

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

WILLIAM RODRIGUES DOS SANTOS

**PROPOSTA DE UMA ABORDAGEM PARA MODELAGEM E
SIMULAÇÃO DE EVENTOS DISCRETOS INTEGRADA COM
SIMULAÇÃO BASEADA EM AGENTES: APLICAÇÃO EM UMA
LINHA DE MONTAGEM**

SÃO CARLOS - SP

2017

WILLIAM RODRIGUES DOS SANTOS

**PROPOSTA DE UMA ABORDAGEM PARA MODELAGEM E
SIMULAÇÃO DE EVENTOS DISCRETOS INTEGRADA COM
SIMULAÇÃO BASEADA EM AGENTES: APLICAÇÃO EM UMA
LINHA DE MONTAGEM**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de São Carlos, como parte dos requisitos para obtenção de título de Doutor em Engenharia de Produção.

Orientação: Prof. Dr. Nilton Luiz Menegon

SÃO CARLOS - SP

2017

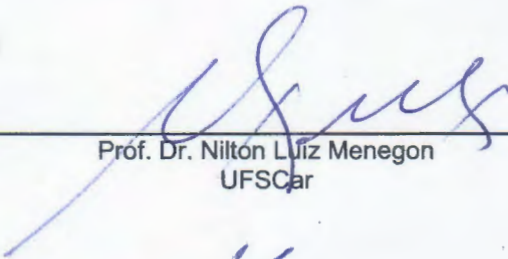


UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

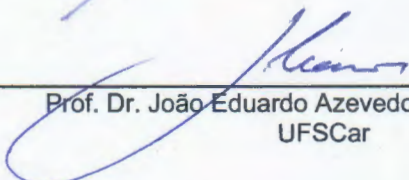
Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção

Folha de Aprovação

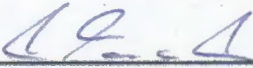
Assinaturas dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a Defesa de Tese de Doutorado do candidato William Rodrigues dos Santos, realizada em 19/12/2017:



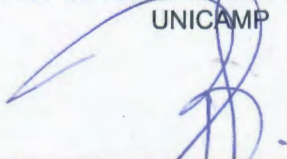
Prof. Dr. Nilton Luiz Menegon
UFSCar



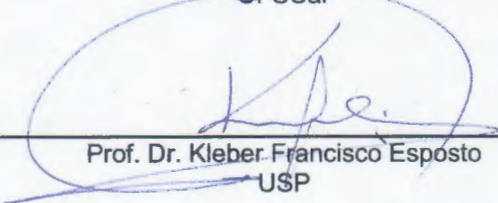
Prof. Dr. João Eduardo Azevedo Ramos da Silva
UFSCar



Prof. Dr. Anibal Tavares de Azevedo
UNICAMP



Prof. Dr. Miguel Antonio Bueno da Costa
UFSCar



Prof. Dr. Kleber Francisco Esposto
USP

Dedico este trabalho à toda minha família, em especial à minha mãe, que sempre esteve do meu lado, à minha linda esposa e aos meus filhos pelo apoio incondicional e constante incentivo.

AGRADECIMENTOS

Os agradecimentos são genuínos, em um nível profundo de vínculo e comprometimento para com estas pessoas. Em poucas palavras busco descrever este sentimento, com a certeza de que esquecerei de nomes que, com toda justiça, deveriam ser lembrados. A todas elas, meu profundo e eterno “Muito Obrigado”. Assim, agradeço:

Aos professores Nilton Menegon, João Camarotto e Miguel Bueno (Mian), pelo aprendizado e confiança ao longo destes anos de trabalho.

Aos mestres e professores presentes na minha banca: Prof. Dr. Nilton Luiz Menegon, Prof. Dr. Miguel Antonio Bueno da Costa, Prof. Dr. Prof. Dr. João Eduardo Azevedo Ramos da Silva Prof. Dr. Kleber Francisco Esposto e Prof. Dr. Anibal Tavares de Azevedo, pela significativa contribuição para o meu trabalho e pelo exemplo de profissionalismo.

