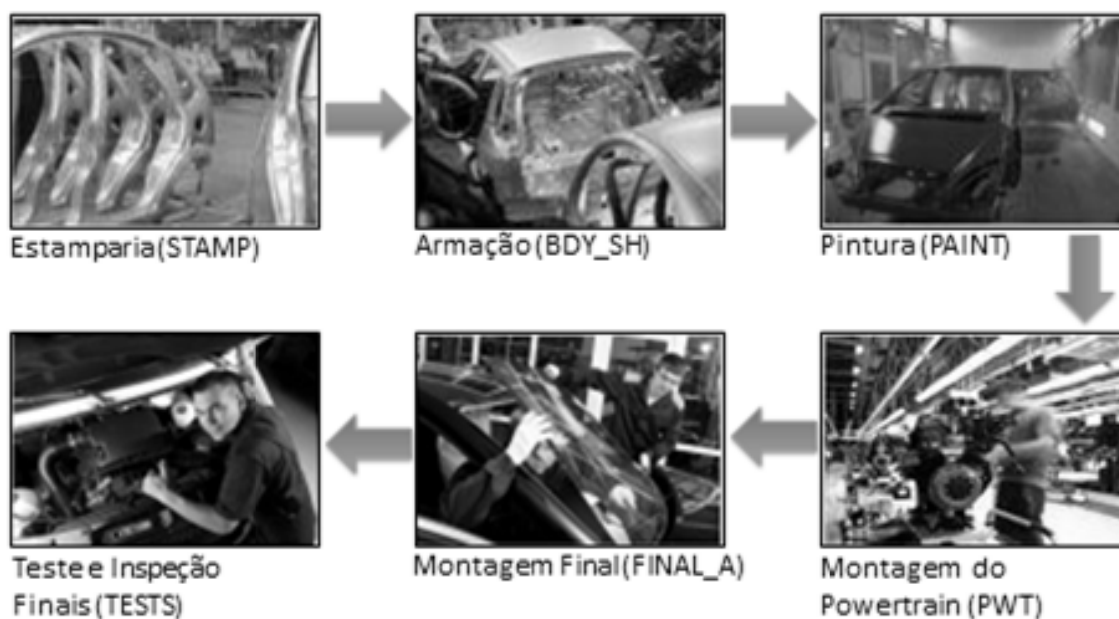
#### **4. O Modelo de Simulação Desenvolvido**

O modelo desenvolvido é baseado numa fábrica fictícia de automóveis que possui um macro processo produtivo em linha composto por seis grandes processos (figura 1), a saber:

- Estamparia (STAMP): onde as peças metálicas dos automóveis são produzidas num processo de estampagem;
- Armação (BDY\_SH): as peças estampadas são soldadas formando a carroceria do veículo;
- Pintura (PAINT): a carroceria e as portas são tratadas num processo anticorrosivo, e em seguida pintadas;
- Montagem do Powertrain (PWT): o conjunto motor e câmbio é inserido no automóvel;
- Montagem final (FINAL\_A): os componentes do interior do veículo são montados;
- Testes finais e Inspeção final (TESTS): Todos os componentes elétricos do veículo são testados e é realizado um teste num dinamômetro e outro teste de estanqueidade.

Cada processo conta com um gerente de produção, responsável pela gestão da área, e um espaço de estoque (*buffer*) com capacidade máxima de 100 unidades de produtos em processo (*Imax*). Uma vez atingido o valor de *Imax* o estágio não é mais capaz de receber novos produtos para serem processados. Pressupõe-se que o custo unitário do estoque em processo é de R\$ 100,00 por unidade por mês, e é válido para todos os seis grupos de processos.

Considera-se também, por simplicidade, que a previsão de demanda seja perfeita e de 20 produtos por dia e que esta empresa trabalha 30 dias por mês. Ao final do mês, portanto, espera-se produzir, numa situação ideal 600 automóveis.



