

## UMA COMPARAÇÃO CONCEITUAL ENTRE AS METODOLOGIAS DE SIMULAÇÃO DISCRETA E A CONTÍNUA COMO ELEMENTO IMPULSIONADOR DA SIMULAÇÃO HÍBRIDA

Thiago Barros Brito<sup>a\*</sup>, Rui Carlos Botter<sup>a</sup>

*<sup>a</sup>Universidade de São Paulo – USP, São Paulo-SP, Brasil*

### Resumo

Neste trabalho, um estudo conceitual envolvendo os paradigmas de simulação discreta e a contínua é conduzido com o intuito de promover o desenvolvimento de uma metodologia híbrida. Partindo de uma investigação bibliográfica conceitual de ambos os paradigmas de simulação, o trabalho revela suas características principais e seus potenciais de aplicabilidade, delineando suas possibilidades de contribuição para o desenvolvimento de modelos híbridos de simulação. Como proposição final, a integração de ambas as metodologias em um único modelo é capaz de expandir o espectro de compreensão do sistema em estudo, com a possibilidade de integração de diferentes visões de mundo e de diversos níveis de complexidade de formulação, apresentando-se como ferramenta poderosa para análise sistemas complexos de diversas naturezas.

Palavras Chave: simulação discreta, simulação contínua, simulação híbrida.

### Abstract

A conceptual study comprising the discrete and continuous simulation methodologies is undertaken, aiming at stimulating the development of a hybrid simulation methodology. Departing from a conceptual literature review about both methodologies, the work reveals their main features and potential of applicability, defining the possibilities of developing hybrid simulation models. As final proposal, the integration of both methodologies in a single model allows the expansion of the comprehension spectrum of the system, with the possibility of integrating different worldviews and several levels of formulation complexity, revealing the hybrid methodology as a powerful tool to analyze complex logistics systems.

Key Words: discrete simulation, continuous simulation, hybrid simulation

\*Autor para correspondência: e-mail: [tbrito@gmail.com](mailto:tbrito@gmail.com)

### 1. Introdução

A metodologia de simulação tornou-se nas últimas décadas uma das mais importantes ferramentas da Pesquisa Operacional (PO) para a representação e compreensão de sistemas complexos. Especificamente, o foco de aplicação desse trabalho é relacionado a sistemas logísticos, mas dada a natureza multidisciplinar da PO, a análise e a ferramenta proposta pode ser aplicada nos mais variados domínios (manufatura, produção, transporte, negócios, tecnologia, etc.) sem restrições.

A simulação tem sido aplicada com sucesso em praticamente todos os ramos do processo de decisão, uma vez que os métodos de simulação são compostos por metodologia flexíveis, e não necessitam de tantas simplificações como outras técnicas da PO (RABELO *et al.* 2005). Entretanto, o inevitável crescimento da complexidade dos sistemas em estudo, tem aumentado a abstrusidade dos processos de tomada de decisão, exigindo a aplicação de ferramentas que sejam capazes de manipular simultaneamente os aspectos estratégicos, táticos e operacionais de um sistema.

Assim, diversas vezes nem mesmo a simulação isoladamente é capaz de sustentar sozinha um processo complexo de tomada de decisão. Outro grande número de técnicas de PO são propostas para tentar superar as demandas dessa complexidade atual – otimização, heurísticas, programação mista, entre outras, mas sua aplicação usualmente é capaz de atacar apenas um dos ramos isolados do processo de tomada de decisão (ou operacional ou estratégico) (MENTZER *et al.* (2001), GOETSCHALCKX *et al.*(2002)).

A alternativa viável para tratar essa complexidade é buscar maneiras de combinar técnicas da PO, com a criação de metodologias híbridas (BRITO *et al.*, 2012). O trabalho de Howick e Ackermann (2011) discute lições sobre a combinação de metodologias da PO na prática, e ressaltam a potencialidade da combinação entre as metodologias de otimização e simulação.

Também Van Hee *et al.* (1988) afirma que o emprego de metodologias complementares, que incorporem pesquisa, tecnologia e práticas de ponta, é necessário a fim de suprir três tipos de funções essenciais para os tomadores de decisão:

- Calcular os efeitos das decisões propostas pelo tomador de decisão;
- Gerar capacidade para tomada de decisões que são ideais, com respeito a um critério especificado pelo decisor;
- Analisar a sensibilidade das decisões, computando os efeitos das variâncias de parâmetros;

Apresentada a demanda pela necessidade de combinação de metodologias da PO para a confecção de metodologias mais robustas, esse trabalho vai focar esforços na avaliação da potencialidade da metodologia de simulação, que se tornou, nas últimas décadas, a ferramenta de PO mais importante para avaliar o desempenho de sistemas logísticos (STEENKEN *et al.*, 2006).

Um olhar mais cuidadoso internamente para o campo da simulação permite a identificação de diferentes paradigmas de simulação. Os dois paradigmas mais estabelecidas no cenário acadêmico e empresarial são a Simulação de Eventos Discretos (SED) a Dinâmica de Sistemas (System Dynamics – SD). Ambas tiveram seu desenvolvimento praticamente simultâneo, mas muita pouca comunicação existiu e existe entre as duas nesse processo (Morecroft e Robinson, 2005). Em uma observação primária, o que se pode afirmar é que ambas trabalham com a construção de modelos com o objetivo final de compreender a performance de determinado sistema ao longo do tempo. Entretanto, suas particularidades de aplicação e desenvolvimento, as tornam conceitualmente distintas, com potenciais de aplicação diferentes. Tradicionalmente, considerando-se tais particularidades, a SED e a SD tem sido aplicadas em situações particulares, baseados em suas limitações e pontos fortes.

Entretanto, existe na comunidade científica a afirmação ainda dispersa da potencialidade de ambas as metodologias (SED e SD) em se complementarem (ROBINSON, 2005; RABELO *et al.*, 2005, HELAL e RABELO, 2004; LEE *et al.*, 2004; LEVIN e LEVIN, 2003), oferecendo as ferramentas necessárias para a construção de novos paradigmas, e garantindo a confecção de ferramentas de suporte à decisão mais robustas, preenchendo assim os requerimentos dos modernos e integrados sistemas corporativos. Contudo, são escassos os passos de pesquisa e desenvolvimento dados nessa direção.

### **2. Objetivos**

Levando-se tais considerações em conta, esse estudo propõe a execução de uma investigação bibliográfica que forneça os elementos para a proposição de uma metodologia de suporte à decisão que combine as metodologias de simulação SED e SD, aqui chamado “simulação híbrida”. Através do processo proposto, espera-se obter uma metodologia que garanta a possibilidade da combinação dos benefícios das duas metodologias separadamente, a superação das suas limitações individuais, em um processo capaz de suportar o desenvolvimento de uma ferramenta de apoio à decisão apto a atuar sob os diversos espectros de sistemas complexos.

Assim, através de uma avaliação minuciosa dos aspectos práticos, técnicos e teóricos da SED e da SD, o objetivo primário desse trabalho é identificar, através da bibliografia, um ambiente de alinhamento entre os dois paradigmas, fortalecendo assim o conceito da metodologia de simulação híbrida.

Através de uma revisão bibliográfica extensa, será o a identificação dos pontos fortes e das limitações de cada um dos paradigmas, permitindo uma comparação aprofundada sobre ambas, buscando identificando suas respectivas possibilidades de aplicação e contribuição em uma direção comum.

A seção 2 do trabalho apresenta uma revisão bibliográfica dos dois paradigmas (SED e SD) com o intuito de caracterizá-los. Na seção 3 essa caracterização é utilizada como *input* em um processo de comparação entre os paradigmas, que finaliza com a proposição de três arquétipos de comparação que visam estabelecer as perspectivas existentes de comparação entre as metodologias e apontar caminhos para uma comparação que permita o estabelecimento de uma metodologia de simulação que combine ambos os paradigmas de maneira eficiente. Já na seção 4, é caracterizada a necessidade de aplicação da metodologia híbrida proposta, enquanto a seção 5 é dedicada à conclusão e recomendações do trabalho.

