UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

Utilização da simulação híbrida para representar o fator humano em sistemas produtivos

Mona Liza Moura de Oliveira

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

Mona Liza Moura de Oliveira

Utilização da simulação híbrida para representar o fator humano em sistemas produtivos

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção como parte dos requisitos para obtenção do Título de Doutor em Ciências em Engenharia de Produção.

Área de Concentração: Engenharia de Produção Orientador: Prof. Dr. José Arnaldo Barra

Montevechi

Co-orientador: Prof. Dr. Alexandre Ferreira de

Pinho

RESUMO

A simulação computacional tem se tornado uma ferramenta amplamente utilizada no ambiente empresarial por auxiliar gestores a compreender melhor a dinâmica de processos complexos, que por muitas vezes não é captada por ferramentas matemáticas convencionais. Os projetos de simulação são desenvolvidos a fim de entender, analisar e prever o comportamento de diversos elementos de um sistema. O elemento humano é um dos elementos mais críticos de sistemas produtivos, uma vez que tem influência direta no comportamento destes sistemas, principalmente em sistemas onde se tem um trabalho com mão de obra manual intensiva. Embora pesquisadores já tenham visto a importância de compreender o elemento humano em uma organização, diversos autores apontam que em muitos projetos de simulação este elemento não é bem representado. Eles criticam ainda o fato de se ter uma grande preocupação em detalhar máquinas e equipamentos, enquanto o elemento humano é tratado como simples recursos que se desempenham de forma constante. Esta visão errônea do fator humano pode prejudicar os resultados gerados pelos modelos de simulação. A simulação a eventos discretos (SED), apesar de apresentar vantagens como flexibilidade e alto poder de análise de processos, apresenta dificuldade em termos de representação do fator humano, principalmente, por este apresentar comportamento bastante complexo. Ao utilizar esta ferramenta, devem-se fazer diversas suposições e adequações para representar o comportamento do ser humano em sistemas produtivos. Já a simulação baseada em agentes (SBA) tem sido apontada como uma excelente alternativa para representar o fator humano em diversas áreas, pois os agentes são seres autônomos, proativos e inteligentes, características inerentes ao ser humano. Portanto, combinou-se a SBA com a simulação a eventos discretos a fim de verificar se esta simulação híbrida torna os resultados simulados mais próximos do real. Nesta simulação híbrida, o fluxo do processo foi construído pela SED e o elemento humano representado por agentes, agentes estes que são influenciados por um fator que afeta a sua produtividade, neste caso o ritmo circadiano. Para tanto, três projetos de simulação de diferentes sistemas produtivos com mão de obra manual intensiva foram desenvolvidos e foi possível verificar que em ambos os casos o modelo de simulação híbrida (SBA e SED) foi estaticamente validado, apresentando resultados mais próximos do real quando comparados aos resultados de modelos de SED dos mesmos sistemas avaliados. Foi possível verificar também que a inserção do ritmo circadiano nestes casos, além de tornar a representação do fator humano mais próxima do real, não exige uma extensiva coleta de dados de tempo para alimentar o modelo computacional, reduzindo assim tempo e custo do desenvolvimento dos projetos de simulação.

Palavras-chave: simulação baseada em agentes, simulação a eventos discretos, simulação híbrida, ritmo circadiano.

ABSTRACT

The computer simulation has become a widely used tool in the business environment by helping managers to understand better the dynamics of complex processes, which is not often captured by conventional mathematical tools. Simulation projects are developed in order to understand, analyze and predict the behavior of various components of a system. The human element is one of the most critical elements of productive systems, since it has direct influence on the behavior of such systems, especially in systems where there is a labor-intensive manual activity. Although researchers have already seen the importance of understanding the human element in an organization, several authors point out that in many simulation projects this human factor is not well represented. They also criticize the fact of having a great concern in detailing machinery and equipment, while the human element is treated as simple features that perform steadily, and this erroneous view of the human factor can damage the results generated by simulation models. The discrete event simulation, although it has advantages such as high flexibility and power of analysis processes, presents difficulties in terms of representation of the human factor, especially because it has very complex behavior. By using this tool, several assumptions and adjustments to represent human behavior in productive systems have to be done. On the other side, the agent-based simulation has been identified as an excellent alternative to represent the human factor in many areas because the agents are autonomous beings, proactive and intelligent features inherent to the human being. Therefore, the agentbased simulation and discrete events simulation was combined, in order to verify if this hybrid simulation makes the simulated results closer to the real results. In this hybrid simulation, process flow was built by discrete event simulation and the human element was represented by agents, these agents are influenced by a factor which affects productivity, in this case the circadian rhythm. Hence, two simulation projects of different production systems have been developed and we found that in both cases the hybrid simulation model (agent-based simulation and discrete event simulation) was statistically validated, presenting results closer to the real than the simulation models of discrete event results of the same evaluated systems. It was also verified that the insertion of the circadian rhythm in these cases, besides making the representation of the human factor closer to the real, does not require an extensive collection of time data to feed the computational model, reducing time and cost of the project simulation development.

Keywords: Agent Base Simulation, Discrete Event Simulation, Hybrid Simulation, Circadian rhythm.

SUMÁRIO

INT	RODUÇÃO	8
1.1	OBJETIVOS GERAL E ESPECÍFICO	10
1.2	JUSTIFICATIVA	11
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO	12
FUN	NDAMENTAÇÃO TEORICA	13
2.1	SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	13
2.1.	1 Introdução à Simulação Computacional	13
2.1.	2 Áreas de aplicação da Simulação Computacional	15
2.1	3 Vantagens da Simulação	16
2.1.	4 Desvantagens	17
2.1	5 Métodos de Simulação	18
2.2	Simulação a Eventos Discretos	21
2.2.	1 Introdução à SED	21
2.2.	2 Exemplos de Aplicação da SED	23
a)		
<i>b</i>)	Área da saúde	24
c)	Setor logístico	25
d)	Simulação em setores de serviço	26
e)		
2.2		
2.2.		
2.3		
2.3.		
2.3.	2 Definição de Agente	30
2.3		
2.3.		
2.3	•	
	1 3	
	Ç	
	Ü	
	1.1 1.2 1.3 FUN 2.1 2.1. 2.1. 2.1. 2.1. 2.1. 2.2 2.2. 2.2. 2.2. 2.2. 2.2. 2.3. 2.3	1.2 JUSTIFICATIVA 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO FUNDAMENTAÇÃO TEORICA 2.1 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL 2.1.1 Introdução à Simulação Computacional 2.1.2 Áreas de aplicação da Simulação Computacional 2.1.3 Vantagens da Simulação 2.1.4 Desvantagens 2.1.5 Métodos de Simulação 2.2 SIMULAÇÃO A EVENTOS DISCRETOS 2.2.1 Introdução à SED 2.2.2 Exemplos de Aplicação da SED a) Ambiente de manufatura b) Área da saúde c) Setor logístico d) Simulação em setores de serviço e) Simulação an área de Ensino 2.2.3 Vantagens 2.2.4 Desvantagens 2.2.5 Definição de Agente 2.3.1 Introdução a SBA 2.3.2 Definição de Agente 2.3.3 Multi Agentes 2.3.4 Softwares utilizados na SBA 2.3.5 Exemplos de Aplicação da SBA 2.3.6 Vantagens da SBA 2.3.7 Desvantagens da SBA 2.3.7 Desvantagens da SBA 2.3.8 SBA versus SED

	2.4 F	REPRESENTAÇÃO DO FATOR HUMANO NA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	47
	2.4.1	Importância da representação do fator humano em projetos de simulação	47
	2.4.2	Representação do fator humano por meio da SED	48
	2.4.3	Representação do fator humano por meio da SBA	49
	2.4.4	Dificuldades de representar o elemento humano em projetos de simulação	49
	2.4.5	Modelagem do desempenho humano	50
	2.4.6	Ritmo Circadiano	52
	2.5 F	REVISÃO SISTEMÁTICA DE LITERATURA	55
	2.5.1	Introdução à Revisão Sistemática da Literatura	55
	2.5.2	Desenvolvimento da Revisão Sistemática de Literatura	57
	2.5.3	Análise Quantitativa	60
	2.5.4	Análise Qualitativa	62
3.	MÉTO	DDO DE PESQUISA	68
	3.1	CLASSIFICAÇÃO DA PRESENTE PESQUISA	68
	3.1.1	Objetivos e definição do sistema	71
	3.1.2	Construção do modelo conceitual	71
	3.1.3	Validação do modelo conceitual	72
	3.1.4	Documentação do modelo conceitual	72
	3.1.5	Modelagem dos dados de entrada	72
	3.2 I	DEDUÇÃO E ANÁLISE	73
	3.2.1	Construção do modelo computacional	73
	3.2.2	Verificação do modelo computacional	73
	3.2.3	Validação do modelo computacional	74
	3.3 I	NTERPRETAÇÃO/INFERÊNCIA	74
	3.3.1	Definição e construção dos cenários	75
	3.3.2	Análise dos resultados	75
	3.3.3	Conclusões e recomendações	75
	3.4 A	AVALIAÇÃO E JULGAMENTO	75
4.	DESE	NVOLVIMENTO DO MÉTODO DE PESQUISA	76
	4.1 S	ISTEMA 1: LINHA DE PRODUÇÃO DE KITS PARA MONTAGEM DE CHICOTES ELÉTRI	cos
	7	6	
	4.1.1	Formulação/Modelagem	76
	4.1.2	Dedução e análise	80

4.1.3	Interpretação/inferência	83
4.1.4	Avaliação e julgamento	85
4.2	SISTEMA 2: LINHA DE PRODUÇÃO DE COMPONENTES DE ALTA TECNOLOGIA	85
4.2.1	Formulação/Modelagem	85
4.2.2	Dedução e análise	88
4.2.3	Interpretação/inferência	89
4.2.4	Avaliação e julgamento	91
4.3	Sistema 3: Linha de produção de placas eletrônicas	91
4.3.1	Formulação/Modelagem	91
4.3.2	Dedução e análise	93
4.3.3	Interpretação/inferência	95
4.3.4	Avaliação e julgamento	96
5. CONC	CLUSÃO	97
Referência	s Bibliográficas	100
Anexos		108

1. INTRODUÇÃO

A alta competitividade das indústrias tem levado as empresas a buscarem um contínuo refinamento de seus processos de manufatura e, em muitos casos, os resultados obtidos de análises convencionais deixam uma lacuna na descrição destes sistemas complexos (HERNANDEZ-MATIAS *et al.*, 2008). A simulação computacional pode ser utilizada na análise de qualquer sistema para garantir a qualidade e eficiência dos processos estocásticos e complexos que operam em ambientes com recursos limitados (PECEK e KOVACIC, 2011).

Segundo Sargent (2015), os modelos de simulação são usados para uma diversidade de propostas como a concepção de sistemas, o desenvolvimento de políticas operacionais e pesquisas para ampliar o entendimento do sistema. A simulação computacional pode ser definida como a representação virtual de um sistema da vida real por meio de um modelo, tornando possível o estudo de um sistema sem que seja necessário construí-lo na realidade, ou mesmo fazer modificações nesse sistema e estudar os resultados dessas modificações, sem que haja necessidade de alterá-lo previamente (HARREL, GHOSH e BOWDEN, 2004).

Os sistemas de manufatura são constituídos de muitas operações discretas que ocorrem aleatoriamente e de forma não linear fazendo que modelos matemáticos ou outros métodos não sejam práticos (O'KANE, SPENCELEY e TAYLOR, 2000). Entretanto, segundo Chwif e Medina (2015), um modelo de simulação consegue capturar com mais fidelidade essas características, procurando repetir em um computador o comportamento que o sistema apresentaria quando submetido às mesmas condições de contorno.

De acordo com Montevechi *et al.* (2007) a simulação é a importação da realidade para um ambiente controlado, onde seu comportamento pode ser estudado sob diversas condições, sem riscos físicos e/ou altos custos envolvidos. Os principais métodos de simulação utilizados são simulação dinâmica do sistema, SED e SBA, uma vez que estes métodos têm as vantagens de lidar com a incerteza e a variabilidade do sistema (SUMARI *et al.*, 2013).

A simulação a eventos discretos (SED), originalmente desenvolvida na década de 1960 para uso da pesquisa operacional e engenharia industrial, é uma técnica de modelagem computacional que permite a avaliação simultânea de diversos riscos em sistemas que são altamente complexos e com recursos limitados (Day *et al.*, 2015). Este tipo de simulação computacional é apontado como uma das técnicas de pesquisa mais utilizadas devido principalmente à sua versatilidade, flexibilidade e poder de análise (RYAN e HEAVEY, 2006).

Entretanto, de acordo com Dubiel e Tsimhoni (2005), existem certas situações que são difíceis de modelar utilizando a SED, como decisões em tempo real. Segundo os mesmos autores, o modelador deve fazer suposições muito precisas sobre o elemento humano, a fim de adequar o seu comportamento no formato de modelagem da SED.

Para Baines *et al.* (2004), a SED nem sempre consegue captar com fidelidade sistemas que possuam muitas atividades manuais, apresentando resultados pouco confiáveis quando comparado aos resultados reais. Bernhardt e Schilling (1997) acreditam que esta diferença entre o desempenho predito e real se deve principalmente ao fato de modelos de simulação não incorporarem relacionamentos chaves do comportamento humano, como o desempenho dos trabalhadores e os fatores que impactam neste desempenho.

Segundo Joo *et al.* (2013), existe uma recente necessidade de observar, analisar e prever comportamentos humanos por meio do uso de tecnologias de simulação computacional. Entretanto, de acordo com Hughes e Jiang (2010), apesar de diversos estudos reconhecerem a importância do desempenho humano, muitos se concentram inapropriadamente no desempenho técnico ao invés de se concentrar no desempenho dos componentes humanos do sistema.

A grande maioria dos softwares de simulação representa em amplo nível de detalhes o comportamento de máquinas, mas considera os trabalhadores como simples recursos, considerando valores de desempenho determinísticos para suas atividades, resultantes de estudos de tempos e métodos (SIEBERS, 2006). Segundo Baines *et al.* (2005), os projetistas dos sistemas de manufatura têm um conhecimento escasso sobre os fatores que influenciam o desempenho dos trabalhadores, prejudicando assim os resultados de seus projetos. Para estes autores, é preciso representar as pessoas de forma realista, considerando seu comportamento e desempenho, a fim de melhorar a exatidão da simulação.

De acordo com Kasaie e Kelton (2015), a simulação baseada em agentes (SBA) é uma ferramenta poderosa e flexível, utilizada para modelar sistemas complexos compostos por vários componentes que interagem, como os sistemas que envolvem o comportamento humano. Lazarova-Molnar (2013) afirma que a SBA é mais flexível e mais adequada para a simulação de ambientes que envolvem pessoas e seus comportamentos. Os agentes podem ser usados para capturar a precisão, velocidade e variabilidade do desempenho humano, que são fundamentais para a análise de segurança e desempenho do sistema (LEE, RAVINDER e JOHNSTON, 2005).

Siebers e Onggo (2014) acreditam que a SBA tem o potencial para se tornar o paradigma predominante para modelar o comportamento humano. A SBA auxilia no melhor entendimento

de sistemas do mundo real, onde a representação ou modelagem de pessoas é importante e os indivíduos têm comportamentos autônomos (SIEBERS *et al.*,2010). Para Chan, Son e Macal (2010) a SBA é diferente da clássica SED por causa da natureza de seus agentes que são proativos, autônomos e inteligentes.

Entretanto, Dubiel e Tsimhoni (2005) afirmam que, por meio da combinação da SED e da SBA, é possível modelar aspectos do sistema que não poderiam ser simuladas por qualquer um destes métodos de simulação separadamente. Segundo North e Macal (2007), a SBA pode ser associada a técnicas altamente bem sucedidas, como a simulação de eventos discretos, para produzir uma nova maneira de descobrir soluções estratégicas, táticas e operacionais de negócios.

Dentro deste contexto, este trabalho tem como questão de pesquisa: é possível representar o elemento humano em projetos de simulação, por meio da combinação da SBA com a SED, de forma que os resultados simulados fiquem mais próximos do real?

1.1 Objetivos geral e específico

Portanto, a fim de responder a esta questão de pesquisa, o objetivo geral deste trabalho é verificar se a simulação híbrida (SBA e SED) permite representar de forma mais realista o elemento humano em projetos de simulação, tornando os resultados do modelo mais próximos do sistema produtivo real. Assim sendo, os operadores serão representados por agentes influenciados por um fator que afete o seu desempenho, neste caso, o ritmo circadiano.

Para tanto, três projetos de simulação híbrida de diferentes sistemas produtivos serão desenvolvidos e seus resultados simulados serão comparados estatisticamente com os resultados reais destes sistemas. Cabe dizer que estes sistemas possuem características semelhantes como mão de obra manual intensiva e baixa variabilidade dos tempos de processo de cada operador. Os resultados dos modelos híbridos serão comparados ainda com os resultados dos modelos SED destes sistemas a fim de verificar qual resultado mais se aproxima dos sistemas reais.

Como objetivos específicos, tem-se:

- Realizar uma revisão sistemática, a fim de analisar como a representação do fator humano vem sendo abordada em projetos de SBA e de SED;
- Definir uma estrutura que permita descrever os passos a serem seguidos na execução de um projeto de simulação híbrida (SBA e SED) de um sistema produtivo;

- Combinar a SBA com a SED para construir o modelo computacional de dois sistemas
 produtivos manuais e representar os operadores destes sistemas como agentes
 influenciados pelo ritmo circadiano, a fim de tornar a representação do elemento
 humano mais realista.
- Verificar qual tipo de simulação mais se aproxima do resultado real por meio da comparação estatística dos resultados dos modelos híbridos com os resultados de modelos de SED dos mesmos sistemas.

1.2 Justificativa

Por meio de projetos de simulação é possível atender a propostas como concepção, desenvolvimento e maior compreensão de um sistema. Torna-se importante, portanto, representar o mais fielmente possível todos os elementos de um processo produtivo real no ambiente virtual dos modelos computacionais a fim de aumentar a confiabilidade dos resultados gerados por eles.

É indiscutível o fato de que o elemento humano tem grande influência nos resultados de um processo produtivo, principalmente em casos onde existe uma mão de obra manual intensiva. Assim sendo, representar o elemento humano em projetos de simulação deve ser uma das preocupações de modeladores a fim tornar a representação virtual o mais próximo possível do real. Entretanto, existe uma lacuna na literatura sobre como melhor representar este elemento humano em projetos de simulação, principalmente pelo fato da dificuldade de se encontrar equações ou modelos de desempenho que representem bem a complexidade do comportamento humano.

Espera-se, portanto, como contribuição científica desta pesquisa, verificar se é possível representar o elemento humano em um sistema produtivo o mais próximo possível do real por meio da simulação híbrida (SBA e SED), com a inserção do ritmo circadiano que é um dos fatores que afeta o desempenho humano.

Com a finalidade de comprovar a relevância do trabalho, bem como sua contribuição científica e tecnológica para o campo de pesquisa, uma análise bibliométrica foi realizada, focando os três principais temas desta tese: a SBA, SED e o ritmo circadiano. Esta análise foi feita em abril de 2017 e as bases de dados utilizadas para esta busca foram *Scopus*, *Emerald*, *ISI Web of knowledge*, *Taylor & Fancis* e *Scielo*.

Primeiramente, buscou-se pelos termos de forma individual em títulos, resumos e palavras chave a fim de verificar a quantidade de artigos relacionados aos mesmos na literatura e o resultado desta primeira busca encontra-se na Tabela 1.1. É possível perceber que a SED apresenta um número muito maior de publicações quando comparada a SBA, isso pode estar relacionado ao fato da simulação baseada em agente ser uma técnica relativamente recente.

Base de dados Discrete Event Simulation Agent Based Simulation Circadian Rhythm Scopus 13499 4544 97500 Emerald 380 107 55 ISI Web of Knowledge 5948 2629 18386 419 Taylor & Francis 1624 6843 Scielo 45 11 149

Tabela 1.1 – Análise bibliométrica dos termos de forma individual

Em seguida, realizou-se a busca nas mesmas bases de dados apresentadas agora para os termos de forma conjunta, a fim de verificar se existe algum trabalho que tenha considerado estes três termos no desenvolvimento da pesquisa. Buscou-se pela combinação dos termos tanto em títulos, resumos e palavras chaves, quanto em todo o corpo do artigo e os resultados encontramse na Tabela 1.2. Pode-se verificar que não existe nenhum trabalho na literatura que aborde os três termos em conjunto, conferindo assim o ineditismo da tese.

Base de dados	Discrete Event Simulation + Agent Based Simulation + Circadian Rhythm	Discrete Event Simulation + Agent Based Simulation + Circadian Rhythm	
Scopus	(Título, resumo, palavras chave) 0	(Todos os campos)	
Emerald	0	0	
ISI Web of Knowledge	0	0	
Taylor & Francis	0	0	
Scielo	0	0	

Tabela 1.2 – Análise bibliométrica dos termos de forma combinada

1.3 Estrutura do Trabalho

Após a presente introdução, uma revisão bibliográfica será apresentada no Capítulo 2, a fim de ilustrar os temas: simulação computacional, SED, SBA, representação do fator humano na simulação computacional e revisão sistemática de literatura. Em seguida, no Capítulo 3, serão apresentados tópicos sobre o método de pesquisa escolhido para o desenvolvimento deste trabalho, a Modelagem e Simulação. No Capítulo 4, tem-se a ilustração de como este método foi aplicado para se atingir os objetivos da pesquisa. Por fim, no Capítulo 5 tem-se a conclusão desta tese, seguida pelas referências dos autores citados no decorrer do trabalho.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEORICA

2.1 Simulação Computacional

Segundo Hernandez-Matias *et al.* (2008), a alta competitividade das indústrias faz com que as empresas busquem um contínuo refinamento de seus processos de manufatura e, em muitos casos, os resultados obtidos por análises convencionais deixam uma lacuna na descrição destes sistemas complexos. O principal desafio de gestores em ambientes empresariais é tomar decisões para que o sistema opere da melhor forma possível e a utilização de modelos de simulação permite compreender melhor o ambiente em questão, identificar problemas, formular estratégias e oportunidades e ainda apoiar e sistematizar o processo de tomada de decisões (MORABITO e PUREZA, 2010).

Para Railsback e Grimm (2012), é importante entender como as coisas funcionam, explicar padrões observados e prever o comportamento do sistema em resposta a algumas mudanças. Ainda segundo os mesmos autores, os sistemas reais geralmente são muito complexos ou desenvolvem-se muito vagarosamente para serem analisados realizando experimentos diretamente no sistema real. De acordo com Baines e Kay (2002), a modelagem computacional de sistemas de produção é uma valiosa ajuda para a tomada de decisão estratégica e tática no processo de concepção, uma vez que tais modelos são representações abstratas da realidade e ajudam a melhorar a compreensão e previsões do desempenho de um sistema de fabricação.

O objetivo deste capítulo é apresentar uma revisão bibliográfica sobre a simulação computacional a fim de ilustrar o conceito, bem como a aplicação e as vantagens e desvantagens desta poderosa ferramenta.

2.1.1 Introdução à Simulação Computacional

Os sistemas de manufatura são constituídos de diversas operações discretas que ocorrem de forma aleatória e não linear fazendo que modelos matemáticos ou outros métodos não sejam práticos (O'KANE, SPENCELEY e TAYLOR, 2000). Entretanto, segundo Chwif e Medina (2015), modelos de simulação conseguem capturar com mais fidelidade essas características, procurando repetir em um computador o mesmo comportamento que o sistema apresentaria quando submetido às mesmas condições de contorno.

A simulação computacional, que vem sendo muito utilizada em melhoria de processos empresariais desde o início de 1990, implica na construção de modelos computacionais que

imitam um processo, de modo a explorar cenários e projetos alternativos (MELÃO e PIDD, 2006). Para Pooyandeh e Marceau (2014), enquanto o desenvolvimento de cenários no sistema real tem sido praticado por anos, somente nas duas últimas décadas que o uso de modelos de computador para criar e avaliar estes cenários se tornou possível.

Baines *et al.* (2004) afirmam que a simulação é uma técnica de construção de um modelo que descreve o comportamento de um sistema de mundo real, e este modelo pode então ser utilizado para testar como o desempenho de um sistema se altera ao longo de diferentes condições de funcionamento. Segundo Kozine (2006), esta ferramenta consegue prever como um sistema novo, ou já existente, irá se comportar, sendo mais aplicável e acessível do que os métodos puramente matemáticos.

Harrel, Ghosh e Bowden (2004) definem a simulação computacional como a representação virtual de um sistema real por meio de um modelo, sendo possível estudar um sistema sem que seja necessário construí-lo na realidade. A simulação permite importar a realidade para um ambiente controlado, onde seu comportamento pode ser estudado sob diversas condições, sem riscos físicos e/ou altos custos envolvidos (MONTEVECHI *et al.*, 2007).

A simulação geralmente implica a representação de certas características-chave ou comportamentos de um sistema, utilizando variação aleatória para capturar a incerteza e para mostrar os eventuais efeitos reais de condições alternativas e dos cursos de ação (XIE e PENG, 2012). Tão importante quanto entender o que é a simulação, é entender os seus limites. Diferentemente dos autores anteriormente citados, Chwif e Medina (2015) preocuparam-se em esclarecer o que a simulação não é:

- Uma bola de cristal: a simulação não pode prever o futuro. O que ela pode prever com certo grau de confiança é o comportamento de um sistema baseado em dados de entradas específicos e respeitado um conjunto de premissas.
- Um modelo matemático: embora se utilizem fórmulas matemáticas em um modelo de simulação, não existe uma expressão analítica fechada ou um conjunto de equações que fornecem resultados sobre o comportamento do sistema a partir de uma forma analítica direta.
- Uma ferramenta estritamente de otimização: a simulação é uma ferramenta de análise de cenários. Esta pode ser combinada com algoritmos de otimização, mas a simulação por si só não é uma ferramenta de otimização capaz de identificar uma solução ótima.

- Substituta do pensamento inteligente: a simulação não pode substituir o ser humano no processo de tomada de decisão.
- Uma técnica de último recurso: a simulação era considerada uma técnica de último recurso, que deveria ser utilizada quando todas as técnicas possíveis falhassem.
- Uma panaceia que irá solucionar todos os problemas: a simulação possui uma classe de problemas bem específicos, nos quais se adapta muito bem.

2.1.2 Áreas de aplicação da Simulação Computacional

Para Baldwin, Eldabi e Paul (2005) houve um aumento significativo do uso da simulação e este crescimento se dá por três razões, sendo elas: a crescente competição entre empresas, levando a um aumento da complexidade do sistema que só pode ser analisada por simulação, a redução em larga escala do custo de hardwares utilizados para executar modelos de simulação e a introdução da animação que resultou em uma maior compreensão da simulação por não especialistas, como engenheiros e gerentes da manufatura.

A simulação pode ser utilizada na análise de qualquer sistema para garantir a qualidade e eficiência dos processos estocásticos e complexos que operam em ambientes de recursos limitados (PECEK e KOVACIC, 2011). Para Pennathur *et al.* (2010), simulações de objetos e ambientes podem variar muito desde representações físicas realistas até *displays* gerados por computador e programas de *software* que incluem representações matemáticas de processos e eventos.

De acordo com Hughes e Jiang (2010), esta tecnologia foi inicialmente usada para melhorar o desempenho e utilização de diferentes processos e o atual aumento da competitividade e custos tem levado a uma maior consciência do valor desta ferramenta na avaliação de complexidade do sistema. Ainda segundo os autores, a simulação tem sido utilizada por pesquisadores para focar em princípios fundamentais de modelagem, representar com precisão sistemas e avaliar projetos em ambientes complexos.

Sakurada e Miyake (2010) afirmam que a simulação é uma técnica utilizada tanto para projeto e avaliação de novos sistemas, como para reconfiguração física ou mudanças no controle e/ou regras de operação de sistemas existentes A simulação computacional é uma das ferramentas mais importantes para estudar problemas envolvidos em sistemas complexos (ZHU *et al.*, 2015).

Modelos de simulação são usados para uma diversidade de propostas como a concepção de sistemas, no desenvolvimento das políticas operacionais do sistema e pesquisas para ampliar o

entendimento do sistema (SARGENT, 2015). Para Kovacic e Pecek (2007), as simulações são cada vez mais aplicadas a processos imprevisíveis, processos estes em que as pessoas desempenham o papel principal como em áreas de saúde, a indústria de serviços, modelagem de tráfego, militar e muitas outras.

Na última década, tem-se testemunhado avanços rápidos no domínio de problemas de sistemas complexos em estudo, como simulações sociais em grande escala, simulações de rede de trabalho e especialmente simulações de cenários militares complexos tem aumentado dramaticamente (ZHU *et al.*, 2015). De acordo com Pennathur *et al.* (2010), simulações computacionais são usadas regularmente em ambientes de transporte, manufatura e serviços para avaliar e melhorar as operações do sistema.

2.1.3 Vantagens da Simulação

Para Pecek e Kovacic (2011), os benefícios resultantes de um investimento em metodologias e ferramentas de simulação são tangíveis e intangíveis, como por exemplo, redução da quantidade de tempo necessária para os cálculos manuais, diminuição na quantidade de tempo necessário para analisar desempenho e melhoria da qualidade das soluções. Os mesmos autores afirmam que a simulação fornece ainda benefícios para atividades de processos de negócios como qualidade, tempo, redução de custos, inovações, atendimento ao cliente, ou performance de produtos que criam rentabilidade em longo prazo para a organização.

Os modelos de simulação são normalmente utilizados para proceder a uma análise comparativa dos projetos de sistemas e a compreensão e previsões que fornecidas pelos modelos são uma ajuda significativa para tomadas de decisão de engenheiros e gerentes (BAINES e KAY, 2002). A simulação ajuda os usuários a realizar análise "e-se" para identificar e mapear etapas sem valor agregado, custos e desempenho do processo (análise de gargalos), desenvolver modelos "como é" e "como deve ser" de processos, além de predizer características que não podem ser medidos diretamente e prever dados econômicos e de desempenho que de outro modo seriam muitos dispendiosos ou impossíveis de adquirir (KOVACIC e PECEK, 2007).

