

## SIMULAÇÃO BASEADA EM AGENTES (SBA) PARA MODELAGEM DE SISTEMAS DE OPERAÇÕES

NELSON SAKURADA ( [nsakurada@uol.com.br](mailto:nsakurada@uol.com.br) , [nelson.sakurada@pfizer.com](mailto:nelson.sakurada@pfizer.com) )  
ESCOLA POLITÉCNICA DA USP - DEPTO. ENGENHARIA DE PRODUÇÃO  
DARIO IKUO MIYAKE ( [dariomiy@usp.br](mailto:dariomiy@usp.br) )  
ESCOLA POLITÉCNICA DA USP - DEPTO. ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

### Resumo

Este estudo aborda o conceito da Simulação Baseada em Agentes (SBA) em comparação à tradicional Simulação de Eventos Discretos (SED) no contexto de sua aplicação na modelagem e simulação de sistemas de operações. Através da análise histórica de aplicações e definição de agentes, o trabalho busca ressaltar as potenciais aplicações da SBA na representação de entidades (pessoas, recursos, objetos, etc.) cujo comportamento individual, descentralizado e autônomo possibilita a modelagem de elementos complexos de difícil representação via SED, tais como comunicação, interação entre entidades e cooperação de recursos humanos.

### Palavras-chave

Simulação, Modelagem, Agentes, Eventos Discretos

### 1. Introdução

A evolução dos padrões de concorrência e a globalização da economia estão mudando a forma convencional de abordagem de gestão das empresas de manufatura e de serviços. Reações em tempo-real para mudanças nas operações de chão-de-fábrica, respostas rápidas e de qualidade no atendimento de solicitações dos clientes, e agilidade na reconfiguração de sistemas de operações são vistas como características essenciais para as próximas gerações de negócios (Babiceanu e Chen, 2005). Neste contexto, a simulação oferece meios para auxiliar gestores e pesquisadores na concepção, planejamento e avaliação de alternativas para enfrentar as constantes mudanças requeridas por sistemas de operações.

A simulação é uma técnica aplicada para entender o comportamento de sistemas existentes, visando à avaliação de possíveis efeitos por alterações em regras de processo e/ou mudanças em sua configuração física (ex. *layout* de instalações, capacidade de recursos). Há também aplicações da simulação em estudos de novos projetos de sistemas, onde a complexidade das operações torna inviável o emprego de qualquer outro método analítico.

A modelagem de simulação exige do programador um entendimento claro do que se precisa avaliar e também habilidade em codificar a realidade por meio de lógicas de programação que reproduzam o sistema a ser estudado. Para autores como Rivett (1980), Pidd (1996) e Carson II (2005), existe uma natureza “subjetiva” na modelagem que demanda uma combinação de ciência e arte na construção de modelos.

O presente estudo discute a abordagem para modelagem de sistemas de operações baseada na utilização do conceito de **agentes**, cuja disseminação é relativamente recente. Os agentes representam os elementos do sistema que apresentam características individuais e que podem ter grande autonomia e interagir entre si como, por exemplo, os recursos humanos. Além do conceito de agentes e seu histórico de aplicações, serão discutidas vantagens e desvantagens de sua aplicação, as habilidades necessárias para modelagem e principais diferenças em relação às tradicionais técnicas de modelagem de simulação.

## 2. Metodologia de Pesquisa

O presente trabalho foi desenvolvido com o objetivo de introduzir o conceito de SBA (Simulação Baseada em Agentes) e contextualizar as potenciais aplicações desta abordagem emergente na busca de um melhor entendimento da dinâmica de sistemas de operações para fins como planejamento, (re)projeto e análise. A natureza do trabalho é de uma pesquisa exploratória apoiada em revisão conceitual da literatura sobre a metodologia de simulação em geral, técnicas de simulação tradicionais e SBA. Face à diversidade de técnicas de simulação existentes, o escopo do trabalho foi limitado a uma discussão qualitativa das características da SBA em comparação às das SED. Como a SBA é uma abordagem de desenvolvimento relativamente recente, muitas das referências consideradas são artigos publicados em eventos técnico-científicos dedicados à simulação computacional, com destaque ao *Winter Simulation Conference*.

Para discutir as possibilidades de aplicação da SBA e evidenciar as novas funcionalidades de modelagem que ela oferece, é apresentada uma breve descrição de alguns pacotes de simulação e software disponíveis para a SBA que têm sido aplicados tanto no âmbito acadêmico como empresarial, e uma análise comparativa da aplicação desta abordagem versus aplicação da abordagem SED na modelagem de um sistema de operações genérico. A avaliação de aspectos práticos da adoção da SED é apoiada na experiência dos autores na utilização de softwares como GPSS, ProModel e Arena. Já para fins de avaliação da SBA, os autores experimentaram a aplicação do software AnyLogic.

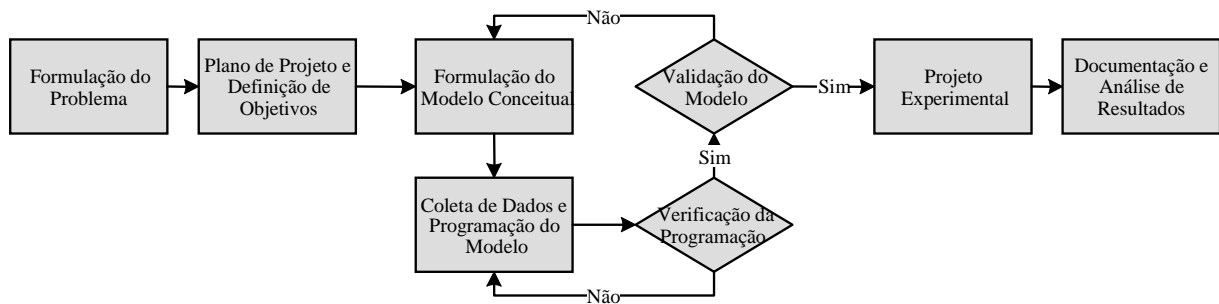
## 3. Simulação de Sistemas

O conceito de **sistema** adotado no presente estudo é baseado em Winston (1993), que define um sistema como um conjunto de entidades que agem e interagem com um determinado propósito. Um sistema pode ser influenciado pelo ambiente em que está inserido, assim, considerando que fatores externos podem afetar o sistema em análise, o programador deve sempre delimitar seu escopo de acordo com a finalidade do estudo.