**Figura 1:** Macro-Processo de produção automobilística

**Fonte:** fotos disponíveis em: [www.digitalphotos.net](http://www.digitalphotos.net)

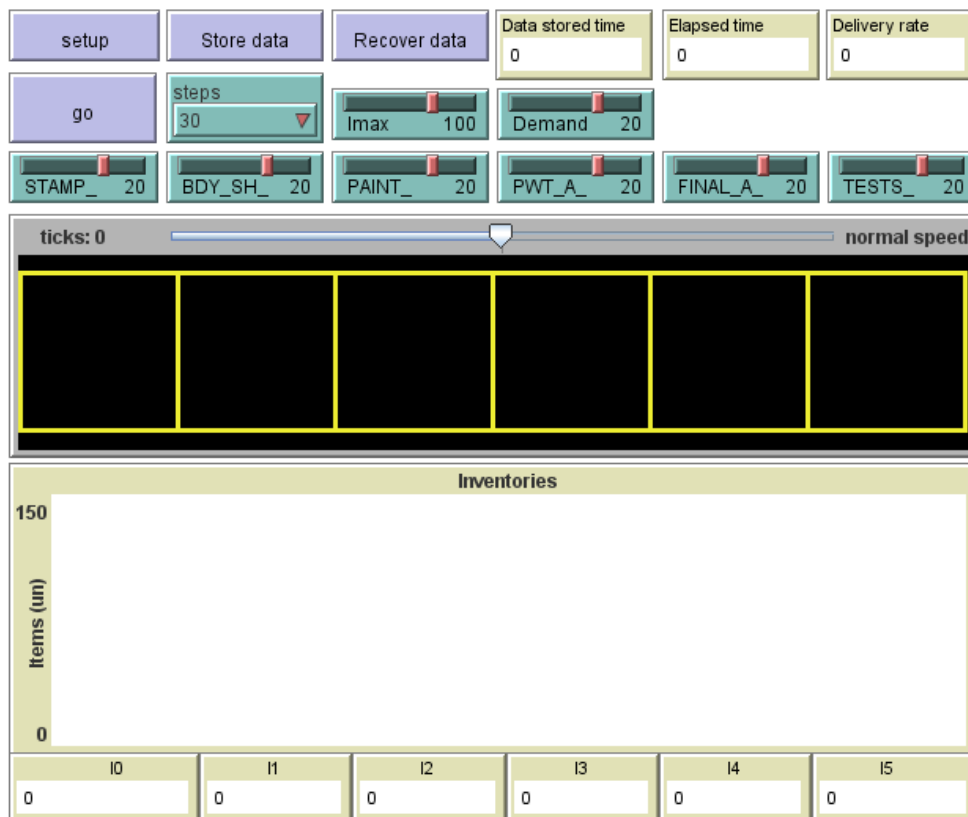
Cada um desses processos tem capacidade de produção nominal máxima de 30 produtos por dia. Todavia, considerando-se a previsão de demanda, o balanceamento da linha e a sobrecarga dos processos, o Diretor em conjunto com os gerentes, decidiu que todos os processos deveriam funcionar com uma taxa de produção de 20 produtos por dia.

Tomando como exemplo o processo 2 (armação) pode-se inferir que, apesar da capacidade nominal de processamento ser de 30, esta capacidade só será atingida se houver peças suficientes no estoque do processo anterior (estamparia) para serem processadas e se o estoque do processo seguinte (pintura) tiver espaço para armazená-las. Desta forma, o fluxo de entrada de produtos poderá ser menor que a capacidade de processamento.

Na Figura 2 está representada a interface do modelo desenvolvido neste trabalho na plataforma Netlogo. Nesta interface os processos de produção são representados, da esquerda

Desenvolvimento e aplicação de um modelo de ensino da teoria das restrições com base em uma abordagem multiagente

**Júlio César Bastos de Figueiredo, Susana Carla Farias Pereira, Luis Henrique Rigato Vasconcellos** para a direita, pelas áreas negras circundadas por linhas amarelas. Dentro do paradigma de programação do Netlogo, estas áreas correspondem a conjuntos de *patches*, que são partes do ambiente no qual os agentes estão inseridos. As chaves deslizantes STAMP\_; BDY\_SH; PAINT\_; PWT\_A\_; FINAL\_A\_; TESTS\_ representam a capacidade de processamento de cada um dos seis processos. O valor máximo do estoque de produtos processados que cada estágio pode comportar é indicado pela chave *Imax*. O valor instantâneo dos estoques dos estágios é representado visualmente por um gráfico de barras (*Inventories*) localizado na parte inferior da interface.



**Figura 2:** Interface gráfica do modelo desenvolvido neste trabalho.

**Fonte:** elaborado pelos autores.

Neste modelo os agentes corresponderão aos produtos. A cada ciclo de processamento (que aqui é interpretado para fins didáticos como dia) cria-se um conjunto de produtos no processo inicial (estamparia) para serem processados. Isso garante que o primeiro processo sempre terá estoques para produzir. O mesmo eventualmente pode não ocorrer com os demais processos. A cada ciclo de processamento a evolução dos produtos na linha é regida por regras simples que são atribuídas aos processos: os processos devem tentar mover um conjunto de produtos do processo anterior para processamento de acordo com a sua taxa de produção, todavia, cada um dos processos não pode contribuir para exceder o valor máximo

Desenvolvimento e aplicação de um modelo de ensino da teoria das restrições com base em uma abordagem multiagente

**Júlio César Bastos de Figueiredo, Susana Carla Farias Pereira, Luis Henrique Rigato Vasconcellos**  
de seu estoque, nem tampouco mover um conjunto de produtos maior que aquele disponível no estoque predecessor.

O processamento dessas regras acaba fazendo com que os agentes (produtos) se desloquem da esquerda para direita durante a simulação. O fluxo de produtos que sai do ultimo processo (Testes finais e inspeção) a cada ciclo (dia) em direção ao mercado (*Delivered itens*) não pode exceder a demanda (*Demand*). A demanda limita a taxa de transferência do último estágio.