À uma dupla mais que especial que me auxiliaram no desenvolvimento deste trabalho. Ao grande parceiro e amigo Lucas Asserby, pelas incontáveis horas que me ajudou no modelo computacional. Ao meu “irmão mais velho”, Luiz Tonin, pela companhia nas madrugadas de trabalho no laboratório e generosidade de apoio.

De forma muito especial, ao professor e coordenador técnico do SENAI de Rio Claro, Paulo Sergio, por ter me liberado nos momentos mais importantes durante o desenvolvimento desta Tese. Minha eterna gratidão!

À minha família, pelo amor, confiança e paciência durante os anos que me dediquei a essa pesquisa. À minha esposa, Maria Fernanda, que soube como ninguém suportar e me apoiar neste período. Ao meu filho mais velho, Icaro Gabriel, pela sabedoria dos momentos difíceis e de ausência. À pequena Mariana, que chegou no meio da jornada, trazendo alegria e motivação.

Aos meus pais, Silvania e Valdir, pela educação e valores ensinados, mas acima de tudo, pela esperança de vida e carinho demonstrados nos momentos mais difíceis da minha vida.

Enfim, a Deus pelas experiências proporcionadas e oportunidades de ter vivenciando com pessoas maravilhosas durante esta jornada.

RESUMO

Nesta pesquisa é proposta uma abordagem para construção de modelos de Simulação de Eventos Discretos (SED) integrado com a Simulação Baseada em Agentes (SBA) para melhorar a representação de sistemas de produção em ambiente computacional de simulação. Esta abordagem é composta por uma arquitetura baseada em linguagem UML, que possui uma articulação para integrar macro especificações (abordagem *top-down*) pela perspectiva da SED, com micro especificações (abordagem *bottom-up*) pela perspectiva da SBA, e um roteiro para modelagem e simulação SED-SBA. A motivação para desenvolvimento desta abordagem são as limitações e dificuldades na modelagem do comportamento de operadores em modelos SED e a demanda crescente por métodos e técnicas para desenvolvimento de modelos SBA no contexto da Gestão de Operações. Para o desenvolvimento desta abordagem foi conduzida uma Revisão Bibliográfica Sistemática (RBS) sobre a SBA no contexto da manufatura, logística e cadeia de suprimentos. Os resultados da RBS forneceram as bases teóricas, conceituais e práticas para desenvolvimento da abordagem e construção do modelo de simulação híbrido (SED-SBA). O processo de modelagem e simulação SED foi adaptado para possibilitar a inserção dos agentes. Os resultados do processo de modelagem e simulação mostram que a prática da SBA aplicada no contexto da Gestão de Operações ainda apresenta alguns desafios operacionais, principalmente para programação de entidades pertencentes ao *software* SED, que já possuem regras de comportamento pré-estabelecidas. Porém, o uso da SED-SBA pode oferecer maior poder de modelagem de sistemas, devido às novas formas de representar o comportamento das entidades de um modelo. Este potencial pode contribuir para redução da necessidade de realizar simplificações operacionais em sistemas com certo nível de complexidade, aumentando a legitimidade dos resultados obtidos no modelo computacional.

Palavras-chave: Projeto de sistemas de produção, linhas de montagem, Simulação Baseada em Agentes, Simulação de Eventos Discretos, UML.