Pidd (1996) define um **modelo** como "uma representação externa e explícita de parte da realidade vista pela pessoa que deseja usar aquele modelo para entender, mudar, gerenciar e controlar parte daquela realidade". Apesar de um modelo ser uma representação simplificada de um sistema em estudo, ele deve apresentar detalhamento suficiente para ser utilizado como uma representação válida (Banks *et al.*, 1996).

O estudo de simulação deve inicialmente buscar uma clara compreensão da estrutura e dinâmica do sistema real a ser simulado e somente então avançar para a derivação dos procedimentos experimentais que possibilitarão analisar seu comportamento. De forma simplificada, as principais etapas do estudo de simulação são apresentadas na Figura 1, baseada nas perspectivas de Shannon (1975), Winston (1993) e Banks *et al.* (1996).

**Figura 1 – Estudo de simulação.**



Fonte: Adaptada de Shannon (1975), Winston (1993) e Banks *et al.* (1996).

#### 4. Simulação de Eventos Discretos

A Simulação de Eventos Discretos (SED) abrange o estudo de modelos de simulação cujas variáveis mudam de estado instantaneamente em pontos específicos de tempo, em contraste ao que ocorre em modelos contínuos, cujas variáveis podem mudar de estado continuamente no decorrer do tempo. No entanto, na prática, poucos sistemas são totalmente discretos ou totalmente contínuos, sendo comum considerar, durante a modelagem, o modo predominante de ocorrência dos eventos no sistema (Gordon, 1978; Law e Kelton, 1991).

A abordagem mais tradicional da SED utiliza os conceitos de entidades, recursos, variáveis globais, geração de números aleatórios, calendário e diagramas de blocos para descrever fluxo de entidades. Esta abordagem começou a ganhar atenção do público na década de 1960 quando Geoffrey Gordon desenvolveu a linguagem de programação GPSS (*General Purpose System Simulator*).

Na SED, as entidades representam os objetos como pessoas, mercadorias, documentos, tarefas, mensagens, veículos, etc. que constituem o fluxo que atravessa um processo e permanecem um determinado tempo nas etapas pelas quais passar. Eles podem ser atrelados a recursos, formar filas ou serem transformados em novos objetos. As aplicações da SED abrangem diversas áreas, tais como manufatura, serviços, logística, negócios, etc., e já estão consagradas na pesquisa acadêmica e no meio empresarial. Em modelos construídos nesta abordagem, o grau de controle no nível individual das entidades é bastante limitado o que caracteriza estas como objetos “passivos”.

Pidd (2008) ressalta que houve um crescimento explosivo de capacidade dos softwares de SED nos últimos 20 anos. Não há dúvidas que os softwares atuais são mais fáceis de utilizar e de maior desempenho se comparados aos de gerações anteriores. Algumas melhorias foram impulsionadas pelo avanço da computação e pelas demandas dos usuários. No entanto, apesar da demanda contínua por softwares mais rápidos, modernos e melhores, um ponto mantém-se inalterado: a necessidade de desenvolvimento de modelos racionais. Esses modelos precisam atender os propósitos que geraram sua demanda facilitando o entendimento ou a melhoria do sistema a ser simulado. Isto significa que os modelos devem ser desenvolvidos num prazo apropriado e de uma forma que torne a análise mais simples e direta possível.

## 5. Simulação Baseada em Agentes

### 5.1 Definições e Histórico

De acordo com Samuelson (2005), a Simulação Baseada em Agentes (SBA) envolve princípios de pesquisa operacional, inteligência artificial, teoria de redes sociais e ciências cognitivas entre outras disciplinas. Sua idéia principal é expandir a teoria tradicional de simulação para incluir entidades cujo comportamento pode ser alterado ao longo do tempo, dependendo das circunstâncias do ambiente. O seu campo de aplicação cresceu consideravelmente em diferentes direções nos últimos 10 anos e inclui aplicações sofisticadas como jogos de guerra e análise de inteligência, desempenho organizacional e políticas sociais.

A SBA que conhecemos hoje teve suas raízes na teoria de simulação tradicional (Simulação de Eventos Discretos e Dinâmica de Sistemas). No entanto, muitos pesquisadores creditam a origem da abordagem de SBA ao Instituto Santa Fe, que desenvolveu o **Swarm** – primeiro pacote computacional disponível projetado para SBA – no final da década de 1980.

Neste estudo, é usado o acrônimo SBA, porém outros termos alternativos podem ser encontrados na literatura para as diferentes ramificações de sua aplicação dentre os quais se podem citar exemplos como: Modelagem Baseada em Agentes (MBA), Modelagem Computacional Baseada em Agentes (MCBA), Simulação Social Baseada em Agentes (SSBA), Simulação Computacional Baseada em Agentes (SCBA), Modelagem Baseada em Indivíduos (MBI) e também Simulação e Modelagem Baseada em Agentes (SMBA). Já o termo “Sistemas Multi-Agentes” (SMA) é usado algumas vezes equivocadamente como sinônimo de Simulação Baseada em Agentes (SBA). O campo de SMA é uma extensão da Inteligência Artificial (IA) e apesar da SBA ter uma raiz muito forte em IA, ela não é limitada à concepção e estudo de agentes. O termo SMA é usado mais frequentemente fora do campo das Ciências Sociais, por exemplo, em Ciências da Computação para o desenvolvimento de softwares orientados a agentes (Smith *et al.*, 2007; Macal e North, 2005).

Ainda reforçando essa diferenciação, Samuelson e Macal (2006) comentam que a SBA usa conceitos de SMA, robótica e inteligência artificial, mas sua preocupação não está centrada em projetar e entender agentes. A SBA está basicamente interessada na modelagem do comportamento humano e tomada de decisão individual. Isso gera uma necessidade de representar interações sociais, comportamento de grupo, colaboração e estruturas sociais complexas, demandando linguagens especializadas e pacotes para modelagem (Samuelson e Macal, 2006).