### **3. Revisão Bibliográfica**

As simulações discreta e contínua serão representadas nesse trabalho através dos dois principais e mais tradicionais paradigmas de modelagem e simulação: a Simulação de Eventos Discretos (SED) e a Dinâmica de Sistemas (System Dynamics - SD). A SED e a SD têm sido tradicionalmente aplicadas em situações particulares, visando a extração de suas potencialidades e benefícios primários (BRITO *et al.* 2011). Ambas têm obtido sucesso na modelagem e simulação de sistemas de tomada de decisão complexos. (HELAL *et al.*, 2007; FREITAS, 2001; SCHRIBER, 1974).

Visando compreender os aspectos básicos de cada paradigma individualmente, a fim de fornecer elementos para uma comparação adequada entre eles e permitir a identificação de suas potencialidades, a revisão bibliográfica executada nesse trabalho foi dividida em três etapas: caracterização geral dos paradigmas – apresenta seus aspectos principais e escopo geral de desenvolvimento; comparação conceitual – apresenta uma comparação de conceitos de desenvolvimento e aplicação; e comparação de processos – que apresenta uma comparação nos processos de desenvolvimento de aplicações em ambas as metodologias, reflexo de suas características definidoras.

### 3.1. Caracterização Geral

A proliferação dos softwares de simulação e a crescente capacidade de processamento computacional colocaram a SED no topo da cadeia das técnicas de modelagem e simulação. Como conceitualização principal, a abordagem da SED corresponde à visão do fluxo de entidades, voltada à visão centrada em processos. Law e Kelton (2000) definem um sistema de SED como uma coleção de entidades que agem e interagem juntas através de processos no sistema, buscando um fim lógico.

Tradicionalmente, a SED tem sido eficientemente aplicada para a simulação de sistemas complexos (especialmente logísticos), uma vez que é capaz de replicar com fidelidade o comportamento de quase qualquer sistema, provendo ao tomador de decisão valiosas informações de como o sistema pode ser modificado ou qual poderia ser seu desempenho (SWEETSER, 1999), através de análises *what if*. Entretanto, a utilização tradicional da SED estreitou seu escopo de aplicação fundamentalmente à análise quantitativa e estatística, mantendo-se usualmente restrita à aplicação nos níveis operacionais do sistema (TAKO e ROBINSON, 2012), onde tradicionalmente encontram-se os processos bem definidos.

Com relação à SD, sua definição mais abrangente é a de Sterman (2000), que a caracteriza como uma metodologia capaz de aprimorar a compreensão de sistemas complexos, enquanto captura e apresenta ao usuário os diagramas causais, *loops* de *feedback* e fluxo, e as interações e mecanismos de atrasos entre os componentes do sistema (TESFAMARIAN e LINDBERG, 2005). A SD é uma abordagem de pensamento que toma uma perspectiva integrativa do sistema e cuja característica principal é o reconhecimento de processos inerentes de *feedback* na estrutura dos sistemas modelados (HELAL, 2008). Assim, é natural que a estrutura fundamental da SD seja a representação do relacionamento entre seus componentes. É a clara percepção das inter-relações entre seus componentes (que podem ser pessoas, organizações, processos, recursos, etc.), realizada através das citadas estruturas de diagramas causais e de loops de fluxo e de *feedback*, que permite a avaliação da performance do sistema.

### 3.2. Comparação Conceitual da SED e da SD

A literatura existente sobre a comparação das duas principais abordagens de simulação é escassa. Os trabalhos sobre a comparação SED x SD consistem, majoritariamente, de afirmações comumente aceitas no campo da PO (BRAILSFORD e HILTON, 2001; MORECROFT e ROBINSON, 2005) e geralmente tendem a apresentar uma visão enviesada, em direção a uma das duas abordagens, dependendo da experiência profissional e/ou acadêmica

do autor. As referidas afirmações comumente aceitas são resumidas e apresentadas no trabalho de Sweetser (1999):

- Modelos SED apresentam potencialidades (em relação aos seus aspectos técnicos e práticos) que os tornam mais apropriados para a análise detalhada de sistemas específicos e bem definidos ou sistemas lineares;
- Já a metodologia SD é apropriada para a modelagem de processos contínuos, sistemas nos quais o comportamento muda de maneira não linear ou sistema com extensivos *loops de feedback*;

O trabalho de Borshchev e Filippov (2004) leva em conta a segregação do campo de estudo citada anteriormente além dos escopos tradicionais de aplicação dos paradigmas de simulação, e avalia a extensão dos problemas logísticos que são eficientemente endereçados com modelos de simulação construídos sob os dois paradigmas (Figura 1).

A abordagem típica do nível mais alto da Figura 1 baseia-se na consideração e avaliação de valores agregados, de feedbacks globais do sistema, de tendências e políticas de tomada de decisão, com elementos individuais sendo raramente considerados, tornando-se tradicionalmente apropriada para abordagem da SD. Enquanto isso, a abordagem no último nível é tipicamente da modelagem física, na qual os objetos individuais, processos de decisão pontuais, distâncias, tempos, etc., são considerados (BORSHCHEV e FILIPPOV, 2004). Nesse caso, a SED é o paradigma considerado mais adequado.

Através de uma observação da aplicação proposta na Figura 1 de ambas as metodologias, pode-se concluir primariamente que, de forma geral a SED apresenta potencialidades que a torna mais apropriada para simular problemas com baixo nível de abstração e mais detalhamentos de sistemas (SWEETSER, 1999). A SD, por outro lado, é mais adequada à modelagem de processos contínuos relacionados a processos extensivos de *feedback*. Os trabalhos de Coyle (1985) e Lin *et al.* (1998) também afirmam que modelos SED funcionam bem com problemas de escopo limitado, mas são incompatíveis com modelos de perspectivas globais, por conta de sua dificuldade em tratar com a estabilidade do sistema.

## PESQUISA OPERACIONAL PARA O DESENVOLVIMENTO

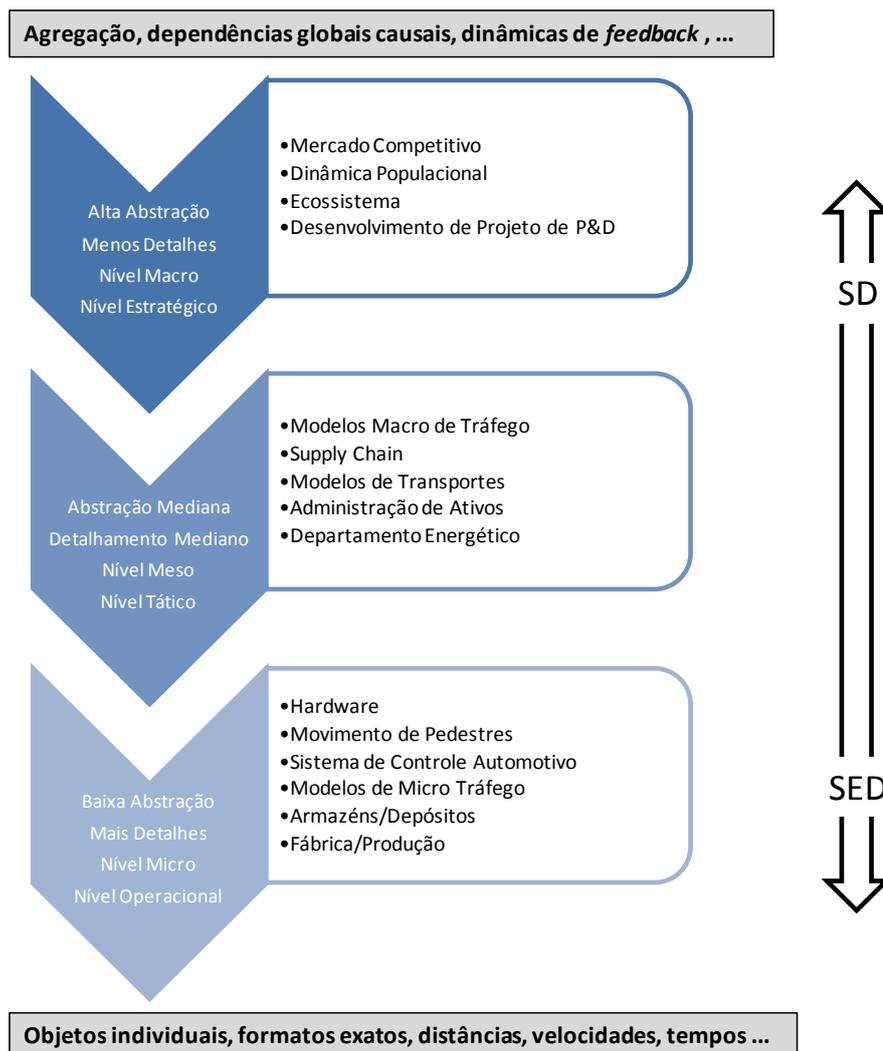


Figura 1: Exemplos das aplicações da técnica de modelagem e simulação organizados relativamente à escala de abstração necessária para a construção do modelo (baseado em Borshchev e Filippov (2004))