O código fonte do modelo pode ser visto no link da simulação. Além disso, o Netlogo permite que os modelos possam ser salvos em um formato que permite a publicação e manipulação interativa no ambiente WEB. As simulações desenvolvidas e apresentadas neste trabalho podem ser testadas no sítio <http://technical.paper.nom.br/toc2>.

Na interface da Figura 2 vê-se que a capacidade de produção de cada estágio produtivo pode ser configurada por meio de chaves deslizantes. O mesmo ocorre com as variáveis *Imax* e *Demand*. Estas chaves podem ter seus valores alterados durante o processo de simulação, permitindo que se testem valores alternativos para cada variável na medida em que constrói hipóteses a respeito do funcionamento do sistema.

## **5. Aplicação do Modelo de Simulação Proposto**

### **5.1 Orientações Gerais**

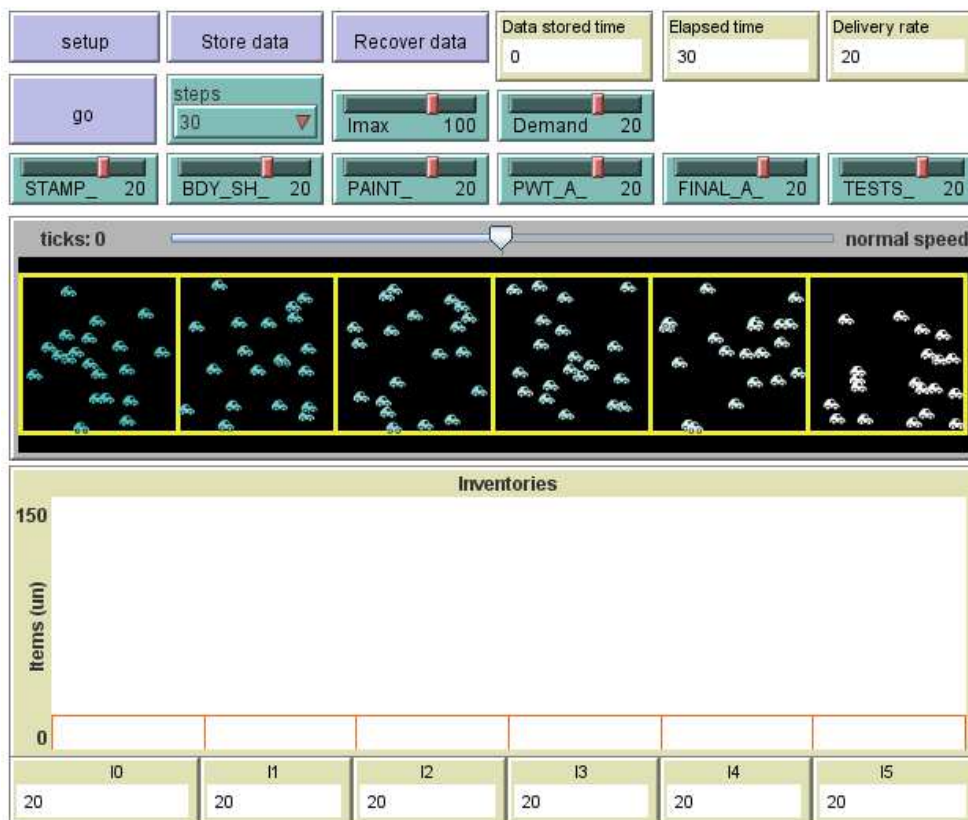
Nessa simulação o aluno deverá assumir o papel do Diretor de Operações de uma grande empresa do setor automobilístico que vai iniciar hoje sua produção. O aluno deve ser orientado para acessar a simulação através do link: <http://technical.paper.nom.br/toc2/>, realizar a simulação conforme parâmetros pré-estabelecidos e responder as questões que se seguem.

Para executar a simulação durante os primeiros 30 dias utiliza-se o botão "go". Caso seja necessário visualizar os resultados da fábrica em diferentes períodos, altere o parâmetro "steps". Durante a simulação qualquer alteração nos parâmetros do modelo é automaticamente computada. Por exemplo, caso ocorram alterações nos estoques o gráfico de barras é atualizado automaticamente. Essa característica é importante para que se tenha ideia da evolução histórica dessas variáveis. Em um ambiente de aprendizado os dados do gráfico também podem ser exportados para serem estudados em separado ou eventualmente ilustrar o relatório de exercício. Como exemplo considere inicialmente que as taxas de produção são iguais em todos os processos, isto é, *20 produtos/dia*.

## 5.2 Roteiro de Aplicação da Simulação:

Adinâmica da simulação está baseada numa série de questões que os participantes devem responder. As respostas devem ser fundamentadas nos resultados obtidos da simulação. A seguir são apresentadas as questões, os resultados, bem como os comentários que o aplicador pode utilizar na condução da dinâmica.