ABSTRACT

In this research we propose an approach for the construction of Discrete Event Simulation (DES) models integrated with Agent Based Simulation (ABS) to improve the representation of production systems in a simulation computational environment. This approach is composed of a UML language architecture, which has a joint to integrate macro specifications (top-down approach) from the perspective of DES, with micro specifications (bottom-up approach) from the perspective of the ABS, and a guide for DES-ABS modeling and simulation. The motivation to develop this approach is the limitations and difficulties in modeling the behavior of operators in SED models and the increasing demand for methods and techniques for the development of SBA models in the context of Operations Management. For the development of this approach a Systematic Review on ABS was conducted in the context of manufacturing, logistics and supply chain. The results of Systematic Review provided the theoretical, conceptual and practical bases for developing the approach and construction of the hybrid simulation model. The modeling and simulation process was adapted to allow the insertion of the agents. The results of the modeling and simulation process show that the practice of SBA applied in the context of Operations Management still presents some operational challenges, mainly for programming of entities belonging to the DES software, which already have pre-established rules of behavior. However, the use of DES-ABS may offer greater system modeling power due to new ways of representing the behavior of entities in a model. This potential can contribute to reduce the need to perform operational simplifications in systems with a certain level of complexity, increasing the legitimacy of the results obtained in the computational model.

Keyword: Design of production systems, assembly lines, Agent-based Simulation, Discrete Event Simulation, UML.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1: Significado do termo projeção	23
Figura 2-2: Estrutura de conhecimentos da <i>Design Science</i>	23
Figura 2-3: Abordagem das três fases para funcionamento dos modelos de eventos discretos	29
Figura 2-4: Processo de modelagem e simulação.....	32
Figura 2-5: Mecanismo para geração de aleatoriedade nos modelos SED	33
Figura 2-6: Modelo de performance do operador baseado na idade e ritmo circadiano	35
Figura 2-7: Fatores para modelagem da performance de operadores em linhas de produção..	36
Figura 2-8: Resumo da RBS sobre simulação baseada em agentes	44
Figura 2-9: Modelo genérico de SBA.....	45
Figura 2-10: Tipos de modelos SBA e propriedades dos agentes	47
Figura 2-11: Estrutura lógica da arquitetura BDI.....	51
Figura 2-12: Arquitetura baseada em lógica BDI e validação por atores sociais.....	55
Figura 2-13: Classificação dos Diagramas da linguagem UML 2.....	56
Figura 2-14: Diagramas de estado do comportamento dos clientes e funcionários	58
Figura 2-15: Modelagem da satisfação dos clientes da loja de departamentos.....	59
Figura 2-16: Arquitetura proposta para modelagem de SED-SBA	66
Figura 3-1: Metodologia SimuCAD	69
Figura 3-2: Método de pesquisa	72
Figura 4-1: Modelo conceitual de embalagem de oscilantes.....	76
Figura 4-2: Imagem do modelo de simulação SED programado no FlexSim.....	86
Figura 4-3: Imagem do FlexSim ilustrando a lógica de Pedidos Urgentes no modelo SED....	86
Figura 4-4: Produção real x modelo de simulação por tipo de produto	88
Figura 4-5: Série temporal comparando os resultados do modelo SED com a produção real.	89
Figura 4-6: Imagem do FlexSim mostrando a estrutura de objetos do modelo SED	90
Figura 4-7: Casos de uso para a “puxada na produção” no modelo SBA	91
Figura 4-8: Comportamento aGI para o Pedido Urgente	92
Figura 4-9: Interação entre o aP e o aLPP	93
Figura 4-10: Comportamento do aOE	94
Figura 4-11: Novo modelo computacional após as mudanças necessárias para SBA.....	97
Figura 4-12: Ilustração conceitual do modelo SED-SBA	99
Figura 4-13: Análise estatística entre o modelo SED e o modelo SED-SBA	100
Figura 4-14: Atendimento de pedidos urgentes no modelo SED	104
Figura 4-15: Atendimento pedidos urgentes no modelo SED-SBA.....	105

Figura 5-1: Roteiro para modelagem e simulação SED-SBA	119
Figura 5-2: Etapa 1 e 2 do roteiro para modelagem e simulação SED-SBA.....	120
Figura 5-3: Modelo conceitual do roteiro SED-SBA	120
Figura 5-4: Etapa de coleta de dados do roteiro SED-SBA	121
Figura 5-5: Programação, Verificação e Validação modelo SED no roteiro SED-SBA.....	122
Figura 5-6: Programação, Verificação e Validação modelo SBA no roteiro SED-SBA	123
Figura 5-7: Etapas de experimentação e análise dos resultados do roteiro SED-SBA	124
Figura 6-1: Características do problema para justificar o uso da simulação	128