A essência dessa nova abordagem reside no conceito de que agentes autônomos que são relativamente simples e cujas interações seguem padrões simples, quando se juntam produzem coletivamente fenômenos complexos de difícil modelagem com base na abordagem tradicional. Dentre os fenômenos que revelam tal natureza incluem-se as dinâmicas de mercado e de cadeias de suprimento, o espalhamento de epidemias, e o comportamento de populações de bactérias e de consumidores (Samuelson e Macal, 2006).

Segundo Macal e North (2005) e Hao e Shen (2007), a SBA pode ser considerada um novo paradigma de modelagem para a próxima geração de projetos de sistemas de manufatura, pois permite inserir elevado grau de individualização, autonomia e iteratividade aos agentes considerados no sistema modelado.

Bankes (2002) acrescenta que a SBA tem conquistado crescente aceitação e entusiasmo em vários campos das ciências sociais nos últimos anos. Uma das razões disso é a insatisfação causada por modelos tradicionais, que usam técnicas como equações diferenciais e modelagem estatística. Ainda segundo este autor, essas ferramentas trouxeram grandes contribuições para as ciências sociais, mas impõem suposições irreais ou revelam limitadas

possibilidades de aplicação no tratamento de questões que requerem a representação do comportamento humano, motivações individuais e relações entre agentes sociais.

De acordo com Swain (2007), operações militares e industriais raramente operam de uma forma completamente previsível, sendo comum a ocorrência de ações derivadas de improvisação e interações inesperadas de seus agentes. Uma limitação da simulação tradicional está associada à restrição do grau de autonomia das entidades consideradas nos modelos. Num sistema de produção real, trabalhadores e equipamentos operam de modo bastante diferente. Assim, num modelo de simulação, dependendo do propósito de sua aplicação, os trabalhadores deveriam ser representados por entidades capazes de se comportar de um modo bastante distinto do modo limitado como a operação de equipamentos é representada. Contudo, poucos modelos de SED permitem considerar que na ocorrência de um evento problema no sistema simulado, as entidades possam tomar decisões individuais, passar por um processo de aprendizagem (mudança de estado) e interagir com outras entidades, de uma forma autônoma.

Os modelos baseados em agentes permitem que as entidades tenham a habilidade de detectar particularidades do ambiente, interagir com outros agentes, e escolher um curso de ação. Agentes podem ser empregados em sistemas de movimentação e transporte, onde a interação e tomada de decisão local são importantes. Segundo Swain (2007), os agentes têm sido usados em simulações de tráfego em que o comportamento do motorista é afetado pelas condições locais e seu perfil pessoal que influenciam a decisão para mudança de rotas baseada na densidade de tráfego de veículos e conhecimento de rotas alternativas. Simulações em tráfego aéreo, fluxo de multidões e tráfego de pedestres também são potenciais aplicações de SBA.

## 5.2 Conceito de Agente

Segundo autores como Zhang e Zhang (2007) e Smith *et al.*(2007), o conceito de agente é altamente abstrato e não há uma precisa definição deste termo na literatura de modelagem de sistemas. Genericamente, qualquer entidade de simulação que contenha os seguintes atributos pode ser considerada um agente:

- Comportamento autônomo (pro-ativo ou reativo);
- Visão de mundo individual;
- Capacidade de comunicação e cooperação (interatividade), e
- Mobilidade espacial.

Macal e North (2005) apresentam as seguintes características comuns aos agentes:

- São indivíduos identificáveis e que carregam um conjunto de características e regras que governam seu comportamento e capacidade de tomada de decisão;
- São situados no sistema modelado e capazes de interagir com outros agentes. Possuem protocolos de interação (ex. protocolos de comunicação) e a capacidade de responder ao ambiente;
- São direcionados a um objetivo;
- Têm autonomia e auto-direção;
- Apresentam flexibilidade e habilidade para aprender e adaptar-se ao longo do tempo com base em experiências. Requerem uma forma de memória;
- Suas próprias regras de comportamento podem ser modificadas por regras adicionais.



Há autores que consideram um agente sendo um componente independente; outros defendem a idéia dos componentes serem dotados de inteligência e adaptabilidade dentro de um sistema, o que remete ao conceito de aprendizagem e de alteração da capacidade de resposta de acordo com as mudanças do ambiente simulado (Smith *et al.*, 2007).

Um agente pode ser considerado uma unidade do projeto de modelagem que pode ter um comportamento, memória (histórico), tempo e contatos com outros elementos e são definidos por meio de variáveis, eventos, diagramas de estados e diagramas de fluxo (Manual do AnyLogic, 2007). Vale salientar que além de pessoas, projetos, recursos, veículos, animais, embarcações, produtos, etc., agentes podem representar também organizações como empresas e cidades.

Uma característica fundamental de um agente é a capacidade de tomada de decisão de forma independente, em outras palavras, um agente é definido como um indivíduo com um conjunto de características e regras que governam seu comportamento e sua capacidade de tomada de decisão.

Por estar centrada na modelagem dos agentes de um sistema, na SBA tem-se que o comportamento global do sistema simulado resulta das interações de muitos comportamentos individuais (nível micro de agentes). Alguns autores caracterizam essa abordagem como uma técnica *bottom-up* (de baixo para cima), oferecendo, portanto uma forma mais simples para modelagem de sistemas complexos (Zhang e Zhang, 2007). Adicionalmente, para fins práticos, as aplicações que utilizam agentes podem ser classificadas como descentralizadas (focadas no indivíduo), em oposição à abordagem de modelagem em nível macro de sistemas.