Por outro lado, a aplicação da metodologia SD tem apresentado casos constantes de sucesso como uma abordagem de pensamento sistêmico, almejando uma perspectiva integrativa em nível gerencial elevado (HELAL et al., 2007). Na prática, a SD é rotineiramente utilizada em tais problemas como, por exemplo, na análise estratégica de políticas, incorporando aspectos “*soft*” do comportamento do sistema que, enquanto difíceis de quantificar, podem afetar significativamente a performance do sistema (SWEETSER, 1999).

Partindo dos trabalhos revisados sobre a comparação entre as metodologias SD e SED, a Tabela 1 sumariza as principais distinções conceituais identificadas entre as duas abordagens.

## PESQUISA OPERACIONAL PARA O DESENVOLVIMENTO

Tabela 1: Diferenças conceituais entre as metodologias SD e SED (baseado em Mak (1993), Lane (2000), Brailsford e Hilton (2001), Tako e Robinson (2009) e Lane (2000))

Aspecto	SED	SD
<b>Perspectiva</b>	analítica, ênfase na complexidade do detalhe	holística, ênfase na complexidade da dinâmica
<b>Configuração Básica do Sistema</b>	rede de filas e atividades	série de estoques e fluxos
<b>Resolução</b>	entidades individuais, atributos, decisões e eventos	entidades homogeneizadas, pressão por política homogênea
<b>Mudança de Estado</b>	em pontos discretos do tempo	contínua
<b>Requerimento de Dados</b>	precisão numérica, muito dependente	descritos de maneira geral, sem necessidade de precisão absoluta
<b>Compreensão dos Outputs</b>	previsões acuradas e detalhadas das medidas de performance; compreensão de regras de decisão e interpretação de cenários	entendimento dos modos de comportamento das estruturas do modelo; visão dinâmica das causas e efeitos das políticas de decisão

Infere-se primeiramente que a SD está envolvida na atividade de compreensão do desempenho de um sistema ao longo do tempo e do entendimento dos comportamentos da estrutura do modelo como consequência das políticas de decisão, e é dependente principalmente da definição de seus loops de *feedback*. Já a SED está também envolvida com atividade de compreensão do desempenho do sistema modelado, mas observa o seu desempenho através da observação de medidas de performance.

Outra característica marcante e balizadora da aplicabilidade tradicional das metodologias é o nível de agregação utilizado no desenvolvimento dos seus respectivos modelos. A SD trabalha com um nível de agregação dos elementos do sistema conhecido como distância conceitual, e se posiciona a um passo antes do nível dos eventos, que são suavizados dentro de padrões de comportamento contínuo (fluxos e políticas de decisão). Argumenta-se que as políticas de decisão e o comportamento dinâmico é que estão conectadas através do conceito elementar de *feedback*, e não os eventos e decisões individuais, que formam apenas a camada superficial das políticas de decisão. Caso não seja adotada a distância conceitual, perderia-se toda a força do conceito de *feedback*. Uma consequência do nível de agregação da SD é o tratamento dos dados a serem inseridos e extraídos do modelo.

Modelos SD tratam com dados gerais e extrapolações numéricas, sem preocupações maiores com precisão, o que permite a inclusão no modelo de variáveis menos tangíveis (“*softs*”) que podem desempenhar papel importante na compreensão do comportamento do sistema.

Apesar das diferenças entre os paradigmas, o objetivo final de ambas as abordagens é a compreensão do comportamento de um determinado sistema ao longo do tempo, proporcionando ao tomador de decisão a possibilidade de modelar e comparar a performance do sistema estudado dentro de uma série de alternativas viáveis.

As diferenças conceituais entre os paradigmas são responsáveis entretanto pela criação de ambientes e situações favoráveis à aplicabilidade de cada um deles. A aplicação da SED remete à modelagem de sistemas logísticos sob o âmbito operacional, através da caracterização de processos, eventos, tomadas de decisão individuais e formalismo numérico. Já a aplicação da SD por sua vez, remete à modelagem de sistemas logísticos sob o âmbito estratégico, através da formalização dos relacionamentos entre as principais variáveis planejadoras do sistema e políticas de tomadas de decisão. Recai-se de certa forma sobre o modelo de comparação “comumente aceito” na comunidade científica, apoiando-se dessa vez sob um referencial teórico.

As diferenças conceituais exploradas entre as metodologias implicam também em processos de construção e utilização de modelos bastante diferentes, tema que será objeto da próxima seção do trabalho.

### ***3.3. Comparação dos Processos de Desenvolvimento dos Modelos SED e SD***

Tako e Robinson (2009b) trabalham na comparação empírica entre o comportamento de modeladores experientes das abordagens SD e SED durante o desenvolvimento de um modelo. O estudo revela quais são os passos e estágios mais relevantes para cada metodologia e o quão diferente modeladores SED e SD pensam enquanto empreendem uma tarefa de simulação. Para tal, os autores constroem diagramas temporais que representam quando e à qual dos tópicos (ou passos) básicos de uma modelagem genérica o modelador está atendendo durante o processo de modelagem e simulação de um problema pré-determinado, para ambas as metodologias. Através de um Protocolo Verbal de Análise (VPA), o número de palavras verbalizadas em cada etapa do processo é contabilizado, em um procedimento capaz de representar uma medida do percentual de atenção que cada programador dedica a cada tópico.

A Figura 2 sugere que programadores SED gastam quase metade do esforço de programação na atividade de Codificação do Modelo (42,8%). Também o tópico de Validação & Verificação é altamente demandante em esforço (20,3%) (TAKO e ROBINSON, 2009b). Por outro lado, programadores SD concentram a maior parte de seus esforços nas atividades de Conceitualização do Modelo (35,7%). A Codificação do Modelo é também um tópico

significativamente demandante (24,2%), porém menos significativo do que no processo de modelagem SED.