Habchi e Berchet (2003) destacam algumas vantagens da simulação computacional em sistemas de manufatura, como a habilidade de abordar diretamente medidas de desempenho normalmente usadas em sistema real e o fato de que diferentes opções podem ser consideradas sem experimentações diretas no sistema e projetos alternativos podem ser facilmente avaliados independentemente do sistema real. Já Sandanayake, Oduoza e Proverbs (2008) acreditam que as ferramentas de modelagem e simulação auxiliam a visualizar, analisar e otimizar processos

complexos de produção, dentro de uma quantia razoável de tempo e investimento. Banks *et al.* (2005) apresentam uma lista de vantagens oferecida pela simulação, tais como:

- Auxílio a tomada de decisão, possibilitando testar todos os aspectos de uma proposta de mudança com menor gasto de recursos;
- Desacelerar e acelerar o tempo, sendo possível analisar fenômenos variando a velocidade do tempo de simulação;
- Facilita o entendimento do porquê, uma vez que com a simulação, é possível determinar as respostas das questões reconstruindo a situação;
- Explorar possibilidades: uma vez validado o modelo de simulação, é possível explorar novas políticas, processos operacionais, ou métodos, sem uma experimentação direta no sistema real, o que certamente implicaria em maiores custos;
- Diagnosticar problemas: em processos complexos é impossível considerar todas as interações que ocorrem em um local em dado momento. Já com a simulação é possível avaliar os efeitos das variáveis e suas interações sobre o sistema;
- Identificar restrições como a presença de gargalos na produção causa efeitos indesejados.
- Desenvolver conhecimento, promovendo o entendimento de como o sistema realmente funciona, ao invés de uma informação prescritiva;
- Preparar para mudança, uma vez que respondendo a questões "o que aconteceria se", cria-se uma situação desejável tanto para desenvolvedores de novos sistemas quanto ao re-projeto de sistemas já existentes;
- Treinar da equipe, já que modelos de simulação podem proporcionar excelentes treinamentos quando projetados para tal, sendo uma estratégia mais barata e menos problemática.

2.1.4 Desvantagens

Apesar das inúmeras vantagens oferecidas pela simulação, alguns autores destacam limitações e fragilidades desta ferramenta. Para Ryan e Heavey (2006) apesar da simulação ter grande potencial para auxiliar no entendimento de sistemas, informações valiosas relacionadas à operação do sistema podem ser perdidas em códigos detalhados de simulação entendidos somente por aqueles intimamente envolvidos com a programação.

Para Golmohammadi e Shimshak (2011), o desenvolvimento de modelos de simulação pode ser um processo caro, uma vez que se têm despesas como a compra de *software* de simulação

e uso de especialistas em simulação para auxiliar no processo de modelagem. Além disso, segundo estes autores, a simulação é um processo demorado, demandando etapas como desenvolvimento do modelo, teste e validação, coleta de dados e interpretação dos dados. Law e Kelton (2000) acreditam que modelos de simulação em geral são caros e consomem bastante tempo em seu desenvolvimento.

A construção de modelos computacionais requer treinamento especial e os resultados podem ser de difícil interpretação já que são essencialmente variáveis aleatórias (BANKS *et al.*, 2005). Os mesmos ainda destacam que um projeto de simulação pode tomar muito tempo acarretando em maiores custos e pode ser utilizada inapropriadamente em casos onde o uso de uma solução analítica seria preferível. Já Doloi e Faafari (2002) afirmam que a complexidade de simular um sistema geralmente se torna uma restrição na utilização da simulação para avaliar situações da vida real.

2.1.5 Métodos de Simulação

Um método é uma estrutura utilizada para modelar um sistema do mundo real e este método sugere um tipo de linguagem, um conjunto de termos e condições para construir um modelo (GRIGORYEV, 2012). Segundo Sumari *et al.* (2013), os principais métodos de simulação utilizados são: sistemas dinâmicos (SD), SED (SED) e SBA (SBA), uma vez que estes métodos têm as vantagens de lidar com a incerteza e a variabilidade do sistema. Borshchev e Filippov (2004) complementam afirmando que SD e SED são abordagens tradicionais enquanto a baseada em agentes é relativamente nova. No Quadro 2.1 é possível verificar as características, vantagens, desvantagens e principais softwares destes tipos de simulação.

Quadro 2.1-Características das abordagens de simulação

Sistemas Dinâmicos (SD)		SED	SBA	
Características	-Usado para adquirir maior compreensão do comportamento do sistema em longo prazo -Foco no fluxo do cenário em sistemas - Utilizado principalmente na formulação de políticas -Usado em um nível estratégico	-Usado para ordenar sistemas que têm rede de filas, bem como para comparar e prever cenários -Foco no processo que envolve o uso de fila - Usado principalmente na tomada de decisão e previsão -Usado em um nível operacional / tático -Utiliza abordagem de cima para baixo	-Usado para identificar a interação e operação entre entidades de forma mais realistas e flexível -Foco na interação que ocorre nos sistemas - Usada principalmente na área de negócios -Utiliza abordagem de baixo para cima	
Vantagens	- Auxilia na compreensão de sistemas complexos - Auxilia a identificar fatores relevantes que existem em sistemas complexos -Cenários podem ser modificados a fim de obter diferentes resultados	 Fácil entendimento pelo usário por meio da ajuda de animações e gráficos presentes nos softwares Flexibilidade ilimitada para determinar o comportamento de entidades Mais simples de ser modelado tendo o problema sido definido 	-Capaz de capturar fenômenos emergentes -Flexível -Capaz de descrever o sistema de forma natural	
Desvantagens	Grandes sistemas podem tornar-se muito complexos de entender -Falhas na identificação de problema pode causar falhas na aplicação da abordagem dinâmica do sistema	-Menos eficaz para mostrar o impacto da verdadeira variabilidade -Não é muito adequado para ser utilizado em na análise de modelo relacionado ao comportamento humano	Necessita de altas habilidades em computação para grandes sistemas -Envolve alto custo para comunicação	
Software	- Ex: Vensim/ Stella/iThink: Usado principalmente em dinâmica de sistemas -Não envolve muita programação e utiliza equações	- Ex: ProModel: Usado principalmente em SED -Consiste em animação e gráficos que podem ser modificados pelo usuário	Ex: AnyLogic: -Usado principalmente em SBA, mas também pode ser utilizado em SED e sistemas dinâmicos -Utiliza gráficos para mostrar a interação entre as entidades -Usa programação Java	

Fonte: Adaptado de Sumari et al. (2013)

Segundo Grigoryev (2012), cada método atende a uma extensão particular de nível de abstração, sendo que Sistemas Dinâmicos presumem um alto nível de abstração e é tipicamente utilizado para modelagem estratégica. Já a Modelagem de eventos discretos suporta uma abstração média e médio-baixa, enquanto que no nível intermediário estão modelos baseados em agentes que variam de modelos detalhados, onde os agentes são objetos físicos, a modelos altamente abstratos, onde os agentes são companhias ou governos. É possível verificar os níveis de abstração para cada método na Figura 2.1.

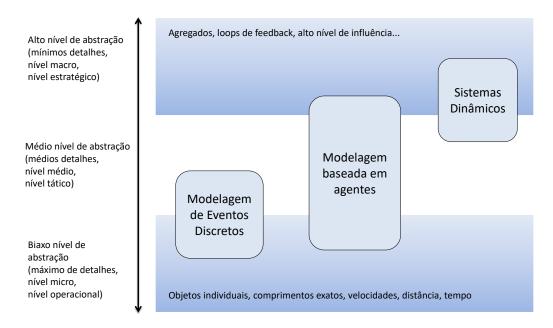


Figura 2.1- Níveis de abstração de cada método de simulação Fonte: Adaptado de Grigoryev (2012)

Cabe ressaltar que dentre os tipos de simulação, apenas a SED e a SBA serão apresentadas nos próximos capítulos da revisão de literatura, uma vez que são estas os tipos de simulação utilizados no desenvolvimento do trabalho. Sendo que a SED será utilizada para modelar o fluxo do processo e a SBA para modelar os operadores do sistema.

2.2 Simulação a Eventos Discretos

Abordagens recentes de processos de fabricação exigem dos sistemas de manufatura uma flexibilidade e capacidade de responder rapidamente a mudanças na demanda por produtos finais, resultando em um desafio para os desenvolvedores de sistemas de manufatura. A SED pode responder a este desafio, projetando e redesenhando sistemas por meio de modelos computacionais que podem ser facilmente adaptados e reavaliados, sem a necessidade de investir tempo e esforço na mudança dos sistemas físicos (BAINES *et al.*, 2003).

O objetivo deste capítulo é apresentar esta ferramenta conhecida como SED, uma vez que esta é um dos métodos de simulação utilizados no desenvolvimento do trabalho. Entretanto, como a ferramenta tem sido bastante difundida na literatura e tem sido o pilar da Pesquisa Operacional na comunidade de simulação de há mais de 40 anos, de acordo com Siebers *et al.* (2010), serão apresentados sucintamente os principais conceitos desta ferramenta, vantagens e desvantagens e ainda exemplos recentes de aplicação da SED em diferentes setores.

2.2.1 Introdução à SED

Segundo Anjomshoae, Hassan e Rani (2014), a SED é uma técnica de simulação que modela o comportamento do sistema ao longo do tempo. Nesta ferramenta, os eventos são a parte atômica do modelo e a ocorrência destes eventos é desencadeada por eventos anteriores ou regras de cronometragem (BEHDANI, 2012). Já as entidades na SED são descritas como objetos passivos e as regras que orientam o sistema estão concentradas em blocos de fluxograma (BORSHCHEV e FILIPPOV, 2004).

Modelos de SED são representações computacionais de processos e eventos que imitam o comportamento de um processo estocástico em sistemas reais (PENNATHUR *et al.*, 2010). Ela está relacionada à modelagem de um sistema, no qual o estado das variáveis de muda instantaneamente em pontos separados no tempo, mudança esta associada diretamente com o início e o fim dos eventos dentro de um sistema (BAINES *et al.*, 2004).

A SED, originalmente desenvolvida na década de 1960 para uso da pesquisa operacional e engenharia industrial, é uma técnica de modelagem computacional que permite a avaliação simultânea de vários riscos concorrentes em sistemas que são altamente complexos e com recursos limitados (DAY *et al.*, 2015). Para Perez *et al.* (2014), a SED envolve a criação de um modelo baseado em uma série de pressupostos matemáticos que ditam como as entidades irão interagir com o sistema.

Segundo Borshchev e Filippov (2004), a SED é uma a abordagem de modelagem baseada no conceito de entidades, recursos e gráficos de blocos que descreve o fluxo de entidade e compartilhamento de recursos. De acordo com os mesmos, as entidades são objetos passivos (que representam as pessoas, peças, documentos, tarefas, mensagens, etc.) que viajam através dos blocos do fluxograma onde eles permanecem em filas, aguardam, são processados, apreendem e liberam recursos, se dividem, se unem, etc.

De acordo com Greasley (2009), a SED está relacionada com a modelagem de sistemas que podem ser representados por uma série de eventos e cada evento é descrito pela simulação de forma individual e move-se de um evento para o outro com o progresso do tempo. Os autores destacam ainda que na SED o sistema é visto como conjunto de uma série de entidades (por exemplo, produtos, pessoas) que têm um número de atributos (por exemplo, tipo de produto, idade) e estas podem consumir o trabalho dos recursos, como por exemplo, pessoas ou máquinas.

Segundo Behdani (2012), neste paradigma de simulação, o sistema possui um estado em qualquer ponto no tempo e a mudança deste estado é desencadeada por eventos discretos. O mesmo autor aponta que a evolução do modelo é regida por um relógio e uma lista de eventos em ordem cronológica, onde a simulação começa com um evento inicial na lista de eventos, procede como um *loop* infinito que executa o evento atual mais iminente (do topo da lista de eventos) e finaliza quando um evento para ou quando a lista estiver vazia.

Kasaie e Kelton (2015) afirmam que SED modela sistemas, tais como redes de filas e atividades, onde as mudanças de estado ocorrem em pontos discretos no tempo e que estas mudanças podem afetar o estado do sistema. Estudos de SED geralmente tornam conhecida a estrutura de um sistema (como as disponibilidades de fluxo do processo e dos recursos) e tentam descobrir como ela se comporta sob condições diferentes, utilizando análise de cenários (GREASLEY, 2009).

Existem diversas ferramentas comerciais que suportam esse estilo de modelagem, sendo alguns de uso geral e outros com objetivos específicos voltados às áreas de: serviço, produção, logística, processos de negócios, *call centers*, etc. (BORSHCHEV e FILIPPOV, 2004). Como exemplos destas ferramentas comerciais utilizadas para a SED têm-se os *softwares* Arena®, AutoMod®, ExtendSim®, Micro Saint Sharp®, Plant Simulation®, Promodel®, SIMUL8®, Anylogic®, entre outros.

2.2.2 Exemplos de Aplicação da SED

A SED normalmente modela processos operacionais, tais como instalações de serviços de manufatura onde são necessárias medidas de desempenho operacionais, tais como os níveis de produção e clientes atendidos (GREASLEY, 2009). Para Dubiel e Tsimhoni (2005), os benefícios da SED estão bem documentados nos setores industrial, militar e acadêmico. Já Chwif *et al.* (2013) afirmam que esta importante ferramenta pode ser utilizada para modelar sistemas de serviço público, sistemas de saúde, sistemas de manufatura, *call centers*, logísticas e muitas outras situações. A seguir, têm-se exemplos de aplicações da SED na literatura em diferentes setores.

a) Ambiente de manufatura

A tecnologia de simulação vem sendo bastante utilizada em situações como a definição de processo, controle de qualidade, redesenho, carga de trabalho, e segurança (HUGHES e JIANG, 2010). Segundo os mesmos autores, estas possibilidades oferecidas pela simulação fazem com que esta seja uma ferramenta bastante aplicável no ambiente de manufatura.

Segundo Baines *et al.* (2004), a SED é um dos auxílios mais utilizados para o projeto de sistemas de manufatura automotivos. Um exemplo de SED aplicado no ambiente de manufatura é o trabalho de Elahi *et al.* (2015), que utilizaram da SED para avaliar como o sistema de *conveyor* pode reordenar a sequência de veículos e assim alterar os tamanhos de lotes que irão para a seção de pintura de uma fábrica da General Motors. Outros exemplos podem ser encontrados em trabalhos como o de Kumar e Sridharan (2007), que utilizaram a simulação para verificar a combinação de regras de sequenciamento, e de Raja e Rao (2007) que aplicaram a simulação para avaliar rotas dentro do fluxo produtivo de uma empresa do setor têxtil.

Já Volsem, Dullaert e Landeghem (2007) otimizaram estratégias de inspeção em sistemas de produção fazendo uso combinado da simulação e da otimização. Potter, Yang e Lalwani (2007) modelaram um processo de produção de aço e Mello (2008) simulou uma linha de produção de chicotes para diagnosticar o estado atual e ainda implementar melhorias.

É possível também encontrar trabalhos presentes na literatura que relacionam a aplicação da SED aliada a filosofia de Produção Enxuta (*Lean Manufacturing*) em ambientes de manufatura. Segundo Womack, Jones e Roos (1990), o sistema *Lean* é um processo disciplinado, orientado para a produção e foca em identificar as principais fontes de desperdícios. A SED é uma ferramenta adicional adequada para enriquecer as análises por mapeamento do fluxo de valor,

ferramenta exclusiva do *Lean manufacturing* (ADAMS *et al.*, 1999; MCDONALD, VAN AKEN E RENTES, 2002).

Donatelli e Harris (2001) afirmam que uma das principais vantagens da simulação é considerar a evolução do tempo, oferecendo percepções que poderiam ser esquecidas se somente o mapeamento *lean* fosse utilizado. De acordo com Oliveira *et al.* (2009), a simulação contribui com o mapeamento *Lean* na medida em que providencia um método para incluir variações nos tempos de processos e setups, quantifica resultados de mapas de estado futuro antes mesmo de serem implantados, examinando assim uma variedade de alternativas e acessando os efeitos de interação de componentes de sistemas.

Como exemplo de aplicação da simulação integrada a filosofia *Lean* tem-se o trabalho de Abdulmalek e Rajgopal (2007) que construíram um mapa do estado atual de um determinado sistema e utilizaram da animação da simulação para mostrar aos diretores da empresa os dados gerados. Eles ainda desenvolveram um projeto de experimentos para encontrar os fatores significativos para a melhoria do processo. Já Sandanayake, Oduoza e Proverbs (2008) utilizaram da simulação para identificar o impacto de direcionadoras chaves da filosofia *Just in time* no desempenho de uma linha de montagem de uma indústria automotiva. Ainda no ambiente *lean*, Torga (2007) realizou uma simulação e otimização de um sistema puxado de manufatura

b) Área da saúde

Segundo Anjomshoae, Hassan e Rani (2014), a simulação tem sido conhecida como uma influente ferramenta de tomada de decisão em diversos setores na área de saúde, incluindo departamento de emergência, estudo do fluxo de pacientes internados e pacientes ambulatoriais. Para estes autores, a simulação computacional auxilia a aplicar vários cenários "e se" na análise de instalações de *healthcare*, a fim de alcançar melhorias sem impor riscos ao atendimento do paciente ou incorrer em custos significativos.

A simulação é um método eficaz para melhorias na área da saúde, uma vez que o modelo computacional pode ser usado para prever resultados de uma mudança de estratégia, ou prever e avaliar uma política alternativa (XIE e PENG, 2012). A simulação computacional tem sido utilizada na área da saúde para modelar operações do departamento de emergência fluxo de pacientes e fluxo de trabalho do cuidador (PENNATHUR *et al.*, 2010).

Segundo Anjomshoae, Hassan e Rani (2014), os modelos de SED são capazes de examinar a eficiência de sistemas atuais de saúde e auxiliar profissionais desta área a implementar

mudanças nestes sistemas. Os mesmos autores realizaram a análise de diversos artigos que fizeram o uso da SED neste setor e concluíram que modelos desenvolvidos para analisar sistemas de administração de saúde são focados principalmente em duas áreas de pesquisa: análise e otimização do fluxo de paciente e alocação de ativos para melhorar a administração do sistema, conforme apresentado na Figura 2.2.

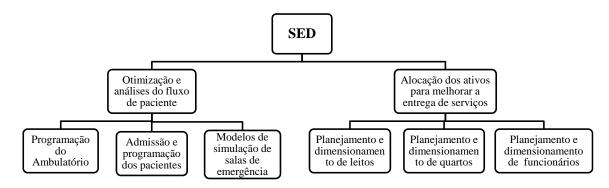


Figura 2.2 - Classificação dos modelos de SED na área da saúde Fonte: Adaptado de Anjomshoae, Hassan e Rani (2014)

Como exemplo de aplicação da simulação na área de saúde, tem-se o trabalho de Joaquim (2005) que utilizou da simulação para prever a ampliação no número de salas de cirurgia e mudanças no fluxo das atividades executadas em um centro cirúrgico de um hospital. Já Ruohonen, Neittaanmäki e Teittinen (2006) utilizaram a SED para analisar o fluxo em um departamento médico de emergência.

Baril, Gascon e Cartier (2014) fizeram uso da SED para modelar as relações e interações entre o fluxo de pacientes, a capacidade de recursos (número de salas de consulta e número de enfermeiros) e as regras de agendamento de consultas, a fim de melhorar o desempenho de uma clínica ortopédica ambulatorial. Ainda no setor de saúde tem-se o trabalho de Day *et al.* (2015) que usaram a SED para prever e testar estratégias que buscam minimizar o número de procedimentos cardíacos adiados devido à indisponibilidade de unidades de cuidados cardíacos intensivos. E tem-se ainda o trabalho de Shi, Peng e Erdem (2014), que desenvolveram um modelo de uma clínica para avaliar o desempenho do sistema, verificando se a clínica faz uso eficiente dos seus recursos e qual o tempo que os pacientes precisam esperar para serem atendidos.

c) Setor logístico

Com o desenvolvimento da teoria e da tecnologia na logística, questões de pesquisa se tornaram mais complexas, e fatores não determinísticos, desconhecidos, nebulosos, com relação de causalidade complexa e de difícil ou impossível resolução pela matemática, fizeram com que a

simulação computacional se tornasse cada vez mais popular na pesquisa científica (ZHENG e LU, 2009).

De acordo com Doloi e Faafari (2002), diversas organizações conseguiram economizar uma significativa quantia de dinheiro e evitar maiores riscos por meio da simulação no setor logístico. A SED pode exercer um importante papel no auxílio no gerenciamento da cadeia de suprimentos, sobretudo por oferecer análises "e-se" e por avaliar quantitativamente benefícios e problemas decorrentes do processo em um ambiente cooperativo (TERZI e CAVALIERI, 2004).

Como exemplo de aplicação no setor logístico, tem-se o trabalho de Bergue (2000) que desenvolveu um projeto de simulação com foco no processo de separação de pedidos do armazém, nos terminais de carga da empresa e na análise de malhas de rotas da mesma. Outro exemplo é o trabalho de Doloi e Faafari (2002) que na tentativa de reduzir custos operacionais e de armazenagem da empresa IBM desenvolveram um projeto de simulação para avaliar diferentes estratégias de execução de fabricação e para identificar os menores custos de políticas de distribuição.

Jayant, Gupta e Garg (2014) utilizaram a SED para modelar a logística reversa de baterias produzidas em uma empresa na índia. Por meio da simulação, os autores puderam avaliar o desempenho da cadeia de suprimentos e entender a relação complexa entre as partes envolvidas nesta cadeia. Ainda dentro da área logística, tem-se o trabalho de Duff, Chong e Tolhurst (2015) que utilizaram da SED para estimar os tempos de viagem e determinar rotas ótimas para os veículos de emergência das bases para os incêndios florestais, tanto dentro quanto fora das estradas.

d) Simulação em setores de serviço

Para Leal (2003), a SED representa graficamente o comportamento das filas de espera, tornando possível o processo de propostas e analises de melhorias e ainda auxilia a estabelecer a sensibilidade de variáveis e parâmetros sob o processo. Este autor utilizou de um projeto de simulação para diagnosticar o processo de atendimento a clientes em uma agência bancária utilizando um conjunto técnicas de mapeamento de processo aliado à simulação computacional.

Greasley (2006) desenvolveu um projeto de simulação em um setor público, a fim de analisar mudanças na implementação de um novo sistema de reporte de acidentes de transito em um setor policial do Reino Unido. Apesar de destacar vantagens da simulação, o autor acredita que o uso desta ferramenta pode exigir um significante esforço em termos de custo, tempo e

habilidade de modelagem. Já Greasley (2003) utilizou uma aplicação da simulação no processo de custódia de prisioneiros, buscando identificar os custos de pessoal envolvidos no processo de prisão e prever as mudanças na taxa de utilização de recursos humanos com um novo projeto de alocação de pessoas.

Outro exemplo de aplicação no setor de serviços é o trabalho desenvolvido por Visintin, Porcelli e Ghini (2014) que utilizaram a SED para auxiliar na concepção do sistema de prestação de serviços de uma das fabricantes de equipamentos da indústria aeroespacial e assim reduzir riscos que os fornecedores enfrentam quando assinam contratos de longo prazo de serviço.

e) Simulação na área de Ensino

No processo de ensino-aprendizagem é necessário cada vez mais colocar as informações de uma forma mais flexível e uso generalizado, além disso, os conteúdos das informações devem permitir assimilação rápida e eficiente (CHRISPIM e WERNECK, 2003). Modelos de simulação podem facilitar o processo de ensino-aprendizagem, trazendo também maior motivação aos alunos em aprender conceitos na área de Engenharia (OLIVEIRA *et al.*, 2009).

Como exemplo de aplicação de simulação na área de ensino tem-se o trabalho de Cardoso (2007) que apresenta uma metodologia aplicada aos alunos utilizando o *software* Preactor® para programar uma linha real de produção. Para os autores, a interface gráfica, os recursos de animação e a facilidade de modelagem destes pacotes de simulação implicaram em uma maior motivação dos alunos em aprender e aplicar esta ferramenta em sistemas estudados no curso.

Silva, Pinto e Subramanian (2007) utilizaram o simulador Arena®, como recurso didático na aplicação de conceitos relacionados aos recursos gargalos e balanceamento do fluxo produtivo. Os autores acreditam que o entendimento destes conceitos pelos alunos não é algo trivial, justificando assim o uso do software como ferramenta de ensino. Já Oliveira *et al.* (2009) propuseram a utilização de modelos de simulação computacional a eventos discretos como um recurso didático para o ensino do mapeamento *Lean* em Engenharia de Produção.

2.2.3 Vantagens

Para Pecek e Kovacic (2011), a SED pode fornecer um mecanismo valioso para avaliar quantitativa e qualitativamente projetos potenciais de processos de negócios. Além disso, segundo estes autores, a simulação pode facilitar a experimentação e estudo de múltiplas perspectivas das organizações, contribuindo assim para uma visão holística das empresas e ainda aumentar a qualidade das decisões de mudanças. Além de contribuir na otimização de recursos em busca de melhorias na produtividade e qualidade de produtos e serviços, a

simulação a ventos discretos permite testar alterações em diferentes cenários, auxiliando assim na compreensão do que estas alterações irão provocar nos processos existentes (BOEIRA, 2008).

De acordo com Greasley (2009) a SED apresenta uma grande vantagem que é modelar o movimento de itens individualmente e permitindo assim a coleta de estatísticas sobre os itens individuais, tais como clientes ou produtos que fluem através do sistema. Já Behdani (2012) acredita que o principal ponto forte da SED é a sua capacidade para modelar entidades distintas, com características heterogêneas.

2.2.4 Desvantagens

Segundo Greasley (2009), a SED tende a ser bastante complexa quando o processo é modelado em detalhes. Para o autor, o nível de detalhe em SED é um fator crítico na construção do modelo, uma vez que um modelo com muito detalhe é susceptível a levar um longo tempo para construir e pode ser menos confiável. Para Hao e Shen (2008) em um ambiente de simulação discreta é muito difícil implementar controles dinâmicos sobre componentes de simulação, especialmente objetos passivos gerados e encaminhados pelo mecanismo de simulação, tais como produtos e veículos.

Já Behdani (2012) afirma que a SED é um paradigma adequado para modelar os detalhes de componentes físicos de um sistema complexo, mas não é de sua natureza considerar entidades sociais e a complexidade de nível social em cadeias de abastecimento. Dubiel e Tsimhoni (2005) acreditam que qualquer modelo que exige a livre circulação de entidades ou um padrão de movimento muito detalhado não é facilmente simulado com SED. Os autores listam três limitações da SED:

- Generalidade de movimento e de função das entidades no mundo da simulação;
- Não capacidade de uma entidade para tomar decisões em incrementos de tempo muito pequenos;
- O processamento de fluxo de entidades é feito em pontos de decisão definidos pelo usuário e não é autônomo.

2.3 Simulação Baseada em Agentes

A SBA é um novo paradigma de modelagem e um dos mais interessantes desenvolvimentos práticos desde a invenção de bases de dados relacionais (MACAL e NORTH, 2005). A SBA tem sido empregada desde meados da década de 1990 para resolver uma variedade de problemas de negócios e tecnologia, como por exemplo, otimização da cadeia de suprimentos e logística, modelagem do comportamento do consumidor, os efeitos de rede sociais, gestão de força de trabalho e gestão de portfólios (WU *et al.*, 2010)

Neste capítulo serão apresentados os principais conceitos deste tipo recente de simulação, bem como exemplos de aplicação na literatura em diversas áreas, os principais softwares utilizados na SBA e, por fim, vantagens e desvantagens apontadas por alguns pesquisadores.

2.3.1 Introdução a SBA

Kasaie e Kelton (2015) afirmam que a SBA (*Agent Based Simulation*) é uma técnica relativamente nova de simulação que está crescendo em popularidade e em número de aplicações em diversos campos. Segundo Chan, Son e Macal (2010), a SBA tem se tornado uma ferramenta bastante conhecida e esta popularidade é impulsionada por sua capacidade de lidar com a crescente complexidade dos sistemas do mundo real, que muitas vezes contêm um grande número de interação de agentes que são autônomos, orientados a meta e adaptáveis.

De acordo com Siebers *et al.* (2010), a chegada da SBA se deu no início de 1990 e prometeu oferecer algo novo à comunidade de simulação computacional. A SBA tem se tornado um tema altamente pesquisado na área de simulação ao longo da última década e desde o ano 2000 várias conferências como *Autonomos Agents and Multiagent Systems* - AAMAS, *Winter Simulation Conference*-WSC, *The Society for Modeling and Simulation* - SCS, inseriram em suas estruturas áreas específicas com foco nesta poderosa abordagem de simulação (DUBIEL e TSIMHONI, 2005).

Para Swinerd e McNaught (2012), a SBA vem cada vez mais sendo encontrada em trabalhos da Pesquisa Operacional e estes trabalhos, em grande parte, são impulsionados pela popularidade da SBA entre os modeladores de sistemas sociais. Já Siebers e Onggo (2014) acreditam que a SBA ainda está lutando para se tornar um dos principais métodos de simulação em Pesquisa Operacional (OR), apesar da sua utilidade geralmente ser aceita quando se trata de representar o comportamento humano em sistemas centrados em humanos.

Siebers *et al.* (2010) afirmam que a SBA não veio para substituir técnicas já consagradas, nem vai responder mais rápido, melhor e com maior robustez todas as questões. Para os autores, ela

é uma abordagem altamente flexível que pode responder melhor um determinado conjunto de questões. Já para Sakurada e Miyake (2010), a SBA é uma ferramenta promissora para dar suporte a tomadas de decisão em sistemas complexos onde as entidades desempenham um papel mais significativo no sistema global.

Segundo Chan, Son e Macal (2010), a definição precisa da SBA varia entre as áreas e até dentro da mesma área, mas a filosofia e os usos do SBA são semelhantes: simular interações de objetos autônomos (chamados agentes) para identificar, explicar, gerar e projetar comportamentos emergentes. Para Bouanan, Zacharewicz e Vallespir (2016), a SBA apresenta processos de nível micro que afetam os resultados no nível macro.

Tan, Hu e Lin (2015) acreditam que o princípio básico da modelagem baseada em agentes é criar fenômeno emergente, simulando o comportamento a nível individual e esta abordagem de modelagem tem sido amplamente utilizada em muitas áreas de análise comportamental. A SBA quebra o modo tradicional de estudo *top-down* (de cima para baixo), uma vez que ela começa na unidade básica do modelo para realizar interações independentes e imitar o comportamento dos sistemas complexos através da comunicação eficaz entre os agentes (DONG, LIU e LU, 2012).

Na SBA, o modelador define o comportamento a nível individual e o comportamento global emerge como resultado de muitos (dezenas, centenas, milhares, milhões) indivíduos, cada um seguindo suas próprias regras de comportamento, vivendo juntos em algum ambiente e se comunicando uns com os outros e com o ambiente (BORSHCHEV e FILIPPOV, 2004). Por meio de modelos de SBA é possível ver como o sistema é afetado pelos indivíduos e ao mesmo tempo como os indivíduos são afetados pelo sistema (RAILSBACK e GRIMM, 2012).

Diferentemente da maioria dos modelos matemáticos, modelos baseados em agentes podem incluir agentes que são heterogêneos em suas características e habilidades, podem modelar situações que estão longe do equilíbrio e podem lidar diretamente com as consequências de interações entre agentes (GILBERT, 2008). Modelos baseados em agentes são definidos em termos de agentes que possuem um conjunto de propriedades e podem interagir com outros agentes por meio de regras simples e estas interações ainda podem influenciar no comportamento de cada agente (LAZAROVA-MOLNAR, 2013).