### 5.3 Elementos de Modelagem de SBA

São apresentados a seguir alguns elementos típicos de SBA:

- a) **Estado:** Um estado representa um conjunto particular de ações/reações (comportamento) da entidade a condições e/ou eventos. Um estado pode ser simples ou conter outros estados (composto).
- b) **Transição:** Uma transição denota a mudança de um estado para outro. A transição acontece quando ocorre um evento específico levando ao atendimento de uma condição. É então acionada uma mudança de comportamento e, conseqüentemente, uma ação ou um grupo de ações é executado. A transição de estados está associada a condições pré-definidas pelo programador, tais como tempos, taxas, mensagens recebidas ou condições booleanas. As transições podem levar a uma mudança de estado que ativa novas oportunidades de comportamento das entidades.
- c) **Diagramas de estados:** Embora muitos eventos que podem ocorrer numa simulação sejam de claro entendimento para modelagem, algumas vezes é preciso definir comportamentos mais sofisticados do ponto de vista da modelagem que não podem ser representados por meio da Simulação de Eventos Discretos ou pela Dinâmica de Sistemas. Essa complexidade pode ser modelada através de diagramas de transição de estados. Um diagrama de estado define como um conjunto de estados pode ser ativado através de eventos que ocorrem no sistema.
- d) **Comunicação/Interação entre agentes:** As mensagens são consideradas como pequenos conjuntos de informação passados entre agentes. Elas podem representar diversos objetos do mundo real, tais como informações, comandos, sinais, etc.

## 5.4 Softwares e Pacotes de SBA

Um dos principais fatores que permitiram o crescimento das aplicações da SBA foi o desenvolvimento de pacotes de software que nos últimos anos tornaram a modelagem baseada em agentes, mais fácil e atrativa aos adeptos da simulação em diferentes campos de conhecimento. Dentre os principais simuladores destacam-se Swarm, Repast, NetLogo, AnyLogic, Mason e Ascape (Samuelson e Macal, 2006). A seguir, três simuladores desta relação, quais sejam Swarm, Repast e AnyLogic, são comparados de acordo com requisitos técnicos e de aplicação.

### 5.4.1 Swarm

O Swarm foi o primeiro pacote utilizado para modelagem de sistemas adaptativos complexos (SAC). Foi desenvolvido por Chris Langton na Santa Fe Institute, e foi criado especificamente para modelagem de vida artificial, uma abordagem para estudos de sistemas biológicos. A primeira versão surgiu em 1996 e a partir dessa data as aplicações não se limitaram a estudos no campo da biologia. Hoje são encontradas aplicações deste simulador em áreas como antropologia, ciências políticas, ciências da computação, ecologia, economia, geografia, planejamento industrial e militar. Os códigos de suas bibliotecas e fontes são abertos (software livre) e mantidos atualmente pelo *Swarm Development Group* (SDG). Graças à pesquisa pública e investimentos de desenvolvimento, disponibiliza muitos recursos de ABS, tais como:

- Calendários;
- Mecanismos de comunicação;
- Topologias de interação flexíveis;
- Facilidades de armazenagem de estados dos agentes;
- Suporte para desenvolvimento em larga escala.

### 5.4.2 Repast

Um dos softwares livres (código aberto) mais conhecidos para SBA é o Repast (*Recursive Porous Agent Simulation Toolkit*), originalmente desenvolvido por Sallach, Collier e outros pesquisadores da Universidade de Chicago em 2000, e expandido pelo *Argonne National Laboratory*, para alavancar descobertas em ciências sociais através de experimentação computacional (Sallach e Macal, 2001).

Recentes publicações mostram que o Repast foi expandido para lidar com simulações baseadas em agentes em larga escala. Repast é gerenciado por uma organização voluntária sem fins lucrativos: a *Repast Organization for Architecture and Design* (ROAD). A ROAD é liderada por membros do governo Americano, acadêmicos e indústrias. O sistema Repast, inclusive o código fonte, pode ser acessado diretamente pela página <<http://repast.sourceforge.net/>>.

Repast está disponível em linguagem Java e sua aplicação é baseada em bibliotecas de componentes que podem ser incorporados ao modelo a ser construído de forma visual sem exigir conhecimentos avançados de Java dos programadores.

### 5.4.3 AnyLogic

AnyLogic é um dos pacotes comerciais desenvolvidos pela XJ Technologies (Rússia) que disponibiliza algumas funcionalidades para desenvolvimento de modelos baseados em agentes. Utiliza linguagem Java e possibilita também a construção de modelos baseados nas abordagens da simulação de Eventos Discretos e da Dinâmica de Sistemas. Dentre as aplicações citadas pelo fornecedor, destacam-se: estudos sociais, planejamento, otimização de fluxos, dinâmica de ecossistemas, redes de telecomunicações, evacuações de áreas e *call center*.

Na Tabela 1 são comparadas as principais funcionalidades dos pacotes de simulação que utilizam agentes como conceito fundamental para modelagem.

**Tabela 1: Comparação entre simuladores baseados em Agentes.**

	<b>AnyLogic</b>	<b>Swarm</b>	<b>Repast</b>
<b>Desenvolvedor</b>	XJ Technologies	Instituto Santa Fe / SDG (SWARM Development Group)	Universidade de Chicago (Dep. Pesquisa Computacional de Ciências Sociais)
<b>Origem (País)</b>	Rússia	EUA	EUA
<b>Licença de uso</b>	Software comercial	Software livre (código aberto)	Software livre (código aberto)
<b>Data de desenvolvimento</b>	Não disponível	1996	2000
<b>Website</b>	<a href="http://www.xjtek.com">http://www.xjtek.com</a>	<a href="http://www.swarm.org">http://www.swarm.org</a>	<a href="http://repast.sourceforge.net">http://repast.sourceforge.net</a>
<b>Linguagens de Programação</b>	Java	Java	Java/Python/Microsoft.Net
<b>Sistema Operacional</b>	Windows, UNIX, Linux, Mac OSX	Windows, UNIX, Linux, Mac OSX	Windows, UNIX, Linux, Mac OSX
<b>Experiência em programação requerida?</b>	Sim. Moderada	Sim. Elevada	Sim. Elevada
<b>Gráficos, diagramas e análise estatística integrados?</b>	Sim	Sim	Sim
<b>Disponibilidade de modelos de demonstração?</b>	Sim	Sim	Sim
<b>Disponibilidade de códigos dos modelos?</b>	Não disponível	Sim	Sim
<b>Disponibilidade de tutoriais e guias?</b>	Sim	Sim	Sim
<b>Aplicações típicas</b>	Planejamento, análise de processos em logística, manufatura, saúde, militar, ciências sociais	Sistemas biológicos, ecologia, sistemas de informação geográfica (GIS), ciências Sociais	Sistemas biológicos, ecologia, sistemas de informação geográfica (GIS), ciências sociais

Fonte: Adaptada de Smith *et al.* (2007) e Swain (2007).