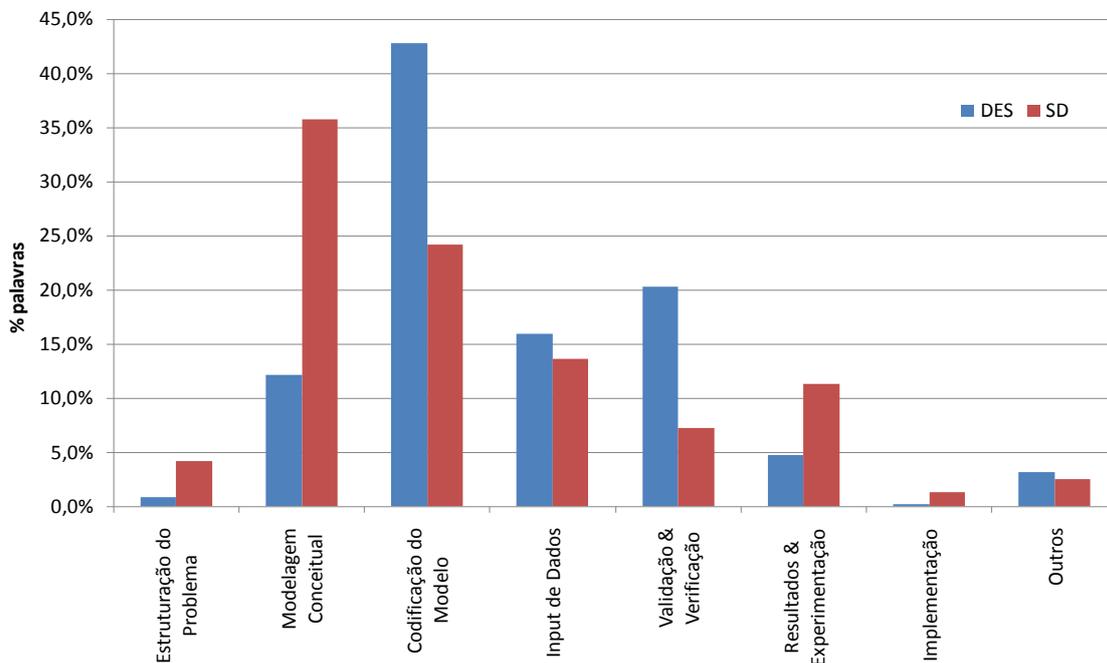


Figura 2: Atenção percentual destinada aos tópicos básicos do processo de modelagem e simulação nas abordagens SED e SD (TAKO e ROBINSON, 2009b)

A observação quantitativa dos caminhos de modelagem dos paradigmas SED e SD apresentadas no estudo permite ao menos duas conclusões importantes possível através da observação empírica:

- Os processos de modelagem SED e SD não são processos lineares. As abordagens SED e SD têm processo de modelagem iterativa (com diferentes padrões de iteratividade). Programadores pulam incontáveis vezes entre os tópicos básicos dos processos. Numerosas bibliografias (CHWIF e MEDINA, 2007, HILLIER e LIEBERMAN, 1990; WILLEMAIN, 1995; STERMAN, 2000) apresentam metodologias genéricas de modelagem que enfatizam essa característica cíclica.
- Programadores SED focam mais esforços no tópico referentes ao processo de Codificação do Modelo e de Verificação & Validação (etapas da Construção Física do Modelo), enquanto que programadores SD concentram esforços na Modelagem Conceitual.

As observações acima reforçam as preferências de aplicação dos dois paradigmas apresentados anteriormente. A SED, que remete à modelagem de sistemas no âmbito operacional, concentra esforços na representação computacional desses objetos e processos. Enquanto isso, a SD, que remete à modelagem de sistemas sob o âmbito estratégico, através da formalização dos relacionamentos entre as principais variáveis planejadoras do sistema e políticas de tomadas de decisão, concentra esforços na compreensão conceitual do sistema em estudo.

#### **4. Conclusões sobre a comparação SED x SD**

A execução da avaliação final sobre a comparação entre as metodologias SD e SED, levando-se em consideração todos os pontos levantados, será executada através da construção de 3 arquétipos de comparação apresentados na sequência, que serão amadurecidos nessa seção, em uma releitura incrementada do trabalho de Lane (2000).

A comparação através de arquétipos está pautada na avaliação da situação atual e do objetivo desse trabalho com relação à integração entre os dois paradigmas. Os arquétipos a serem discutidos são descritos a seguir:

- Arquétipo 1 - Concentrando-se nas diferenças teóricas e práticas entre os dois paradigmas e na dificuldade de comunicação entre os especialistas. A conclusão final é de que se trata de paradigmas distintos, cuja aplicação e desenvolvimento devem ser tratados independentes;
- Arquétipo 2 - Concentrando-se nas suas similaridades e desenvolvendo a concepção de que, no fundo a SED e a SD representam essencialmente aspectos de uma mesma e única metodologia.
- Arquétipo 3 - Através de um esforço por uma compreensão mais profunda da SED e da SD, baseada na revisão bibliográfica e definições trabalhadas até o momento, e que permite uma busca de oportunidades para criação de áreas de aplicação e esforços de desenvolvimento comuns, mas permanecendo consciente de suas diferenças e aplicações particulares.

Os arquétipos 1 e 2 de comparação representam o estado atual do campo de pesquisa, com metodologias aplicadas de maneira distante, com baixa possibilidade de integração. Já o arquétipo 3 de comparação carrega em seu âmago o objetivo final do trabalho: o desenvolvimento e impulsão da metodologia de simulação híbrida.

### *4.1. Arquétipo 1*

O arquétipo 1 proposto suporta-se na afirmação das diferenças entre as aspirações, hipóteses e métodos de compreensão e representação do mundo a partir dos dois paradigmas de simulação. A partir das considerações e revisões bibliográficas apresentadas no trabalho, foram selecionados 8 critérios de comparação, que permitem uma visualização dos campos de aplicação, objetivos e características comuns ou não dos dois paradigmas, apresentados na Figura 3 como dimensões de um gráfico em rede, segundo estrutura proposta por Randers (1980). Os critérios selecionados foram:

- (1) Compreensão do Sistema: capacidade da metodologia em fornecer uma compreensão holística do sistema modelado pelo usuário;
- (2) Capacidade Descritiva do Sistema: corresponde à extensão com que os elementos do modelo conseguem representar o mundo real;
- (3) Reprodutibilidade de Cenários: capacidade da metodologia em gerar uma série de cenários e avaliar comportamentos do modelo e políticas de decisão;
- (4) Transparência do Modelo: refere-se não à validade do modelo, mas à sua transparência lógico-estrutural ao usuário;
- (5) Capacidade de Enriquecimento do Modelo: aspira à medida da facilidade do modelo em ser expandido ou remodelado;
- (6) Capacidade de Geração de Ideias/Soluções: corresponde à fertilidade da metodologia na geração de intuições ou percepções pertinentes à solução do problema proposto;
- (7) Correspondência com Dados Disponíveis: relata a habilidade do modelo em representar os dados históricos com significância;
- (8) Previsibilidade do Futuro: capacidade do modelo em prever com precisão eventos futuros e seus efeitos.

Os julgamentos foram realizados baseados na compreensão da aplicação e características de ambas os paradigmas pelos autores e por outros especialistas da área, através de questionários de pesquisas. Foram preenchidos 8 questionários distribuídos entre os laboratórios de pesquisa da Engenharia USP. A concatenação dos julgamentos é realizada em uma escala Baixa-Média-Alta, e é apresentada na Tabela 2.

A recomendação para atribuição da classificação para os pesquisadores e especialistas recomendou a utilização de um critério: sua própria experiência acadêmica e profissional.

## PESQUISA OPERACIONAL PARA O DESENVOLVIMENTO

Propôs-se também que a avaliação contivesse um descritivo justificando cada atribuição na escala Baixa-Média-Alta realizada por cada especialista, que também foi compilada na coluna “Comentário” na Tabela 2.

Tabela 2: Avaliação dos oito critérios de comparação dos paradigmas SD e SED

Dimensão de Comparação	SD	SED	Comentário
Compreensão do Sistema Real	Alta	Baixa	O tipo de abordagem proposto pela SD, que envolve a estruturação de loops de feedback e dá ênfase ao relacionamento entre os componentes do sistema, oferece ampla vantagem frente a metodologia SED.
Descrição do Sistema	Alta	Média	Seguindo a linha raciocínio acima, um modelo SD, construído com as devidas precauções é capaz de representar o comportamento do mundo real melhor, ou ao menos tão bem quanto um modelo SED.
Reprodução de Cenários	Alta	Média	O tratamento agregado da SD, que trata de políticas gerais para tomadas de decisão, permite a exploração de um gama mais ampla de cenários, mas que perde em questão de sensibilidade para a avaliação de cenários em modelos SED.
Transparência do Modelo	Alta	Baixa	O conceito de caixa-transparente presente no desenvolvimento de modelos SD garante uma vantagem significativa frente ao conceito de caixa-preta dos modelos SED.
Enriquecimento do Modelo	Baixa	Baixa	Ambas as metodologias apresentam um nível elevado de re-trabalho para a readequação de lógicas de modelos previamente construídos.
Fertilidade de Idéias	Alta	Média	A SD, por tratar de gerenciamento de políticas de tomada de decisão e não de decisões discretas, gera um potencial maior na concepção de planos de ação sobre o sistema como um todo.
Correspondência com Dados	Baixa	Alta	A agregação de dados e eventos na construção dos modelos SD representa uma precisão significativamente inferior tanto nos dados de entrada quanto nos dados de saída quando comparado aos modelos SED.
Previsibilidade	Média	Alta	Por razões similares aos expostos acima, mas ainda mais enfaticamente, modelos SED leva vantagem sobre modelos SD.