2.3.2 Definição de Agente

Para melhor compreender o conceito de SBA, é preciso entender o que é um agente, bem como suas principais características. Para Macal e North (2005), não existe um consenso universal

sobre a definição precisa do termo "agente", mas as definições na literatura tendem a concordar em mais pontos do que discordar. Já Behdani (2012) acredita que na tentativa de descrever um "agente", elemento central da SBA, uma vasta gama de propriedades tem sido discutida na literatura.

Macal (2016) acredita que é improvável que uma única definição de SBA seja aceita universalmente. Entretanto, a fim de esclarecer sobre o assunto, o autor propôs quatro definições alternativas de agente, crescentes em complexidades e baseadas em aplicações presentes na literatura. Os agentes foram classificados em: individual, autônomo, interativo e adaptativo e esta classificação foi baseada nas suas características de individualidade, comportamento, interações e adaptabilidade, conforme apresentado no Quadro 2.2.

	Individualidade	Comportamento	Interações	Adaptabilidade
Individual	Agentes heterogêneos individuais ¹	Prescrito Roteirizado ²	Limitado	Nenhuma
Autônomo	Agentes heterogêneos individuais ¹	Autônomo, dinâmico ³	Limitado	Nenhuma
Interativo	Agentes heterogêneos individuais ¹	Autônomo, dinâmico ³	Entre os agentes e com o ambiente ⁴	Nenhuma
Adaptativo	Agentes heterogêneos individuais ¹	Autônomo, dinâmico ³	Entre os agentes e com o ambiente	Agentes mudam comportamento durante simulação ⁵

Quadro 2.2: Classificação dos agentes

Chan, Son e Macal (2010) afirmam que os agentes são objetos de computador programados para executar ações pré-definidas e agem com base em suas próprias estratégias, cooperando ou competindo uns com os outros, de acordo com certas regras ou acordos mútuos. Para os mesmos autores, a complexidade comportamental de um agente é bastante flexível e varia de

¹Os agentes na população têm um conjunto de características diversas.

² O comportamento do agente é fornecido externamente e não baseado em eventos internos durante a simulação.

³O comportamento do agente é interno com base no estado atual do agente.

⁴ Os comportamentos dos agentes são baseados nos estados e comportamentos observados de outros agentes e no estado do ambiente.

⁵ Os agentes mudam comportamentos durante a simulação, os agentes aprendem, e / ou as populações ajustam sua estrutura

simples decisões binárias (sim ou não) até um comportamento humano complicado ou inteligência.

De acordo com Madejski (2010), existem duas abordagens diferentes para concepção do agente: a abordagem de decomposição física e a de decomposição funcional. Na abordagem de decomposição física, agentes representam entidades físicas, como trabalhadores, máquinas, ferramentas, produtos, etc. Já na abordagem de decomposição funcional, não há nenhuma relação entre agentes e entidades físicas, mas os agentes são atribuídos a algumas funções como a distribuição de produtos, gerenciamento de transportes, aquisição de ordens, programação da produção, manuseio de materiais, etc.

Dong, Liu e Lu (2012) afirmam que o agente é uma unidade do modelo que tem comportamento, memória, temporização, contatos, etc. e eles podem representar pessoas, empresas, projetos, ativos, veículos, cidades, animais, navios, produtos, entre outros. Os agentes podem ser organismos, humanos, negócios, instituições e qualquer outra entidade que possui certo objetivo (RAILSBACK e GRIMM, 2012).

Para Leitão (2009) nos campos de automação e manufatura, um agente pode representar recursos físicos (máquinas, robôs, veículos autoguiados e produtos) e objetos lógicos (programações e pedidos). Os agentes podem ser usados para representar os componentes físicos da área de produção, tais como peças de máquinas, ferramentas, e até mesmo seres humanos sendo que cada agente é responsável pela coleta de informações, armazenamento de dados e tomadas de decisão para o componente de chão de fábrica correspondente (WANG e USHER, 2002).

2.3.3 Multi Agentes

Um sistema multi agente pode ser definido como um conjunto de agentes que representam os objetos de um sistema capazes de interagir para alcançar seus objetivos individuais quando eles não têm conhecimento e/ou habilidade suficiente para alcançar individualmente os seus objetivos (LEITÃO, 2009). O sistema multi agente consiste em um modelo de agentes autônomos no qual múltiplos agentes podem identificar mudanças ambientais e adaptar-se ao novo ambiente e cada agente interage tanto com o ambiente em mudança quanto com outros agentes (KIM e KIM, 2010).

Assim como nos sistemas de autômatos celulares, os sistemas multi agentes são classificados como abordagem "bottom-up" (de baixo para cima), uma vez que descrevem sistemas complexos por meio de interações locais (EMRICH, SUSLOV e JUDEX, 2007). Ainda

segundo os autores, os modelos multi agentes têm a capacidade de representar como comportamentos complexos e estruturas do sistema mudam ou surgem ao longo do tempo a partir do resultado de um conjunto de regras para as entidades (ou agentes).

De acordo com Monostori, Váncza e Kumara (2006), o sistema multi agente (*Multi-agent systems*) é formado por uma rede de agentes computacionais que interagem e tipicamente se comunicam uns com os outros. Para estes autores, em um sistema multi-agente, as decisões e ações dos diversos agentes devem necessariamente interagir e esta interação ocorre para resolver os problemas que estão além dos limites da competência individuais dos agentes.

Leitão (2009) afirma que nos sistemas multi-agentes, cada agente tem uma visão parcial do sistema e, portanto, precisa ser capaz de se comunicar para atingir um objetivo pré-definido ou resolver um problema e ser capaz ainda de compreender uns aos outros, usando uma linguagem de comunicação adequada. Segundo o mesmo autor, em cenários voláteis e dinâmicos, onde é difícil prever eventos futuros, os agentes devem aprender a adaptar o seu comportamento a esses ambientes dinâmicos, melhorando o seu desempenho.

2.3.4 Softwares utilizados na SBA

Bouanan, Zacharewicz e Vallespir (2016) afirmam que atualmente, os modelos baseados em agentes são principalmente implementados como programas de computador orientados a objeto. Para Dubiel e Tsimhoni (2005) existem vários pacotes de *softwares* que podem ser usados para construir modelos baseados em agentes, como por exemplo, AnyLogic®, Êxodus®, RePast® e Swarm®. Para os autores, cada um destes pacotes é especializado e projetado para produzir um tipo de modelo específico, como os modelos com um grande número de indivíduos (Anylogic® ou Swarm®) ou modelos que observam o comportamento dos indivíduos em situações de emergência (pacotes Êxodus®). Mas somente o software Anylogic combina os três tipos de métodos de simulação: sistemas dinâmicos, SED e SBA (MERKURYEVA e BOLSHAKOVS, 2010).

Siebers e Onggo (2014) afirmam que o simulador mais avançado é o Anylogic®, software comercial que suporta o projeto do modelo gráfico de todos os principais paradigmas de simulação (SD, SED e SBA), mas necessita que o modelador tenha conhecimento da linguagem de programação Java. Os autores apresentam ainda o software Repast Simphony® (um sistema de modelagem baseada em Java) e o NetLogo® que, segundo os autores, tem a vantagem de ser de fácil aprendizagem, uma vez que utiliza uma linguagem de programação simples baseada em Logo.

Segundo Devillers *et al.* (2010), o desenvolvimento de modelos de SBA pode ser facilitado por meio da utilização de ferramentas de modelagem, uma vez que elas podem fornecer modelos confiáveis para a concepção, implementação e / ou visualização dos modelos. Os mesmos autores fizeram uma lista dos principais *softwares* utilizados na SBA, bem como a linguagem utilizada nestes softwares e qual deve ser o nível de habilidade do modelador em programação, esta lista está presente no Quadro 2.3.

Quadro 2.3 - Principais softwares utilizados na SBA

Toolkits	Linguagem de programação	Habilidade de programação	
ABLE	Java	Alta	
AgentBuilder	Java	Média	
AgentSheets	Específica	Baixa	
Aglobe	Java	Alta	
AndroMeta	C++	Alta	
AnyLogic	Java	Baixa	
Ascape	Java	Média	
Brahms	Específica	Alta	
Breve	Python	Alta	
Cormas	SmallTalk	Baixa	
Cougaar	Java	Alta	
Jade	Java	Média	
JAS	Java	Alta	
JASA	Java	Alta	
MadKit	Java/Python	Média	
Mason	Java	Alta	
Mobidyc	SmallTalk	Baixa	
Moduleco	Java	Alta	
NetLogo	Específica	Alta	
Omar	Java	Alta	
Repast	Java	Média	
SeSam	Específica	Média	
Swarm	Java	Alta	

Fonte: Adaptado de Devillers et al. (2010)

2.3.5 Exemplos de Aplicação da SBA

Para Kasaie e Kelton (2015), os modelos de SBA têm sido utilizados em diferentes disciplinas como inteligência artificial, ciência da complexidade, teoria dos jogos, etc. A SBA tem sido utilizada para resolver uma variedade de problemas como: otimização da cadeia de suprimentos e logística, modelagem do comportamento do consumidor, efeitos de rede sociais, gestão de força de trabalho e gestão de portfólios (WU *et al.*, 2010). Macal e North (2005) destacam que este tipo de simulação está ligado a muitos outros campos, incluindo ciência da complexidade, ciência de sistemas, dinâmica de sistemas, informática, ciências de gestão, as ciências sociais em geral, e modelagem tradicional e simulação.

Segundo Dubiel e Tsimhoni (2005), esta abordagem de simulação tem sido usada para modelar diversas situações como a evolução social, a segregação, a propagação da doença, e a eficácia da propaganda. A SBA tem uma grande diversidade de aplicações como modelagem do comportamento do agente no mercado de ações e nas cadeias de suprimento, previsão de propagação de epidemias e da ameaça de bio-guerra, modelagem comportamento do consumidor (MACAL e NORTH, 2005).

Já Leitão (2009) afirma que a SBA é aplicada em áreas como o comércio eletrônico, e-business, controle de tráfego aéreo, controle de processos e de telecomunicações, além de manufatura. De acordo com Chan, Son e Macal (2010) a SBA tem sido amplamente utilizado em vários campos, incluindo militares, biologia, ciências sociais, economia e negócios. Entretanto, para os mesmos autores, a comunidade de usuários de SBA tem crescido muito e as pesquisas deste tipo de abordagem têm incorporado ideias destes e de muitos outros campos, tornando-a uma ciência multidisciplinar que integra ciências computacionais, cognitivas e sociais e simulação.

Macal e North (2005) listaram possibilidades de aplicação da SBA em diferentes áreas e estas opções encontraram-se no Quadro 2.4. Irá se aproveitar das áreas citadas por estes autores para classificar e apresentar alguns exemplos de aplicações presentes na literatura da SBA relacionados a algumas destas áreas.

Quadro 2.4 - Áreas de aplicação da SBA

Negócios e Organizações Sociedade e Cultura Manufatura Civilizações antigas Mercados de consumo Desobediência civil Cadeia de Suprimentos Terrorismo Seguro Determinantes sociais Economia Redes de Organizações Mercados financeiros artificiais Militares Comando e Controle Redes de negócio Biologia Infraestrutura Ecologia Mercados de energia elétrica Comportamento do grupo de animais Economia do hidrogénio Comportamento celular Transporte de Multidões População Comportamento molecular subcelular O movimento humano

Fonte: Adaptado de Macal e North (2005)

a) Negócios e Organizações

Modelos de Evacuação

Segundo Lazarova-Molnar (2013), a SBA tem sido aplicada com sucesso em diversos setores relacionados à gestão como: gestão da cadeia de suprimentos, gestão de crises, gerenciamento de ameaças na distribuição sistemas de água, gestão da área de saúde, etc. Para este autor, a

SBA é adequada para estes setores, pois cada um deles apresenta um alto grau de incerteza que a SBA tem flexibilidade para representar com precisão.

A modelagem baseada em agente é especialmente vantajosa no domínio do mercado consumidor, pois permite alavancar todos os dados individuais obtidos pelo centro de relacionamento a clientes (GARIFULLIN, BORSHCHEV e POPKOV, 2007). Para os autores, nos ambientes de mercado altamente dinâmicos, competitivos e complexos, a escolha do consumidor depende essencialmente uma série de características individuais, rede de contatos e interações e influências externas que podem ser melhor capturados pela modelagem baseada em agente.

A SBA tem emergido e ganhado importância como um método de simulação para sistemas que incluem modelos de comportamento, como no caso de cronogramas de projetos, pois há um alto grau de fator humano envolvido que precisa ser representado por meio de vários modelos de comportamento (LAZAROVA-MOLNAR, 2013).

Para Siebers *et al.* (2010) a manufatura ágil e a cadeia de suprimentos são áreas de aplicação naturais da SBA, já que estas requerem uma modelagem de processos dinâmica e que deve adaptar-se rapidamente às exigências e eventos de mudança em tempo real. Os autores ainda ressaltam que através do SBA podem-se incluir modelos descritivos de como as pessoas realmente tomam decisões dentro de uma cadeia de suprimentos e ver os efeitos de todos os tomadores de decisão nesta cadeia.

A cadeia de abastecimento é um sistema complexo, estocástico e adaptativo caracterizado pela dinâmica, incerteza e compartilhamento parcial de informação. A simulação baseada em agente, porém, é um método mais eficiente de lidar com esses recursos do que os métodos analíticos tradicionais (LONG e ZHANG, 2014). Para Macal e North (2005), os aspectos do comportamento dos elos presentes em uma cadeia de suprimentos poderiam facilmente ser incorporados a um modelo de SBA.

Agentes ajudam a compreender propriedades importantes como a autonomia, capacidade de resposta e redundância, além disso, eles podem ser projetados para trabalhar com informações e conhecimentos incertos e/ou incompletos (MONOSTORI, VÁNCZA e KUMARA, 2006). Por isso, de acordo com os mesmos autores, muitas tarefas relacionadas à manufatura, desde o projeto de engenharia até gerenciamento da cadeia de suprimentos, podem ser conduzidas por agentes. As abordagens baseadas em agentes oferecem muitas vantagens para sistemas de programação e planejamento de processos de manufatura como: modularidade,

configurabilidade, escalabilidade, capacidade de atualização e robustez, incluindo a recuperação de falha (SHEN, WANG e HAO, 2006).

Segundo Wang e Usher (2002), as abordagens baseadas em agente têm oferecido uma solução promissora para o controle de sistemas de produção que exigem flexibilidade, confiabilidade, capacidade de adaptação e de reconfiguração. Exemplos de utilização da SBA no ambiente de manufatura podem ser encontrados nos trabalhos de Zhao, Zhang e Qiu (2012) que desenvolveram um modelo de agente dos trabalhadores e integraram no modelo de simulação do sistema produtivo para avaliar o impacto da manutenção autônoma na produção, e no trabalho de Dong, Liu e Lu (2012) que utilizaram a SBA para avaliar qual a melhor estratégia de reposição de estoque e assim minimizar custos, onde *warehouse* e fornecedor são representados por agentes no modelo, com funções e objetivos. Ou ainda no trabalho de Wang e Usher (2002) que desenvolveram um modelo de SBA de um chão de fábrica onde um agente toma decisões sobre a melhor rota de produção.

b) Economia

Agentes inteligentes e cooperativos estão sendo utilizados no desenvolvimento de sistemas de planejamento de processo, uma vez que o agente compreende de forma eficaz a adaptabilidade e dinamismo do processo de planejamento, sendo utilizados, por exemplo, em planejamento de sistemas programação e planejamento de processo de manufatura, as negociações em licitação ou abordagens de mercado (SHEN, WANG e HAO, 2006).

Pooyandeh e Marceau (2014) afirmam que a SBA tem sido utilizada para modelar negociação automatizada, que se refere à negociação conduzida em computador onde dois ou mais agentes barganham recursos com pretensão de ganho mútuo e as partes escolhem uma estratégia para maximizar a negociação resultante. Esmaeili, Vancheri e Giordano (2010) utilizaram a modelagem baseada em agentes simular o processo de comportamento e tomada de decisões individuais de pessoas no mercado.

c) Infraestrutura

Karpov *et al.* (2005) utilizam SBA para o planejamento de expansão de sistemas de energia elétrica, sistemas estes que são complexos e territorialmente estendidos, com uma estrutura não homogênea das redes elétricas. Já Kremers *et al.* (2009) desenvolveram um módulo de geração eólica de um modelo baseado em agentes para sistemas de energia integrais do Instituto Europeu de Pesquisa de Energia. Enquanto que, com relação ao transporte de multidões, Takama e Preston (2008) utilizaram a SBA para analisar a taxa de utilização em uma rodovia que liga duas cidades dos Estados Unidos.

d) População:

Existem diversos trabalhos na literatura que utilizaram a SBA para criar modelos de evacuação de emergência. Modelos baseados em agentes de evacuação normalmente consistem de agentes autônomos que realizam comportamentos de evacuação heterogêneos dentro de um espaço virtual (TAN, HU e LIN, 2015). Um exemplo de utilização da SBA para análise de evacuação pode ser encontrado no trabalho de Golmohammadi e Shimshak (2011) que desenvolveram um modelo de SBA para estimar o tempo de evacuação em caso de emergência em hospitais, onde estimativas de incidentes e tempos de evacuação de diferentes tipos de pacientes, como pacientes de cadeira de rodas, terminais ou não críticos, foram considerados.

Já Joo et al. (2013) desenvolveram uma estrutura formal de SBA do comportamento humano baseada em situações de evacuação de emergência, especificamente na evacuação de um almoxarifado. Tan, Hu e Lin (2015) realizaram um estudo para simular evacuação de um edifício por meio da SBA, onde cada agente seleciona sua própria rota de fuga baseado na acessibilidade espacial assumida e na possibilidade de uma rota estar bloqueada. Neste caso o agente é capaz de atualizar os seus conhecimentos e ajustar a rota de fuga para uma rota alternativa.

e) Sociedade e Cultura

Gilbert (2008) afirma que modelos baseados em agentes têm sido usados produtivamente em áreas de ciências sociais como modelos urbanos, como segregação racial em cidades americanas, dinâmicas das opiniões, entender o desenvolvimento de opiniões políticas, análise do comportamento do consumidor, redes industriais como a relação entre indústrias do mesmo ramo ou pertencentes a uma mesma matriz, gerenciamento da cadeia de suprimentos para modelar as relações complexas inter- organizacionais e até mesmo em áreas rurais, para auxiliar no gerenciamento de recursos naturais como agua para irrigação.

Modelagem e Simulação baseada em agente desempenham um papel importante no campo da ciência social computacional, uma vez que representa as interações individuais, a partir das quais emergem padrões sociais (BOUANAN, ZACHAREWICZ e VALLESPIR, 2016). Esta abordagem de simulação tem sido usada para modelar muitas situações diferentes, como a evolução social, a segregação, a propagação da doença, e a eficácia da propaganda (DUBIEL e TSIMHONI, 2005).

f) Biologia

O uso de modelos baseados em agentes tem aumentado em todas as disciplinas, incluindo química ambiental e toxicologia e este crescimento é impulsionado principalmente pela sua

capacidade de lidar com problemas que técnicas de modelagem convencionais não conseguem, como por exemplo, o surgimento de fenômenos imprevistos (DEVILLERS *et al.*, 2010). Figueredo e Aickelin (2011) utilizaram modelos de SBA e de sistemas dinâmicos para avaliar o desenvolvimento de células com tumor.

A SBA tem encontrado muitas aplicações nas ciências físicas, onde os agentes são partículas ou moléculas, e as interações destes agentes estão baseadas em princípios relacionados à física como: cinética química, alinhamento de velocidade, forças de coesão e repulsão (CHAN, SON e MACAL, 2010). Como exemplo de interação molecular, tem-se o trabalho de Wakeland *et al.* (2004) que fazem uso de modelos de SBA e sistemas dinâmicos para analisar a movimentação de moléculas nas células em diferentes situações.

g) Outras áreas

A SBA também vem sendo utilizada para analisar situações relacionadas ao setor de saúde. Dunn *et al.* (2011), por exemplo, utilizaram a SBA para modelar os fluxos de risco do processo de transferência de paciente e avaliar como as violações individuais do padrão podem impactar na rotina de uma clínica.

Brailsford e Schmidt (2003) combinaram SBA com SED para modelar o comparecimento dos pacientes no processo de exames que verificam retinopatia diabética. Neste caso, a SED foi utilizada para simular o fluxo dos pacientes e a SBA para inserir características pessoais aos pacientes e assim verificar a probabilidade de comparecimento ao atendimento, como por exemplo, pessoas ansiosas tem probabilidade maior de comparecer ao exame agendado.

Já Xie e Peng (2012) combinaram a técnica de mapeamento da cadeia de valor (*Value Stream Mapping*-VSM) com a SBA para modelar a sala de operações de um hospital, a fim de reduzir o tempo de espera de pacientes e melhorar a utilização dos recursos. Os autores utilizaram o VSM para entender todo o processo e identificar problemas, já a SBA foi utilizada para modelar o comportamento humano na sala de operações, como por exemplo, tomada de decisões.

A SBA vem sendo também utilizada na agricultura onde, segundo Higgins *et al.* (2010), os modelos multi-agentes fornecem uma capacidade para acomodar a complexidade das relações entre e dentro dos segmentos da cadeia de valor, representando estes segmentos (ou suas atividades) como agentes.

A SBA pode ser aplicada ainda como um elemento educativo, pois, de acordo com Siebers *et al.* (2010), compreender como as pessoas se comportam e porque, por meio da implementação

destes comportamentos em modelos baseados em agentes pode ser uma experiência muito interessante e educativa.

2.3.6 Vantagens da SBA

A SBA permite saber se e como as interações locais podem produzir padrões de comportamento global, sendo assim, ela tornou-se uma metodologia aceitável para o desenvolvimento de explicações plausíveis para fenômenos emergentes (MONOSTORI, VÁNCZA e KUMARA, 2006). Behdani (2012) afirma que algumas características específicas da SBA a torna um paradigma popular para modelar sistemas complexos em diferentes domínios, sendo elas:

- Facilidade de modelar agentes heterogêneos em um modelo baseado em agentes;
- Os mecanismos de aprendizagem e comportamento adaptativo podem ser facilmente representados em um modelo baseado em agentes. Isto é muito importante onde uma representação explícita de tomada de decisão humana é necessária para modelar o comportamento do sistema;
- Capacidade de modelar os aspectos espaciais;
- Modelos baseados em agentes podem ser facilmente estendidos ou utilizados para outros fins.

A SBA é de crescente interesse para a modelagem e simulação de sistemas complexos, pois é capaz de simular o comportamento coletivo e emergente de subsistemas heterogêneos, incluindo hardware, software e operadores humanos (LEE, REMINGTON E RAVINDER, 2005). Os modelos de SBA são úteis para capturar fenômenos emergentes, uma vez que fornecem um ambiente natural para o estudo de sistemas compostos por entidades do mundo real com diferentes comportamentos e permitem integrar facilmente tempo e espaço dentro do processo de modelagem (DEVILLERS *et al.*, 2010).

Gilbert (2008) afirma que uma grande vantagem de modelagem baseada em agentes é que as dificuldades em garantir o isolamento do sistema humano e o problema ético de experimentações não estão presentes quando se faz experiências em sistemas virtuais ou computacionais. O autor ainda reitera que uma experiência pode ser configurada e reproduzida muitas vezes, utilizando uma gama de parâmetros ou permitindo que alguns fatores a variem aleatoriamente.

Segundo Macal e North (2013), a SBA permite trabalhar com modelos de comportamentos reais ou supostos dos agentes, ao invés de versões idealizadas ou normativas, e verificar em grande escala quais são as implicações lógicas das interações dos agentes. Para os autores, em

comparação com as abordagens tradicionais de simulação tais como SD e SED, menos pressupostos devem ser feitos na SBA em termos de agregar comportamentos ou trabalhar com apenas um conjunto limitado de tomadores de decisões.

De acordo com Xiang e Lee (2008), na programação da produção do mundo real, uma abordagem baseada em agentes tem a vantagem de dar uma resposta rápida a um ambiente de manufatura dinâmico e obter um desempenho global coerente por meio de tomadas de decisão local e de diversas formas de coordenação ou negociação dos agentes. Ainda segundo os mesmos, a SBA não só fornece a execução paralela de comandos, mas também tem a inteligência da negociação para melhorar o desempenho do sistema.

Sauvageau e Frayret (2015) acreditam que a SBA apresenta três grandes vantagens. A primeira é ser capaz de simular individualmente entidades discretas com propriedades e comportamentos únicos e heterogêneos, a segunda é permitir representações de sistemas bem próximas do mundo real e a terceira é emular o comportamento de componentes do mundo real. A SBA permite que modeladores possam representar de uma forma natural várias escalas de análise, como as consequências no nível macro ou social de uma ação individual e os vários tipos de adaptação e aprendizagem, sendo nenhum deles fácil de fazer com outras abordagens de modelagem (GILBERT, 2008).

Modelos de SBA podem ser direcionados por dados reais e assim investigar através do espaço de parâmetros (dados tempo, poder e memória suficientes) visando responder perguntas "e - se" de forma muito eficaz (CHAN, SON e MACAL, 2010). Ainda de acordo com estes autores, ela permite simular os efeitos em cascata decorrentes de menores interações locais, examinar experimentalmente pontos de ruptura, identificar e explicar comportamentos emergentes benéficos ou prejudiciais, e o mais importante, projetar mecanismos para aumentar comportamentos benéficos (e desencorajar maliciosos), tudo a um baixo custo.

Abordagens baseada em agentes são atraentes porque sua natureza autônoma, distribuída e dinâmica atende à exigência de uma construção complexa, flexível, robusta e dinâmica de programação de manufatura (XIANG e LEE, 2008). Segundo os referidos autores, a principal vantagem de SBA é que os agentes não têm que contar com uma entidade específica para executar suas instruções, sendo assim a falha de um componente não irá interromper o funcionamento de todo o sistema.

Borshchev e Filippov (2004) acreditam que a SBA é uma abordagem mais geral e poderosa, porque permite capturar estruturas mais complexas e dinâmicas. Outra vantagem segundo os

autores é que os modelos baseados em agente são tipicamente mais fáceis de manter, pois os refinamentos no modelo normalmente resultam em alterações locais e não globais.

2.3.7 Desvantagens da SBA

Embora os modelos baseados em agente permitam representar e analisar o comportamento em um alto nível de detalhes, eles são muitas vezes criticados como "modelos de brinquedo" que não captam adequadamente o comportamento real em um ambiente de mercado, principalmente porque muitos deles não têm um fundamento empírico (STUMMER *et al.*, 2015). Higgins *et al.* (2010) acreditam que a ausência de modelos multi-agentes que buscam analisar propriedades emergentes sociais ou ambientais se deve a exigência de um volume intensivo de dados, como dados geográficos, sociais, biofísicos e econômicos.

Stummer *et al.* (2015) aponta que validar modelos de SBA é uma tarefa desafiadora por causa dos muitos parâmetros envolvidos e outras questões metodológicas. Segundo os autores, no caso específico da difusão da inovação, as dificuldades surgem desde a criação de redes realistas à coleta de dados a nível individual e acompanhamento da difusão.

Para Bobashev *et al.* (2007), modelos baseados em agentes são poderosos na descrição de processos epidemiológicos envolvendo o comportamento humano e interação local. Entretanto, de acordo com estes autores, esta vantagem de capturar interações locais, não é sem custo, uma vez que a SBA pode impor uma carga computacional pesada e rastrear e programar um grande número de agentes leva a requisitos computacionais difíceis e desafios analíticos.

De acordo com Garifullin, Borshchev e Popkov (2007), os modelos baseados em agente são computacionalmente intensivos e, portanto, podem encontrar limites nos desktops atuais. Para os autores é sempre tentador adicionar mais e mais lógicas sofisticadas para um agente, mas o aumento do número de propriedades do agente pode ser barrado pela falta de dados adequados. Devillers *et al.* (2010) acreditam que apesar do poder de computação estar cada vez maior, a alta exigência computacional de modelos de SBA faz com que a modelagem de sistemas de grande porte seja um processo computacionalmente intensivo e demorado.

Já Siebers *et al.* (2010) afirmam que embora haja uma série de excelentes ferramentas academicamente desenvolvidas, o software comercialmente disponível é limitado ao Anylogic® e todos estes produtos exigem conhecimento de técnicas de programação orientada a objeto e capacidade de utilizar programação Java. Estes autores acreditam que estas não são características que gerentes têm se concentrado no desenvolvimento da sua carreira e, por isso,

a SBA continua a ser do domínio de relativamente poucos especialistas qualificados e de pesquisadores acadêmicos.

2.3.8 SBA versus SED

Para Kasaie e Kelton (2015), a SED é uma abordagem de modelagem de cima para baixo na representação de um sistema e oferece uma baixa flexibilidade para incorporar níveis individuais e micro dinâmicos de comportamento. Ainda segundo os mesmos autores, a SBA é uma abordagem de modelização ascendente e é uma ferramenta poderosa e flexível que modela sistemas complexos compostos por diversos componentes que interagem, como por exemplo, sistemas que envolvem o comportamento humano.

Behdani (2012) afirma que na SED o modelo é constituído por objetos "passivos" no qual alguma sequência de um conjunto de operações é executada, enquanto que na SBA, as entidades podem por si mesmas assumir a iniciativa de fazer algo; se tornando entidades "ativas". Para o autor, este fato indica explicitamente que modelar o comportamento humano não é uma tarefa simples em um modelo de SED.

De acordo com Chan, Son e Macal (2010), a grande diferença entre SED e SBA é devido à natureza dos agentes, uma vez que na SBA estes são proativos, autônomos e inteligentes, podendo iniciar ações, comunicar com outros agentes, e tomar decisões por conta própria. Já as entidades em um modelo de SED são bastante simples, reativas e limitadas em recursos. Nos Quadros 2.5.1 e 2.5.2, têm-se as principais diferenças entre os dois tipos de simulação, SED e SBA.