## 6. Comparação de Abordagens de Simulação

A SBA pode oferecer uma variedade muito maior de representações de comportamentos das entidades em comparação com a representação tradicional de fluxo de processos de SED. Na SED, por exemplo, as escolhas que entidades como clientes podem exercer, são geralmente limitadas a pontos de decisão posicionados em alguns pontos do fluxo de processo. Por outro lado, na SBA os agentes podem continuamente avaliar as condições do sistema e determinar um novo comportamento independente de sua posição no fluxo de operações, o que seria quase impossível de se modelar através de SED, haja vista a necessidade de se tentar prever em cada evento todas as possibilidades de escolha do agente e em seguida proceder sua codificação uma a uma.

Para Dubiel e Tsimhoni (2005), qualquer modelo que requer liberdade de movimento de entidades ou um padrão detalhado de caminhos não é facilmente modelado através de SED. Como exemplo, estes autores citam o caso de sistemas de serviço onde cada cliente pode transitar por caminhos imprevisíveis. Apesar de ser um fenômeno simples, a sua modelagem por SED é complicada e envolve diversas suposições que tornam o resultado pouco aderente à realidade. Outra limitação da SED está relacionada à capacidade das entidades tomarem decisões em intervalos muito pequenos de tempo. Nesta abordagem de modelagem, é preciso incluir uma grande quantidade de pontos de decisão próximos uns aos outros ao longo dos possíveis trajetos das entidades. Além disso, é preciso programar a lógica de decisão a ser processada em cada ponto. Este detalhamento afeta substancialmente o tempo necessário para a modelagem e torna a verificação/validação do modelo uma tarefa de grande complexidade.

O Quadro 1 resume as principais funcionalidades oferecidas pela SED e SBA de acordo com alguns elementos de modelagem discutidos neste estudo.

**Quadro 1: Comparação entre SED e SBA.**

Elemento de Modelagem		Simulação de Eventos Discretos (SED)	Simulação Baseada em Agentes (SBA)
<b>Entidades e Recursos</b>	Individualização das entidades e recursos	Ignora a variação de desempenho das entidades e seus comportamentos "pró-ativos". Porém, possibilita definir grupos distintos de entidades com características em comum que seguem fluxos distintos no processo.	O comportamento de cada entidade é individualizado, definido através de estados, acionado por eventos, mensagens ou condições do sistema. Possibilita modelar grupos heterogêneos e suas interações, nas quais cada agente pode ter incentivos e motivações particulares.
	Comunicação/ Interação entre entidades e recursos	A interação entre recursos e entidades é modelada em nível agregado, não sendo detalhado o fluxo de comunicação entre entidades e/ou recursos e sua influência no processo simulado.	A comunicação/interação pode ocorrer entre entidades e/ou recursos. A troca de informações pode alterar o comportamento dos elementos e influenciar as ações tomadas no sistema simulado.
	Movimentação das entidades e recursos no modelo	Dificuldade para simular caminhos imprevisíveis das entidades. Todas as definições de processo e rotas devem ser predeterminadas no fluxo do processo durante a programação do modelo através de pontos de decisão previamente programados.	Possibilita livre movimentação das entidades no sistema simulado de acordo com os estímulos do ambiente que são recebidos e processados pelas entidades e/ou recursos. Não requer que as rotas que podem ser percorridas sejam previamente determinadas.

<b>Processos</b>	Definição do fluxo de Atividades / Esperas / Filas	Funções e blocos predefinidos facilitam a modelagem. O comportamento global do sistema (interações e fluxos) é definido previamente em nível macro ( <i>top-down modeling</i> ).	Modelos descentralizados, ou seja, o comportamento das entidades é feito em nível micro (individual) e o comportamento global do sistema emerge das interações individuais ( <i>bottom-up modeling</i> ).
<b>Reconfiguração do modelo na simulação</b>	Transição de estados das entidades e recursos	Dificuldade em reprogramação de entidades e recursos durante a simulação. É preciso rodar diferentes rodadas de simulação para analisar comportamentos dinâmicos.	A transição de estados possibilita modelagem de cenários flexíveis que podem ser reconfigurados durante a simulação. Possibilita programar comportamentos distintos (estados) acionados por alterações do ambiente de simulação.

Fonte: Baseado em Hao e Shen (2007), Dubiel e Tsimhoni (2005), Siebers *et al.* (2007), Borshchev e Filippov (2004).

Fica evidente que existem vantagens e desvantagens da utilização de cada abordagem de simulação, dependendo do objetivo do estudo. Para aplicações em sistemas de operações, observam-se possibilidades de benefícios provenientes da combinação das duas abordagens.