A Figura 3, elaborada a partir da Tabela 2, transmite a clara percepção de que, apesar de haver características comuns a ambos os paradigmas, eles cobrem áreas distintas, dando suporte ao Arquétipo 1 de comparação, que trata a SED e a SD como paradigmas distintos. O resultado desse discurso é o afastamento conceitual e prático, desencorajando a comunicação e a integração entre ambas.

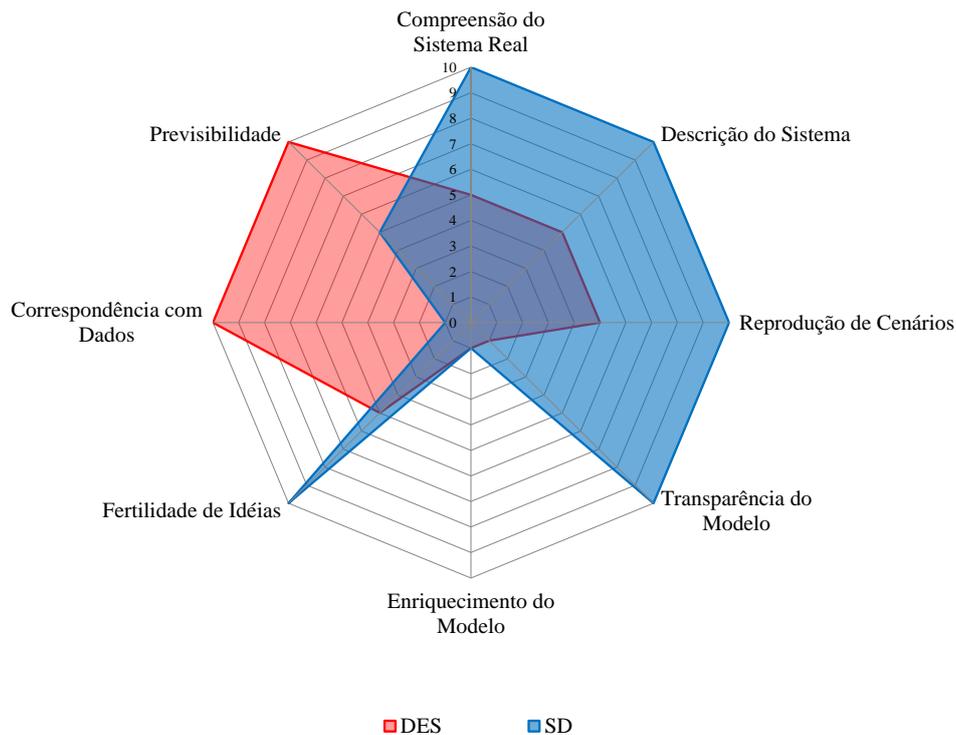


Figura 3: Comparação das características dos paradigmas SD e SED

#### 4.2. Arquétipo 2

O arquétipo 2 proposto concentra-se nas similaridades entre a SED e a SD. O arquétipo propõe e assume diferenças secundárias na abordagem, com o argumento de que ambas representam uma única metodologia.

A definição básica do campo de atuação dos dois paradigmas e do objetivo final de qualquer metodologia de simulação é um forte argumento para o arquétipo 2 de comparação: “Fundamentalmente, um modelo de simulação “-----” oferece uma poderosa ferramenta de análise que permite a experimentação lógica, livre de riscos e flexível de um sistema do mundo real. É capaz de gerar uma compreensão do sistema real e prever seu comportamento segundo interesse do modelador” (LANE, 2000). O trecho marcado com “-----”, poderia ser ocupado, de maneira igualmente adequada, tanto pelo termo SD quanto pelo termo SED, o que representa uma forte indicação de um campo comum de atuação da SED e da SD.

Ainda, outros dois pontos apontados como marcantes na diferenciação entre os dois paradigmas, podem ser revisitados e observados sob outras perspectivas:

- Agregação x Eventos.

Como já abordado, a SD trabalha em um nível elevado de agregação, em uma abordagem voltada à definição de políticas gerais de tomada de decisão e fluxos homogêneos,

à chamada distância conceitual de eventos e decisões individuais, que por sua vez correspondem aos elementos definidores do comportamento de modelos SED. Entretanto pode-se afirmar que a SD considera sim os eventos individuais no processo de modelagem (GRAHAM, 1980) em dois momentos distintos: na construção do modelo e na análise de seus resultados.

Um exemplo elaborado por Dazinger (1996) e Lane (2000) trata da qualidade educacional, influenciada pelas condições econômicas dos alunos, medida por inúmeros dados estatísticos (salário dos pais, distância da casa da criança até a escola, etc.) e eventos (se a criança usa roupas limpas, se a merenda tem refrigerante, se o tênis da criança está furado, etc.) que parecem desconexos, mas são capazes de forjar um padrão e definir um fluxo na elaboração do modelo (Figura 4a). Portanto, os eventos individuais são considerados de forma direta na formulação de um modelo SD, mas são aplicados de forma indireta. Além disso, eventos podem ser também interpretados a partir das respostas dos modelos SD (LANE, 2000).

Apresenta-se como exemplo um modelo que representa a composição da matriz modal de transporte de uma companhia. Uma das variáveis relacionadas no modelo considera o nível de confiabilidade de cada modal, baseado em fatores como a pontualidade no atendimento da demanda, custo, etc., para a configuração da distribuição da matriz de transporte. Se por algum motivo, o nível de confiabilidade de determinado modal decair, pode-se inferir que, a partir de determinado momento, esse modal será abandonado. O momento exato em que o modal é abandonado pela companhia não é tornado explícito nos resultados do modelo, mas é possível inferi-lo, a partir de um conhecimento prévio do sistema em estudo, com precisão considerável. (Figura 4b)

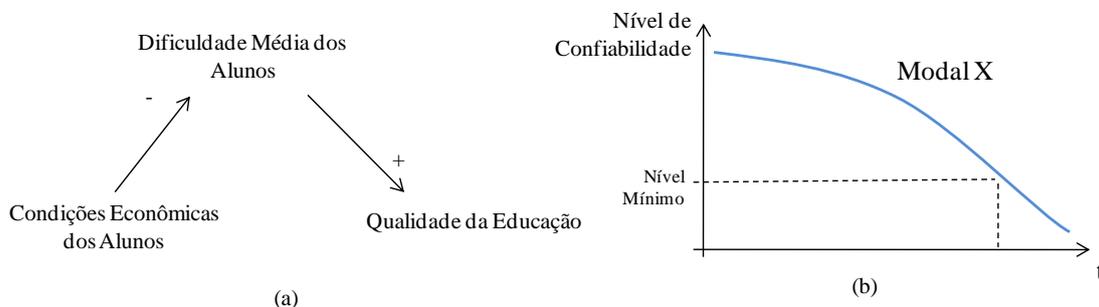


Figura 4: Consideração de eventos individuais na modelagem SD

- Abrangência da Aplicação

Uma das afirmações comumente aceitas na comparação dos dois paradigmas de simulação refere-se à abrangência da aplicação da SED e da SD. A abrangência de aplicação da SD é definida por seus elementos principais - os *loops de feedback* e a “distância conceitual”

de eventos individuais. As estruturas de *feedback*, que tratam da determinação das relações causais entre as variáveis do modelo e são tornadas explícitas através de um série de equações frequentemente não-lineares, são capazes de incorporar aspectos *soft* do comportamento do sistema que, enquanto difíceis de quantificar, podem afetar significativamente sua performance (SWEETSER, 1999). Associado a isso, o nível de agregação proporcionado pela distância conceitual fornece uma perspectiva global do sistema em estudo. Já a SED, por sua vez, opera bem com problema de escopo limitado (LIN *et al.*, 1998).