Quadro 2.5.1- Diferenças entre SED e SBA

SED	SBA			
Orientada a processos (abordagem de	Baseado no indivíduo (abordagem bottom-			
modelagem top-down) foco em modelar o	up) foco em modelar entidades e as			
sistema em detalhes, não as entidades	interações entre elas			
Abordagem de cima para baixo	na para baixo Abordagem de baixo para cima			
Uma linha de controle (centralizado)	Cada agente tem sua linha de controle			
	(descentralizado)			
Entidades passivas, algo é realizado para as	Entidades ativas, as entidades por elas			
entidades enquanto elas movem pelo sistema;	mesmas podem tomar iniciativa para fazer			
a inteligência (como tomada de decisão) é	algo, inteligência é representada dentro de			
modelada a parte	cada entidade individual.			
Filas são um elemento chave	Sem conceito de filas			
Fluxo de entidades através do sistema, o	Sem conceito de fluxos, o comportamento			
comportamento macro é modelado	macro não é modelado, ele emerge de micro			
	decisões dos agentes individuais			

Quadro 2.5.2- Continuação

SED SBA		
Distribuições de entradas são sempre	Distribuições de entradas são sempre	
baseadas em dados coletados/medidos	baseados em dados teóricos ou subjetivos	
Direcionador para o comportamento	Direcionador para o comportamento	
dinâmico do sistema é a "ocorrência de	dinâmico do sistema é "decisões e interações	
evento".	dos agentes".	
As entidades são objetos passivos	Entidades ativas (agente) que podem	
(Sem inteligência ou capacidade de tomar	perceber o ambiente, interagir com outras	
decisão) que se movem através de um sistema	pessoas e tomar decisões autônomas.	
em um processo de pré especificado		

Fonte: Adaptado de Chan, Son e Macal (2010) e Behdani (2012)

Segundo Dubiel e Tsimhoni (2005) existem determinadas situações que são muito difíceis de simular utilizando SED, como por exemplo, a livre circulação de entidades ou um padrão de movimento muito detalhado, sistemas de serviço por meio do qual os seres humanos fluem em caminhos imprevisíveis e decisões em tempo real de entidades individuais. Para os autores, suposições muito rigorosas sobre as escolhas do ser humano têm de ser feitas pelo modelador a fim de ajustar seu comportamento para o formato da modelagem SED, enquanto que a modelagem baseada em agente é considerada a melhor maneira de simular a interação em tempo real de pessoas com seu ambiente.

Para Kim e Kim (2010), a convencional abordagem SED tem uma limitação em simular o fluxo de tráfego de veículos porque estes têm comportamento dinâmico e contínuo, como por exemplo a alteração de velocidade de acordo com a distância entre veículos. Já a SBA, segundo os autores, é a melhor escolha para este tipo de problema, uma vez que esta abordagem descreve características comportamentais de cada agente detectando alterações em um ambiente dinâmico.

Já Siebers *et al.* (2010) acreditam que a SED tem sido a base da Pesquisa Operacional na comunidade de simulação de há mais de 40 anos e que apesar da SBA prometer oferecer algo novo, há relativamente poucas evidências de que ela seja muito usada na comunidade de pesquisa operacional. Para eles, a SBA apresenta volume muito maior de artigos em revistas de disciplinas como Ciência da Computação, Ciências Sociais e Economia.

Apesar desta afirmação, Siebers *et al.* (2010) destacam que a SBA ajudará a entender melhor os sistemas do mundo real em que a representação ou modelagem de muitas pessoas é importante e para os quais os indivíduos têm comportamentos autônomos (ou seja, ações não são roteirizadas, mas agentes respondem ao ambiente simulado). Ainda segundo os mesmos

autores, é possível combinar SBA com SED onde o fluxo do processo é representado por um modelo de SED e as entidades são entidades ativas (para substituir as entidades passivas da SED) que são autônomas e podem mostrar um comportamento proativo.

2.3.9 SBA e SED: Simulação Híbrida

A natureza complexa e multifacetada de muitos sistemas modernos pode representar desafios consideráveis para as abordagens tradicionais de simulação que utilizam uma única metodologia (SWINERD e MCNAUGHT, 2012). As ferramentas tradicionais de simulação estão enfrentando desafios quando é necessário modelar em grande escala, sistemas complexos, heterogêneos e altamente dinâmicos (HAO e SHEN, 2008).

A simulação híbrida é a combinação de dois ou mais paradigmas da simulação. De acordo com Swinerd e McNaught (2012), a simulação híbrida envolve o uso de múltiplos paradigmas de simulação e tem se tornado uma abordagem cada vez mais comum para modelagem de sistemas modernos e complexos. Borshchev (2013) dá exemplos de algumas das possíveis arquiteturas da simulação híbrida, como: utilizar sistemas dinâmicos dentro da estrutura de um agente, utilizar agentes como entidades; inserir um fluxo de processo da SED no interior de um agente, entre outros.

Os modelos de simulação híbrido permitem a criação de modelos mais realistas (LÄTTILÄ, HILLETOFTH e LIN, 2010). Para Swinerd e McNaught (2012), o crescente interesse em abordagens de simulação híbridas pode ser parcialmente explicado por melhorias na educação da simulação e pela natureza cada vez mais complexa de problemas sendo enfrentados pelos profissionais da pesquisa operacional.

De acordo com Sewall, Wilkie e Lin (2011), o componente chave na simulação híbrida é compreender quais e como utilizar as técnicas de simulação que serão combinadas. Segundo Swinerd e McNaught (2012), quando se tem a interação de elementos de diferentes naturezas e estes elementos são melhor representados por diferentes paradigmas de simulação, os modeladores enfrentam a escolha de tentar identificar um único melhor paradigma e aplicá-lo a todo o sistema, ou adotar múltiplos paradigmas, isto é, uma abordagem de simulação híbrida.

Segundo Dubiel e Tsimhoni (2005), a combinação da SED com a SBA permite simular aspectos do sistema que não poderiam ser simulados por qualquer um dos métodos de simulação isoladamente. Para Siebers et *al.* (2010), é possível combinar SBA com SED onde o fluxo do processo é representado por um modelo de SED e as entidades são entidades ativas (para

substituir as entidades passivas da SED) que são autônomas e podem mostrar um comportamento proativo.

Siebers e Onggo (2014) acreditam que os agentes podem substituir as entidades passivas tradicionalmente utilizadas na SED e este fato representa uma melhoria neste tipo de simulação, uma vez que torna o modelo de SED capaz de simular o comportamento proativo do ser humano. Para Macal e North (2005), a SED oferece métodos para se ter uma visão dos processos de um sistema e para lidar com a incerteza estocástica do mesmo. Ainda segundo os autores, a medida em que os agentes estão envolvidos em processos e movem-se através de um sistema, a SED pode ser útil no desenvolvimento de um modelo de SBA.

Dentro deste conceito, Dubiel e Tsimhoni (2005) utilizaram a simulação híbrida (SBA e SED) para modelar uma pessoa (agente) buscando chegar a um local determinado, se movimentando em um parque (ambiente em SED) e se guiando por meio de informações obtidas por meio de objetos estacionários (mapas) ou outras pessoas (agentes informantes). Já Zhang, Chan e Ukkusuri (2011) combinaram a SED com a SBA para simular a evacuação de transporte público, onde os agentes são pessoas que apresentam diferentes comportamentos nesta evacuação e a rede de transporte foi modelada em eventos discretos, eliminando a limitação de movimentos restritos para agentes em um espaço celular. Siebers e Onggo (2014) desenvolveram uma proposta do uso da combinação de SBA e SED para modelar um sistema de serviço. Nesta proposta, o sistema de filas (filas e prioridades de serviço dentro da loja de departamentos) é construído por meio da SED, enquanto os agentes são criados para modelar a equipe e os clientes, bem como seus comportamentos.

2.4 Representação do fator humano na simulação computacional

A simulação computacional é uma ferramenta amplamente utilizada para auxiliar no projeto de sistemas de manufatura, entretanto, grande parte dos praticantes desta ferramenta ignora um elemento importante da indústria: a força de trabalho (BAINES *et al.*, 2003). A representação superficial dos elementos humanos que trabalham nos sistemas produtivos é uma limitação grave, pois o desempenho destas pessoas é fundamental para a competitividade de muitas empresas de manufatura (MASON *et al.*, 2005).

O objetivo deste capítulo é apresentar o relato de alguns autores na literatura sobre como é importante representar o fator humano em projetos de simulação, bem como as dificuldades desta representação. Pretende-se ainda apresentar questões relacionadas à modelagem do desempenho do elemento humano, por se tratar de uma característica importante em ambientes de manufatura, e por fim, apresentar um dos fatores que afetam este desempenho: o ritmo circadiano.

2.4.1 Importância da representação do fator humano em projetos de simulação

Segundo Joo *et al.* (2013) existe uma recente necessidade de observar, analisar e prever comportamentos humanos por meio do uso de tecnologias de simulação computacional. Estes modelos de simulação devem ser desenvolvidos para representar os comportamentos mais complexos do ser humano (ZHAO, ZHANG e QIU, 2012).

Para Wellbrink e Buss (2004), é extremamente importante incorporar o desempenho humano em modelos de simulação, principalmente em situações onde este desempenho está sujeito à degradação ao longo do tempo, como por exemplo, tarefas de vigilância. Já Anjomshoae, Hassan e Rani (2014) afirmam que o fator humano e o fator ergonômico, aliados à simulação, podem contribuir para assegurar qualidade e segurança em processos.

Entretanto, de acordo com Hughes e Jiang (2010), apesar de diversos estudos reconhecerem a importância do desempenho humano, muitos se concentram inapropriadamente no desempenho técnico ao invés de se concentrar no desempenho dos componentes humanos do sistema. A maioria dos esforços de pesquisa e desenvolvimento tem se concentrado na modelagem precisa da dinâmica de componentes físicos do sistema, enquanto pouca atenção tem sido dada à modelagem e simulação do comportamento humano, mesmo estes seres humanos sendo componentes integrais do sistema e elementos críticos que afetam o desempenho global e segurança dos sistemas (LEE, REMINGTON E RAVINDER, 2005).

Representar o elemento como simples recurso é um problema particularmente grave na modelagem de um sistema com uma elevada porcentagem de trabalho manual, tal como uma linha de montagem (BAINES et al., 2004). De acordo com estes autores, os seres humanos que realizam tais tarefas não devem ser representados na simulação da mesma maneira que máquinas, uma vez que eles são inerentemente instáveis, imprevisíveis e capazes de ações independentes. Quando a variação do desempenho humano é modelada incorretamente em SED, os resultados da simulação podem ser distorcidos, fornecendo apenas uma previsão grosseira de como as pessoas nos sistemas de manufatura provavelmente se desempenham (MASON et al., 2005).

2.4.2 Representação do fator humano por meio da SED

Segundo Zhao, Zhang e Qiu (2012), modelos de SED desempenham um papel importante na melhoria da eficiência das células de produção. No entanto, segundo os mesmos autores, a maior parte de projetos de simulação considera o ser humano como recurso de produção comum, ignorando a influência do comportamento organizacional no processo de produção. Para Baines *et al.* (2003), os trabalhadores na SED são geralmente representados como simples recursos, muitas vezes até com valores determinísticos de desempenho, ignorando assim o efeito potencialmente significativo que a variação de desempenho humano pode ter em um sistema.

De acordo com Baines *et al.* (2004), o elemento humano de um sistema de fabricação é mal representado, uma vez que as pessoas são tratadas como um elemento pseudo-tecnológico e espera-se que se comportem da mesma forma que uma máquina. Baines *et al.* (2003) acreditam que os resultados previstos em modelos de SED são diferentes dos resultados que ocorrem na prática, devido à incapacidade desta simulação em representar o desempenho de trabalhadores com precisão. Os mesmos autores ainda afirmam que esta lacuna entre o desempenho previsto e o real do sistema de produção cria problemas para os desenvolvedores de sistemas, sendo de extrema importância então ampliar a capacidade da SED em simular o comportamento dos trabalhadores.

A simulação de operadores humanos tem sido muitas vezes mínima, até mesmo em sistemas onde o comportamento humano tenha um enorme impacto sobre o desempenho geral e segurança do sistema (LEE, RAVINDER e JOHNSTON, 2005). Portanto, segundo estes autores, as capacidades e limitações humanas precisam ser levadas em consideração no início do processo de concepção do sistema, antes que escolhas irrevogáveis sejam feitas. Para ampliar as capacidades de modelagem, principalmente na SED, é importante avaliar o impacto que os

fatores humanos podem ter sobre o desempenho do sistema de produção (BAINES e KAY, 2002).

2.4.3 Representação do fator humano por meio da SBA

Segundo Kasaie e Kelton (2015) a SBA é uma ferramenta poderosa e flexível para modelar sistemas complexos compostos por vários componentes que interagem, como os sistemas que envolvem o comportamento humano. Siebers e Onggo (2014) complementam que a SBA tem o potencial para se tornar o paradigma predominante para modelar o comportamento humano.

Lazarova-Molnar (2013) afirma que a SBA é mais flexível e mais adequada para a simulação de ambientes que envolvem pessoas e seus comportamentos. Os agentes podem ser usados para capturar a precisão, velocidade e variabilidade do desempenho humano, que são fundamentais para a análise de segurança e desempenho do sistema (LEE, RAVINDER e JOHNSTON, 2005).

Siebers *et al.* (2010) destacam que a SBA ajuda a entender melhor os sistemas do mundo real em que a representação ou modelagem de pessoas é importante e os indivíduos tenham comportamentos autônomos, ou seja, possuem ações que não são roteirizadas, mas respondem ao ambiente simulado. A modelagem baseada em agente é considerada a melhor maneira de simular a interação em tempo real de pessoas com seu ambiente (DUBIEL e TSIMHONI, 2005).

A SBA possibilita a modelagem e simulação do desempenho humano e sua variabilidade comportamental, que é fundamental para a análise de segurança e desempenho do sistema (LEE, RAVINDER e JOHNSTON, 2005). Os autores ainda destacam que modelos computacionais baseados em agente têm o potencial para fornecer uma maneira segura e efetiva em termos de custos de testar a concepção e implementação de novas tecnologias, prever possíveis erros humanos, bem como de antecipar desafios de transição e seu impacto na implementação de novos procedimentos de tarefas.

2.4.4 Dificuldades de representar o elemento humano em projetos de simulação

De acordo com Joo *et al.* (2013), a pesquisa sobre modelagem e simulação de comportamentos humanos em sistemas complexos tem sido lenta devido aos desafios associados com a natureza não-determinística e dinâmica do ser humano. Segundo Kernan e Sheahan (2013), a maioria dos artigos com propostas de melhorias de representação do trabalhador na simulação refere-se a melhorias na modelagem da variação de desempenho humano. No entanto, segundo estes

autores, estas melhorias propostas requerem informações adicionais que podem ser difíceis de adquirir, como por exemplo, estresse e esforço excessivo.

Em geral, modelos detalhados do desempenho humano são difíceis e demorados de construir e requerem conhecimento especializado sobre as capacidades cognitivas e comportamento humano (LEE, RAVINDER e JOHNSTON, 2005). Nem sempre existem recursos ou tempo suficientes para identificar questões de fatores humanos com antecedência suficiente para o desenvolvimento de bases técnicas detalhadas (LAUGHERY *et al.*, 1996).

De acordo com Lee, Ravinder e Johnston (2005), o nível de detalhe que cada elemento humano deve ser modelado depende da finalidade do modelo de simulação, onde uma simulação muito detalhada tem um custo maior e pode somente complicar o processo de avaliação e uma simulação muito superficial fornece informações insuficientes ou enganosas. Para Hughes e Jiang (2010) a dificuldade de modelar a complexidade e variabilidade do comportamento humano resulta em uma menor compreensão dos fatores que afetam o desempenho.

2.4.5 Modelagem do desempenho humano

Desempenho humano é definido pela capacidade de perceber, planejar e realizar tarefas e subtarefas em resposta às demandas do ambiente (CHAPPARO e RANKA, 1996). Para Baines *et al.* (2004) o desempenho de um indivíduo vai oscilar dependendo de fatores como a sua habilidade, treinamento e educação junto com seus estados e características fisiológicas e psicológicas.

A modelagem do desempenho humano deve ser inserida em projetos de simulação computacional, a fim de tornar mais robustos a avaliação e refinamento do processo de concepção de um sistema de manufatura (BAINES e KAY, 2002). Por meio da Figura 2.3, é possível perceber que a descrição, a produtividade e confiabilidade do trabalhador são resultados diretos do seu desempenho e devem, portanto, ser inseridos no modelo computacional.

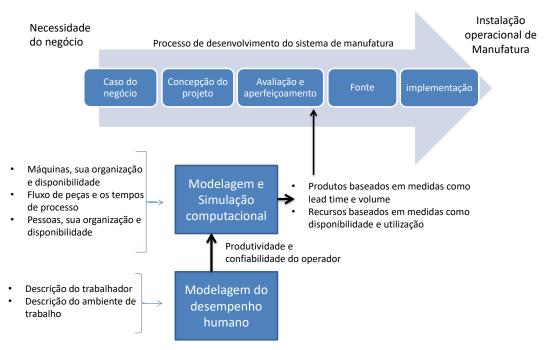


Figura 2.3- Modelagem do desempenho humano como auxílio no desenvolvimento de sistemas de manufatura Fonte: Adaptado de Baines e Kay (2002)

Lee, Remington e Ravinder (2005) acreditam que como a importância das funções cognitivas dos operadores em sistemas tecnológicos modernos aumenta, modelos computacionais de desempenho dos seres humano tendem a incorporar aspectos fundamentais do comportamento destes seres, incluindo capacidades motoras, cognitivas e perceptivas, bem como suas limitações. Para estes autores, estes modelos também podem ser utilizados para avaliar o impacto do comportamento humano no desempenho do sistema, bem como o impacto das mudanças de tecnologias no desempenho dos operadores.

A modelagem do desempenho humano fornece um meio de simular mudanças de projeto e avaliar o impacto do operador humano, sem o desenvolvimento de protótipos de alto custo (HUGHES e JIANG, 2010). Um modelo computacional do desempenho humano pode ser definido como uma representação das características comportamentais humanas que podem ser implementadas e executadas em um ambiente de simulação (LEE, REMINGTON e RAVINDER, 2005).

De acordo com Baines *et al.* (2004) existem dois tipos de modelos de desempenho humano na literatura, sendo eles:

 Modelos de alto nível: normalmente lida com interações complexas de mecanismos psicológicos, como por exemplo, satisfação no trabalho que afeta o desempenho humano que é influenciada por fatores psicológicos e ambientais. São modelos inerentemente complexos e dependem de cada indivíduo. A combinação da baixa

- validade contextual com a complexidade torna esses modelos inadequados para simulação de manufatura.
- Modelos de baixo nível: representam mecanismos fisiológicos basais, como por exemplo, modelos de desidratação que fornecem estimativas de variações de desempenho, mediadas por condições ambientais. São relativamente simples e podem ser aplicados para qualquer indivíduo, portanto, particularmente adequados para a simulação.

A simulação oferece a oportunidade de expandir além das capacidades de abordagens de modelagem para que se possa avaliar e prever o desempenho humano (HUGHES e JIANG, 2010). O desempenho imperfeito ou reduzido causado por falta de informação, de percepção, ou de recursos cognitivos é chamado de "redução do desempenho humano" e devem ser retratados pelas entidades simuladas para que os modelos de simulação possam ser cada vez mais realistas (WELLBRINK e BUSS, 2004).

Para representar a variação do desempenho humano na simulação, é importante primeiramente saber qual modelo de desempenho será selecionado para este fim. Segundo Baines *et al.* (2004), a seleção dos modelos de desempenho humano na manufatura deve ser baseada em três critérios: os modelos devem ser válidos no contexto em que foram derivados originalmente, deve haver literatura suficiente para indicar que o fator representado pelo modelo estaria presente num contexto de manufatura, as entradas necessárias para os modelos devem ser fáceis de obter. Os autores ainda destacam que é também desejável que os modelos consistam de funções matemáticas.

Cabe ressaltar que considerando todos estes critérios abordados por Baines, escolheu-se a modelagem proposta por Spencer (1987) que demonstra como o ritmo circadiano afeta o desempenho humano e, por consequência, a sua produtividade. Cabe dizer ainda que se trata de um modelo de baixo nível que, conforme visto anteriormente, é indicado para a simulação computacional de sistemas.

2.4.6 Ritmo Circadiano

Os seres humanos são criaturas suscetíveis a uma queda de performance e um aumento de sonolência para que repousem no momento apropriado, fazendo com que se sintam e desempenhem de forma diferente de um período do dia ao outro e estas mudanças são chamadas de ritmos circadianos (MONK *et al.*, 1997). A principal função do ritmo circadiano (RC) é

preparar a pessoa para dormir através da regulação hormonal das mais básicas funções do corpo humano (MONK, 1986).

Segundo Baines *et al.* (2004), em certo momento da noite, normalmente em uma faixa 22:30 às 01:00, as pessoas naturalmente entram em estado de sono (devido a redução da temperatura central, aumento da melatonina - "hormônio do sono") e o mesmo RC faz com que as pessoas despertem após uma duração média do sono de pouco mais de 7 horas. A melatonina começa a aumentar à noite, atinge um pico no meio da noite, e diminui lentamente para atingir níveis baixos indetectáveis no final da manhã, fazendo com que sujeito fique ativo durante o dia e vá dormir durante a sua secreção de pico de melatonina (BOIVIN e BOUDREAU, 2014).

De acordo com Martinez, Lenz e Barreto (2008), o *homo sapiens* é uma espécie diurna, adaptada para exercer suas atividades na fase clara e repousar na fase escura do dia e a repetição regular dos episódios de sono noturno caracteriza o chamado ciclo sono-vigília, ou ritmo circadiano. Para os autores, apesar da relativa flexibilidade dos horários de dormir e acordar, o ser humano tende a manter os períodos de sono-vigília com durações em torno de 24 horas por ciclo. Zadra e Proffitt (2014) afirmam que a maioria das pessoas experimenta um padrão semelhante de variações ao longo do decurso de tempo do dia e a fase destes ritmos circadianos é coordenada pelo relógio solar (ciclos de claro/escuro) e por um relógio social (isto é, a necessidade de estar no trabalho, ao mesmo tempo).

De acordo com Marquie e Foret (1999), todos os ritmos desenvolvem tarefas vitais de bioregulação, permitindo ao corpo manter níveis normais de motivação, esforço, saúde mental e física e quando estes ritmos são interrompidos, o desempenho é degradado e a saúde pode ser afetada. Os ritmos circadianos, inerentes a todos os seres humanos, consistem em 24 hora de padrões biológicos que afetam o nível de fadiga de uma pessoa (ZHANG, *et al.*, 2014). Compreender a ritmicidade circadiana nas funções neurocomportamentais é importante quando o ritmo de sono-vigília é alterado, uma vez que sono e perda de sono têm efeitos significativos no estado de alerta e no desempenho humano (DONGEN e DINGES, 2011).

O ritmo circadiano determina a extensão da redução do estado de alerta e o desempenho psicofísico ao longo do dia (COSTA, 2010). Segundo o autor, o desalinhamento dos ritmos circadianos é responsável pela chamada "*jet lag*" caracterizada por sentimentos de fadiga, sonolência, insônia, problemas digestivos, irritabilidade, e eficiência de desempenho reduzido.

Conforme Zadra e Proffitt (2014), a ritmicidade circadiana será mais ou menos a mesma para a maioria das pessoas, uma vez que o relógio solar é o mesmo e a maioria das pessoas segue

um cronograma de jornada de trabalho que os faz acordar e ir para a cama em tempos semelhantes. Com relação à jornada de trabalho, Costa (2010) alerta que pessoas que trabalham no turno da manhã, quando despertam precocemente, ou perdem horas de sono por atividades sociais, apresentam um aumento da sonolência e fadiga durante o período de serviço e para o resto do dia.

Spencer (1987) realizou um experimento para analisar a variação da performance do ser humano no ambiente de trabalho ao longo do dia, devido à influência do ritmo circadiano. O resultado do trabalho de Spencer (1987) é uma equação que relaciona a hora do dia com o tempo em que a pessoa está acordada até aquele momento, para prever o desempenho dos operadores em diferentes períodos do dia. Assim, o referido autor observou que a produtividade percentual média na realização de um trabalho é representada pelo *Digit Symbol Substitution Task* (DSST), presente na Equação (1), onde T e t são medidos em horas e T representa a hora do dia e t o tempo transcorrido desde o acordar até o momento T. Apesar de receber o nome de produtividade percentual, o resultado da equação fornece uma correção no tempo de processo referente à variação do rendimento pessoal ao longo do dia.

$$DSST(T,t) = 233,3+1,54t-0,304t^2+0,0108t^3+4,97\cos(2\pi(T-17,05)/24)$$
 (1)

Oliveira *et al.* (2015) elaboraram um gráfico baseado na equação de Spencer (1987), presente na Figura 2.4, que ilustra o percentual de produtividade de um trabalhador ao longo do dia, considerando que um trabalhador acorde às cinco horas e comece o seu turno de trabalho às oito horas. Pode-se perceber pelo gráfico que o funcionário que acorda às cinco horas e trabalha das oito às dezessete horas, com um intervalo de descanso compreendido entre doze e treze horas, terá um rendimento maior aproximadamente às treze horas, e um rendimento menor nas extremidades, principalmente no começo do expediente, afetando assim sua produtividade.

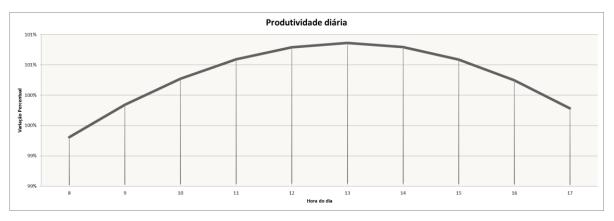


Figura 2.4 - Gráfico da Taxa de produtividade relacionado à hora do dia Fonte: Oliveira *et al.* (2015)

2.5 Revisão Sistemática de Literatura

Conforme apresentado anteriormente, diversos autores destacam a importância de se representar o fator humano em modelos de simulação, bem como os fatores que afetam a sua produtividade, para melhor representar o sistema real. Entretanto, alguns autores destacam fragilidades neste processo de representação, principalmente com relação ferramenta de SED, pelo fato de muitos pesquisadores representarem as pessoas como simples recursos nos projetos de simulação. Já outras referências afirmam que a SBA tem se tornado uma ferramenta poderosa para simular o comportamento humano em diversas situações.

O objetivo deste capítulo é realizar uma revisão sistemática a fim de compreender, por meio de uma busca estruturada e refinada de artigos, como trabalhos que utilizaram as abordagens SED e SBA têm representado o fator humano em seus modelos de simulação.

2.5.1 Introdução à Revisão Sistemática da Literatura

Para Biolchini *et al.* (2007), a revisão sistemática é uma metodologia de pesquisa desenvolvida para reunir e avaliar as evidências disponíveis, referentes a um tema específico. Segundo Staples e Niazi (2007), a revisão sistemática emerge da necessidade de resumir minunciosamente toda informação existente sobre um fenômeno, buscando responder uma questão específica de pesquisa, e é adequada para toda evidência empírica onde se encaixem critérios de elegibilidade predefinidos.

Kitchenham (2004) relata que antes de desenvolver uma revisão sistemática da literatura, os pesquisadores devem primeiro buscar quaisquer revisões sistemáticas existentes relacionadas com o fenômeno para evitar a necessidade de uma nova revisão sistemática, ou pelo menos, encontrar revisões semelhantes para ajudar no desenvolvimento de um protocolo da nova estrutura da revisão sistemática. No caso deste estudo, escolheu-se uma estrutura de revisão sistemática proposta por Biolchini *et al.* (2007). Entretanto, algumas adaptações foram necessárias visto que a estrutura escolhida foi desenvolvida para revisões sistemáticas de literatura na área de engenharia de software e não para o ambiente industrial, como é o caso dos objetos de estudo deste trabalho. Na Figura 2.5, têm-se os passos a serem realizados na revisão sistemática.

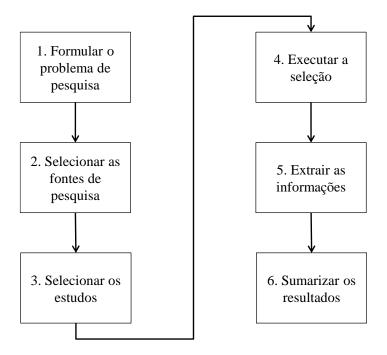


Figura 2.5- Estrutura da Revisão Sistemática De Literatura Fonte: Adaptado de Biolchini *et al.* (2007)

Segundo a estrutura apresentada, adaptada de Biolchini *et al.* (2007), os passos para realizar uma revisão sistemática de literatura consistem em:

1. Formular o problema de Pesquisa

Para a formulação do problema de pesquisa, segundo os referidos autores, é preciso definir:

- Problema: define-se a meta da revisão sistemática, descrevendo brevemente o contexto da pesquisa.
- Questão: refere-se à questão a ser respondida com a revisão. Se o contexto for muito amplo, pode-se decompor a questão principal em questões secundárias.
- Palavras chaves e sinônimos: lista dos termos principais que compõem a questão de pesquisa. São termos que serão utilizados durante a execução da revisão para seleção dos estudos.

2. Selecionar as fontes de pesquisa

Nesta etapa, devem-se selecionar as fontes onde será realizada a pesquisa.

3. Selecionar os estudos

Para o desenvolvimento desta fase, é preciso considerar:

- Critério de inclusão e exclusão dos estudos
- Definição dos tipos de estudo

• Procedimento para seleção do estudo

4. Executar a seleção

Avaliação da qualidade dos estudos

5. Extrair as informações

Nesta etapa de extração das informações, os autores citados apontam que é possível obter-se resultados objetivos como a identificação, metodologia, resultados e problemas relacionados aos estudos observados, e os resultados subjetivos como informações sobre autores, impressões gerais e abstrações.

6. Sumarizar os resultados

Por fim, apresentam-se os resultados em tabelas, realiza-se a análise e fazem-se os comentários finais.

2.5.2 Desenvolvimento da Revisão Sistemática de Literatura

O objetivo desta revisão Sistemática da Literatura é entender, por meio de uma busca estruturada de artigos, como o fator humano vem sendo representado em trabalhos que utilizaram a SED e/ou a SBA para desenvolver seus projetos de simulação. Seguindo o fluxograma da Figura 2.5 que representa os passos propostos para o desenvolvimento da revisão sistemática, teve-se como resultado em cada etapa:

2.5.2.1 Formulação do problema da Pesquisa

- Problema: Diversos autores defendem a ideia de que o fator humano não vem sendo bem representado em projetos de simulação, podendo assim afetar os resultados dos modelos computacionais e, por consequência, as análises sobre os mesmos.
- **Questão:** Para tentar compreender como o fator humano está sendo representado em projetos de simulação, têm-se as seguintes perguntas:
- 1. Como o fator humano está sendo representado em projetos de SED?
- 2. Como o fator humano está sendo representado em projetos de SBA?
 - Palavras chaves e sinônimos: Para que se possam identificar trabalhos que introduzem
 o elemento humano em projetos de simulação, foram escolhidas as seguintes palavras
 chaves:
 - o "Agent Based Simulation" (para identificar artigos que utilizaram a SBA).
 - o "Discrete Event Simulation": (para identificar artigos que utilizaram a SED).

o "Human Factor", "Human Performance" e "Human Element" para identificar artigos que buscaram representar o fator humanos nos projetos de simulação.