*Questão 1: Supondo que a fábrica comece a operar no dia de hoje, qual será a produção acumulada total ao final do primeiro mês, sabendo-se que a fábrica opera trinta dias?*



**Figura 3:** Taxas de produção igualadas nos estágios após 30 dias de operação.

**Fonte:** elaborado pelos autores.

*Comentário:* Na Figura 3 o número de passos simulados pode ser visto na janela *Elapsed time*. A janela *Delivered itens* indica o número de produtos que saiu do processo Testes e Inspeção Final após o último dia de produção, ou seja, a variável *Delivered rate* indica a taxa diária de produção de toda a linha. Durante a simulação os produtos que serão processados em cada estágio são representados por carros transparentes. No caso da Figura 3 percebe-se que os gráficos de barras que indicam o volume de estoque registram apenas o total de 20 peças em cada processo, ou seja, nos processos há apenas as peças que estão sendo processadas. Isto se deve ao fato, já apresentado pela Teoria das Restrições (GOLDRATT,

Desenvolvimento e aplicação de um modelo de ensino da teoria das restrições com base em uma abordagem multiagente

**Júlio César Bastos de Figueiredo, Susana Carla Farias Pereira, Luis Henrique Rigato Vasconcellos**

1990) de todas os processo estarem trabalhando com os fluxos sincronizados e operando na mesma taxa que a demanda. O professor poderá explicar que, partindo-se da condição inicial, somente há produção de produtos acabados a partir do sétimo dia. A produção de automóveis será  $= 20 * 24 = 480$  veículos. É provável que muitos participantes não considerem o fato de que a saída de produtos acabados ocorrerá apenas no sétimo dia de produção, e respondam de forma equivocada que a produção do mês foi de 600 veículos.

*Questão 2: Ao final do primeiro mês qual é o custo do estoque em processo?*

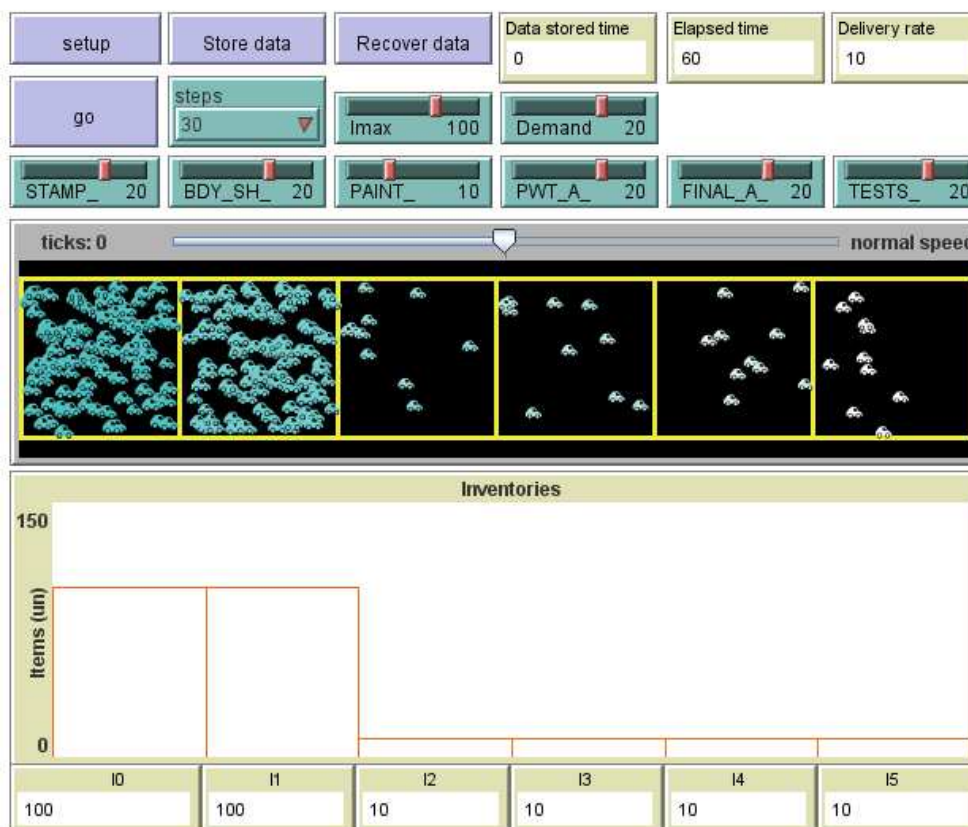
*Comentário:* O custo do estoque em processo será de 12.000, conforme mostrado na tabela 1.