Porém, uma análise mais crítica permite afirmar que os loops de *feedback* são sim considerados nos modelos de SED. Enquanto os programadores SD investem uma parcela de tempo consideravelmente maior na etapa de modelagem conceitual – que envolve a identificação dos relacionamentos entre os parâmetros do modelo, os programadores SED realizam essas considerações não explicitamente (SWEETSER, 1999; LANE, 2000; MORECROFT; ROBINSON, 2005), mas dentro da própria etapa de codificação do modelo (etapa na qual usualmente despende-se maior parcela de tempo). Para exemplificar, foi elaborada na Figura 5 a apresentação da codificação de um modelo SED simples, que corresponde à chegada e descarga de um navio em um terminal portuário, onde são identificados os loops de feedback e relacionamentos entre as variáveis.

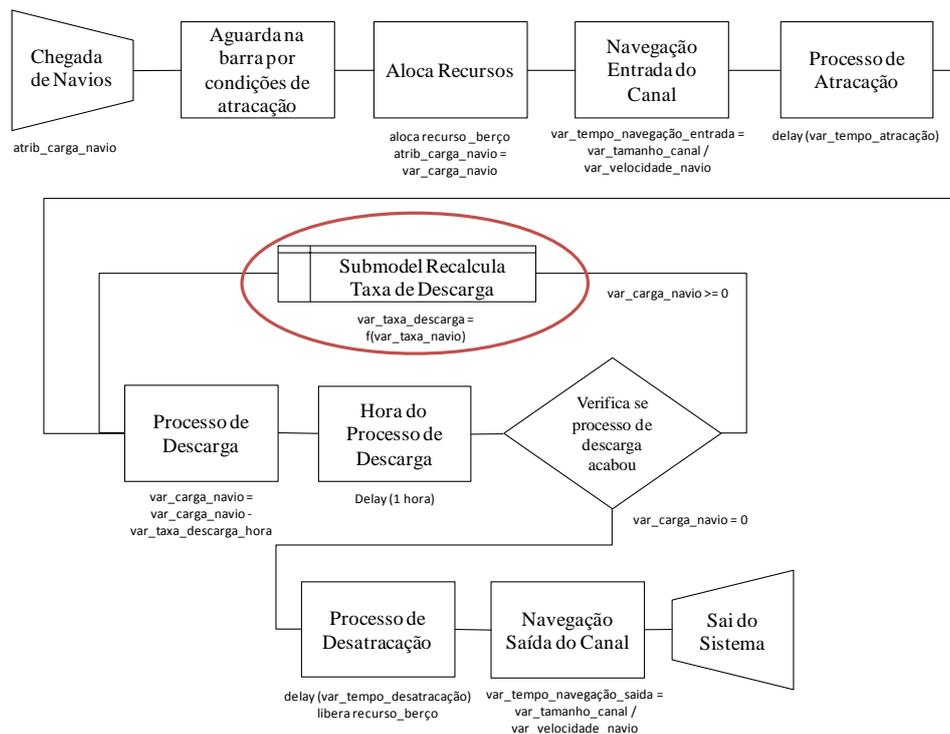


Figura 5: Modelagem SED de um processo de chegada e atendimento de navios em um terminal marítimo

Na Figura 6 é apresentada em detalhe a construção implícita de um loop de *feedback* no modelo SED, entre as variáveis “Taxa de Descarga” e “Nível de Carga Restante”.

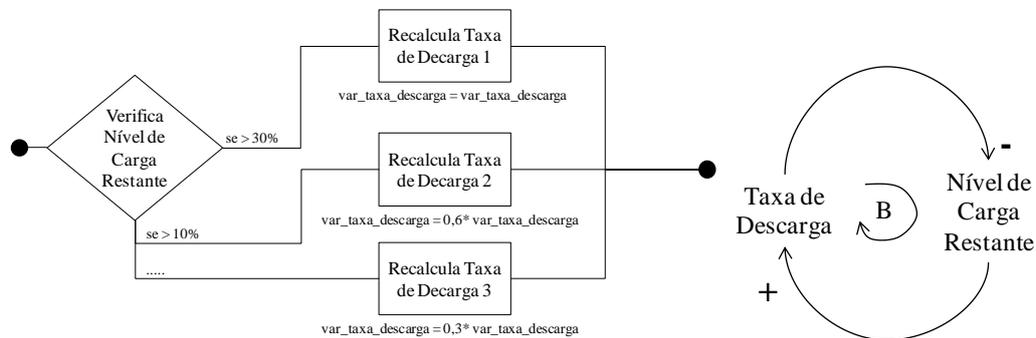


Figura 6: Detalhe do relacionamento entre variáveis em um modelo SED e representação do loop de *feedback* construído implicitamente, dentro do “Submodelo Recalcula Taxa de Descarga” da Figura 5.

As considerações apresentadas anteriormente permitem um encaminhamento simples sobre a conclusão da comparação entre os dois paradigmas: cada um deles representa aspectos, nuances de uma única metodologia.

O arquétipo 2 proposto, entretanto, ainda não é capaz de promover a expansão da utilização conjunta dos paradigmas. Ao considerar os paradigmas como iguais, o arquétipo 2 torna a escolha da metodologia de simulação uma mera formalidade baseada na conveniência: poder-se-ia optar por um ou outro paradigma, sem preocupações de perdas ou ganhos, baseando-se apenas em critérios como facilidade de aplicação, conhecimento prévio do usuário e valor da licença do software. Tais critérios são de fato relevantes no momento da escolha de um paradigma para simulação, mas não podem ser considerados definitivos. A relação entre a complexidade do sistema simulado e os objetivos do projeto de simulação proposto e as características principais do paradigma de simulação são elementos vitais nesse processo de escolha e devem ser levados em consideração.

### 4.3. Arquétipo 3

O arquétipo que o trabalho deseja propor e incentivar é diferente dos arquétipos 1 e 2 apresentados até o momento. Primeiramente, por que os arquétipos 1 e 2 são frágeis. Essa fragilidade é ressaltada pelo fato de que os arquétipos não são capazes de combater os argumentos um do outro. A ideia proposta pelo arquétipo 1 de que os paradigmas de simulação são distintas e devem seguir campos de aplicação e pesquisa diferenciados, ignora os fatos

apresentados pela abordagem do arquétipo 2, que demonstra uma relação contígua entre os dois paradigmas. Por outro lado, o conceito de semelhança proposta pelo arquétipo 2 ignora as sutilezas presentes nos conceitos e práticas de cada um dos paradigmas, o que torna suas aplicações diferenciadas. A consequência de ambos os arquétipos de comparação é o distanciamento dos dois paradigmas. Os arquétipos 1 e 2 são considerados falhos no objetivo final de estruturar e fomentar a comunicação entre os dois campos de estudo.

A proposta de um terceiro arquétipo de comparação entre os paradigmas, levantada primeiramente por Lane (2000), visa obter um equilíbrio entre os arquétipos 1 e 2, com o objetivo principal de preparar terreno para que os programadores, usuários e pesquisadores da SD e da SED possam visualizar a potencialidade existente na integração dos paradigmas, sem o receio da supressão ou diminuição de importância de uma pela outra.

O primeiro ponto a ser levado em consideração é que as proposições dos dois arquétipos, se não levadas ao extremo, estão corretas. Assim, é possível afirmar que os paradigmas SD e SED apresentam características únicas, possuem conceitos exclusivos e comportam-se particularmente bem em situações específicas, mas são, entretanto, similares em muitos aspectos. Ambas têm obtido sucesso na construção de modelos de simulação e a credibilidade de ambas não pode ser negada; os modelos construídos por ambos os paradigmas são capazes de replicar com fidelidade o comportamento e desempenho de determinado sistema, dando ao tomador de decisão a potencialidade de avaliar possíveis modificações nos sistemas, inserção/exclusão de elementos, etc.; os estágios envolvidos no processo de modelagem de ambas os paradigmas são equivalentes aos de um processo genérico de modelagem no campo da PO e apresentam característica interativa e iterativa.