2.5.2.2 Seleção das fontes de pesquisa

Para o presente estudo a fonte utilizada para a busca de artigos foi a base de dados *Web of Science*. Esta base de dados foi escolhida devido ao fato que, de acordo com Franceschini, Maisano and Mastrogiacomo (2014), a *Web of Science* (WoS) é uma das principais bases de dados internacional multidisciplinar.

2.5.2.3 Seleção dos estudos

Para esta etapa foi preciso definir quais artigos serão incluídos ou excluídos, os tipos de artigos que seriam selecionados e ainda como seria realizada esta seleção.

Com relação aos tipos de artigo a serem selecionados, optou-se por artigos provenientes de revistas e congressos. Portanto, artigos que não tiverem como origem revista ou congresso serão excluídos. Outra opção de exclusão é a de artigos que não possuem acesso livre na internet, impedindo assim sua análise. O procedimento da seleção de estudos a ser executada segue os seguintes passos:

- 1. Acessar a base de dados Web of Science;
- 2. Selecionar a opção de busca que permita que somente artigos de congressos e revistas sejam pesquisados;
- 3. Buscar por artigos relacionados especificamente a projetos de SED. Portanto, deve-se pesquisar na base de dados artigos que contenham o termo "Discrete Event Simulation". É importante colocar o termo entre aspas para garantir que somente artigos relacionados ao termo completo sejam selecionados. Deve-se ainda pesquisar por este termo nos tópicos do artigo, ou seja, no corpo do artigo a fim de se ampliar a busca dos possíveis artigos relacionados a este assunto.
- 4. Dentre os artigos selecionados no passo anterior, deve-se então procurar por artigos relacionados ao fator humano. Para isso, deve-se pesquisar pelas palavras chaves "Human Factor", ou "Human Element" ou "Human Performance" para que artigos que tratem sobre estes termos sejam selecionados.

O mesmo procedimento de seleção de estudos também será utilizado para buscar responder à pergunta sobre a representação do fator humano na SBA. A diferença é que no terceiro passo,

o termo utilizado na busca será "*Agent Based Simulation*", também entre aspas. O primeiro, segundo e último passo serão executados da mesma forma.

2.5.2.4 Execução da seleção

Conforme dito anteriormente, a busca por artigos foi feita na base de dados da *Web of Science* e o procedimento descrito na etapa anterior foi utilizado. Para a busca relacionada a projetos de SED, tiveram-se no primeiro passo 5314 artigos selecionados e a busca por artigos relacionados ao fator humano dentre estes selecionados resultou em 19 trabalhos. Destes, apenas 3 não estavam disponíveis para leitura e foram excluídos resultando assim em 16 artigos finais. Já na busca relacionada à SBA, primeiramente foram encontrados 2084 artigos e dentre estes os que continham termos relacionados ao fator humano eram 12. Os artigos não disponíveis para leitura dentre estes eram apenas 2 resultando em 10 artigos finais. A representação do afunilamento destes dados está presente na Figura 2.6.

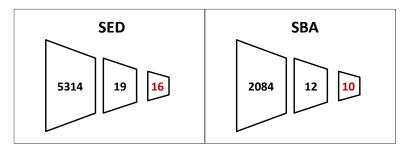


Figura 2.6- Resultado da execução da seleção de estudo para SBA e SED

Uma vez selecionados os artigos, foi possível fazer a leitura dos trabalhos para que se pudesse extrair o máximo de informações importantes possível. Foram extraídas informações como resumo, metodologia utilizada, resultados obtidos, problemas enfrentados, softwares utilizados e ainda informações sobre os autores. Foi possível ainda entender nestes artigos como o fator humano foi abordado nos projetos de SED e SBA.

2.5.2.5 Sumarização dos resultados

Os resultados obtidos graças à realização da revisão sistemática da literatura podem ser divididos em duas etapas. A primeira está relacionada a uma análise quantitativa dos resultados, como por exemplo, o total de publicações, softwares utilizados, entre outros, que serão compilados e apresentados por meio de tabelas e gráficos. Já a segunda etapa está relacionada a uma análise qualitativa dos resultados, na qual por meio da leitura dos artigos selecionados foi possível entender como os autores representaram o fator humano em projetos de simulação.

2.5.3 Análise Quantitativa

Serão apresentados os resultados compilados dos artigos selecionados da revisão sistemática realizada. Cabe ressaltar que esta revisão sistemática de literatura foi realizada para que se pudesse entender como os projetos de simulação tem representado o fator humano. Para isso, o procedimento de seleção de busca foi realizado em duas etapas: uma etapa buscando por artigos que utilizaram a SED em seus projetos de simulação e que continham termo relacionado ao fator humano e a outra etapa buscando artigos com projetos de SBA que também continham termos relacionados ao fator humano. Portanto, para cada item avaliado serão apresentados gráficos e tabelas dos dois tipos de abordagem de simulação.

Tem-se na Tabela 2.1 o nome e ano de publicação dos artigos resultados da execução do procedimento de seleção dos artigos, tanto relacionados à SED (SED) quanto a SBA (SBA).

Tabela 2.1 - Artigos resultantes da Revisão Sistemática de Literatura

	Artigos	Ano
	A Review of Ergonomics and Simulation Modeling in Healthcare Delivery System	2014
BUSINESS PROCESS MANAGEMENT: USE OF SIMULATION IN THE PUBLIC SECTOR		2011
	Using Discrete Event Simulation to Model Excavator Operator Performance	2010
SED	Development of a Simulation Environment to Study Emergency Department Information Technology	2010
	A Methodology to Estimate the Reliability of Passageway system in Naval Ship Design	2010
	Use of simulation in a public administration process	2007
	Simulation of human performance in a discrete event environment	2006
	Improving the design process for factories: Modeling human performance variation	2005
	Humans: the missing link in manufacturing simulation?	2004
	Vigilance performance modeled as a complex adaptive system with listener event graph objects (LEGOS)	2004
	Using empirical evidence of variations in worker performance to extend the capabilities of discrete event simulations in manufacturing	2003
	Human performance modelling as an aid in the process of manufacturing system design: a pilot study	2002
	Human performance modeling for discrete-event simulation: Workload	2002
	Discrete event simulation of operator interaction with an alarm system	1997
	Discrete event simulation as a tool to determine necessary nuclear power plant operating crew size	1996
	Modelling with the integrated performance modelling environment (IPME)	2003
SBA	Agent-based Modeling and Simulation Framework for Enhanced Project Schedules	2013
	How users' participation affects reputation management systems: The case of P2P networks	2010
	Human-Centered Safety Analysis of Prospective Road Designs	2010
	Collaboration and Human Factor as Drivers for Reputation System Effectiveness	2010
	Modelling Trust into an Agent-Based Simulation Tool to Support the Formation and Configuration of Work Teams	2009
	Towards a user-centred road safety management method based on road traffic simulation	2007
	A framework for Modeling and simulating human behavior in complex systems	2005
	Developing an agent model of human performance in air traffic control operations using apex cognitive architecture	2005
	Adding a motor control component to the operator function model expert system to investigate air traffic management concepts using	2004
	simulation	2004
	A framework for simulating human cognitive behavior and movement when predicting impacts of catastrophic events	2004

2.5.3.1 Áreas de aplicação

Dentre os artigos avaliados, podem-se verificar quais as áreas de aplicação dos projetos de simulação. Na Figura 2.7, têm-se os gráficos das áreas de aplicação tanto dos artigos relacionados à SED, a esquerda, quanto à SBA, a direita. É possível verificar que a área com maior porcentagem de artigos de SED que contém o termo fator humano é a área industrial, enquanto que na SBA é o tráfego aéreo.

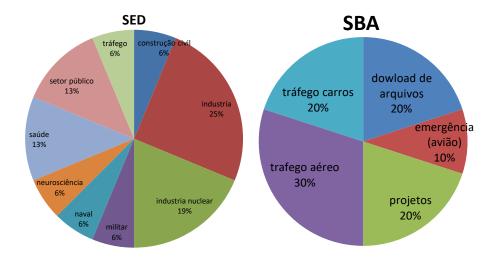


Figura 2.7- Áreas de aplicação dos artigos de SED e SBA

2.5.3.2 Softwares utilizados

Na Figura 2.8, têm-se os gráficos dos softwares utilizados nos projetos de SED (esquerda) e de SBA (direita) dos artigos selecionados. Pode-se verificar pelo gráfico que a maior porcentagem de utilização nos projetos de SED é o Micro Saint, e na SBA a grande maioria dos artigos não especifica o software utilizado, entretanto outros artigos não nomearam o software, mas especificaram a linguagem utilizada, no caso a linguagem Java.

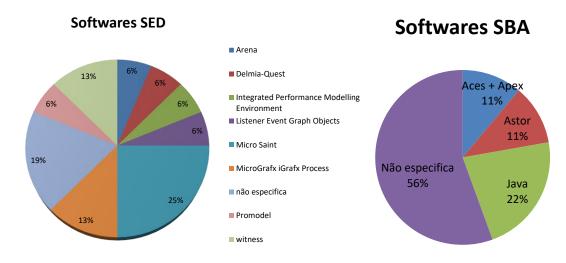


Figura 2.8- Softwares utilizados nos artigos de projetos de SED e SBA

2.5.3.3 Origem de publicação dos artigos

Na seleção de artigos, optou-se por somente artigos de revistas (*Journal*) ou congressos. No gráfico na Figura 2.9, pode-se verificar a porcentagem de artigos de revistas e congressos nos artigos relacionados à SED e SBA. É possível verificar que metade dos artigos de SED é

originária de congresso e a outra metade de revistas. Já para os artigos de SBA, a grande maioria tem origem em congressos da área.

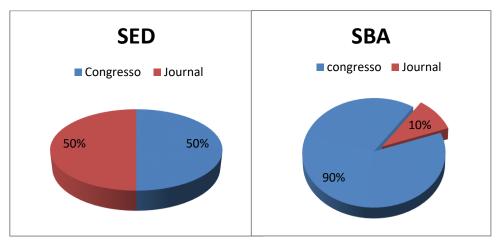


Figura 2.9- Origem dos artigos analisados

2.5.4 Análise Qualitativa

Na análise qualitativa dos resultados da revisão sistemática de literatura, foi possível verificar por meio da leitura dos artigos selecionados, qual o objetivo do artigo lido, como o projeto de simulação foi desenvolvido para alcançar este fim e ainda, como o fator humano foi representado neste projeto de simulação. Cabe ressaltar que esta análise também foi dividida em duas etapas: uma etapa com a análise dos artigos de projetos de SED que continham termos relacionados ao fator humano e a segunda etapa a avaliação de artigos de SBA que também continham termo relacionado ao fator humano. Nesta etapa foi possível avaliar ainda se existiam trabalhos que apresentassem a combinação destas duas abordagens (SED e SBA) para representar o fator humano e nenhum artigo com a referida configuração foi encontrado.

2.5.4.1 Artigos SED:

Conforme descrito na revisão sistemática, buscou-se por artigos em uma base de dados conhecida para melhor entender como a SED e a SBA estão representando o fator humano na simulação. Diversos autores têm defendido a necessidade de representação deste fator para tornar os resultados dos modelos computacionais mais próximos possíveis da realidade a fim de tornar eficientes análises e previsões resultantes de projetos de simulação.

Apesar dos critérios de busca apresentados, os artigos não necessariamente buscaram representar o elemento humano na simulação. O termo relacionado ao fator humano presente no artigo pode ter sido usado para outro fim, ou ter sido simplesmente citado apenas. O trabalho desenvolvido por Anjomshoae, Hassan e Rebi (2014), por exemplo, é uma revisão de literatura

que destaca a importância de representar o fator humano na área da saúde, mas não apresentaram aplicações, nem soluções relacionadas ao assunto.

Pecek e Kovacic (2011) apresentam um estudo de caso de um projeto de simulação de atendimento de pacientes em asilos, entretanto só utilizam o termo fator humano no resumo para dizer que o projeto de simulação está sendo aplicada em uma área onde o fator humano é importante, mas não faz nenhuma menção de representação do elemento humano no artigo. Já Hughes e Jiang (2010) desenvolveram um estudo do desempenho de operadores que controlaram escavadeiras. Por meio da coleta de dados de tempos das atividades, foi possível calcular a carga de trabalho de cada operador. Como resultado, puderam verificar que a experiência do operador, bem como tipo de escavadeira, influencia no tempo de execução da tarefa.

Pennathur *et al.* (2010) utilizaram a SED para criar um simulador do sistema de rastreamento de pacientes em um hospital. As pessoas puderam ser treinadas neste simulador para lidar com situações adversas como telefone tocando e erros de digitação em um ambiente controlado no laboratório. A preocupação neste caso não é representar o elemento humano nos modelos de simulação e sim treinar as pessoas para que a falha no desempenho destas pessoas não prejudique o sistema.

Já Kovacic e Pecek (2007) desenvolveram um modelo de simulação de um setor administrativo público de um centro de assistência social. Os autores não descrevem em detalhes a representação do elemento humano, mas utilizam distribuições uniformes para os tempos das atividades das pessoas envolvidas e concluem que a performance humana é algo difícil de se analisar. Liu, Qiu e Xie (2010) desenvolvem uma metodologia para avaliar a confiabilidade dos sistemas de corredores em navios. Como é difícil obter dados para esta situação analisada, os autores simulam cenários com dados hipotéticos para verificar se pelo menos um corredor estará disponível para passagem e a probabilidade de que a população irá complete a tarefa de sair do navio dentro do tempo.

Keller (2002) analisa a carga de trabalho, *workload*, de uma pessoa que atende o celular enquanto dirige. Para isso ele utiliza os conceitos da teoria de múltiplos recursos identificando o valor tabelado na literatura dos componentes visual, auditório, cognitivo e psicomotor para cada atividade realizada durante a direção do veículo. Como resultado do modelo tem-se gráficos do valor do *workload* do motorista ao longo do percurso. Enquanto que Fowles-Winkler (2003) demonstra em seu artigo os recursos de um software de SED baseado em Linux IPME usado no ambiente militar. No software é possível inserir para cada atividade o peso das

características cognitivas, visual, auditória e psicomotora dos recursos, resultando no *workload* dos recursos humanos em termos destas características. Apesar de mencionar que é possível inserir funções e variáveis para o elemento humano, não descreve nenhuma.

Kozine (2006) utilizou um estudo de caso em uma indústria nuclear para simular a probabilidade de falhas na execução das tarefas de um operador, considerando sua habilidade e a demanda das tarefas. A habilidade está relacionada à distribuição de tempos e a falha ocorre quando o tempo de execução é maior que o tempo disponível e, portanto, o modelo calcula a probabilidade deste evento acontecer. Já Yow e Engh (1997) utilizaram a SED para modelar confiabilidade humana no controle de uma usina nuclear. Eles simulam a probabilidade de a pessoa errar ao receber alarmes no computador sobre o funcionamento da usina. Para isso eles inserem no modelo computacional uma sequência de tarefas e cada tarefa tem uma probabilidade de erro, sendo este valor obtido da literatura específica da área. Ainda neste setor, Laughery *et al.* (1996) desenvolvem modelos computacionais para avaliar o trabalho de pessoas que controlam abertura ou fechamento de válvulas em uma usina nuclear, mais especificamente verificar a disponibilidade dos operadores, ou seja, quando estes atrasam a abertura ou fechamento porque estão realizando outras atividades.

Mason *et al.* (2005) alertam que o elemento humano é representado de forma superficial na simulação e buscam sanar esta lacuna usando funções de densidade e probabilidade para representar as variações de tempo das atividades dos operadores e por meio de um estudo real de tempos de um posto de trabalho. Neste, os autores apresentaram a distribuição de Pearson como a melhor distribuição para o sistema em estudo. Baines *et al.* (2003), na tentativa de melhor representar o fator humano, buscam encontrar a distribuição de tempos a ser utilizada por meio de medições de tempo de uma linha de produção. Eles concluem que as distribuições são diferentes para cada operador, não sendo algo simples de ser obtido.

Baines e Kay (2002) desenvolveram um estudo piloto para descreverem um passo a passo de como inserir em modelos computacionais a relação entre fator humano, ambiente e desempenho. Apesar de levantar questões importantes como a que fatores ambientais (barulho, ventilação, temperatura, luminosidade e limpeza) e fatores pessoais (estereótipos) afetam o desempenho humano e por consequência a produtividade, os autores não descrevem como estes fatores devem ser inseridos na simulação para representar de forma mais realista o comportamento humano. Os próprios autores admitem fragilidades neste primeiro piloto sugerindo para futuros trabalhos testar a abordagem proposta, refinar os métodos de coleta de dados dos operadores, descrever melhor cada indivíduo, considerar efeitos das interações

sociais e desenvolver um método para verificar que os modelos estão sendo interpretados corretamente.

Baines *et al.* (2005) buscam através de um estudo de caso verificar se a variação humana é a causa da diferença entre os resultados real a simulado. Para isso, criaram dois modelos com fatores que afetam o desempenho, sendo um considerando o fator idade e o outro considerando o ritmo circadiano. Mesmo tendo realizado o estudo considerando uma linha de produção real, os autores optam por fazer diversas simplificações como considerar variáveis como idade e hora que acorda igual para todos os operadores a fim de evitar maiores complexidades no modelo. Apesar dos autores terem demonstrado a possibilidade de inserir modelos de desempenho humano na simulação, os resultados apresentaram variação. Não foi feita nenhuma validação do modelo computacional e os resultados apresentaram uma variação menor do que o esperado em ambos os casos, necessitando, segundo os autores, uma investigação detalhada.

Pode-se perceber, portanto, que alguns dos artigos apresentados não estão relacionados diretamente a projetos de simulação que buscaram representar o fator humano. Entretanto, os outros trabalhos apresentaram esta preocupação, onde é possível verificar que a representação do fator humano na simulação se dá pela introdução da variação do desempenho humano nos modelos. Desempenho este afetado pela alteração dos elementos cognitivos, pelo cálculo da probabilidade de erros no caso dos trabalhos relacionados a usina nuclear ou então, na grande maioria dos casos, por meio da cronometragem de dados de tempo, a fim de achar uma distribuição de probabilidades que melhor represente a variação do tempo das atividades.

Cabe dizer que o trabalho de Baines *et al.* (2005) é um dos principais artigos que motivou esta pesquisa, uma vez que os autores levantaram esta questão sobre a importância de representar o elemento humano na simulação e ainda chamaram a atenção para dois fatores que afetam o desempenho humano e, portanto, precisavam ser inseridos no modelo de simulação: a idade e o ritmo circadiano. Entretanto, conforme já apresentado, os autores utilizaram a SED para representar o fator humano e acabaram encontrando dificuldades como a complexidade do modelo, sendo obrigados então a fazer diversas simplificações na modelagem computacional, apresentando resultados inconclusivos.

2.5.4.2 Artigos SBA

O objetivo desta etapa é avaliar os artigos de projetos de SBA para verificar como o termo relacionado ao fator humano foi utilizado nestes trabalhos. Conforme citado anteriormente, os

artigos podem conter algum dos termos selecionados na revisão sistemática, mas não estar relacionado diretamente à representação do elemento humano no projeto de simulação.

Martínez-Miranda e Pavón (2009) buscaram analisar o fator confiança das pessoas que trabalham em projetos e para isso simularam o comportamento das pessoas (agentes) em times de projeto. Eles imputaram características nos agentes como: personalidade (amável, expressivo, analítico, direcionador), estado emocional (interesse, desejo, desgosto e ansiedade), características sociais (introvertido, extrovertido, gosta de trabalhar em time ou sozinho), capacidades cognitivas (nível de experiência e nível de criatividade) e utilizaram da lógica *fuzzy* para verificar a variação do nível de confiança dos agentes devido a cada uma destas características. Já Lazarova-Molnar (2013) desenvolveu uma estrutura (*framework*) conceitual para melhorar a alocação de tarefas aos times de projetos utilizando SBA. As tarefas, os times e os gerentes são representados por agentes cujos comportamentos são compostos por ações que podem causar mudança no ambiente ou nos outros agentes e por mecanismos para selecionar as ações apropriadas com base nas percepções e no estado do agente.

Lee, Remington Ravinder (2005) desenvolveram um modelo de comportamento do elemento humano considerando os módulos: arquitetura do recurso humano (capacidade cognitiva, perceptiva e motora dos componentes) arquitetura de seleção de ações (quais tarefas devem ser realizadas e qual recurso deve ser alocado) e biblioteca de procedimentos (conhecimento e conjunto de tarefas a serem realizadas). Este modelo foi inserido em outro modelo de transporte aéreo que simula outros agentes como fluxos do tráfego aéreo, terminal e aeroporto, mas não simula o fator humano como os controladores aéreos. Apesar de mostrar telas da interface construída, não detalha equações utilizadas para representar os agentes.

Os mesmos autores Lee, Ravinder e Johnston (2005) apresentam uma continuação do trabalho citado anteriormente, desenvolvendo um modelo onde o agente representa os controladores aéreos e o seu comportamento humano, descrito como a interação dos sistemas cognitivo, perceptivo e motor. Já Goknur, Bolton e Bass (2004) desenvolveram um modelo simulando o comportamento de pilotos ao receberem alertas de um *display* em um *cockpit* de avião. Para simular o comportamento humano eles incorporam um módulo gerenciador de tarefas que prioriza as tarefas de acordo com o nível de alerta.

Ainda com relação a área de transporte aéreo, mas com um foco diferente, Court *et al.* (2004) utilizaram a SBA para modelar comportamento das pessoas para saírem do avião em uma situação de emergência. O comportamento dos agentes "pessoas" é direcionado pelas funções que executam e por características psicológicas diferentes. No caso das funções, o agente pode

avançar (mover), bloquear (posição inacessível), entrar em pânico (que reduz a capacidade do agente de receber mensagens como avançar). Já como exemplo de características psicológicas tem-se conhecimento sobre as saídas, onde uma aeromoça conhece melhor o caminho que os passageiros, ou ainda se os agentes são casais ou mãe e filho, pois serão simulados juntos.

Boella e Remondino (2009) utilizaram a SBA para simular o ambiente de *download* de arquivos e verificar como a influência de contatos sociais que comunicam a reputação de usuários pode afetar no sistema. Os agentes são de dois tipos: pessoas confiáveis que fazem *upload* de arquivos reais ou maliciosas que fazem *upload* de arquivos falsos. Os autores publicaram os resultados da pesquisa em outro artigo também selecionado na revisão sistemática, o Remondino e Boella (2010).

Gregoriades (2007) buscou por meio da SBA quantificar a probabilidade de acidentes em uma rodovia. Para modelar o comportamento dos agentes motoristas, ele utilizou uma tabela da literatura com diversos fatores que influenciam o motorista e a probabilidade de que cada um destes fatores cause um acidente de trânsito. Os resultados deste trabalho também foram apresentados no artigo Gregoriades *et al.* (2010), artigo este também selecionado na pesquisa da revisão sistemática.

Pode-se perceber por meio da análise dos trabalhos selecionados que todos os trabalhos estão relacionados com a representação do comportamento em diversas situações, e estes comportamentos são resultados de características pessoais, cognitivas, ações, e até mesmo de situações emergenciais como alertas de display e evacuações. Entretanto, nenhum trabalho apresenta em detalhes como estes agentes foram construídos. Cabe observar ainda que nenhum destes trabalhos está relacionado ao setor industrial, buscando compreender o desempenho humano no ambiente de manufatura.

3. MÉTODO DE PESQUISA

O uso de uma metodologia cientifica robusta é o que separa um trabalho cientifico de um trabalho meramente opinativo, isso porque uma metodologia científica bem escolhida e aplicada confere legitimidade às conclusões atingidas pela pesquisa (MIGUEL *et al.* 2012). O objetivo deste capítulo é classificar a presente pesquisa quanto a sua natureza, abordagem, objetivo e método de pesquisa. Os passos a serem seguidos para o desenvolvimento do trabalho também serão apresentados.

3.1 Classificação da presente pesquisa

Segundo Appolinário (2006) uma pesquisa é considerada aplicada quando possui objetivos práticos, ou seja, os resultados alcançados com sua realização sejam aplicados ou utilizados para a solução de problemas reais. A presente pesquisa pode ser classificada então, com relação à natureza, como uma pesquisa aplicada. Já com relação à abordagem, pode-se classificar este trabalho como baseado em modelagem quantitativa. Isto porque, nas pesquisas baseadas em modelagem quantitativas, os modelos de relações causais entre variáveis de controle e variáveis de desempenho são desenvolvidos, analisados ou testados e se alteram sobre um domínio específico (BERTRAND e FRANSOO, 2002).

Os autores Bertrand e Fransoo (2002) classificam as pesquisas quantitativas em pesquisas axiomáticas e pesquisas empíricas, sendo que nas pesquisas axiomáticas, a principal preocupação do pesquisador é obter soluções dentro de um modelo definido, gerando conhecimento sobre o comportamento de certas variáveis. Já na pesquisa empírica, a principal preocupação do pesquisador é assegurar que existe uma adequação entre o modelo desenvolvido e o sistema real, e os resultados teóricos são aplicados em processos reais. Podese dizer então que o presente trabalho é classificado como uma pesquisa empírica, já que busca por meio da combinação de duas técnicas de simulação representar de forma realista o fator humano em projetos de simulação.

Ainda dentro da classificação das pesquisas quantitativas, os autores Bertrand e Fransoo (2002) descrevem a pesquisa empírica em dois tipos: a Empírica Descritiva e a Empírica Normativa. A Empírica Descritiva visa criar um modelo que descreva adequadamente as relações causais que podem existir na realidade, levando à compreensão dos processos atuais. Já a Empírica Normativa busca o desenvolvimento de políticas, estratégias e ações para melhorar um sistema real. Portanto, como a atual pesquisa busca avaliar se a combinação da SBA com a SED pode melhor representar o fator humano em projetos de simulação, comparando os resultados dos

modelos computacionais com o sistema real, esta pesquisa é considerada uma pesquisa empírica descritiva.

Cabe dizer ainda que o método de pesquisa a ser utilizado na pesquisa é o método Modelagem e Simulação. Modelar é o processo de mapear problemas quando prototipagem ou experimentação no sistema real é impossível ou oneroso e a simulação é o processo de execução do modelo utilizada em problemas complexos onde a dinâmica é importante (BORSHCHEV e FILIPPOV, 2004). O método Modelagem e Simulação foi escolhido, uma vez que todas as etapas para criação de modelos de simulação serão seguidas para alcançar o objetivo da pesquisa. Na Figura 3.1 tem-se a classificação deste trabalho com relação à sua natureza, abordagem, objetivo e método de pesquisa.

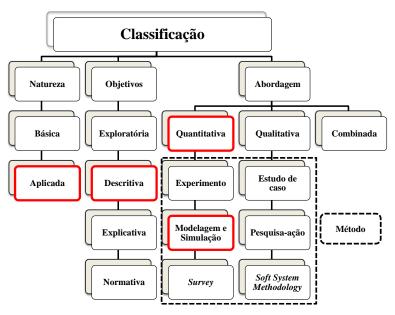


Figura 3.1- Classificação da pesquisa Fonte: Adaptado de Miguel *et al.* (2010).

De acordo com Bertrand e Fransoo (2002), trabalhos baseados em pesquisa empírica devem envolver diversos passos como: identificação das premissas do problema, dos tipos de processo operacional e do problema de decisão considerados, definições operacionais do processo, do sistema decisão e derivação das hipóteses relativas ao comportamento do processo, desenvolvimento e resultados dessas medidas, interpretação dos dados e observações relacionadas às hipóteses, e a confirmação ou rejeição das premissas do modelo teórico. Arenales *et al.* (2007) propõem um processo simplificado de abordagem de resolução de um problema por meio de modelos de pesquisa operacional como, por exemplo, modelos de simulação. Os quatro principais passos desta abordagem são:

- 1. Formulação/Modelagem: Define-se as variáveis e as relações matemáticas para descrever o comportamento relevante do sistema ou problema real;
- 2. Interpretação/inferência: Argumenta-se se as conclusões retiradas do modelo têm significado suficiente para inferir conclusões ou decisões para o problema real;
- 3. Dedução e análise: Aplica-se técnicas matemáticas e tecnologia para resolver o modelo matemático e visualizar quais conclusões ele sugere;
- 4. Avaliação e julgamento: Quando a avaliação das conclusões inferidas aponta que estas não são adequadas e a definição do problema e sua modelagem matemática precisam de revisão, sendo necessária a repetição do ciclo.

Por apresentar uma abordagem simples, favorecer pesquisas empíricas e ser focada em conclusões nas etapas que propõe, este diagrama será utilizado para o desenvolvimento do trabalho. Entretanto, como o método Modelagem e Simulação foi escolhido para o desenvolvimento da presente pesquisa, irá se utilizar também a estrutura proposta por Montevechi *et al.* (2010), para que se possa detalhar cada passo a ser seguido nos projetos de simulação.

Na Figura 3.2, tem-se do lado esquerdo o diagrama de Arenales *et al.* (2007), enquanto que no lado direito desta figura tem-se a estrutura proposta por Montevechi *et al.* (2010). Conforme visto por meio desta figura, as três primeiras etapas principais (formulação/modelagem, interpretação/inferência e dedução/análise) do diagrama de Arenales *et al.* (2007) coincidem com os objetivos das etapas de concepção, implementação e análise da estrutura de Montevechi *et al.* (2010). A combinação destas duas estruturas resultará nos passos a serem seguidos na aplicação do método de pesquisa para desenvolvimento do trabalho, que serão descritos a seguir.

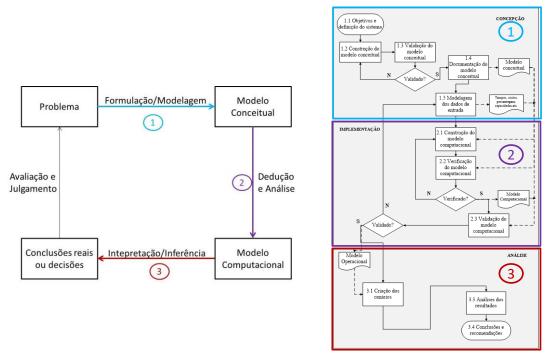


Figura 3.2- Estruturas propostas por Arenales et al. (2007) e Montevechi et al. (2010)

Pretende-se nesta fase modelar o processo dos sistemas produtivos em análise e os operadores pertencentes a este sistema.

3.1.1 Objetivos e definição do sistema

Em um projeto de simulação, o primeiro passo é definir quais os objetivos a serem alcançados com o desenvolvimento do projeto e qual o sistema a ser simulado para se alcançar estes objetivos. No caso desta tese, o objetivo é verificar se a SBA combinada a SED pode representar o fator humano mais próximo possível do real. Para tanto, os operadores serão representados como agentes e será inserida nestes operadores a variação do ritmo circadiano com a finalidade de alterar sua produtividade ao longo do dia e os valores de produtividade resultantes do modelo computacional serão comparados ao sistema real. Estes sistemas reais considerados para estudo são dois sistemas produtivos com mão de obra manual intensiva, já que nestes casos a variação do ritmo circadiano é mais acentuada.