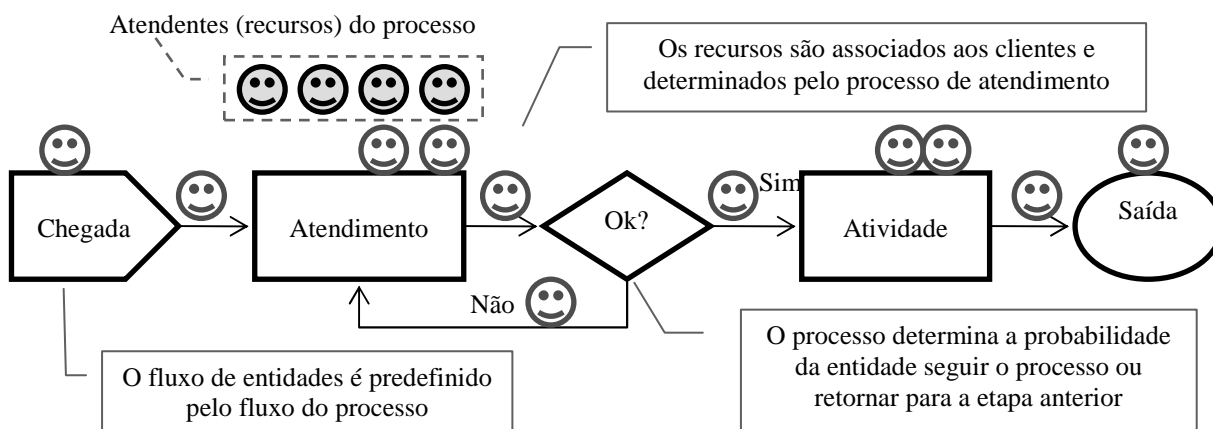
Hao e Shen (2007) apresentaram uma aplicação que integra a SED com a SBA na implementação de uma simulação de um sistema de movimentação de materiais. A SED foi utilizada na modelagem de uma linha de produção com sistema de produção puxada enquanto que o sistema *kanban* bem como os veículos para transporte dos itens puxados foram modelados usando o conceito de agentes “inteligentes” da SBA. O protótipo desenvolvido confirmou que a controlabilidade, adaptabilidade e a inteligência de todo o sistema de movimentação de materiais foram significativamente aprimoradas e refinadas com o uso da tecnologia de simulação baseada em agentes. Ainda segundo estes autores, geralmente no ambiente de simulação de eventos discretos é difícil implementar controles dinâmicos nos componentes de simulação, especialmente nos objetos passivos criados e roteados pelos simuladores, tais como produtos, veículos e pessoas.

### **Exemplo de modelagem SED x SBA: Atendimento de clientes em um quiosque**

Para ilustrar a comparação dos dois tipos de simulação considerados, nesta seção é apresentado um exemplo genérico que toma como base a modelagem do atendimento de clientes (entidades) em um quiosque que oferece serviços através de atendentes (recursos).

De forma simplificada, na SED o cliente chega no início do processo e aguarda atendimento pelo(s) recurso(s). Como a capacidade dos recursos é limitada, ocorre espera caso todos os recursos estejam ocupados. Após a prestação do serviço, cujo tempo é determinado através de uma distribuição probabilística, existe a possibilidade de o cliente solicitar novo serviço, determinada por uma taxa de probabilidade. Se o cliente não requerer serviço adicional, ele passar por uma nova atividade sem necessidade do atendente, por um tempo determinado (também por uma distribuição probabilística), e dirige-se à saída do sistema, conforme ilustrado na Figura 2.

**Figura 2 - Modelo 1: Simulação de atendimento usando Eventos Discretos.**



A maior parte da lógica do sistema simulado está contida nos blocos que compõem o fluxo de processo. Essas lógicas determinam o tempo que cada entidade permanece em etapas do fluxo de processo onde isso foi previsto por meio de alguma regra e após este tempo direcionam a entidade para o próximo passo em sua rota. O fluxo de processo e as alternativas de rota neste caso são muito bem definidos, e as entidades pouco influenciam a seqüência de eventos resultante em sua passagem pelo sistema simulado.

A Tabela 2 resume os principais elementos de modelagem da SED.

**Tabela 2 – Atendimento em um quiosque utilizando SED.**

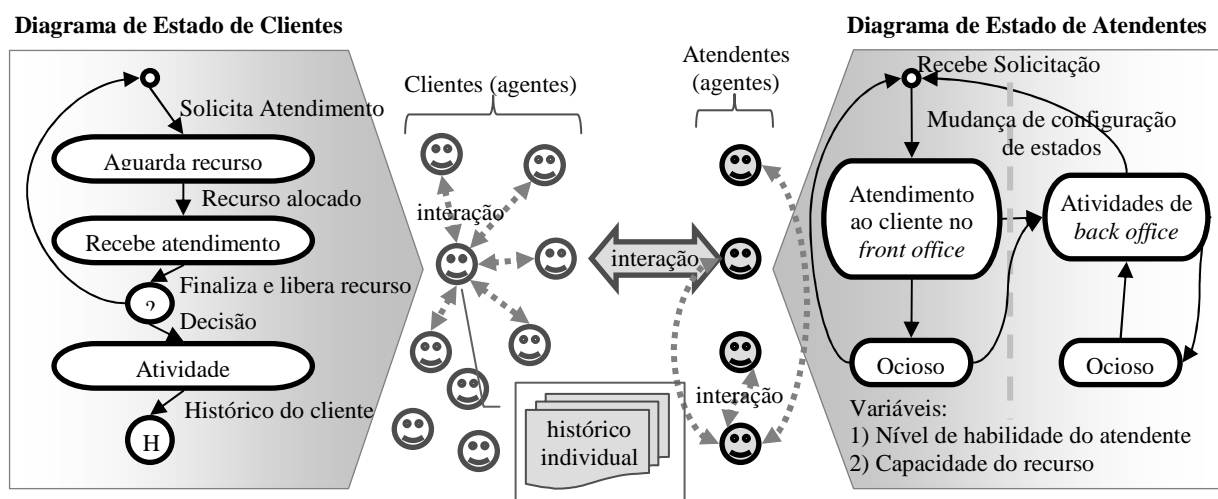
Elemento de Modelagem		SED: Exemplo de quiosque de atendimento
<b>Entidades e Recursos</b>	Individualização das entidades e recursos	Entidades: Clientes. Definidos através de uma taxa de chegada, por uma distribuição probabilística de tempos. Recursos: Atendentes. Definidos como parte do processo de atendimento, sendo atribuídos às entidades considerando capacidade do processo, tempo probabilístico de atividade e liberados após utilização
	Comunicação/Interação entre entidades e recursos	A interação entre entidade e recursos dá-se através da alocação do atendente pelo processo de atendimento quando uma entidade (cliente) entra no processo. Essa alocação representa a comunicação e interação entre elementos do sistema, através de um tempo probabilístico
	Movimentação das entidades e recursos no modelo	A movimentação das entidades dá-se através do fluxo predefinido no modelo. Há uma possibilidade de bifurcação da entidade de acordo com uma probabilidade de retorno do cliente para o início do processo
<b>Processos</b>	Definição do fluxo de Atividades / Esperas / Filas	Fluxo de processos previamente definido no modelo (Figura 2). Pontos de espera, filas e atividades são programadas com tempos probabilísticos e quantidade máxima (capacidade) que as entidades podem solicitar ao sistema
<b>Reconfiguração do modelo na simulação</b>	Transição de estados das entidades e recursos	A reconfiguração do modelo pode ser feita variando o número de atendentes e/ou alterando os tempos de processo ou capacidade de atendimento. No entanto, é preciso simular distintos cenários variando cada elemento a ser desafiado para fins da simulação