Outro ponto que reflete a similaridade entre os paradigmas é a percepção não significativa do usuário leigo referente aos resultados e aplicações da SED e da SD (TAKO e ROBINSON, 2009b). Isso implica que, do ponto de vista do usuário, o paradigma aplicado faça pouca ou nenhuma diferença. Akkermans (1995) também afirma que o cliente não está preocupado com a escolha da abordagem de simulação, apenas com o resultado apresentado por essa aplicação. Assim, a escolha do paradigma não é fator crítico para o usuário, bastando que sua aplicação seja bem sucedida.

A revisão bibliográfica executada revelou que há um nível geral de concordância entre os autores referente às diferenças entre os paradigmas de simulação. Essas diferenças conceituais e práticas (tipos de abordagem, controle de tempo, métodos de atualização dos estados do sistema modelado, etc.) podem ser resumidas em um único aspecto: fornecer

possibilidades distintas de visão de mundo, cabendo ao programador a escolha adequada correspondente às suas necessidades. A visão de mundo de ambas os paradigmas pode ser esclarecida através do gráfico tridimensional proposto por Lane (2000), que posiciona a SD e a SED em relação ao grau de complexidade (dinâmica, combinatória e organizacional) em que os modelos são capazes de atuar com inquestionável eficiência.

Uma descrição dos tipos de complexidade, a fim de facilitar a compreensão da elaboração da “visão de mundo” é apresentada a seguir.

- Complexidade combinatória (ou de detalhes): refere-se à complexidade encontrada na busca de uma solução ótima em meio a um número muito grande de opções;
- Complexidade dinâmica (ou estrutural): é originada pela rede de interações entre os elementos de um sistema;
- Complexidade organizacional: refere-se à complexidade no âmbito da compreensão do problema e sua definição; Jackson e Keys (1984) afirmam que a medida da complexidade organizacional captura a ideia de que alguns problemas não podem ser representados sem que causem frustração entre alguns dos tomadores de decisão.

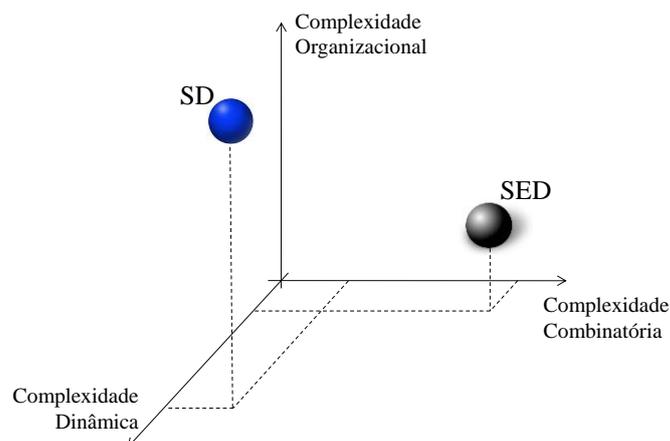


Figura 7: Posicionamento da SD e da SED em gráfico de complexidades tridimensional (adaptada de Lane (2000))

A avaliação da Figura 7 permite mapear os campos de contribuição dos dois paradigmas em estudo:

- A SED apresenta como grande potencial a capacidade de representar sistemas de elevada complexidade de detalhes, considerando o refinamento de dados, a análise detalhada da dinâmica em eventos, com pouca ênfase na tentativa de compreender o relacionamento entre as variáveis, resultando em baixa capacidade para aplicação

em sistema de complexidade dinâmica elevada. Por esses mesmos fatores, os modelos SED apresentam uma característica de maior hegemonia na sua concepção e definição, com menos polêmica e discussões envolvendo sua concepção e análise, atuando então em sistemas de complexidade organizacional baixa.

- A SD opera em contexto de alta complexidade dinâmica e baixa complexidade de detalhes. O elevado grau de agregação de variáveis e explicitação das relações causais entre as variáveis potencializam as atenções ao comportamento dinâmico do sistema. Assim, modelos SD tornam-se, naturalmente, ferramentas de debate e aprendizado para análise de estratégias gerenciais, representando problemas com níveis elevados de complexidade organizacional.

### **5. Necessidade de Diferentes Visões de Mundo**

O passo natural na proposição de uma metodologia híbrida de simulação é o questionamento da necessidade de abarcar as diferentes visões de mundo propostas em um processo de simulação de um sistema complexo. O quão de fato é relevante sermos capazes de abranger diferentes visões de mundo, representar diferentes tipos de processo e variáveis, dentro de um modelo de simulação?

Se retornarmos à Tabela 1 apresentada anteriormente, que compila as diferenças conceituais, de interpretação, de representação e de utilização das duas abordagens, e levarmos em consideração a Figura 7 e a relação das complexidades aclamadas por cada paradigma, e tentarmos posicionar as aspirações pertinentes à representação de um sistema complexo, certamente a seleção do paradigmas será ambígua, ora tendendo à SD, ora tendendo à SED.

Se propusermos, por exemplo, a modelagem e simulação de um terminal portuário para a movimentação de contêineres, estaremos interessados em uma gama de respostas, entre elas: investimento inicial em equipamentos e política de investimento para manutenção de nível de serviço desejado; resultados operacionais e índices de desempenho do terminal, receitas com movimentação, custos do sistema (relacionados a atrasos de navios, caminhões e carga), entre muitos outros. A opção pelo melhor paradigma para representação do sistema e obtenção das respostas propostas sem hesitação ou ambiguidade é tarefa difícil, e é apresentada na Tabela 3, e foi obtida através de entrevista realizada com dois especialistas da área, com mais de 20 anos de desenvolvimento de modelos de simulação em ambientes portuários.

## PESQUISA OPERACIONAL PARA O DESENVOLVIMENTO

Tabela 3: Representação da escolha pelo paradigma mais apropriado para representação dos elementos de um sistema logístico

	SED	SD
Investimento Inicial	X	
Política de Investimento		X
Avaliação do Nível de Serviço		X
Resultados Operacionais	X	
Índices de Desempenho	X	
Receitas Operacionais	X	
Custos do Sistema	X	
Absorção de Demanda		X

Isso torna evidente a potencialidade dos benefícios da utilização conjunta da SED e da SD, aplicadas, cada uma delas, à extensão do modelo capaz de representar com maior capacidade. É nesse contexto que a proposta do trabalho é impulsionada. Deve-se buscar explorar a potencialidade da aplicação da metodologia híbrida de simulação, mesclando os paradigmas SED e SD, a partir da compreensão e compartilhamento de seus potenciais e fraquezas. Uma metodologia híbrida de simulação é capaz de lidar com as necessidades impostas pelo dinamismo econômico mundial, integrar diferentes “visões de mundo” e fornecer respostas eficientes às cada vez mais complexas questões gerenciais e administrativas.

### 6. Conclusões e Recomendações

A proposta principal do trabalho, que corresponde à geração de um estímulo na direção do desenvolvimento da metodologia de simulação híbrida, foi preenchida. O estudo preliminar de cada um dos paradigmas separadamente, seguido por uma profunda comparação bibliográfica conceitual entre ambas, foi capaz de revelar potencialidades, fraquezas e possibilidades de compartilhamento e integração de suas características, fornecendo ferramentas para o delineamento de uma perspectiva de aplicação e contribuição em uma direção comum.

Capazes de manusear aspectos distintos do planejamento de sistemas logísticos, os modelos discretos e contínuos devem ser capazes de suportarem-se com informações as quais o outro modelo não é capaz de manusear. Em especial, os paradigmas SED e SD, podem complementar um ao outro, oferecendo as ferramentas necessárias para a construção de novos paradigmas de simulação com potencialidade para atingir os requerimentos conformados pelo moderno, integrado e dinâmico sistema empresarial mundial.