3.1.2 Construção do modelo conceitual

Uma vez definidos os objetivos e o sistema a ser simulado, o próximo passo é a construção do modelo conceitual do sistema. De acordo com Sakurada e Miyake (2010), a formulação do modelo conceitual consiste em levantar suposições sobre os componentes, a estrutura do sistema e as hipóteses sobre os parâmetros e variáveis envolvidas. Para este trabalho, o modelo

conceitual do sistema em estudo será construído por meio da técnica de modelagem IDEF-SIM, proposta por Montevehi *et al.* (2010).

Cabe dizer que o agente que irá representar os funcionários dos sistemas produtivos em estudo também precisa ser conceitualmente modelado. Nesta modelagem será representado como o ritmo circadiano será inserido em cada agente e como isso afetará sua produtividade e para esta modelagem nenhuma técnica específica será utilizada. Vale ressaltar que o nível de complexidade de agente utilizado nesta pesquisa é o nível individual, conforme classificação de Macal (2016).

3.1.3 Validação do modelo conceitual

Segundo Sargent (2015), a validação do modelo conceitual é definida como a determinação de que as teorias e suposições presentes no modelo conceitual estão corretas e que a representação da entidade problema é razoável para a finalidade do modelo. Esta validação do modelo conceitual muitas vezes é feita através da validação face a face, onde especialistas do sistema em estudo verificam se o modelo conceitual representa corretamente o sistema modelado e está será a técnica de validação utilizada para os modelos conceituais dos sistemas.

3.1.4 Documentação do modelo conceitual

Documentar envolve armazenar, catalogar e descrever de maneira funcional o modelo conceitual do processo. Segundo Kotiadis e Robinson (2008), o modelo conceitual muitas vezes não é documentado, permanecendo apenas na mente do modelador e dos proprietários do problema. Os modelos conceituais em IDEF-SIM dos sistemas em análise neste trabalho serão documentados e apresentados no capítulo seguinte, bem como a representação dos agentes.

3.1.5 Modelagem dos dados de entrada

Os dados coletados neste passo são informações relacionadas a tempo, custo, porcentagens, capacidades, entre outras, que irão alimentar o modelo computacional. De acordo com Chwif e Medina (2015), o estudo de modelagem pode ser resumido em três etapas:

- Coleta de dados: corresponde ao processo de amostragem, onde a amostra é um conjunto de valores retirados da população de interesse utilizado para representar a população no estudo estatístico.
- Tratamento dos dados: são utilizadas técnicas para descrever os dados levantados, identificar as possíveis falhas nos valores amostrados e aumentar o conhecimento acerca do fenômeno em estudo. Estas falhas estão relacionadas aos *outliers* que são

- valores não usuais cujas causas mais comuns são os erros na coleta de dados ou um evento raro e totalmente inesperado
- Inferência: aplica-se o conhecimento dos cálculos de probabilidades para inferir
 qual o comportamento da população a partir da amostra, tendo como resultado uma
 distribuição de probabilidades que representara o fenômeno aleatório em estudo e
 será incorporado ao modelo de simulação.

Cabe dizer que os dados relacionados ao tempo de duração das atividades manuais serão utilizados para alimentar o modelo computacional. Para o desenvolvimento do trabalho estes dados serão tratados e quando necessário, inferidos.

3.2 Dedução e análise

Aplicam-se técnicas matemáticas e tecnologia para resolver o modelo matemático e visualizar suas conclusões. No caso deste trabalho, irá se utilizar da simulação computacional para o desenvolvimento desta etapa.

3.2.1 Construção do modelo computacional

Para a construção do modelo computacional, o primeiro passo é a escolha do software a ser utilizado para este fim. Para Baldwin, Eldabi e Paul (2005) escolher o pacote correto de simulação é vital, uma vez que esta escolha é rentável não só em termos monetários, mas também em poupar tempo e esforço que poderiam ser gastos na adaptação de um pacote incorreto. No caso deste trabalho o software escolhido é o Anylogic®, uma vez que este software permite a construção de modelos híbridos de simulação, objetivo deste trabalho.

3.2.2 Verificação do modelo computacional

Verificar um modelo computacional é garantir que o programa computacional e a implementação do modelo conceitual estejam corretos (SARGENT, 2015). É importante que a cada etapa da construção do modelo, o mesmo possa ser verificado para que se houverem erros ou incoerências, estes possam ser imediatamente corrigidos. Cabe dizer que alguns softwares possuem sinalizadores, variáveis e contadores que podem ser utilizados na identificação destas incoerências e assim facilitar o processo de verificação. Os modelos computacionais deste trabalho serão verificados com auxílio de recursos do próprio software de simulação.

3.2.3 Validação do modelo computacional

Para Law (2006), validação é o processo de determinar se o modelo de simulação é uma representação exata do sistema, para os objetivos particulares do estudo. Para obter um elevado nível de confiança no modelo e em seus resultados, comparações entre as variáveis de saída do modelo e do sistema real são realizadas, sendo que estas comparações podem ser feitas através de comparação gráfica de dados (histogramas, *box plot* ou gráficos de pontos), intervalos de confiança e teste de hipóteses (SARGENT, 2015).

Ainda segundo Sargent (2015), o teste de hipóteses pode ser usado no processo de validação do modelo computacional para comparar médias, variâncias, distribuições e séries de tempo de variáveis de saída de um modelo e de um sistema para cada conjunto de condições experimentais, a fim de determinar se o comportamento dos resultados do modelo tem uma variação de confiança aceitável. Onde se considera:

 H_0 : Modelo é válido para uma variação de confiança aceitável sob o conjunto de condições experimentais.

 H_1 : Modelo não é válido para uma variação de confiança aceitável sob o conjunto de condições experimentais.

De acordo com Montgomery e Runger (2003), procedimentos de teste de hipóteses usam informações de uma amostra aleatória proveniente de uma população de interesse e se essa informação for consistente com a hipótese, então se conclui que a hipótese é verdadeira, mas se esta informação for inconsistente com a hipótese conclui-se que a hipóteses é falsa. Para os autores, a estrutura de problemas de teste de hipóteses será idêntica em todas as aplicações consideradas, onde a hipótese nula é a que devemos testar e a rejeição da hipótese nula sempre leva a não rejeição da hipótese alternativa.

Para a validação dos modelos computacionais desta pesquisa será utilizado o teste de hipóteses, por meio do qual se pretende avaliar se a média dos resultados de produtividade dos modelos computacionais é estatisticamente igual a média de produtividade dos sistemas reais em estudo.

3.3 Interpretação/inferência

Esta atividade corresponde a verificar se as conclusões retiradas do modelo têm significado suficiente para inferir conclusões ou decisões para o problema real. No caso desta pesquisa, pretende-se por meio das conclusões provenientes do modelo verificar se a os modelos de simulação híbrida de SBA e SED, com inserção do ritmo circadiano, representam fielmente os sistemas reais simulados e verificar ainda se esta simulação combinada está mais próxima dos resultados reais do que a SED pura.

3.3.1 Definição e construção dos cenários

Tendo terminado as etapas de verificação e validação, o modelo de simulação torna-se operacional, vindo a ser uma fonte poderosa de experimentos estatísticos utilizados no processo de análise do comportamento do sistema. Para Montgomery e Runger (2003), o experimento pode ser visto como um teste, ou um conjunto de testes, no qual mudanças propostas são aplicadas em variáveis de entrada de um processo ou sistema, para assim observar e identificar mudanças ocorridas em variáveis de saída. Definidos os cenários, realiza-se a experimentação, ou seja, a execução da simulação para gerar dados desejados e análises de sensibilidade (EHM, MCGINNIS e ROSE, 2009).

No caso deste trabalho, tendo validado o modelo híbrido de simulação (SBA e SED) construído para cada sistema, irá se comparar o resultado deste modelo com o resultado de um modelo de simulação a eventos discreto do mesmo sistema, a fim de se verificar qual mais se aproxima do resultado do sistema real.

3.3.2 Análise dos resultados

De acordo com Chwif e Medina (2015), o processo de análise de resultados é geralmente menos dispendioso do que os processos de modelagem, construção do modelo computacional, verificação e validação, uma vez que é o modelo quem trabalha para gerar resultados. Vale ressaltar que boas análises permitem melhores condições e maior segurança para a tomada de decisão e no caso deste trabalho serão avaliados os resultados das comparações gráficas e estatísticas das etapas anteriores.

3.3.3 Conclusões e recomendações

Um projeto de simulação só está completo com a apresentação de um relatório técnico, capaz de sintetizar as principais conclusões de um projeto de simulação, e a documentação completa deste projeto (CHWIF e MEDINA, 2015). Esta etapa é de extrema importância para presente pesquisa, na qual se pretende apresentar as principais conclusões dos passos realizados no desenvolvimento do ciclo.

3.4 Avaliação e julgamento

Esta etapa só é aplicável quando a avaliação das conclusões inferidas indica que estas não são adequadas e a definição do problema, bem como a modelagem matemática, precisam de revisão, resultando na repetição do ciclo. Esta etapa só será realizada no presente trabalho, portanto, se os resultados da etapa anterior forem inconclusivos.

4.DESENVOLVIMENTO DO MÉTODO DE PESQUISA

Muitos estudiosos apontam que o elemento humano não é bem representado em modelos de simulação e que isto se torna um grande problema, uma vez que pode até mesmo afetar a confiabilidade dos resultados gerados pelos modelos computacionais. O objetivo deste estudo é, portanto, utilizar a combinação da SBA com a SED, com a inserção do fator ritmo circadiano nos agentes, a fim de verificar se esta simulação híbrida acrescida de um fator que afeta a produtividade do operador, pode representar o fator humano mais próximo possível do real.

Para atingir este objetivo será desenvolvido um projeto de simulação de três diferentes sistemas produtivos, com mão de obra manual intensiva, já que neste tipo de sistema a influência do ritmo circadiano se torna mais acentuada. Conforme explicado anteriormente, irá se utilizar a combinação das estruturas de Arenales *et al.* (2007) e Montevechi *et al.* (2010) para detalhar cada passo do projeto de simulação desenvolvido para os dois sistemas em estudo. Estes passos serão apresentados a seguir.

4.1 Sistema 1: Linha de produção de kits para montagem de chicotes elétricos

4.1.1 Formulação/Modelagem

O objetivo da primeira fase é entender e descrever o sistema por meio de formulação e modelagem conceitual. Portanto, os resultados principais são a modelagem conceitual do sistema e do agente.

4.1.1.1 Objetivos e definição do sistema

A finalidade é desenvolver um projeto de simulação do sistema produtivo em estudo por meio da combinação da SBA com a SED, com a inserção do ritmo circadiano nos agentes, a fim de verificar se esta simulação híbrida acrescida de um fator que afeta a produtividade do operador, pode representar o fator humano mais próximo possível do real.

O sistema em análise trata-se de uma linha de produção de chicotes elétricos de uma empresa multinacional localizada no sul de Minas Gerais. Os dados do sistema utilizados foram baseados no trabalho de Paiva (2010) e está limitado às cinco primeiras células de manufatura por estas se tratarem de uma atividade totalmente manual. Este trecho escolhido representa parte de uma linha de produção responsável por produzir kits de cabos elétricos que serão roteados na mesa de montagem de chicotes elétricos. Em cada célula tem-se um operador cuja atividade é inserir uma quantidade pré-definida de cabos em conectores e entregar sua pré-montagem para o

operador da célula posterior através de trilhos, conhecidos como trilhos de kit. O operador da última célula entrega o kit final para que este possa ser roteado nas mesas de montagem de chicotes elétricos. Cabe ressaltar que a modelagem do processo a partir deste ponto não será considerada, pois os kits irão pra mesas de montagem inseridas em um *conveyor* (carrossel) que gira de acordo com uma velocidade imposta por um motor, sendo o ritmo de trabalho dos operadores ditado por uma máquina e não pelo ritmo circadiano.

4.1.1.2 Construção do modelo conceitual

Uma das etapas mais importantes de um projeto de simulação é a modelagem conceitual, já que por meio dela é possível entender o funcionamento do sistema e traduzir esta informação para construção do modelo computacional. Neste passo serão desenvolvidos dois modelos conceituais: o modelo conceitual do sistema produtivo, por meio da técnica IDEF-SIM, e também o modelo conceitual do agente. Cabe ressaltar que o agente que irá representar os funcionários dos sistemas produtivos em estudo também precisa ser conceitualmente modelado. Nesta modelagem será representado como o ritmo circadiano será inserido em cada agente e como isso afetará sua produtividade.

Na Figura 4.1 tem-se a modelagem conceitual do sistema a ser simulado. Vale lembrar que o modelo conceitual foi construído através da utilização da técnica IDEF-SIM e no Quadro 4.1, têm-se a definição dos símbolos desta técnica, utilizados neste modelo. A entidade 1, presente no modelo conceitual representa a matéria prima necessária para a montagem de kits de chicotes elétricos e sua chegada acontece em um ritmo de 23 peças/hora. O horário de trabalho é compreendido entre 8:00 e 17:00, com um intervalo entre 12:00 e 13:00, quando os operários se ausentam da linha de produção. Já a entidade 2 representa a entidade kit final pronto para ser roteado na mesa de montagem.

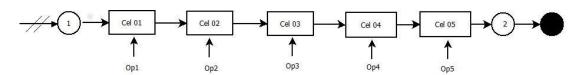


Figura 4.1- Modelo conceitual do sistema Fonte: Adaptado de Paiva (2010)

Elementos

Entidade

Funções

Fluxo da entidade

Recursos

Fluxo de entrada no sistema modelado

Ponto final do sistema

Quadro 4.1 - Símbolos da técnica IDEF-SIM utilizados na modelagem conceitual

Fonte: Adaptado de Oliveira (2010)

A modelagem conceitual do sistema apresentada do sistema representa o fluxo do processo de produção de kits para o roteamento de chicotes elétricos. Entretanto, ainda é necessário modelar o agente que irá representar os operadores da linha. A fim de aproximar o comportamento do agente ao comportamento real do operador, inseriu-se o ritmo circadiano, fator inerente ao ser humano que afeta a sua produtividade ao longo do dia. A Figura 4.2 apresenta a modelagem conceitual do agente, especificando como o ritmo circadiano será inserido no agente. Lembrando que o nível de complexidade deste agente é o nível individual.

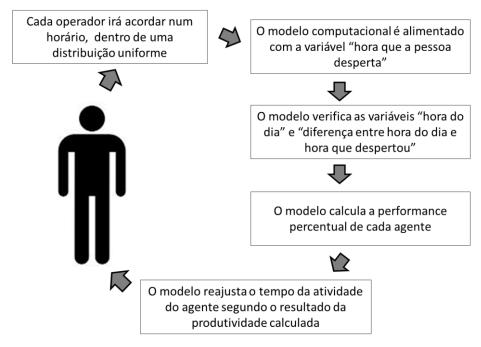


Figura 4.2 - Modelo conceitual do agente operador

4.1.1.3 Validação do modelo conceitual

O modelo conceitual em IDEF-SIM apresentado foi adaptado de Paiva (2010), entretanto a adaptação está relacionada somente a limitação do número de postos simulados, conforme justificado anteriormente. Pode-se dizer então que o modelo conceitual adaptado também foi validado, uma vez que o modelo original foi validado por meio de técnica de validação face a face com especialistas da área. Como a inserção do ritmo circadiano em um agente para representar um operador é algo inédito, o modelo conceitual do agente não pode ser validado por completo. Mas este será validado juntamente com a validação do modelo computacional, uma vez que se for comprovado que este modelo computacional representa a realidade, podese dizer que o agente foi desenvolvido corretamente.

4.1.1.4 Documentação do modelo conceitual

Esta etapa está relacionada a armazenar e catalogar o modelo conceitual do processo. Os modelos conceituais tanto do sistema quanto do agente foram documentados e armazenados, a fim de serem utilizados na etapa de construção da modelagem computacional.

4.1.1.5 Modelagem dos dados de entrada

O dado de entrada principal para o desenvolvimento do modelo é o tempo de realização das atividades manuais dos operadores em cada posto. Normalmente, em projetos de simulação, faz-se a coleta de tempos por meio de cronometragem e alimenta-se o modelo computacional com a média dos tempos cronometrados ou com a distribuição de probabilidade encontrada para estes dados. Vale lembrar que a grande maioria dos artigos de SED da revisão sistemática utilizou deste conceito de cronometragem para tentar representar a variação do desempenho das pessoas. Entretanto, por muitas vezes torna-se necessário um grande número de dados coletados para encontrar a melhor distribuição de probabilidade. No caso desta pesquisa, a variação do tempo dos operadores (aumento ou redução do tempo de tarefa) será calculada por meio da equação do ritmo circadiano sendo, portanto, necessária apenas a média dos tempos cronometrados. Para este estudo utilizou-se a média dos dez primeiros dados de tempo cronometrados para cada atividade e estas médias estão presentes na Tabela 4.1.

	T	1	1
Célula	Tempo (s)	Célula	Tempo (s)
Célula 01	138,4	Célula 04	138,6
Célula 02	141,0	Célula 05	138,3
Célula 03	144,4		

Tabela 4.1- Média dos tempos de cada posto

4.1.2 Dedução e análise

O objetivo desta etapa é aplicar técnicas matemáticas e tecnologia para resolver o modelo da etapa anterior e visualizar suas conclusões. No caso deste trabalho, a simulação computacional será utilizada para este fim.

4.1.2.1 Construção do modelo computacional

O software escolhido para o desenvolvimento do modelo computacional que combina SBA e SED é o Anylogic®, uma vez que este software permite a construção de modelos híbridos de simulação. Na Figura 4.3, tem-se a tela do modelo computacional construído, é possível verificar o fluxo da entidade Kit pelas 5 células de trabalho.

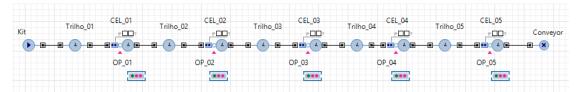


Figura 4.3- Tela do modelo computacional do sistema 1

No modelo computacional construído, os funcionários são representados por agentes, sendo estes influenciados pelo efeito do ritmo circadiano ao longo do dia. Conforme apresentado na revisão de literatura, o ritmo circadiano afeta diretamente o ser humano impactando a sua performance e consequentemente a sua produtividade. De acordo com a equação de Spencer (1987), a variação da performance deve ser calculada a cada hora considerando as variáveis "hora em que a pessoa acorda" e a "diferença entre a hora em análise e a hora que a pessoa acorda".

Para o modelo computacional, a cada hora do dia, a variação de performance de cada agente é calculada e esta variação é então multiplicada pelo tempo de duração da atividade, penalizando ou acrescentando este tempo de acordo com o resultado da equação. Vale ressaltar que o tempo utilizado no modelo para cada atividade foi o tempo médio de cada atividade, apresentado na Tabela 4.1.

Na Figura 4.4 tem-se a estrutura de um agente no modelo computacional construída por meio de um gráfico de estado. O parâmetro "horarioAcordar", representa a hora que o trabalhador irá despertar, valor este que será utilizado na equação (1) apresentada e é atribuído diariamente para cada agente. Esse parâmetro segue uma distribuição uniforme discreta que tem os valores variando entre 5 e 7 horas, conforme realidade dos funcionários da célula em análise. O ritmo circadiano irá influenciar ao longo do dia o comportamento do agente e como consequência afetará sua produtividade. Portanto, uma transição interna, que está representada com um relógio sobre ela, foi inserida no estado trabalhando, e irá atualizar de hora em hora essa produtividade a ser determinada pela Equação (1) apresentada anteriormente.

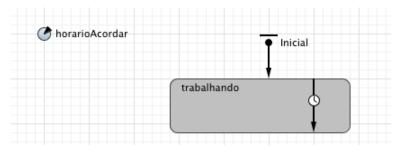


Figura 4.4- Representação do Agente na Simulação baseado em Agentes

Para que a equação de produtividade seja calculada a cada hora do dia, foi necessário criar um evento dentro do modelo computacional. Este evento, nomeado ritmo circadiano, verifica a cada hora rodada o novo valor da produtividade de cada operador. Na Figura 4.5 é possível verificar uma ação associada ao evento, ou seja, cada vez que este evento acontece o modelo executa o cálculo do valor da produtividade horária baseado na equação de Spencer (1987).

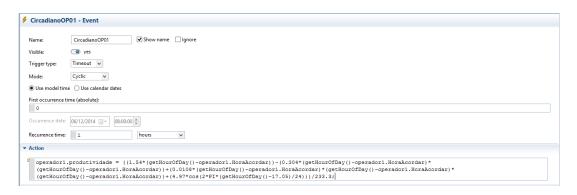


Figura 4.5- Evento horário para o cálculo da produtividade

4.1.2.2 Verificação do modelo computacional

De acordo com Sargent (2015), verificar um modelo computacional é garantir que o programa computacional e a implementação do modelo conceitual estejam corretos. No caso deste

modelo, verificou-se se haviam erros de programação, por meio de um recurso fornecido pelo software utilizado, a cada etapa de construção do modelo. Outra forma de verificação realizada foi inserir valores discrepantes no modelo e avaliar se os resultados estavam coerentes com esta situação.

4.1.2.3 Validação do modelo computacional

Validação é o processo de determinar se o modelo de simulação é uma representação exata do sistema, para os objetivos particulares do estudo (LAW, 2006). De acordo com Sargent (2015), o teste de hipóteses pode ser usado no processo de validação do modelo computacional para comparar médias de um modelo e de um sistema para cada conjunto de condições experimentais para determinar se o comportamento dos resultados do modelo tem uma variação de confiança aceitável.

Portanto, para a validação do modelo computacional construído na etapa anterior será utilizado o teste de hipóteses, por meio do qual se pretende verificar se a média da variável de saída "peças diárias produzidas" do modelo computacional é estatisticamente igual à produção diária coletada do sistema real em estudo.

O horizonte de comparação para validação estatística entre sistema real e simulado será de 21 dias, uma vez que este foi período em que foi realizado o acompanhamento das células do sistema real e a cronometragem de tempos das mesmas. Como o número de dados coletados no sistema real se restringe a 21, não se tem base suficiente para afirmar que os dados representam uma distribuição normal.

Este fato não prejudica a análise estatística dos dados, uma vez que, de acordo com Montgomery e Runger (2003), quando a distribuição em estudo não é caracterizada como uma distribuição normal, métodos não paramétricos como teste *Mann-Whitney* U podem ser utilizados. Ainda segundo os autores, este teste compara duas amostras independentes, onde a hipótese nula é testada para verificar se as médias das duas amostras são iguais. Já a hipótese alternativa está relacionada a não igualdade das médias.

Ao realizar o teste não paramétrico *Mann-Whitney* U para os dados do estudo, verificou-se que o *P-value* é maior que 0,05, ou seja, não se rejeita a hipótese nula que considera que as amostras são iguais. Pode-se afirmar com 95% de confiança, que as duas amostras, real e simulada, são consideradas estatisticamente iguais, ou seja, pode-se considerar que o modelo computacional construído representa o comportamento da célula em questão. Os resultados deste teste encontram-se na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Resultado do teste estatístico para o sistema 1

Média Sistema Real (pç/dia)	184
Média Sistema Simulado (pç/dia)	180,5
P-value	0,0923

4.1.3 Interpretação/inferência

Nesta etapa busca-se averiguar se as conclusões retiradas do modelo têm significado suficiente para inferir conclusões ou decisões para o problema real. Para o presente trabalho, pretende-se verificar se o modelo de simulação híbrida de SBA e SED, com inserção do ritmo circadiano, representa fielmente o sistema real simulado e verificar ainda se esta simulação combinada está mais próxima dos resultados reais do que a SED pura.

4.1.3.1 Definição e construção dos cenários

Uma vez verificado e validado, o modelo de computacional torna-se operacional e uma fonte confiável onde podem então ser realizados experimentos. Estes experimentos podem estar relacionados a construção de cenários, aplicação de *Design of Experiment-DOE*, análise de sensibilidade, entre outros. No caso desta pesquisa, será feita uma comparação gráfica entre a simulação hibrida (SBA e SED) e a clássica SED.

Como o modelo computacional que combina SBA e SED foi verificado e validado estaticamente, pode-se dizer então que este modelo representa o sistema real, ou seja, representar os seres humanos do sistema como agentes, com a inserção do ritmo circadiano, torna o modelo computacional próximo do real. Entretanto, como alguns autores apontam fragilidades na SED pura na tentativa de representar o elemento humano, afirmando até mesmo que este tipo de simulação superestima o resultado, irá se comparar o resultado de produtividade deste modelo computacional híbrido com o resultado de um modelo de SED do mesmo sistema, a fim de se verificar qual apresenta resultado mais próximo do sistema real.

Portanto, a fim de realizar comparações entre os dois tipos de simulação, um modelo de SED para o sistema foi construído. Neste modelo, os operadores são representados como simples recursos e o tempo de execução das atividades destes operadores está relacionado à melhor distribuição de probabilidades encontrada para os tempos coletados em cronometragem real da linha. A melhor distribuição de probabilidade para os dados coletados de tempo de cada célula encontra-se na Tabela 4.3.

Tabela 4.3- Distribuição de probabilidades de tempo para as células do sistema

Célula	Tempo (s)	Célula	Tempo (s)
Célula 01	Beta (122, 156, 1.47, 1.36)	Célula 04	N (141,6)
Célula 02	Beta (121, 161, 2.69, 2.82)	Célula 05	N (138.5,8)
Célula 03	N (144,7)		

É importante dizer que o número necessário de dados de tempo coletados para se encontrar uma distribuição de probabilidade confiável foi relativamente alto, sendo necessários dois meses de coleta de dados para obter uma média de 30 dados de tempo para cada atividade. Cabe ressaltar ainda que se realizou o mesmo procedimento do teste estatístico de validação para os resultados do modelo de SED, considerando-se novamente a variável produtividade diária, e pode-se verificar que este modelo também está validado (P*value* =0,056), uma vez que as médias das amostras real e simulada podem ser ditas estatisticamente iguais.

4.1.3.2 Análise dos resultados

Os resultados de produtividade do modelo de SED e do modelo híbrido de simulação (SBA e SED) foram comparados aos resultados reais de produtividade coletados do sistema. Assim, é possível verificar o comportamento dos dois tipos de simulação frente ao sistema real. A fim de quantificar a diferença entre os modelos, calculou-se o erro percentual relativo médio entre os modelos de simulação e o sistema real, ou seja, a média das diferenças percentuais entre o sistema simulado e o sistema real para cada dado. Vale lembrar que no modelo de DES o elemento humano é representado por recursos onde o tempo das atividades está relacionado a uma distribuição de probabilidades proveniente de uma cronometragem. Já no modelo de SBA combinado a DES, os operadores são representados por agentes, onde o tempo de execução das tarefas é afetado pelo ritmo circadiano.

Pode-se perceber por meio dos resultados apresentados na Tabela 4.4 que o modelo de simulação híbrida apresenta um erro relativo médio menor, ou seja, os seus resultados estão mais próximos do sistema real do que os resultados da SED.

Tabela 4.4- Erro relativo médio

	Modelo SED	Modelo SBA + SED
Erro relativo médio	5,4%	3,7%

4.1.3.3 Conclusões e recomendações

Pode-se concluir para os resultados apresentados nas etapas anteriores que, para este sistema em estudo, representar o elemento humano na simulação como agentes e não como simples recursos faz com que os resultados do projeto de simulação sejam mais próximos do real. Cabe dizer ainda que a inserção do fator humano nos agentes, inserção esta possibilitada pela SBA, fez com que os operadores fossem representados mais fielmente, uma vez que as pessoas não trabalham em um ritmo constante e a variação deste ritmo que afeta a produtividade humana foi considerado. Na SED buscou representar esta variação por meio da melhor distribuição de probabilidades dos dados de tempo, mas a variação pelo ritmo circadiano se mostrou mais precisa.

4.1.4 Avaliação e julgamento

Como as conclusões inferidas foram adequadas e a definição do problema e os resultados levantados não foram inconclusivos, esta etapa não precisa ser realizada.

4.2 Sistema 2: Linha de produção de componentes de alta tecnologia

A finalidade do desenvolvimento deste segundo projeto de simulação também é verificar se um modelo computacional construído por meio da combinação da SBA com a SED, com a inserção do ritmo circadiano nos agentes pode representar o fator humano mais próximo do real. Como a descrição de cada etapa já foi apresentada no estudo do sistema anterior, serão apresentados somente os resultados principais gerados nos seguintes passos.

4.2.1 Formulação/Modelagem

4.2.1.1 Objetivos e definição do sistema

Conforme dito anteriormente, o objetivo desta fase é o mesmo já apresentado no projeto de simulação do sistema 1. A diferença é que este projeto será desenvolvido em outro sistema produtivo com características comuns ao primeiro, como por exemplo, a mão de obra manual intensiva, já que neste tipo de sistema o ritmo circadiano se torna mais proeminente.

O segundo projeto de simulação está relacionado a uma célula de produção de *transponders* ópticos de uma empresa de alta tecnologia do interior de São Paulo. Os dados do sistema utilizados para modelagem foram baseados no trabalho de Costa (2010) e escolheu-se esta célula por se tratar de um processo totalmente manual realizado por dois operadores. O produto manufaturado nesta célula representa cerca de 40% do faturamento da empresa. A célula

trabalha em um único turno das 8h às 17h, com uma hora de almoço e 30 minutos para café distribuídos em intervalos ao longo do turno. Existem dois operadores disponíveis para montar o produto em questão e as atividades realizadas por estes operadores são totalmente manuais.

4.2.1.2 Construção do modelo conceitual

Neste passo serão apresentados dois modelos: o modelo conceitual do sistema produtivo desenvolvido por meio da técnica IDEF-SIM e o modelo conceitual do agente. Na Figura 4.6, tem-se o modelo conceitual do sistema onde é possível verificar o fluxo da entidade peça pelos postos de trabalho. No Quadro 4.2, tem-se os símbolos utilizados nesta modelagem que ainda não foram apresentados neste trabalho, os demais estão presentes no Quadro 4.1.