Processos	Estoque em processo (unidades)	Custo estoque (R\$)
Estamparia	20	2.000,00
Armação	20	2.000,00
Pintura	20	2.000,00
Montagem do Powertrain	20	2.000,00
Montagem Final	20	2.000,00
Testes e Inspeções Finais	20	2.000,00
	Custo Total Estoques (R\$)	12.000,00

**Tabela 1:** Custo de estoque rodada 1 após 30 dias de operação

**Fonte:** elaborado pelos autores

*Questão 3: No segundo mês de operação ocorreu um problema no processo de pintura e a capacidade deste processo foi reduzida para 10 carros/dia. A empresa operou durante o período de um mês com a capacidade reduzida neste processo. Qual é a produção acumulada total do segundo mês?*



**Figura 4:** Taxas de produção igualadas nos estágios após 60 dias de operação.

**Fonte:** Resultado da Simulação

*Comentário:* No final do segundo mês de produção a produção total será de 340 automóveis. É importante apontar que a produção da fábrica inteira passa a ser de apenas 10 unidades por dia a partir do 34º dia. A produção do gargalo (pintura) controla a produção da fábrica inteira, conforme preconizada Goldratt (1990).

Como a taxa de produção do processo pintura é inferior à demanda, o processo pinturorna-se uma restrição do sistema. Isto pode ser evidenciado pelo acúmulo de estoque que é gerado nos estágios anteriores (figura 4). Além disso, a taxa de produtos entregues ao mercado a cada ciclo (*Delivered itens*) é de 10 produtos/ciclo, exatamente igual à taxa de produção do recurso restritivo (pintura). Durante a simulação com esses parâmetros pode-se perceber que não importa o quanto se aumente as taxas dos estágios anteriores ao estágio 3, não haverá alteração em *Delivered itens*. Ou seja, a produção de toda a linha está atrelada à produção do estágio de menor capacidade.

Caso avancemos a simulação até o ciclo 15 com esses parâmetros veremos que o estoque no processo 2 aumentará até atingir a capacidade máxima (*Imax*), a partir de então começarão a se acumular produtos nos estágios anteriores.

*Questão 4:* Ao final do segundo mês, qual é o custo do estoque em processo?

Desenvolvimento e aplicação de um modelo de ensino da teoria das restrições com base em uma abordagem multiagente

**Júlio César Bastos de Figueiredo, Susana Carla Farias Pereira, Luis Henrique Rigato Vasconcellos**

*Comentário:* O custo do estoque em processo será de 24.000, conforme mostrado na tabela 2. Para fins de aprendizagem é conveniente que o professor estimule o aluno a realizar uma análise sobre a redução da produção e o aumento do custo de estoque.

Processos	Estoque em processo (unidades)	Custo estoque (R\$)
Estamparia	100	10.000,00
Armação	100	10.000,00
Pintura	10	1.000,00
Montagem do Powertrain	10	1.000,00
Montagem Final	10	1.000,00
Testes e Inspeções Finais	10	1.000,00
	<b>Custo Total Estoques (R\$)</b>	<b>24.000,00</b>

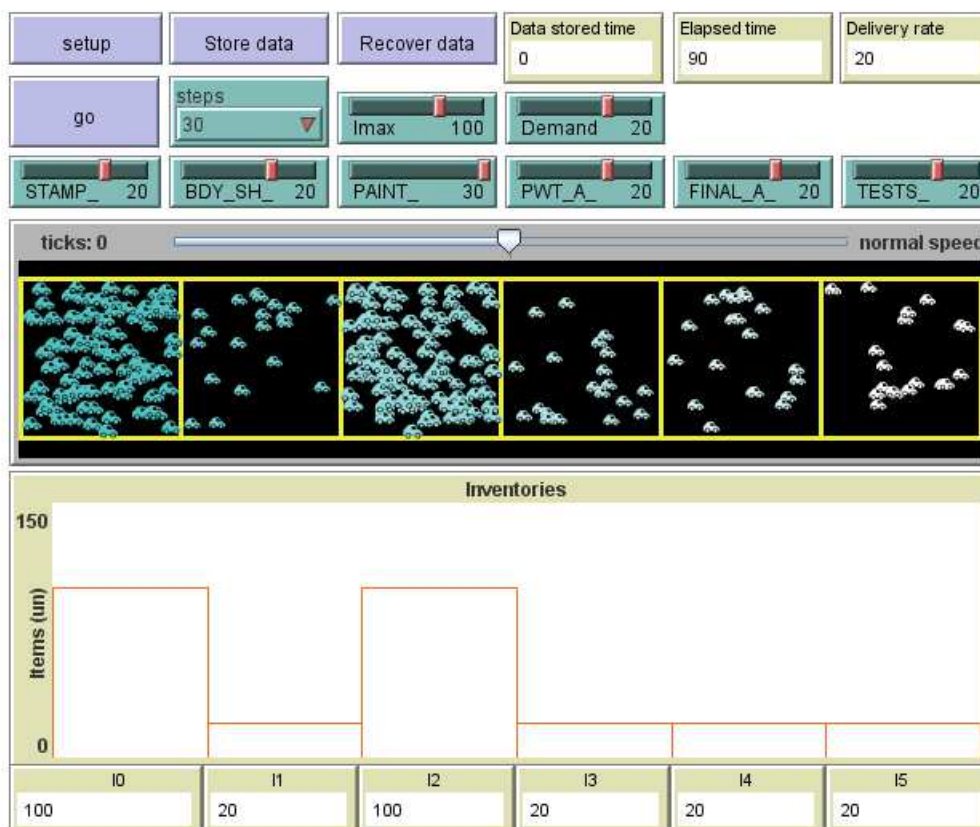
**Tabela 2:** Custo de estoque rodada 2 após 60 dias de operação