Portanto, a simulação híbrida constitui uma ferramenta importante para atuação no atual mercado exigente e competitivo do planejamento e administração de sistemas logísticos complexos.

É importante ressaltar que, o que garante vantagem da simulação híbrida frente à simulação discreta ou contínua aplicadas isoladamente portanto, não é a possibilidade de trabalhar com dois modelos simultaneamente, mas sim a capacidade de integração entre os dois paradigmas, através um processo efetivo de trocas de informação entre ambos. Assim, fica evidenciada a necessidade de desenvolvimento de metodologias de simulação híbrida.

O primeiro passo de desenvolvimento da simulação híbrida apresentado nesse trabalho é limitado à avaliação conceitual realizada através de um estudo de revisão bibliográfica. Assim, aponta-se como passo seguinte para extensão do trabalho e execução de trabalho futuros, a necessidade em trabalhar o desenvolvimento de um procedimento para a integração prática entre a SED e a SD, seguido por testes (construção de modelos) de exploração da potencialidade da metodologia híbrida de simulação para sistemas complexos.

### Referências

- Akkermans, H.A. (1995). Modeling with managers: Participative business modeling for effective strategic decision-making. Tese de Doutorado apresentada à Technische Universiteit Eindhoven, Eindhoven.
- Borshchev, A., Filippov, A. (2004). From System Dynamics and Discrete Event to Practical Agent Based Modeling: Reasons, Techniques, Tools. 22nd International Conference of the System Dynamics Society, July 25 - 29, 2004, Oxford, England.
- Brailsford S., Hilton N. (2001). A comparison of discrete event simulation and system dynamics for modeling healthcare systems. Proceedings of Operational Research Applied to Health Services (ORAHs) 2000, Glasgow, Scotland, 18–39.
- Brito, T.B., Botter, R.C., Trevisan, E.F.C. (2011) A Literature Review Conceptual Comparison Between Discrete Simulation and Continuous Simulation as Booster of the Hybrid Simulation Methodology. In Proceeding of the 29th Winter Simulation Conference, Phoenix, USA.
- Brito, T.B., Silva, R.C.S., Trevisan, E.F.C, Botter, R.C. (2012). Discrete Event Simulation Combined with Multiple Criteria Decision Analysis as a Decision Support Methodology in Complex Logistics Systems, Discrete Event Simulations - Development and Applications, Dr. Eldin Wee Chuan Lim (Ed.), ISBN: 978-953-51-0741-5, InTech.
- Chwif, L., Medina, A.C. (2007). Modelagem e simulação de eventos discretos: Teoria e Aplicações. Editora do Autor, 2nd Edition, São Paulo.
- Coyle, R.G. (1985). Representing discrete events in system dynamics models: A theoretical application to modeling coal production. Journal of Operational Research Society 36(4): 307–318.

Freitas, P.J.F. (2001). *Introdução à Modelagem e Simulação de Sistemas*. Visual Books Ltda, 2ª Edição, São Paulo.

Goetschalckx, M., Vidal, C.J. And Dogan, K. (2002) 'Modeling and design of global logistics systems: a review of integrated strategic and tactical Supply Chain Multi-Structural (re)design with structure dynamics considerations model and design algorithms', *European Journal of Operational Research*, Vol. 143, No. 1, pp. 1-18.

Helal M. And Rabelo, A. (2004). An enterprise simulation approach to the development of dynamic balanced scorecards. *Proceedings of American Society of Engineering Management Conference*, October 20-23, 2004, Alexandria, Virginia.

Helal M., Rabelo L., Sepúlveda J., Jones, A. (2007). A methodology for Integrating and Synchronizing the System Dynamics and Discrete Event Simulation Paradigms. *Proceedings of the 25th International Conference of the System Dynamics Society*, July 29- August 2, 2007, Boston, MA.

Helal, N. (2008). A hybrid system dynamics-discrete event simulation approach to simulating the manufacturing enterprise. Tese de Doutorado apresentada ao Department of Industrial Engineering and Management Systems in the College of Engineering and Computer Science at the University of Central Florida.

Hillier, F.S., Lieberman, G.J. (1990). *Introduction to Operations Research* 5th ed. New York: McGraw-Hill.

Howick, S., Ackermann, F. (2011). "Mixing OR Methods in Practice: Past, Present and Future directions." *European Journal of Operational Research* (215) (3): 503-511 (3).

Jackson, M.C., Keys, P. (1984). Towards a system of systems methodologies. *Journal of the Operations Research Society*, 35 (6): 473-486.

Jackson, M.C., Keys, P. (1984). Towards a system of systems methodologies. *Journal of the Operations Research Society*, 35 (6): 473-486

Lane, D.C. (2000). You just do not understand me. Working Paper, London School of Economics, Operational Research Group.

Law, A., Kelton, W. (2000). *Simulation modeling and analysis*. McGrawHill, USA.

Lee, J.; Zhou, M.; Hsu, P. (2004). A multi-paradigm modeling approach for hybrid dynamic systems. *IEEE Intl. Symposium on Computer Aided Control System design*, Taipei, Taiwan, September 2-4, pp 77-82

Levin, T., Levin, I. (2003). Integrating hybrid modeling with system dynamics. *Proceedings of the 21st System Dynamics Society International Conference*, New York, NY, pp 20-24.

Lin, C., Baines, T., O'kane, J, Link, D. (1998). A generic methodology that aids the application of system dynamics to manufacturing system modeling. *International Conference on Simulation*, Sept 30 – October 2, 1998, York, UK.

Mak, H.-Y. (1993). *System dynamics and discrete event simulation modeling*. Department of Statistical and Mathematical Sciences. London, London School of Economics and Political Science: 228.

Mentzer, J.T., Dewitt, W., Keebler, J.S., Min, S., Nix, N.W., Smith, C.D., Zacharia, Z.G. (2001). Defining Supply Chain Management. *Journal of Business Logistics*, 22, (2), 1-25.

- Morecroft J.D.W., Robinson S. (2005). Explaining puzzling dynamics: comparing the use of system dynamics and discrete event simulation. Proceedings of the 23rd International Conference of the System Dynamics Society, July 17-21, 2005, Boston, MA.
- Rabelo, L., Helal, M., Jones, A., Min, H. (2005). Enterprise simulation: a hybrid system approach. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 18(6), 498-508.
- Randers, J. (1980). Guidelines for model conceptualization. Em: Randers, J. (ed) *Elements of the System Dynamics Method*. MIT Press, Cambridge, MA, pp 117-139.
- Robinson, S. (2005). Discrete-event simulation: from the pioneers to the present: what next? *Journal of Operational Research Society*, 56, 619 – 629.
- Schriber, T.J. (1974). *Simulation Using GPSS*. John Wiley & Sons, 1st Edition, New York, NY.
- Steenken, D., Voss, S., Stahlbock, R. (2004) Container terminal operation and operations research – a classification and literature review. *OR Spectrum* 26: 3 – 49.
- Sterman, J. (2000). *Business dynamics: System thinking and modeling for a complex world*. Irwin/McGraw-Hill. Boston, MA.
- Sweetser, A. (1999). A comparison of System Dynamics (SD) and Discrete Event Simulation (DES). 17th International Conference of the System Dynamics Society, July 20 - 23, 1999, Wellington, New Zealand.
- Tako, A.A., Robinson, S. (2009). Comparing discrete-event simulation and system dynamics: user's perception. *Journal of the Operational Research*, 60, 296 – 312.
- Tako, A.A., Robinson, S. (2009b). Comparing model development in discrete-event simulation and system dynamics. Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference, Austin, TX.
- Tesfamarian, D., Lindeberg, B. (2005). Aggregate analysis of manufacturing systems using system dynamics and ANP. *Computers & Industrial Engineering*, [S.I.], v. 49, n.1, p. 98-117.
- Van Hee K.M., Wijbrands R.J. (1988), Decision support system for container terminal planning. *European Journal of Operational Research*, 34, 262-272.
- Willemain, T.R. (1995). Model Formulation: What Experts Think about and When. *Operations Research* 43(6): 916-932.