O mesmo sistema de serviço a partir da abordagem baseada em agentes, SBA, implica na consideração de uma perspectiva bem diferente. Neste caso, como ilustra a Figura 3, tanto os clientes como os atendentes podem ser representados como agentes, ou seja, uma entidade individualizada, com objetivos e características próprias no sistema. Os diagramas de estado, que determinam o comportamento de clientes e atendentes são apresentados, respectivamente, à esquerda e à direita na Figura 3. Num modelo de SBA, estes diagramas são inseridos em nível individual de modo que durante a simulação, o que ocorre com cada entidade é definido em função de seu próprio diagrama. A interação dessas entidades no sistema é que comanda a dinâmica do processo simulado.

No caso considerado, os fluxos resultantes no modelo de SBA, em certo grau, podem ser comparados aos fluxos resultantes no modelo de SED. Entretanto, como a adoção da abordagem de SBA implica na realização de simulações em que cada entidade pode ter um comportamento e rotas individuais no sistema simulado, ela possibilita considerar sutilezas como as que seguem no nível micro dos agentes:

- Existência de diferentes perfis e/ou padrões de comportamento dos agentes considerados e seu impacto nos resultados,
- Transição de um estado a outro e tomada de decisão em função do histórico individual de cada agente,
- Interação não apenas entre diferentes tipos de entidades (ex. agentes como clientes que são atendidos por agentes que seriam tratados como recursos na SED), mas também entre agentes de mesma natureza o que em sistemas reais ocorre na forma de concorrência, ajuda mútua, informação que influencia tomada de decisão, etc.

**Figura 3 - Modelo 2: Simulação de atendimento usando Agentes (Clientes e Atendentes).**



A Tabela 3 resume os principais elementos de modelagem da SBA.

Tabela 3 – Atendimento em um quiosque utilizando SBA.

Elemento de Modelagem		SBA: Exemplo de quiosque de atendimento
<b>Entidades e Recursos</b>	Individualização das entidades e recursos	Entidades e Recursos: Clientes e Atendentes. Definidos individualmente como agentes, através de um diagrama de estados que define seu comportamento no sistema, e possíveis interações e comunicações entre eles, que podem afetar suas ações dentro do modelo
	Comunicação/Interação entre entidades e recursos	A comunicação entre agentes pode acontecer através de mensagens entre entidades e/ou recursos, sendo que a interação entre cliente e atendente está programada dentro do diagrama de estado dos elementos modelados
	Movimentação das entidades e recursos no modelo	A movimentação das entidades e recursos no modelo pode obedecer um fluxo predefinido ou ter maior liberdade dentro do sistema, dependendo do foco do estudo (se o objetivo for analisar movimentação de clientes dentro do modelo)
<b>Processos</b>	Definição do fluxo de Atividades / Esperas / Filas	As atividades estão programadas dentro das entidades e recursos modelados. É possível associar tempos probabilísticos e eventos que disparem as ações no sistema, mas as ações e decisões estão definidas em nível individual e o comportamento do sistema não está predefinido como na abordagem de SED
<b>Reconfiguração do modelo na simulação</b>	Transição de estados das entidades e recursos	De acordo com o diagrama de estado de cada entidade no sistema, é possível observar uma reconfiguração do modelo na simulação à medida que eventos externos ou a interação entre agentes acontece no sistema, como o exemplo do atendente que muda suas atividades de <i>front office</i> a <i>back office</i> a medida que ele é solicitado no sistema. Em cada estado, há diferentes atividades e ações desempenhadas pelo atendente.

## 7. Modelagem do Fator Humano

Apesar da SED ter sido amplamente difundida e utilizada no tratamento de problemas de gestão de operações, alguns elementos sempre foram simplificados no modelo de simulação pela dificuldade de modelagem, como a representação do elemento humano, cuja autonomia e heterogeneidade dificultam a individualização do modelo em simulações de eventos discretos.

Um sistema baseado em recursos humanos envolve agentes com escolhas subjetivas, comportamentos explicados pelo estudo da psicologia e, portanto, fatores que dificultam a quantificação, calibração e justificativa (Smith *et al.*, 2007). Os fatores humanos dificultam a implementação e desenvolvimento de modelos e suas interpretações dos resultados simulados. Entretanto, a motivação fundamental para modelagem emerge da lacuna que existe em acessar todos os dados do fenômeno de interesse. Geralmente, o objeto do estudo nem sempre é compreendido ou de fácil avaliação.

Bonabeau (2002) identificou algumas situações em que a aplicação da SBA que pode oferecer vantagens na modelagem de fatores humanos:

- **Interações complexas:** Frequentemente, as interações entre agentes humanos é complexa, não-linear e descontínua. O uso da SBA pode ser particularmente útil se a

modelagem da descontinuidade é difícil, por exemplo, através de equações diferenciais;

- **Populações heterogêneas:** A possibilidade de modelagem de populações heterogêneas utilizando modelos de agentes pode ser significativa. Equações diferenciais agregadas tendem a suavizar flutuações de comportamento que poderiam ser observadas através da SBA;
- **Estrutura conceitual adequada:** Em muitos casos, a abordagem de SBA é um meio mais natural para descrever e simular sistemas que contêm elementos humanos com comportamentos complexos. Embora hipoteticamente qualquer processo possa ser explicado por equações, a complexidade das equações diferenciais aumenta exponencialmente à medida que a complexidade dos indivíduos aumenta.