**Fonte:** Elaborado pelos autores

*Questão 5:* No terceiro mês, o objetivo da produção é resolver o problema do aumento excessivo de estoques no processo de estamparia e armação. O gerente do processo de pintura conseguiu solucionar o problema de capacidade e sugeriu operar este setor durante o próximo mês na capacidade máxima de 30 carros/hora a fim de reduzir o estoque em processo. Assumindo-se esse novo parâmetro, qual é a produção acumulada total do terceiro mês?

*Comentário:* Ao final do terceiro mês, a produção total deverá ser de 560 automóveis. A fábrica somente começa a operar com produção de 20carros/dia a partir do 64º dia (Figura 5).





**Figura 5:** Taxas de produção igualadas nos estágios após 90 dias de operação.

**Fonte:** Resultado da Simulação

*Questão 6: Ao final do terceiro mês, qual é o custo do estoque em processo?*

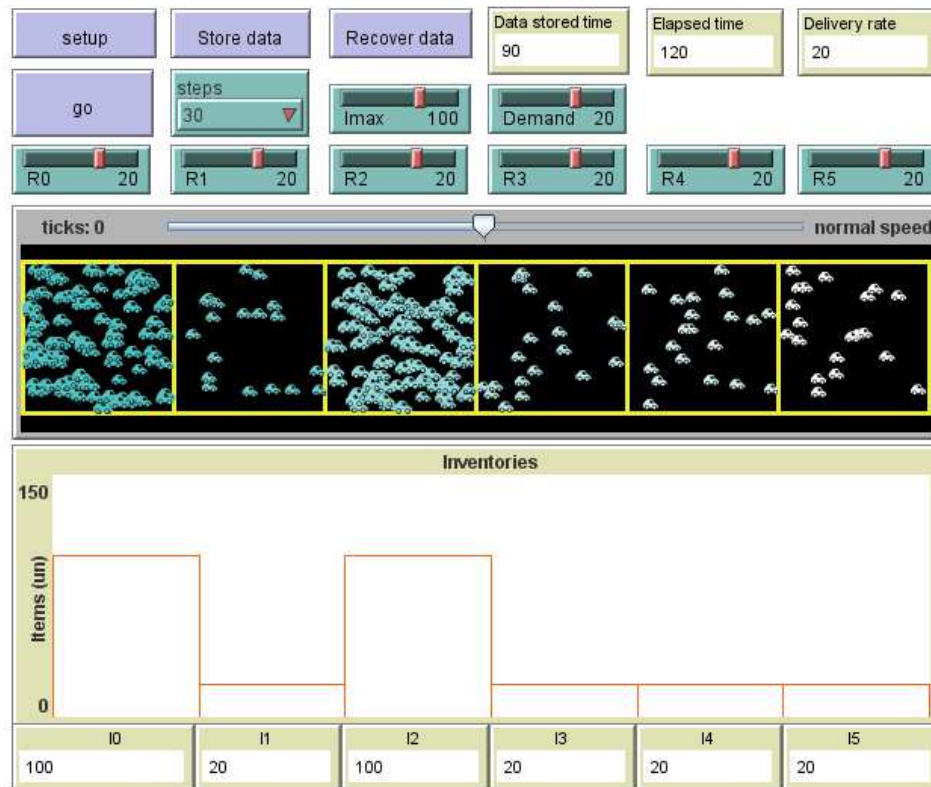
*Comentário:* Não existe mais restrição no processo, uma vez que a empresa é capaz de atender plenamente a demanda de 20 unidades/dia. O estoque em processo permaneceu inalterado no processo Estamparia, reduziu no processo Armação e aumentou no processo Pintura e o custo do estoque total aumentou para R\$ 28.000,00 (Tabela 3).

Processos	Estoque em processo (unidades)	Custo estoque (R\$)
Estamparia	100	10.000,00
Armação	20	2.000,00
Pintura	100	10.000,00
Montagem do Powertrain	20	2.000,00
Montagem Final	20	2.000,00
Testes e Inspeções Finais	20	2.000,00
<b>Custo Total Estoques (R\$)</b>		<b>28.000,00</b>

**Tabela 3:** Custo de estoque rodada 3 após 90 dias de operação

Fonte: Elaborado pelos autores

*Questão 7: Considerando o aumento do custo dos estoques, você determinou que o estoque de todos os processos fossem reduzidos e homogeneizados, para isso, ele definiu que a linha deveria voltar a operar no quarto mês na condição inicial, perfeitamente balanceada, com todos os processos com capacidade de 20 produtos/hora. Assumindo-se esse novo parâmetro, qual é a produção acumulada total do quarto mês?*



**Figura 6:** Taxas de produção iguais nos estágios após 120 dias de operação.

Fonte: Resultado da Simulação

*Comentário:* No do quarto mês, a produção total deverá ser de 600 automóveis (Figura 6).