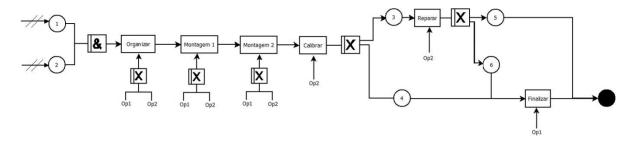


Figura 4.6- Modelo conceitual do sistema Fonte: Adaptado de [Costa 2010]

Quadro 4.2 - Símbolos da técnica IDEF-SIM ainda não apresentados

Elementos	Simbologia
&	Regra E
х	Regra OU

Fonte: Adaptado de Oliveira (2010)

De acordo com a Figura 4.6, as entidades matérias-primas 1 e 2 chegam ao sistema e são levadas pelo operador 1 ou 2 até a atividade organizar. O operador disponível organiza esses materiais na bancada e em seguida os componentes são montados pelo operador 1 ou 2. A seguir, ocorre uma soldagem realizada pelo operador 1 ou 2 resultando no produto montado. Este produto é ajustado e calibrado somente pelo operador 2, utilizando os equipamentos necessários. Neste ponto do processo, um produto montado pode seguir para a atividade finalizar, onde será acrescentada a blindagem, ou para atividade consertar, caso apresente defeito. Se necessitar de reparo, este reparo será feito pelo operador 2 e então o produto voltará para o fluxo normal, ou

seja, seguirá para atividade finalizar. Caso não seja possível o conserto, este seguirá para o fornecedor, deixando o sistema. Por fim, após ser finalizado, o produto é levado pelo operador 1 ou 2 para a célula de controle de qualidade (saída do sistema).

A modelagem conceitual do comportamento do agente no sistema e a influência do ritmo circadiano em suas atividades é a mesma modelagem apresentada na Figura 4.2 do sistema produtivo anterior. A diferença se encontra na base de dados de tempo das atividades destes agentes, dados estes que ainda serão apresentados nos próximos passos deste projeto.

4.2.1.3 Validação do modelo conceitual

Assim como no projeto de simulação anterior, o modelo conceitual em IDEF-SIM apresentado foi adaptado de um trabalho presente na literatura, neste caso de Costa (2010). Entretanto, esta adaptação está relacionada somente a atualização da simbologia da técnica IDEF-SIM utilizada. Portanto, pode-se considerar o modelo conceitual adaptado validado, uma vez que o modelo original foi validado por meio de técnica de validação face a face com especialistas da empresa. Conforme justificado anteriormente, o modelo conceitual do agente não pode ser validado por completo por se tratar de algo inédito, mas sua validação também será realizada juntamente com a do modelo computacional, tendo visto que se for comprovado que este modelo computacional representa a realidade, pode-se verificar que o agente foi desenvolvido corretamente.

4.2.1.4 Documentação do modelo conceitual

Ambos os modelos conceituais foram documentados e armazenados a para serem utilizados na etapa de construção da modelagem computacional.

4.2.1.5 Modelagem dos dados de entrada

O principal dado de entrada para o desenvolvimento do modelo é o tempo de duração das atividades dos operadores em cada posto de trabalho. Cabe lembrar que no caso deste estudo, a variação do tempo dos operadores (aumento ou redução do tempo de tarefa) será calculada por meio da equação do ritmo circadiano sendo, portanto, necessária apenas a média dos tempos cronometrados e no caso deste estudo foram utilizadas as me´dias dos dez primeiros tempos cronometrados para cada posto. Na Tabela 4.5 têm-se as médias dos tempos de cada posto de trabalho.

Posto	Tempo (s)	Célula	Tempo (s)
Organizar	6,3	Ajustar/Calibrar	31,6
Montar 1	15,4	Consertar	17,9
Montar 2	9,4	Finalizar	6,9

Tabela 4.5 - Média dos tempos de cada posto

4.2.2 Dedução e análise

4.2.2.1 Construção do modelo computacional

Utilizou-se do software Anylogic® para a construção do modelo computacional do sistema. Na Figura 4.7, onde se tem a tela deste modelo, pode-se verificar o fluxo da entidade pelas 5 células de trabalho.

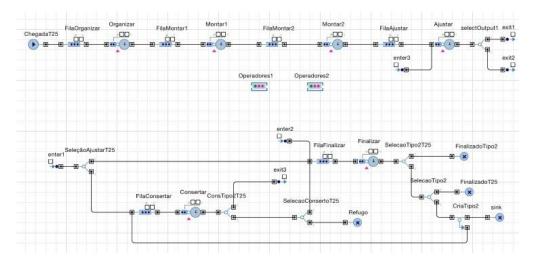


Figura 4.7- Tela do modelo computacional do sistema produtivo 2

O modelo computacional foi construído na mesma lógica apresentada no projeto de simulação anterior. Os funcionários foram representados como agentes influenciados pelo efeito do ritmo circadiano e a cada hora do dia, a variação de performance de cada agente é calculada pela equação de Spencer (1987) e esta variação é então multiplicada pelo tempo de duração da atividade, penalizando ou acrescentando este tempo. Já a estrutura de um agente no modelo computacional é a mesma da apresentada na Figura 4.2, sendo que a diferença neste caso é a base de dados de tempo de duração das atividades que será utilizada para cada operador.

4.2.2.2 Verificação do modelo computacional

Assim como no projeto de simulação anterior, o modelo computacional do sistema foi verificado a cada etapa de construção do mesmo.

4.2.2.3 Validação do modelo computacional

Para a validação do modelo computacional deste projeto de simulação foi utilizado o teste de hipóteses para verificar se a média da variável de saída "peças mensais produzidas" do modelo simulado é estatisticamente igual à produção mensal coletada do sistema real. O horizonte de comparação para validação estatística deste estudo foi de 6 meses, já que este foi período de acompanhamento do sistema real e a cronometragem de tempos dos postos de trabalho do mesmo. Como o número de dados coletados no sistema real é relativamente pequeno, não se tem base suficiente para afirmar que os dados representam uma distribuição normal.

Conforme explicado anteriormente, este fato não prejudica a análise estatística dos dados, e novamente será realizado o teste não paramétrico *Mann-Whitney* U para os dados do estudo. Por meio deste teste foi possível verificar que o *P-value* é maior que 0,05 indicando que a hipótese nula que considera que as amostras são iguais não deve ser rejeitada. Pode-se afirmar, portanto, com 95% de confiança que as duas amostras, real e simulada, são consideradas estatisticamente iguais, ou seja, o modelo computacional representa o comportamento do sistema produtivo em análise. Os resultados deste teste encontram-se na Tabela 4.6.

Tabela 4.6- Resultado do teste estatístico para o sistema 1

Média Sistema Real (pç/mês)	101,5
Média Sistema Simulado (pç/mês)	145,5
P-value	0,3785

4.2.3 Interpretação/inferência

4.2.3.1 Definição e construção dos cenários

Como o modelo computacional que combina SBA e SED do sistema em análise também foi validado estaticamente, pode-se dizer então que este modelo representa o sistema real, ou seja, representar os seres humanos do sistema como agentes com a inserção do ritmo circadiano, fez com que os resultados do modelo computacional se aproximassem do resultado real. Neste caso, irá se comparar também o resultado de produtividade deste modelo computacional híbrido com o resultado de um modelo de SED do mesmo sistema, a fim de se verificar qual mais se aproxima do resultado do sistema real.

Conforme o projeto de simulação anterior, um modelo de SED para este sistema foi construído, onde os operadores foram representados como simples recursos e o tempo de execução das atividades destes operadores está relacionado à melhor distribuição de probabilidades

encontrada para os tempos coletados em cronometragem real da linha. A distribuição de probabilidade para os dados coletados de tempo de cada posto de trabalho encontra-se na Tabela 4.7.

Tabela 4.7- Distribuição de probabilidades de tempo para as células do sistema

Posto	Tempo (s)	Célula	Tempo (s)
Organizar	N (7.3, 4.7)	Ajustar/Calibrar	N (25.9, 14.6)
Montar 1	N (12.6, 4.7)	Consertar	N (21.8, 12)
Montar 2	N (10.7, 3.4)	Finalizar	N (6.8, 1.4)

Realizou-se o mesmo procedimento do teste estatístico de validação para os resultados do modelo de SED e verificou-se que este modelo também foi validado (Pvalue =0,229), uma vez que a média das amostras real e simulada podem ser ditas estatisticamente iguais.

4.2.3.2 Análise dos resultados

É importante lembrar que no modelo de SED os operadores são representados por recursos e o tempo das atividades está relacionado a uma distribuição de probabilidades fruto de uma cronometragem. Enquanto que no modelo de híbrido de simulação, os operadores são representados por agentes, onde o tempo de execução das tarefas é afetado pelo ritmo circadiano.

A fim de quantificar a diferença entre o modelo híbrido e de SED, calculou-se também para este projeto de simulação o erro relativo médio entre os modelos de simulação e o sistema real e os resultados encontram-se na Tabela 4.8. Pode-se perceber por meio dos resultados apresentados que o modelo de simulação híbrida apresenta um erro relativo médio menor, ou seja, os seus resultados estão mais próximos do sistema real do que os resultados da SED.

Tabela 4.8- Erro relativo médio do sistema produtivo 2

	Modelo SED	Modelo SBA + SED
Erro relativo médio	51.3%	38.2%

4.2.3.3 Conclusões e recomendações

Conclui-se para os resultados obtidos até então que, para este sistema em estudo, a representação do elemento humano por meio da combinação das técnicas SBA e SED fez com que os resultados do projeto de simulação fossem mais próximos do real. Cabe dizer ainda que a inserção do fator humano nos agentes, facilitada pela SBA, tornou a representação do

elemento humano mais realista, uma vez que as pessoas não trabalham em um ritmo constante e a variação da a produtividade humana foi considerada.

4.2.4 Avaliação e julgamento

Como as conclusões inferidas foram adequadas e a definição do problema e os resultados levantados não foram inconclusivos, esta etapa não precisou ser executada.

4.3 Sistema 3: Linha de produção de placas eletrônicas

O intuíto do desenvolvimento deste terceiro projeto de simulação também foi averiguar se um modelo computacional construído por meio da combinação da SBA com a SED, com a inserção do ritmo circadiano nos agentes pode representar o fator humano mais próximo do real. Uma vez que a descrição de cada etapa já foi apresentada nos estudos dos sistemas anteriores, serão apresentados os resultados principais gerados nos seguintes passos.

4.3.1 Formulação/Modelagem

4.3.1.1 Objetivos e definição do sistema

O objetivo é desenvolver um projeto de simulação do sistema produtivo em análise por meio da combinação da SBA com a SED e a inserção do ritmo circadiano nos agentes, a fim de verificar se esta simulação híbrida, acrescida de um fator que afeta a produtividade do operador, pode representar o fator humano mais próximo do real.

O novo sistema produtivo em estudo trata-se de uma linha de produção de uma empresa do setor eletrônico situada na cidade de Santa Rita do Sapucaí, MG. A linha de produção em análise é responsável pela montagem de placas eletrônicas e é composta de dez etapas principais. As três primeiras etapas estão relacionadas à montagem do produto, onde cada operador insere um número determinado de componentes e envia a placa pré-montada para o próximo posto. Já as demais etapas consistem em postos de inspeção e testes seguidos pela etapa final de embalagem. Ao todo nesta linha trabalham 14 operadores em um turno com uma jornada diária de 8 horas. Os dados de tempo foram retirados do trabalho de Vilela (2015) e a justifica-se esta escolha pelo fato que o referido sistema produtivo é totalmente composto por etapas com mão de obra manual intensiva, o que auxilia no atingimento de objetivo deste trabalho, uma vez que o ritmo circadiano tem maior impacto nestes casos.

4.3.1.2 Construção do modelo conceitual

Neste passo foram desenvolvidos dois modelos conceituais, o modelo conceitual do sistema produtivo, por meio da técnica IDEF-SIM, e também o modelo conceitual do agente. Na Figura 4.8 tem-se a modelagem conceitual do sistema a ser simulado.

A primeira entidade presente no modelo conceitual representa a matéria prima no início da linha de montagem, com um ritmo de chegada de 500 peças/dia. Já a segunda entidade está relacionada ao produto que irá atravessar todo o processo até a etapa final de embalagem. O horário de trabalho é compreendido entre 8:00 e 17:00, com um intervalo entre 12:00 e 13:00, quando os operários se ausentam da linha de produção.

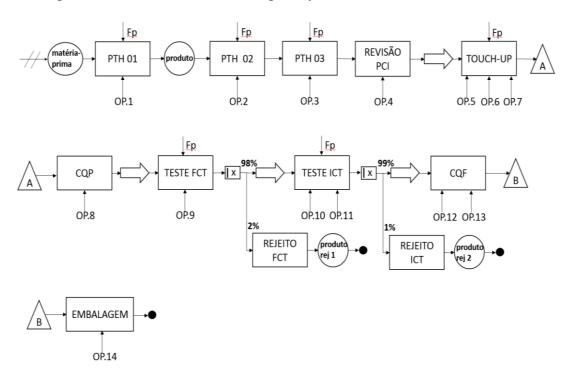


Figura 4.8- Modelo conceitual do sistema 3 Fonte: Vilela (2015).

A modelagem conceitual do comportamento do agente no sistema e a influência do ritmo circadiano em suas atividades é a mesma apresentada na Figura 4.2 do primeiro sistema produtivo analisado. A diferença se encontra na base de dados de tempo das atividades destes agentes, dados que serão apresentados nos passos seguintes.

4.3.1.3 Validação do modelo conceitual

Assim como nos projetos apresentados anteriormente, o modelo conceitual em IDEF-SIM apresentado foi obtido de um trabalho presente na literatura, neste caso de Vilela (2015).

Portanto, pode-se considerar o modelo conceitual validado, uma vez que o modelo original foi analisado por especialistas da empresa.

4.3.1.4 Documentação do modelo conceitual

Os modelos conceituais tanto do sistema quanto do agente foram documentados e armazenados, a fim de serem utilizados na etapa de construção da modelagem computacional.

4.3.1.5 Modelagem dos dados de entrada

O dado de entrada principal para o desenvolvimento do modelo é o tempo de realização das atividades manuais dos operadores em cada posto. Cabe lembrar que nesta pesquisa, a variação do tempo dos operadores (aumento ou redução do tempo de tarefa) será calculada por meio da equação do ritmo circadiano sendo, portanto, necessária apenas a média dos tempos cronometrados. Para o cálculo desta média foram utilizados os dez primeiros dados de tempo coletados em cada posto de trabalho na linha de produção e estas médias estão presentes na Tabela 4.9.

Postos Tempo (s) **Postos** Tempo (s) PTH 01 57,5 **CQP** 70,3 40,9 **PTH 02** 55,9 **FCT ICT** 72 **PTH 03** 43 COI 41.5 **PCI** 76 Embalagem 16,3 Touch Up 59

Tabela 4.9- Média dos tempos de cada posto

4.3.2 Dedução e análise

4.3.2.1 Construção do modelo computacional

O *software* utilizado para o desenvolvimento do modelo computacional que combina SBA e SED foi novamente o Anylogic®. Na Figura 4.9, tem-se a tela do modelo computacional construído, é possível verificar o fluxo da entidade pelos dez postos de trabalho.

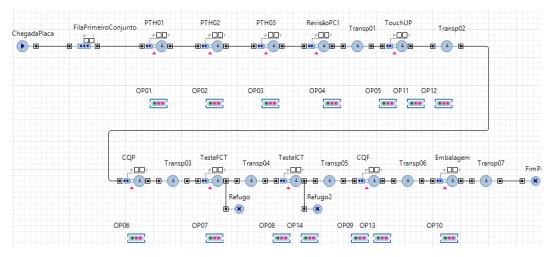


Figura 4.3 - Tela do modelo computacional do sistema 3

4.3.2.2 Verificação do modelo computacional

Assim como nos projetos de simulação anteriores, o modelo computacional do sistema foi verificado a cada etapa de construção do mesmo.

4.3.2.3 Validação do modelo computacional

Para validação do modelo computacional construído na etapa anterior também foi utilizado o teste de hipóteses para verificar se a média da variável de saída "peças semanais produzidas" do modelo computacional é estatisticamente igual à produção semanal coletada do sistema real em estudo.

O horizonte de comparação para validação estatística entre sistema real e simulado é de 30 semanas. Com o número de dados coletados no sistema real não se tem base suficiente para afirmar que os dados representam uma distribuição normal. Realizou-se, portanto, o teste não paramétrico *Mann-Whitney* U para os dados do estudo e verificou-se que o *P-value* é maior que 0,05 (*Pvalue* = 0,250), ou seja, não se rejeita a hipótese nula que considera que as amostras são iguais. Pode-se afirmar com 95% de confiança, que as duas amostras, real e simulada, são consideradas estatisticamente iguais, ou seja, pode-se considerar que o modelo híbrido construído representa o comportamento da célula em questão. Os resultados deste teste encontram-se na Tabela 4.10:

Tabela 4.10 - Resultado do teste estatístico para o sistema 3

Média Sistema Real (pç/semana)	1606,93
Média Sistema Simulado (pç/semana)	1609,16
P-value	0,250

4.3.3 Interpretação/inferência

4.3.3.1 Definição e construção dos cenários

Como o modelo computacional que combina SBA e SED foi verificado e validado estaticamente, pode-se dizer então que este modelo representa o sistema real, ou seja, representar os seres humanos do sistema como agentes, com a inserção do ritmo circadiano, torna o modelo computacional próximo do real.

Para o caso deste estudo, a comparação entre modelo híbrido e modelo de SED se dará de forma qualitativa. Os resultados a serem comparados serão os resultados do modelo híbrido obtidos na etapa anterior e os resultados do mesmo sistema apresentados por Vilela (2015), uma vez que o autor desenvolveu uma gama de cenários deste objeto de estudo por meio da SED. No primeiro cenário, o referido autor considerou uma distribuição de probabilidade de tempo para cada dia da semana para representar os tempos de um dia inteiro de produção. Para definir a melhor distribuição, foram consideradas 60 tomadas diárias de tempo para cada etapa de montagem.

Já no segundo cenário foram utilizadas duas distribuições de probabilidade de tempo para cada dia da semana, onde estas distribuições representaram os períodos da manhã e da tarde e foram consideradas 30 tomadas de tempo para cada período. No terceiro cenário o autor dividiu a jornada de trabalho em quatro períodos (07:00 às 09:00, 09:00 às 11:00, 13:00 às 15:00, 15:00 às 17:00) e inseriu no modelo computacional uma distribuição de probabilidade para cada período do dia, totalizando 4 diferentes distribuições por dia. Foram utilizadas 15 tomadas de tempo para cada um dos períodos. Por fim, no quarto cenário, o autor utilizou apenas uma distribuição de probabilidade para representar a semana inteira de produção e para tanto considerou 30 tomadas de tempos selecionadas de forma aleatória para cada etapa do sistema.

Vilela (2015) relata que dos quatro cenários desenvolvidos, apenas um pode ser validado estatiscamente, quando comparado o resultado simulado com o real. Devido a grande variabilidade dos tempos de processo do sistema, apenas o terceiro cenário, que considera a divisão de uma jornada de trabalho em quatro períodos diferentes de tempo, representou estatisticamente o sistema real. Cabe destacar que ao atribuir uma distribuição de probabilidade para cada um dos quatro períodos, considera-se que o operador de cada posto tem um rendimento diferente para cada período do dia, o que se assemelha ao conceito do ritmo circadiano.

4.3.3.2 Análise dos resultados

O modelo híbrido do sistema em análise desenvolvido nesta pesquisa apresentou resultados estatisticamente iguais aos do sistema real. Ou seja, o modelo do sistema desenvolvido por meio da combinação da SBA com SED, considerando a inserção do ritmo circadiano nos agentes, foi estatiscamente validado e pode representar o sistema real.

Já o modelo de SED desenvolvido por Vilela (2015) deste mesmo sistema, não pode ser validado em três diferentes cenários, devido a grande variabilidade dos dados de tempo. Apesar da grande quantidade de tempos coletados (300 dados de tempo para cada atividade), o único cenário validado foi o que considera uma distribuição de probabilidade de tempo para cada período de duas horas da jornada de trabalho.

4.3.3.3 Conclusões e recomendações

Pode-se dizer então que no caso do modelo de SED houve certa dificuldade para validar estatiscamente o modelo, uma vez que foram necessárias diferentes configurações de cenários para chegar a este fim. Já na SBA, a combinação de SBA, SED e ritmo circadiano permitiu que o modelo fosse validado estatiscamente sem dificuldades.

4.3.4 Avaliação e julgamento

Como as conclusões inferidas foram adequadas e a definição do problema e os resultados levantados não foram inconclusivos, esta etapa não precisa ser realizada.

5. CONCLUSÃO

É indiscutível a importância de se representar o comportamento humano nos modelos de simulação computacional, uma vez que este comportamento irá afetar direta ou indiretamente o sistema em que o elemento humano está inserido. Esta representação do fator humano também se torna importante em ambientes industriais, principalmente onde existe mão de obra manual intensiva, já que neste tipo de situação o comportamento do fator humano afeta de forma intensiva as atividades realizadas.

Entretanto, apesar desta importância destacada, muitos trabalhos de aplicação da simulação computacional não consideram o comportamento humano, ou representam de forma simplista este elemento tão importante nos sistemas. Cabe dizer ainda que alguns autores apontam a fragilidade da SED de representar o fator humano, uma vez que o comportamento das pessoas é algo complexo e, portanto, não muito de simples de ser simulado pela mesma. A fim de contornar esta situação, alguns pesquisadores defendem a ideia de representar a variação do desempenho humano, principalmente em ambientes industriais, por meio da melhor distribuição de probabilidade dos dados de tempo resultantes de cronometragem. Pôde-se verificar por meio da revisão sistemática de literatura realizada neste trabalho que a grande maioria dos artigos que utilizavam a SED e continham termos relacionados ao fator humano buscavam representar a variação da performance do ser humano por meio de análise da melhor distribuição de dados tempos cronometrados. Contudo, a atividade de cronometragem pode exigir um grande número de coleta de dados para que a melhor distribuição seja encontrada, tornando-se um processo caro e demorado.

Já artigos resultantes da revisão sistemática de literatura que utilizavam a SBA e continham termos relacionados ao fator humano buscavam representar este elemento por meio de variação comportamental (características pessoas e cognitivas). No caso destes últimos artigos pode-se verificar que a grande maioria foi publicada em congressos, por se tratar de uma questão relativamente recente, e nenhum destes trabalhos estavam relacionados ao setor industrial, fatos estes que ressaltam a importância do tema discutido nesta pesquisa.

A SBA é uma ferramenta relativamente recente que tem se mostrado como uma alternativa interessante para se representar o fator humano, uma vez que agentes podem ser representados como seres inteligentes e autônomos, características inerentes ao ser humano. Já a SED é uma poderosa ferramenta amplamente utilizada na representação de fluxos de processo. Portanto, a fim de verificar se a simulação híbrida SBA/SED pode ser considerada uma boa alternativa para

representar o fator humano em sistemas produtivos, construiu-se o modelo computacional híbrido de nível individual de três diferentes sistemas, mas com características comuns, como por exemplo, a mão de obra manual intensiva e baixa variabilidade de tempo de processo de cada operador. Aproveitou-se das vantagens oferecidas pela estrutura dos agentes para se inserir um fator que afeta o desempenho do ser humano, o ritmo circadiano, a fim de representar de forma mais realista os operadores dos sistemas em estudo.

Realizaram-se testes estatísticos para validar os modelos computacionais híbridos dos sistemas avaliados na pesquisa e foi possível verificar por meio destes testes que, em todos os casos, os modelos foram estatisticamente validados, consolidando a proposição de que estes modelos computacionais representam os sistemas reais simulados. Pode-se dizer então que nestes casos representar o elemento humano como agente, por meio da combinação das técnicas de simulação SBA e SED com a inserção do ritmo circadiano nos agentes, fez com que os modelos computacionais híbridos apresentassem resultados próximos aos do sistema real.

Porém, como alguns autores destacam fragilidades da tentativa de representar o fator humano somente com a SED, comparou-se os resultados do modelo híbrido e do modelo de SED para cada sistema, com o objetivo de averiguar qual resultado mais se aproxima do real. Neste modelo de SED, os operadores foram representados como simples recursos e o tempo de execução das atividades destes operadores estava relacionado à melhor distribuição de probabilidades encontrada para os tempos cronometrados das linhas de produção. Foi possível verificar por meio do cálculo do erro percentual relativo médio que o resultado da simulação híbrida (SBA e SED) se aproximou mais dos resultados do sistema real do que a SED, para os dois primeiros sistemas produtivos avaliados. Já no terceiro sistema, pode-se verificar que houve certa dificuldade em encontrar uma configuração de cenário que tornasse válido o modelo SED, dificuldade esta não encontrada para o modelo híbrido.

É importante dizer que, com relação ao desenvolvimento dos modelos computacionais dos sistemas, os modelos híbridos apresentaram um processo de construção mais complexo do que os modelos em SED. Entretanto, a SBA apresenta vantagens na representação do fator humano como, por exemplo, o fato de ser possível inserir nos agentes características do comportamento humano (cognitivas, pessoais, físicas, biológicas) e assim simular fatores que afetam este comportamento. Enquanto que a representação deste comportamento humano na SED se torna uma tarefa muito mais complexa à medida que mais características são inseridas.

Cabe ressaltar que a inserção do ritmo circadiano nos agentes, facilitada pela SBA, tornou a representação do elemento humano mais realista, uma vez que as pessoas não trabalham em um

ritmo constante e a variação do comportamento humano, e por consequência da sua produtividade, foi considerada. Outro ponto positivo desta inserção nos casos analisados é que para o cálculo da produtividade horária, baseado na equação de Spencer (1987), era necessária apenas a média dos tempos das atividades, já que a variação deste tempo era ditada pelo ritmo circadiano. Já no caso da SED, para representar esta variação foi necessário um grande número de dados cronometrados, encarecendo em termos de tempo e custo um projeto de simulação.

Cabe dizer ainda que as conclusões obtidas estão relacionadas à aplicação da pesquisa em objetos de estudos com características semelhantes como mão de obra manual intensiva e baixa variabilidade de tempo de processo de cada operador. Sugere-se, portanto, a aplicação deste estudo em sistemas onde existe grande variabilidade de tempo de processo para verificar se os resultados também se aplicam a esta condição de contorno. Ainda como sugestão de novos trabalhos, tem-se a análise do fator humano em projetos de simulação por meio do aumento da complexidade dos agentes. No caso deste trabalho, utilizou-se o agente classificado como individual, uma vez que o comportamento das pessoas envolvidas no sistema em estudo condizia com tal classificação. Para demais trabalhos, outros tipos de agente podem ser utilizados visando contemplar comportamentos ou características individuais diferentes, como pessoas com diversos níveis de experiência que podem interagir entre si ou com mobilidade e habilidades reduzidas.

Referências Bibliográficas

ABDULMALEK, F.A.; RAJGOPAL, J. Analyzing the benefits of lean manufacturing and value stream mapping via simulation: a process sector case study. **International Journal of Production Economics**, v. 107, p. 223–236, 2007.

ADAMS, M.; COMPONATION, P.; CZARNECKI, H.; SCHROER, B. J. Simulation as a tool for continuous process improvement. In: **Proceedings of the Winter Simulation Conference**, ed. P. A. Farrington, 1999.

ANJOMSHOAE, A.; HASSAN A.; RANI, M.R.A. A Review of Ergonomics and Simulation Modeling in Healthcare Delivery System. In: **Advanced Materials Research**. Trans Tech Publications, 2014. p. 604-608.

APPOLINÁRIO, F. **Metodologia da ciência - filosofia e prática da pesquisa**. São Paulo: Editora Pioneira Thomson Learning, 2006.

ARENALES, M.; ARMENTANO, V.; MORABITO, R.; YANASSE, H. **Pesquisa Operacional para cursos de engenharia: Modelagem e algoritmos.** Rio de Janeiro: Editora Campus, 2007.

BAINES, T. S.; ASCH, R.; HADFIELD, L.; MASON, J. P; FLETCHER, S.; KAY, J. M. Towards a theoretical framework for human performance modeling within manufacturing systems design. Simulation Modelling Practice and Theory, 13: 486–504, 2005.

BAINES, T.; HADFIELD, L.; MASON, S.; LADBROOK, J. Using empirical evidence of variations in worker performance to extend the capabilities of discrete event simulations in manufacturing. In: **Proceedings of the Winter Simulation Conference**, Vol. 2, pp. 1210-1216, 2003.

BAINES, T. S.; KAY, J. M. Human performance modelling as an aid in the process of manufacturing system design: a pilot study. **International Journal of Production Research**, v. 40, n. 10, p. 2321-2334, 2002.

BAINES, T. S.; MASON, S.; SIEBERS, P. O.; LADBROOK, J. Humans: the missing link in manufacturing simulation? Simulation Modelling Practice and Theory, 12: 515–526, 2004.

BALDWIN, L. P.; ELDABI, T.; PAUL, R. J. Business process design: flexible modelling with multiple levels of detail. **Business Process Management Journal**, v. 11, n. 1, p. 22-36, 2005.

BANKS, J.; CARSON, J.S.; NELSON, B.L.; NICOL, D.M. **Discrete-event system simulation**. 2 ed., New Jersey: Prentice Hall, 2005.

BARIL, C.; GASCON, V.; CARTIER, S. Design and analysis of an outpatient orthopaedic clinic performance with discrete event simulation and design of experiments. **Computers & Industrial Engineering**, v. 78, p. 285-298, 2014.

BEHDANI, B. Evaluation of paradigms for modeling supply chains as complex socio-technical systems. In: **Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference (WSC)**, p. 1-15, 2012.

BERGUE, L.X. Análise das potencialidades do uso da ferramenta de simulação computacional em operações logísticas: estudo de caso em um armazém geral. 2000. 96 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

BERNHARDT, W.; SCHILLING, A. Simulation of group work processes in manufacturing. In: **Proceedings of the 1997 Winter Simulation Conference**, Atlanta, Georgia, pp. 888–891,1997.

BERTRAND, J. W. M.; FRANSOO, J. C. Modelling and Simulation: operations management research methodologies using quantitative modeling. International Journal of Operations & Production Management, 22:241-264, 2002.

BIOLCHINI, J. C. A.; MIAN, P. G.; NATALI, A. C. C.; CONTE, T. U.; TRAVASSOS, G. H. Scientific research ontology to support systematic review in software engineering. **Advanced Engineering Informatics**, v.21, n.2, p.133-151, 2007.