## 8. Considerações Finais

O crescimento de aplicações de SBA, principalmente em sistemas sociais e biológicos abriu novos caminhos para a aplicação e pesquisa em gestão de operações. Uma combinação de modelagem e simulação baseada em agentes com a tradicional modelagem de eventos discretos pode oferecer uma abordagem inovadora para estudos de sistemas de operações.

Como foi mencionado anteriormente, a SBA não substitui a SED, pois o que determina a melhor abordagem de simulação é o objetivo da análise em questão. No entanto, o estudo evidenciou que as particularidades dos fatores humanos podem ser representadas através da SBA em ambientes tradicionalmente modelados via SED, quando a complexidade dos recursos humanos torna a simulação tradicional muito limitada e de difícil modelagem.

Apesar da relativa complexidade envolvendo conhecimento em programação, com os recentes lançamentos de pacotes de softwares de simulação voltados à SBA, esta nova abordagem provavelmente irá se tornar cada vez mais acessível para uma gama maior de analistas e programadores, requerendo menor experiência de programação e em ambientes mais fáceis de utilização (*user friendly*).

## Referências

BABICEANU, R.F.; CHEN, F.F. Performance evaluation of agent-based material handling systems using simulation techniques. In: Winter Simulation Conference, 2005. Florida. Disponível em: < <http://www.informs-sim.org/wsc05papers/122.pdf> >. Acesso em 15 fev.2009.

BANKES, S.C. Agent-based modeling: A revolution? PNAS. Vol.99, p.7199-7200. Maio, 2002. [www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.072081299](http://www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.072081299)

BANKS, J.; CARSON, J.; NELSON, B. Discrete-event system simulation. New Jersey: Prentice Hall, 1996.

BONABEAU, E. Agent-based modeling: methods and techniques for simulating human systems. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS), Vol 99. No 3. 2002.



BORSHCHEV, A.; FILIPPOV, A. From system dynamics and discrete event to practical agent based modeling: reasons, techniques, tools. In: The 22<sup>nd</sup> International Conference of the System Dynamics Society, 22, 2004. Proceedings. Oxford, England: Keble College, 2004.

CARSON II, J.S. Introduction to Modeling and Simulation. In: Winter Simulation Conference, 2005. Florida. Disponível em: <<http://www.informs-sim.org/wsc05papers/003.pdf>>. Acesso em 25 fev.2009.

DUBIEL, B.; TSIMHONI, O. Integrating agent based modeling into a discrete event simulation. In: Winter Simulation Conference, 2005. Florida. Disponível em: <<http://www.informs-sim.org/wsc05papers/123.pdf>>. Acesso em 25 fev.2009.

GORDON, G. System simulation. 2 ed. New Jersey: Prentice Hall, 1978.

HAO, Q; SHEN, W. Implementing a hybrid simulation model for a Kanban-based material handling system. Robot Computer-Integrated Manufacturing (2007), doi:10.1016/j.rcim.2007.09.012

LAW, A. M.; KELTON, W. D. Simulation modeling and analysis. 2 ed. New York: McGraw-Hill, 1991.

MACAL, C. M.; NORTH, M. J. Tutorial on agent-based modeling and simulation. Florida: In Proceedings of the 2005 Winter Simulation Conference, 2005.

MANUAL ANYLOGIC 6.0. AnyLogic 6 User's Guide. XJ Technologies, 2007. Disponível em: <<http://www.xjtek.com>>. Acesso em 10 dez.2008.

PIDD, M. Modelagem empresarial: ferramentas para tomada de decisão. Porto Alegre: Artes Médicas Sul, 1996.

PIDD, M. Why modeling matters. In: Winter Simulation Conference, 2008. Florida. Disponível em: <<http://www.informs-sim.org/wsc08papers/003.pdf>>. Acesso em 15 fev.2009.

RIVETT, P. Model building for decision analysis. New York: J. Wiley, 1980.

SALLACH, D.; MACAL, C.M. The simulation of social agents: an introduction. Special Issue of Social Science Computer Review. Vol 19. No 3. 2001.

SAMUELSON, D.A. Agents of Change: How agent-based modeling may transform social science. OR/MS Today. Vol 32. No 1. 2005. Disponível em: <<http://www.lionhrtpub.com/orms/orms-2-05/fragments.html>> . Acesso em 22 fev.2009.

SAMUELSON, D.A.; MACAL, C.M. Agent-Based Simulation Comes of Age: Software opens up many new areas of application. OR/MS Today. Vol 33. No 4. 2006. Disponível em: <<http://www.lionhrtpub.com/orms/orms-8-06/agent.html>>. Acesso em 22 fev.2009.

SHANNON, R. E. Systems Simulation: The Art and the Science. New Jersey: Prentice-Hall, 1975.

SIEBERS, P.O.; AICKELIN, U.; CELIA, H.; CLEGG, C.W. Understanding retail productivity by simulating management practices. In: EUROSIM, 2007, Slovenia. Disponível em: <[http://eprints.nottingham.ac.uk/591/1/07eurosim\\_agents.pdf](http://eprints.nottingham.ac.uk/591/1/07eurosim_agents.pdf)>. Acesso em: 12 fev.2009.

SMITH, M.J.; GOODCHILD, M.F.; LONGLEY, P.A. Geospatial Analysis: A Comprehensive Guide to Principles, Techniques and Software Tools. Leicester, England: Troubador Publishing Ltd., 2007.

SWAIN, J.J. New Frontiers in Simulation: Biennial survey of discrete-event simulation software tools. OR/MS Today. Vol 34. No 5. 2007. Disponível em: <<http://www.lionhrtpub.com/orms/orms-10-07/frsurvey.html>>. Acesso em 22 fev.2009.

WINSTON, W. L. Operations research: applications and algorithms. 3 ed. California: Duxbury Press, 1993.

ZHANG, T.; ZHANG, D. Agent-based simulation of consumer purchase decision-making and the decoy effect. Journal of Business Research. Vol.60, p.912-922, 2007.