*Questão 8:* Ao final do quarto mês, qual é o custo do estoque em processo?

*Comentário:* O custo de estoque permaneceu o mesmo, isto é R\$ 28.000,00.

*Questão 9:* Considerando-se a situação no final do quarto mês, elabore uma estratégia de produção que, no menor período possível (dias), melhore o desempenho da fábrica? Quantos dias isto levaria? Descreva e justifique suas ações.

*Comentário:* segundo a TOC (GOLDRATT, 1990) existem três formas possíveis de melhorar desempenho: aumentando o ganho (fluxo), reduzindo despesa operacional ou reduzindo estoques. Considerando que na simulação proposta não é possível atuar no aumento do ganho (fluxo) e nem da despesa operacional, a única alternativa é atuar na redução dos

estoques. Uma ação possível é interromper a produção dos processos de armação e pintura por um período de quatro dias. Essa ação possibilita o escoamento de 80 peças do estoque do processo de Estamparia, acumulado em 100 peças ao final do quarto mês de operação. Sugere-se como ação seguinte, ajustar a capacidade dos processos armação e pintura para 20 unidades/dia e zerar o primeiro processo (estamparia). Em seguida, rodar a simulação por mais quatro dias de produção.

Outras questões e análises dos resultados das simulações podem ser feitos com o auxílio de diversas ferramentas. É possível gerar outros gráficos e tabelas dos resultados obtidos, os resultados também podem ser exportados e trabalhados em outros softwares, além disso, o modelo proposto pode ser facilmente modificado para incorporar sugestões e *insights* dos alunos. A ferramenta de simulação aqui proposta pode e deve ser explorada como um instrumento para a captura, estruturação e compreensão dos modelos mentais envolvidos no processo de estudo da Teoria das Restrições, permitindo, em sala de aula, um melhor debate sobre a maioria das suposições a respeito dessa teoria.

## **6. Conclusões**

As técnicas de modelagem e simulação têm sido desenvolvidas, em geral, como ferramentas para lidar com situações passíveis de serem matematicamente estruturadas e com uma forte vocação para previsão e otimização. Todavia, a modelagem e a simulação podem e devem ser exploradas também como ferramentas para a captura e estruturação do conhecimento. Nos processos de ensino e aprendizado, podem ser utilizadas como instrumentos que permitirão ao estudante testar situações difíceis de serem vivenciadas no ambiente clássico de sala de aula.

Este trabalho apresenta uma possível aplicação de um modelo multiagente, empregando-se os conceitos da Teoria das Restrições, num ambiente de aprendizado baseado em simulação. Este trabalho contribui especificamente com a construção de um modelo simples, que oferece àqueles ligados ao ensino da administração, uma forma eficiente para lidar com exemplificações dinâmicas de problemas que envolvem o tópico de “Teoria das Restrições” dentro do ensino de Gestão de Operações.

O modelo apresentado possibilita a simulação de uma situação similar à realidade empresarial, bem como a visualização do conceito básico da Teoria das Restrições: melhoria da eficiência da produção a partir de uma perspectiva sistêmica (GOLDRATT, 1990). Segundo Spencer e Cox (1995), a TOC tem sido extensivamente utilizada para ajudar no

Desenvolvimento e aplicação de um modelo de ensino da teoria das restrições com base em uma abordagem multiagente

**Júlio César Bastos de Figueiredo, Susana Carla Farias Pereira, Luis Henrique Rigato Vasconcellos** estudo e compreensão dos processos produtivos. O paradigma multiagente, por sua vez, fornece um ambiente metodológico propício para a representação dessas formas sistêmicas de encarar os processos organizacionais.

Além disto, a plataforma de código aberto, permite também que estudantes e professores possam fazer aperfeiçoamentos no modelo, buscando cobrir detalhes específicos de seus cursos e treinamentos, bem como providenciando melhorias na interface que atendam a propostas específicas. O fato de o modelo poder ser facilmente modificável também estimula outros pesquisadores da área a propor suas próprias modificações e extensões, estimulando novas pesquisas e discussões.

É evidente que como todo exercício de simulação, este trabalho não pretende exaurir as possibilidades de ensino da teoria das restrições. Outras variantes desta teoria podem e devem ser trabalhadas a partir desta forma de ensinar, tais como a inclusão de conceitos de tambor-corda-pulmão (SPENCER; COX, 1995) no gerenciamento do processo produtivo.

Além disso, o ambiente de simulação pode ser estendido para outros campos do ensino de operações, tais como o gerenciamento da qualidade, *outboundlogistics*, como proposto por Souza e Pires (2010) *eSupply Chain Management*. Uma avenida está aberta para profissionais que queiram seguir adotando inovações e novas metodologias para o ensino de Gestão de Operações.