BOBASHEV, G. V.; GOEDECKE, D. M.; YU, F.; EPSTEIN, J. M. A hybrid epidemic model: combining the advantages of agent-based and equation-based approaches. In: **Winter Simulation Conference**, p. 1532-1537, 2007

BOEIRA, L. do M., **Simulação computacional: um estudo de caso em uma empresa fabricante de câmaras de ar pneumáticas.** 2008. 96 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

- BOELLA, G.; REMONDINO, M. Collaboration and Human Factor as Drivers for Reputation System Effectiveness. In: **International Conference on Web Information Systems and Technologies**. Springer Berlin Heidelberg, p. 3-16, 2009.
- BOIVIN, D. B.; BOUDREAU, P. Impacts of shift work on sleep and circadian rhythms. **Pathologie Biologie**, v. 62, n. 5, p. 292-301, 2014.
- BORSHCHEV, A. Multi-method modeling. In: **Proceedings of the 2013 Winter Simulation Conference: Simulation: Making Decisions in a Complex World**, p. 4089-4100, 2013.
- BORSHCHEV, A.; FILIPPOV, A. From system dynamics and discrete event to practical agent based modeling: reasons, techniques, tools. In: **Proceedings of the 22nd international conference of the system dynamics society**. 2004.
- BOUANAN, Y.; ZACHAREWICZ, G.; VALLESPIR, B. DEVS modelling and simulation of human social interaction and influence. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, v. 50, p. 83-92, 2016.
- BRAILSFORD, S.; SCHMIDT, B. Towards incorporating human behaviour in models of health care systems: An approach using discrete event simulation. **European Journal of Operational Research**, v. 150, n. 1, p. 19-31, 2003.
- CARDOSO, P.A. Interdisciplinaridade na prática: a experiência da Aplicação do software preactor como ferramenta de Integração curricular no curso de graduação em Engenharia de produção. **Revista Gestão Industrial**, 2007.
- CHAN, W. K. V.; SON, Y.; MACAL, C. M. Agent-based simulation tutorial-simulation of emergent behavior and differences between agent-based simulation and discrete-event simulation. In: **Proceedings of the Winter Simulation Conference**, p. 135-150, 2010.
- CHAPPARO, C.; RANKA, J. Occupational performance model: Definition of terms. 1996.Dissertação (Mestrado) 95f. University of Sydney, Sidney, 1996.
- CHRISPIM, E.M.; WERNECK, R.F. Contexto e prática em Engenharia de Produção: Estudo de caso de uma organização como fonte de conhecimento. In: **Anais do XXIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção**, Ouro Preto, 2003.
- CHWIF, L.; BANKS, J.; FILHO, J. P.; SANTINI, B. A framework for specifying a discrete-event simulation conceptual model, **Journal of Simulation**, 7(1), 50-60, 2013.
- CHWIF, L.; MEDINA, A. C. Modelagem e Simulação de Eventos Discretos: Teoria e Aplicações. São Paulo: Ed. dos Autores, 2015.
- COSTA, G. Shift work and health: current problems and preventive actions. **Safety and health at Work**, v. 1, n. 2, p. 112-123, 2010.
- COSTA, R.F.S. Abordagem sistemática para avaliação econômica de cenários para modelos de simulação discreta em manufatura, 2010. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2010.
- COURT, M.; PITTMAN, J.; ALEXOPOULOS, C.; GOLDSMAN, D.; KIM, S. H.; LOPER, M.; HADDOCK, J. A framework for simulating human cognitive behavior and movement when predicting impacts of catastrophic events. In **Proceedings of the 2004 Winter Simulation Conference**, 2004
- DAY, T. E., SARAWGI, S., PERRI, A.; NICOLSON, S. C. Reducing postponements of elective pediatric cardiac procedures: analysis and implementation of a discrete event simulation model. **The Annals of thoracic surgery**, v. 99, n. 4, p. 1386-1391, 2015.
- DEVILLERS, J.; DEVILLERS, H.; DECOURTYE, A.; AUPINEL, P. Internet resources for agent-based modelling. **SAR and QSAR in Environmental Research**, 21(3-4), 337-350, 2010.
- DOLOI, H.; FAAFARI, A. Conceptual simulation model for strategic decision evaluation in project management. **Logistics information management**, v. 15, n 2, p. 88-104, 2002.
- DONATELLI, A.; HARRIS, G. Combining Value Stream Mapping and Discrete Event Simulation. In: **Proceedings of the Huntsville Simulation Conference**, San Diego, CA, 2001.
- DONG, F.; LIU, H.; LU, B. Agent-based simulation model of single point inventory system. **Systems Engineering Procedia**, v. 4, p. 298-304, 2012.
- DONGEN, V. H. P. A.; DINGES, D. F. Circadian rhythms in sleepiness, alertness, and performance. **Principles and practice of sleep medicine**, v. 5, p. 445-55, 2011.

DUBIEL, B.; TSIMHONI, O. Integrating agent based modeling into a discrete event simulation. In: **Proceedings of the Winter Simulation Conference**, 2005. IEEE, p. 9, 2005.

DUFF, T. J.; CHONG, D. M.; TOLHURST, K. G. Using discrete event simulation cellular automata models to determine multi-mode travel times and routes of terrestrial suppression resources to wildland fires. **European Journal of Operational Research**, v. 241, n. 3, p. 763-770, 2015.

DUNN, A. G.; ONG, M.; WESTBROOK, J.I.;MAGRABI, F.;COIERA, E.; WOBCKE, W. A simulation framework for mapping risks in clinical processes: the case of in-patient transfers. **Journal of the American Medical Informatics Association**, v. 18, n. 3, p. 259-266, 2011.

EHM, H.; MCGINNIS, L.; ROSE, O. Are simulation standards in our future? In: **Proceedings of the Winter Simulation Conference**, Austin, USA, 2009.

ELAHI, M. M. L. RAJPUROHIT, K.; ROSENBERGER, J.M.; ZARUBA, G.; PRIEST, J. Optimizing real-time vehicle sequencing of a paint shop conveyor system. **Omega**, v. 55, p. 61-72, 2015.

EMRICH, S.; SUSLOV, S.; JUDEX, F. Fully agent-based modelling of epidemic spread using AnyLogic. In: **Proc. EUROSIM**, p. 9-13, 2007.

ESMAEILI, M.; VANCHERI, A.; GIORDANO, P. Mathematical and computational modeling of housing market dynamics. In: **Systems Conference**, **2010 4th Annual**, p. 29-34, 2010.

FIGUEREDO, G. P.; AICKELIN, U. Comparing system dynamics and agent-based simulation for tumour growth and its interactions with effector cells. In: **Proceedings of the 2011 Summer Computer Simulation Conference**, p. 52-59, 2011.

FOWLES-WINKLER, A. M. Modelling with the integrated performance modelling environment (IPME). In: **European Simulation Symposium**, Delft, The Netherlands. p. 26-29, 2003.

FRANCESCHINI, F.; MAISANO, D.; MASTROGIACOMO, L. Scientific journal publishers and omitted citations in bibliometric databases: Any relationship?. **Journal of Informetrics**, v. 8, n. 3, p. 751-765, 2014.

GARIFULLIN, M.; BORSHCHEV, A.; POPKOV, T. Using AnyLogic and agent-based approach to model consumer market. In:**Proceedings of the 6th EUROSIM Congress on Modelling and Simulation**, p. 1-5, 2007.

GOKNUR, S.; BOLTON, M.; BASS, E. J. Adding a motor control component to the operator function model expert system to investigate air traffic management concepts using simulation. In: **Systems, Man and Cybernetics, 2004 IEEE International Conference on**, p. 886-892, 2004.

GILBERT, G. Nigel. Agent-based models. Sage, 2008

GOLMOHAMMADI, D.; SHIMSHAK, D. Estimation of the evacuation time in an emergency situation in hospitals. **Computers & Industrial Engineering**, v. 61, n. 4, p. 1256-1267, 2011.

GREASLEY, A. Using business-process simulation within a business-process reengineering approach. **Business Process Management Journal**, v.9, n.4, p. 408-420, 2003.

GREASLEY, A. Using process mapping and business process simulation to support a process-based approach to change in a public sector organization. **Technovation**, v.26, p. 95–103, 2006.

GREASLEY, A. A comparison of system dynamics and discrete event simulation. In: **Proceedings of the 2009 Summer Computer Simulation Conference**. Society for Modeling & Simulation International, p. 83-87, 2009.

GREGORIADES, A. Towards a user-centred road safety management method based on road traffic simulation. In: **2007 Winter Simulation Conference**. IEEE, p. 1905-1914, 2007.

GREGORIADES, A.; SUTCLIFFE, A.; PAPAGEORGIOU, G.; LOUVIERIS, P. Human-centered safety analysis of prospective road designs, **Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans,** 40(2), 236-250, 2010.

GRIGORYEV, I. AnyLogic 6 in three days: a quick course in simulation modeling. Hampton, NJ: AnyLogic North America, 2012.

HABCHI, G.; BERCHET, C. A model for manufacturing systems simulation with a control dimension. **Simulation Modelling Practice and Theory**, v.11, p.21–44, 2003.

HAO, Q.; SHEN, W. Implementing a hybrid simulation model for a Kanban-based material handling system. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, v. 24, n. 5, p. 635-646, 2008.

HARRELL, C., GHOSH, B. K., BOWDEN, R. Simulation Using Promodel. 3. ed., Boston: McGraw-Hill, 2004.

- HERNANDEZ-MATIAS, J.C.; VIZAN, A.; PEREZ-GARCIA, J. & RIOS, J. An integrated modeling framework to support manufacturing system diagnosis for continuous improvement. **Robotics and computer-integrated manufacturing**, v.24, n.2, p.187-199, 2008.
- HIGGINS, A. J.; MILLER, C. J.; ARCHER, A. A.; TON, T.; FLETCHER, C. S.; MCALLISTER, R. R. J. Challenges of operations research practice in agricultural value chains. **Journal of the Operational Research Society**, 61(6), 964-973, 2010.
- HUGHES, Khaliah; JIANG, Xiaochun. Using discrete event simulation to model excavator operator performance. **Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries**, v. 20, n. 5, p. 408-423, 2010.
- JAYANT, A.; GUPTA, P.; GARG, S. K. Simulation Modelling and Analysis of Network Design for Closed-Loop Supply Chain: A Case Study of Battery Industry. **Procedia Engineering**, v. 97, p. 2213-2221, 2014.
- JOAQUIM, E.D. Análise de um novo centro cirúrgico para o hospital universitário Cajuru: estudo de caso baseado em simulação computacional. 2005. 125 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção e Sistemas) Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, 2005.
- JOO, J.; KIM, N.; WYSK, R.A.; ROTHROCK, L.; SON,Y.; OH, Y.; LEE,S. Agent-based simulation of affordance-based human behaviors in emergency evacuation. **Simulation Modelling Practice and Theory** v.32, p.99–115, 2013.
- KARPOV, Y. G.; IVANOVSKI,, R.I.; VOROPAI,, N.I.; POPOV, D.B. Hierarchical modeling of electric power system expansion by anyLogic simulation software. In: **2005 IEEE Russia Power Tech**. 2005.
- KASAIE, P.; KELTON, W. D. Guidelines for design and analysis in agent-based simulation studies. In: **Proceedings of the 2015 Winter Simulation Conference**. IEEE Press, p. 183-193, 2015.
- KELLER, J. Human performance modeling for discrete-event simulation: workload. In: **Proceedings of the Winter Simulation Conference**, p. 157-162, 2002.
- KERNAN, B.; SHEAHAN, C. An investigation into heuristics for alternative worker selection in discrete event simulation. **Journal of Simulation**, v. 7, n. 1, p. 61-67, 2013.
- KIM, K.; KIM, K. J. Multi-agent-based simulation system for construction operations with congested flows. **Automation in Construction**, v. 19, n. 7, p. 867-874, 2010.
- KITCHENHAM, B. **Procedures for performing systematic reviews.** 2004. Dissertação (Mestrado), Keele University, Keele, f.126, 2004.
- KOTIADIS, K.; ROBINSON, S. Conceptual modeling: knowledge acquisition and model abstraction. In: **Proceedings of the Winter Simulation Conference**, USA, 2008.
- KOVACIC, A.; PECEK, B. Use of simulation in a public administration process. **Simulation**, v. 83, n. 12, p. 851-861, 2007.
- KOZINE, I. Simulation of human performance in a discrete event environment. **Safety and Reliability for Managing Risk. Proceedings.** Vol. 1, 2006.
- KREMERS, E.; LEWALD, N.; BARAMBONES C. O.; GONZÁLEZ, D. G. J. M. An agent-based multi-scale wind generation model. In: **9th IASTED European Conference on Power and Energy Systems**, p.166-172, 2009.
- KUMAR, S.; SRIDHARAN, R. Simulation modeling and analysis of tool sharing and part scheduling decisions in single-stage multimachine flexible manufacturing systems. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, v.23, p. 361–370, 2007.
- LÄTTILÄ, L.; HILLETOFTH, P.; LIN, B. Hybrid simulation models—when, why, how?. **Expert Systems with Applications**, v. 37, n. 12, p. 7969-7975, 2010.
- LAUGHERY, R.; PLOTT, B. M.; ENGH, T. H.; SCOTT-NASH, S. Discrete event simulation as a tool to determine necessary nuclear power plant operating crew size. In **Proceedings of the 28th conference on Winter simulation**, p. 1272-1279,1996.
- LAW, A.M. How to build valid and credible simulation models. In: **Proceedings of the Winter Simulation Conference**, Monterey, CA, USA, 2006.
- LAW, A. M.; KELTON, W. D. Simulation modeling and analysis. 3.ed., New York: McGraw-Hill, 2000.

- LAZAROVA-MOLNAR, S. Agent-based modeling and simulation framework for enhanced project schedules. In: **20th International Congress on Modelling and Simulation**, p. 887-893, 2013.
- LEAL, F. Um diagnóstico do processo de atendimento a clientes em uma agência bancária através de mapeamento do processo e simulação computacional. 2003. 224 f. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG, 2003.
- LEE, S. M.; RAVINDER, U.; JOHNSTON, J. C. Developing an agent model of human performance in air traffic control operations using apex cognitive architecture. In: **Proceedings of the Winter Simulation Conference, 2005**, p. 9, 2005.
- LEE, S. M.; REMINGTON, R. W.; RAVINDER, U. A framework for modeling and simulating human behavior in complex systems. **In IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics**, Vol. 4, pp. 3161-3166, 2005.
- LEITÃO P. Agent-based distributed manufacturing control: A state-of-the-art survey. **Engineering Applications of Artificial Intelligence** v.22, p.979–991, 2009.
- LIU, C.; QIU, C. H.; XIE, Z. Q. A Methodology to Estimate the Reliability of Passageway system in Naval Ship Design. In: **Key Engineering Materials Trans Tech Publications**, Vol. 419, pp. 721-724, 2010.
- LONG, Qingqi; ZHANG, Wenyu. An integrated framework for agent based inventory–production–transportation modeling and distributed simulation of supply chains. **Information Sciences**, v. 277, p. 567-581, 2014.
- MACAL, C. M. Everything you need to know about agent-based modelling and simulation. **Journal of Simulation**, v. 10, n. 2, p. 144-156, 2016.
- MACAL, C. M.; NORTH, M. J. Tutorial on agent-based modeling and simulation. In: **Proceedings of the 37th conference on Winter simulation**. p. 2-15, 2005.
- MADEJSKI, J. Dynamic scheduling for agent based manufacturing systems. **Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering**, v. 40, n. 1, p. 66-69, 2010.
- MARQUIE, J. C.; FORET, J. Sleep, age, and shiftwork experience. **Journal of sleep research**, v. 8, n. 4, p. 297-304, 1999.
- MARTINEZ, D.; LENZ, M. C. S.; BARRETO, M. L. Diagnóstico dos transtornos do sono relacionados ao ritmo circadiano. **J Bras Pneumol**, v. 34, n. 3, p. 173-80, 2008.
- MARTÍNEZ-MIRANDA, J.; PAVÓN, J. Modelling trust into an agent-based simulation tool to support the formation and configuration of work teams. In: **7th International Conference on Practical Applications of Agents and Multi-Agent Systems (PAAMS 2009)**, p. 80-89, 2009.
- MASON, S.; BAINES, T.; KAY, M.; LADBROOK, J. Improving the design process for factories: Modeling human performance variation. **Journal of manufacturing systems**, v. 24, n. 1, p. 47, 2005.
- MCDONALD, T.; VAN AKEN, E.M.; RENTES, A.F. Utilizing simulation to enhance value stream mapping: a manufacturing case application. **International Journal of Logistics: Research and Applications**, n.5, p.213–232, 2002.
- MELÃO, N., PIDD, M. Using component technology to develop a simulation library for business process modeling. European Journal of Operational Research, 172: 163–178, 2006.
- MELLO, de. A.E.N.S. **Aplicação do Mapeamento de Processos e da simulação no desenvolvimento de projetos de processos produtivos**. 2008. 117 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2008.
- MERKURYEVA, G.; BOLSHAKOVS, V. Vehicle schedule simulation with AnyLogic. In: Computer Modelling and Simulation (UKSim), 2010 12th International Conference on. IEEE, p. 169-174, 2010.
- MIGUEL, P. A. C.; FLEURY, A.; MELLO, C. H. P.; NAKANO, D. N.; TURRIONI, J. B.; LEE HO, L.; MORABITO, R.; MARTINS, R. A.; PUREZA, V. **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações.** Rio de Janeiro: Elsevier, 2010.
- MONK, T. H. Advantages and disadvantages of rapidly rotating shift schedules—A circadian viewpoint. **Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society**, v. 28, n. 5, p. 553-557, 1986.
- MONK, T. H.; BUYSSE, D.J.; REYNOLDS III, C.F.; BERGA, S.L.; JARRET, D.B.; BEGLEY, A.E.; KUPFER, D.J. Circadian rhythms in human performance and mood under constant conditions. **Journal of sleep research**, v. 6, n. 1, p. 9-18, 1997.

MONOSTORI, L.; VÁNCZA, J.; KUMARA, S. R.T. Agent-based systems for manufacturing. **CIRP Annals-Manufacturing Technology**, v. 55, n. 2, p. 697-720, 2006

MONTEVECHI, J. A. B.; LEAL, F.; PINHO, A. F.; COSTA, R. F. S.; OLIVEIRA, M. L. M.; SILVA, A. L. F. Conceptual modeling in simulation projects by mean adapted IDEF: an application in a Brazilian tech company. In: **Proceedings of the Winter Simulation Conference**, Baltimore, USA, 2010.

MONTEVECHI, J. A. B., PINHO, A. F. DE, LEAL, F, MARINS, F. A. S. Application of design of experiments on the simulation of a process in an automotive industry. In: Proceedings of the Winter Simulation Conference, Washington, DC, USA, 2007.

MONTGOMERY, D.C.; RUNGER, G.C. Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros. 2.ed., Editora LTC, 2003.

MORABITO R.; PUREZA, V. Modelagem e simulação. In: Paulo A. C. Miguel. (Org.). **Metodologia de Pesquisa em Engenharia de Produção e Gestão de Operações**, 1 ed., Rio de Janeiro: Campus/Elsevier, 2010.

NORTH, M. J.; MACAL, C. M. Managing business complexity: discovering strategic solutions with agent-based modeling and simulation. Oxford University Press, 2007.

O'KANE, J.F., SPENCELEY, J.R.; TAYLOR, R. Simulation as an essential tool for advanced manufacturing technology problems. Journal of Materials Processing Technology, 107, 412-424, 2000.

OLIVEIRA, M. L. M.; COSTA, R. F. S.; XAVIER, A. F.; ALMEIDA, D. A.; MONTEVECHI, J. A. B. Ensino do mapeamento Lean utilizando como recurso didático a simulação computacional a eventos discretos. In: **Anais do Simpósio de Engenharia de Produção**, Bauru, SP, 2009.

OLIVEIRA, M. L. M.; MONTEVECHI, J. A. B.; DE PINHO, A. F.; PEREIRA, T. F.; SENA, D. C. Utilização da SBA combinada a SED para representar o elemento humano em uma célula de manufatura. In: **XLVII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional**, Porto de Galinhas, Pernambuco-PE, 2015.

PAIVA, C. N. A relevância do fator humano na simulação computacional. 2010. Dissertação (Mestrado) Universidade federal de Itajubá, Itajubá, 2010.

PECEK, B., KOVACIC, A. Business process management: use of simulation in the public sector. Economic Research-Ekonomska Istraživanja, 24(1): 95-106, 2011.

PENNATHUR, P. R.; CAO,D.; SUI,Z.; LIN,L.; BISANTZ,A.M.; FAIRBANKS,R.J.; GUARRERA,T.K.; BROWN,J.L.; PERRY ,S.J.; WEARS ,R.L. Development of a simulation environment to study emergency department information technology. Simulation in healthcare: journal of the Society for Simulation in Healthcare, v. 5, n. 2, p. 103, 2010.

PEREZ, J.; LOOZE, M.P.; BOSCH, T.; NEUMANN, W.P. Discrete event simulation as an ergonomic tool to predict workload exposures during systems design. **International Journal of Industrial Ergonomics**, v. 44, n. 2, p. 298-306, 2014.

POOYANDEH, M.; MARCEAU, D. J. Incorporating Bayesian learning in agent-based simulation of stakeholders' negotiation. **Computers, Environment and Urban Systems**, v. 48, p. 73-85, 2014.

POTTER, A.; YANG, B.; LALWANI, C. A simulation study of despatch bay performance in the steel processing industry. **European Journal of Operational Research**, v.179, p. 567–578, 2007.

RAILSBACK, S. F.; GRIMM, V. Agent-based and individual-based modeling: a practical introduction. Princeton university press, 2012.

RAJA, R.; RAO, K.S. Performance evaluation through simulation modeling in a cotton spinning system. **Simulation Modelling Practice and Theory**, v.15, p. 1163-1172, 2007.

REMONDINO, M.; BOELLA, G. How users' participation affects reputation management systems: the case of P2P networks. **Simulation Modelling Practice and Theory**, v. 18, n. 10, p. 1493-1505, 2010.

RUOHONEN, T.; NEITTAANMÄKI, P.; TEITTINEN, J. Simulation model for improving the operation of the emergency department of special health care. In: **Proceedings of the Winter Simulation Conference**, Monterey, CA, USA, 2006.

RYAN, J, HEAVEY, C. Process modeling for simulation. Computers in Industry, 57: 437-450, 2006.

SAKURADA, N.; MIYAKE, D. I. Agent-Based Simulation Application in Operations Management. In: XVI International Conference on Industrial Engineering and Operations Management, São Carlos, SP, Brazil, p.1-12, 2010.

- SANDANAYAKE, Y.G.; ODUOZA, C.F.; PROVERBS, D.G. A systematic modelling and simulation approach for JIT performance optimization. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, v. 24, p.735-743, 2008.
- SARGENT, Robert G. An introductory tutorial on verification and validation of simulation models. In: **Proceedings of the 2015 Winter Simulation Conference**. IEEE Press, p. 1729-1740, 2015
- SAUVAGEAU, G.; FRAYRET, J. Waste paper procurement optimization: An agent-based simulation approach. **European Journal of Operational Research**, v. 242, n. 3, p. 987-998, 2015.
- SEWALL, J., WILKIE, D., LIN, M. Interactive Hybrid Simulation of Large-Scale Traffic. **ACM Trans. Graph**. *30*, 6, 2011.
- SHEN, W.; WANG, L.; HAO Q. Agent-Based Distributed Manufacturing Process Planning and Scheduling: a State-of-the-Art Survey. **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetic Part C: Applications and Reviews**, v. 36, n. 4, 2006.
- SHI, J.; PENG, Y.; ERDEM, E. Simulation analysis on patient visit efficiency of a typical VA primary care clinic with complex characteristics. **Simulation Modelling Practice and Theory**, v. 47, p. 165-181, 2014.
- SIEBERS, P.O. Worker Performance Modeling in Manufacturing Systems Simulation. Chapter in J-P. Rennard (Eds.) Handbook of Research on Nature. Inspired Computing for Economy and Management. Pennsylvania: Idea Group Publishing, 2006.
- SIEBERS, P.O.; MACAL, C.M.; GARNETT, J.; BUSTON, D.; PIDD, M. et al. Discrete-event simulation is dead, long live agent-based simulation!. **Journal of Simulation**, v. 4, n. 3, p. 204-210, 2010.
- SIEBERS, P.; ONGGO, S. Graphical representation of agent-based models, Operational Research and Management Science using UML. In: Proceedings of the 7th Operation Research Society Simulation Workshop. Operational Research Society, pp. 143-153. 2014.
- SILVA, L.M.F.; PINTO M.de G.; SUBRAMANIAN, A. Utilizando o software arena como ferramenta de apoio ao ensino em engenharia de produção. In: **Anais do XXVII Encontro Nacional de Engenharia de Produção**, Porto Alegre, RS, 2007.
- SPENCER, M. B. The influence of irregularity of rest and activity on performance: a model based on time sleep and time of day. Ergonomics. 30:1275-1286, 1987.
- STAPLES, M.; NIAZI, M. Experiences using systematic review guidelines. **Journal of Systems and Software**, v. 80, n. 9, p. 1425-1437, 2007.
- STUMMER, C.; KIESLING, E.; GÜNTHER, M.; VETSCHERA, R. Innovation diffusion of repeat purchase products in a competitive market: an agent-based simulation approach. **European Journal of Operational Research**, v. 245, n. 1, p. 157-167, 2015.
- SUMARI, S.; IBRAHIM, R.; ZAKARIA, N. H.; ABHAMID, A. H. Comparing three simulation model using taxonomy: System dynamic simulation, discrete event simulation and agent based simulation. **International Journal of Management Excellence**, v. 1, n. 3, p. 54-59, 2013.
- SWINERD, Chris; MCNAUGHT, Ken R. Design classes for hybrid simulations involving agent-based and system dynamics models. **Simulation Modelling Practice and Theory**, v. 25, p. 118-133, 2012.
- TAKAMA, T.; PRESTON, J. Forecasting the effects of road user charge by stochastic agent-based modelling. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, v. 42, n. 4, p. 738-749, 2008.
- TAN, L.; HU, M.; LIN, H. Agent-based simulation of building evacuation: Combining human behavior with predictable spatial accessibility in a fire emergency. **Information Sciences** v.295, p.53–66, 2015.
- TERZI, S.; CAVALIERI, S. Simulation in the supply chain context: a survey. **Computers in Industry**, v.53, p. 3–16, 2004.
- TORGA, B.L.M. **Modelagem, simulação e otimização em sistemas puxados de manufatura.** 2007. 139 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG, 2007.
- VILELA, F. F. Modelagem do ritmo do trabalho humano em um projeto de simulação através da criação de cenários com múltiplas distribuições, 2015. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2015.
- VISINTIN, F.; PORCELLI, I.; GHINI, A. Applying discrete event simulation to the design of a service delivery system in the aerospace industry: a case study. **Journal of Intelligent Manufacturing**, v. 25, n. 5, p. 1135-1152, 2014.

VOLSEM, V. S.; DULLAERT, W.; VAN LANDEGHEM, H. An Evolutionary Algorithm and discrete event simulation for optimizing inspection strategies for multi-stage processes. **European Journal of Operational Research**, v.179, p. 621–633, 2007.

WAKELAND, W. W.; GALLAHER, E. J.; MACOVSKY, L. M.; AKTIPIS, C. A. A comparison of system dynamics and agent-based simulation applied to the study of cellular receptor dynamics. In: **Proceedings of the 37th Annual Hawaii International Conference**, 2004.

WANG, Y.; USHER, J. M. An agent-based approach for flexible routing in dynamic job shop scheduling. In: **IIE Annual Conference. Proceedings**. Institute of Industrial Engineers-Publisher, p. 1, 2002.

WELLBRINK, J.C.G; BUSS, A. H. Vigilance performance modeled as a complex adaptive system with listener event graph objects (LEGOS). In: **Proceedings of the 36th conference on Winter simulation**. Winter Simulation Conference, p. 755-759, 2004.

WOMACK, J. P.; JONES, D. T.; ROOS, D. The Machine that changed the World. New York, 1990.

WU, D. D.; KEFAN, X.; HUA, L.; SHI, Z.; OLSON, D. L. Modeling technological innovation risks of an entrepreneurial team using system dynamics: an agent-based perspective. **Technological Forecasting and Social Change**, 77(6), 857-869, 2010.

XIANG, W.; LEE, H. P. Ant colony intelligence in multi-agent dynamic manufacturing scheduling. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, v. 21, n. 1, p. 73-85, 2008.

XIE, Y.; PENG, Q. Integration of value stream mapping and agent-based modeling for OR improvement. **Business Process Management Journal**, v. 18, n. 4, p. 585-599,2012.

YOW, A. B.; ENGH, T. H. Discrete event simulation of operator interaction with an alarm system. In: Human Factors and Power Plants, 1997. Global Perspectives of Human Factors in Power Generation, **Proceedings of the IEEE Sixth Conference on**. IEEE, p. 724-729, 1997.

ZADRA, J. R.; PROFFITT, D. R. Implicit associations have a circadian rhythm. **PloS one**, v. 9, n. 11, p. 110-149, 2014.

ZHANG, B.; CHAN, W. K.; UKKUSURI, S.V. Agent-based discrete-event hybrid space modeling approach for transportation evacuation simulation. In: **Proceedings of the Winter Simulation Conference (WSC)**, p. 199-209. 2011.

ZHANG, H.; YAN, X.; WU, C.; QIU, T.Z. Effect of circadian rhythms and driving duration on fatigue level and driving performance of professional drivers. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, n. 2402, p. 19-27, 2014.

ZHAO, C.; ZHANG, X.; QIU, J. Modelling and simulation on collaborative work in cellular manufacturing. In: Computer Supported Cooperative Work in Design (CSCWD), 2012 IEEE 16th International Conference on. IEEE,p. 730-733, 2012.

ZHENG, N.; LU, X. Comparative study on push and pull production system based on Anylogic. In: **2009** International Conference on Electronic Commerce and Business Intelligence. 2009.

ZHU, F.; YAO,Y.; TANG,W.; CHEN,D. A high performance framework for modeling and simulation of large-scale complex systems. **Future Generation Computer Systems**, v. 51, p. 132-141, 2015.

Anexos

Tabela 7.1: Resultados dos modelos de SED e SBA + SED para o sistema 1

(pç/dia)	
(pç/tila)	(pç/dia)
174	181
182	183
171	170
188	176
182	174
181	188
175	179
184	187
180	167
186	180
178	185
183	185
174	189
186	165
178	190
194	185
183	173
185	180
179	167
185	185
175	184
	182 171 188 182 181 175 184 180 186 178 183 174 186 178 194 183 185 179 185

Tabela 7.2: Resultados dos modelos de SED e SBA + SED para o sistema 2

Real (pç/mês)	SED	SBA+SED
Real (pç/mes)	(pç/mês)	(pç/mês)
163	176	154
84	138	130
91	157	140
90	158	137
112	181	151
215	159	155

Tabela 7.3: Resultados dos modelos de SED e SBA + SED para o sistema 3

Real	SBA+SED	Real	SBA+SED
(pç/semana)	(pç/semana)	(pç/semana)	(pç/semana)
1611	1644	1612	1612
1595	1604	1610	1608
1622	1612	1603	1612
1592	1612	1611	1604
1620	1612	1616	1604
1599	1608	1603	1604
1597	1604	1604	1604
1604	1604	1607	1604
1595	1604	1609	1612
1607	1608	1605	1612
1614	1608		
1609	1612		
1598	1612		
1605	1612		