## **7. Referências Bibliográficas**

ANUMBA, C. J. et al. A multi-agent system for distributed collaborative design. **Journal of Enterprise Information Management**, v. 14, n. 5-6, p. 355-367, 2001.

AXELROD, R. Advancing the art of simulation in the social sciences. **Complexity**, v. 3, n. 2, p. 16-22, 1997.

BACELLAR, F.C.T. **Contribuições para o ensino de marketing: revelando e compreendendo a perspectiva dos professores**. Tese de Doutorado: Universidade de São Paulo, 2005.

BOUYER, G.C.; SZNELWAR, L.; COSTA, M.J.B. Aprendizagem estratégica e aquisição conceitual no ensino de gestão de operações. Em **Anais do XXV Encontro Nacional de Engenharia de Produção**. Porto Alegre: ABEPRO. 2005.

Desenvolvimento e aplicação de um modelo de ensino da teoria das restrições com base em uma abordagem multiagente

Júlio César Bastos de Figueiredo, Susana Carla Farias Pereira, Luis Henrique Rigato Vasconcellos  
CORBETT NETO, T. **Contabilidade de ganhos: a nova contabilidade gerencial de acordo com a teoria das restrições**. São Paulo: Nobel, 1997.

CORREA, H. L.; CORREA, C. A. **Administração da Produção e Operações**. 2ª. Ed. São Paulo: Atlas, 2008

CHASE, R. B.; JACOBS, F. R; AQUILANO, N. J. **Administração da Produção e Operações**, 11ª. Ed, São Paulo: McGraw-Hill, 2006.

CHRISTENSEN, C. M.; HORN, M.B.; JOHNSON, C.W. **Inovação na sala de aula: como a inovação de ruptura muda a forma de aprender**. Porto Alegre: Bookman, 2009, 240 p.

EPSTEIN, J. M. **Generative social science: studies in agent-based computational modeling**. Princeton University Press, Princeton, 2006.

GOLDRATT, E.. **What is this thing called Theory of Constraints**. New York: North River Press. 1990

JARVIS, P. **Adult and continuing education: Theory and practice**. Routledge, 1995.

JENNINGS, N. R.; SYCARA, K.; WOOLDRIDGE, M. A. Roadmap of Agent Research and Development. **Autonomous Agents and Multi-Agent Systems**, v. 1, n. 1, p. 7-38, 1998.

KRAJEWSKI, L.; RITZMAN, L.; MALHOTRA, M. **Administração de Produção e Operações**, 8ª Ed. São Paulo: Pearson, 2009

LACRUZ, A.J. Jogos de empresas: considerações teóricas. **Caderno de Pesquisas em Administração**, v.11, n.4, p.93-109, 2004.

MAÑAS, A.V. O processo do ensino em administração: a relação qualidade, produtividade e imagem – um modelo de avaliação. Em **Anais do VII Encontro Nacional da ANGRAD**. Florianópolis. 1996.

MABIN, V.J; BALDERSTONE, S.J. The Performance of the theory of constraints methodology: Analysis and discussion of successful TOC applications. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 23, n. 6, pp. 568-595, 2003.

NICOLINI, A.. Qual será o futuro das fábricas de administradores? **Revista de Administração de Empresas** [online], vol.43, n.2, pp. 44-54, 2003.

Desenvolvimento e aplicação de um modelo de ensino da teoria das restrições com base em uma abordagem multiagente

**Júlio César Bastos de Figueiredo, Susana Carla Farias Pereira, Luis Henrique Rigato Vasconcellos**

RAHMAN, S. Theory of constraints: A review of the philosophy and its applications. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 18, n. 4, pp. 336-355, 1998.

SELLITO, M.A. Processos de pensamento da TOC como alternativa sistêmica de análise organizacional: uma aplicação em saúde pública. **Gestão & Produção**, v. 12, n. 1, p. 81-96, jan-abr, 2005.

SOUZA, F.B. de; PIRES, S.R.I. Theory of constraints contributions to outbound logistics. **Management Research Review**, v. 33, n. 7, pp. 683-700, 2010.

SPENCER, M.S.; COX, J.F. Optimum production technology (OPT) and the theory of constraints (TOC): analysis and genealogy. **International Journal of Production Research**, v.33, n.6, p.1495-1504, 1995.

SLACK, N. et al. **Gerenciamento de Operações e de Processos**. Porto Alegre: Bookman, 2008.

STEVENSON, W.J. **Operations Management**, Eight edition, Mcgraw-Hill, 2005.

TESFATSION, L.; JUDD, K. Handbook of Computational Economics. **Agent-Based Computational Economics, vol II**, 2006.

TISUE, S.; WILENSKY, U. NetLogo: A Simple Environment for Modeling Complexity. **International Conference on Complex Systems**, 2004.

WEISS, G. **Multiagent Systems: A Modern Approach to Distributed Artificial Intelligence**. MIT Press, 1999.

---