LISTA DE QUADROS

Quadro 2-1: Definições do conceito de simulação	26
Quadro 2-2: Pesquisas sobre modelagem comportamento humano em SED	34
Quadro 2-3: Cenários de teste do modelo HPV (MANSON et al., 2005).....	38
Quadro 2-4: Características dos modelos ABMS e MAS	43
Quadro 2-5: Principais diferenças entre os modelos SED e SBA	46
Quadro 2-6: Características da arquitetura utilizada para construção dos agentes.....	53
Quadro 2-7: Diagramas UML para modelagem de agentes	57
Quadro 4-1: Variáveis de entrada e saídas definidas para o modelo de simulação.....	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 4-1: Ordem de produção diária de cada tipo de produto (Janeiro a Junho).....	79
Tabela 4-2: Ordem de produção diária de cada tipo de produto (Julho a Dezembro).....	79
Tabela 4-3: Estatística descritiva das amostras de tempos de processamento	80
Tabela 4-4: Tempos de processamento para embalagem dos oscilantes.....	82
Tabela 4-5: Estatística descritiva dos tempos de preparação de grades	83
Tabela 4-6: Tempos de preparação das grades	83
Tabela 4-7: Quantidade de <i>pallets</i> de cada Tipo de Produto para pedido urgente	84
Tabela 4-8: Estatística descritiva e inferência estatística do modelo para 5 e 10 replicações..	88
Tabela 4-9: Resultados quantitativos dos cenários simulados	100

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABMS	<i>Agent-Based Modelling and Simulation</i>
ACD	Diagrama de Ciclo de Atividade
aGI	agente Gerente Industrial
aLEO	agente Líder de Embalagem de Oscilantes
aLPP	agente Líder Peças Plásticas
aOE	agente Operador Extra
aP	agente Processista
BDI	<i>Belief-Desire-Intention</i>
EPA	Estoque de Produto Acabado
FDA	Função de Distribuição de probabilidade Acumulada
HPV	<i>Human Performance Variation</i>
IDEFO	<i>Integration Definition for Function. Modeling</i>
JADE	<i>Java Agent Development</i>
MAS	<i>Multi-Agent System</i>
OPLE	Ordem de Produção Líquida Esperada
OPLP	Ordem de Produção Líquida Planejada
PUE	Pedido Urgente Esperado
RBS	Revisão Bibliográfica Sistemática
SBA	Simulação Baseada em Agentes
SD	<i>System Dynamics</i>
SED	Simulação de Eventos Discretos
SED-SBA	Simulação de Eventos Discretos integrada com Simulação Baseada em Agentes
SIPOC	<i>Suppliers-Inputs-Process-Outputs-Customer</i>
SKU	<i>Stock Keep Unit</i>
SOP	<i>Sales and Operations Planning</i>
TC	Tempo de Ciclo
UML	<i>Unified Modeling Language</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Problema de pesquisa	16
1.2	Objetivos da pesquisa.....	19
1.3	Justificativa	20
1.4	Estrutura de Tese.....	20
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1	Introdução	22
2.2	A ciência do <i>Design</i> e os Sistemas Técnicos	22
2.2.1	Formas de representação dos sistemas de produção em modelos de simulação.....	24
2.3	Conceitos sobre modelagem e simulação de Eventos Discretos.....	26
2.3.1	Funcionamento da Simulação de Eventos Discretos (SED)	27
2.3.2	Componentes de um modelo SED	30
2.3.3	Processo de modelagem e simulação	31
2.3.4	Inserção da variabilidade nos modelos SED.....	32
2.3.5	Problemática dos modelos SED.....	34
2.3.6	Modelagem do comportamento humano em modelos SED.....	34
2.3.7	Considerações sobre a Simulação de Eventos Discretos	39
2.4	RBS: Simulação baseada em agentes.....	40
2.4.1	Conceito de agente	45
2.4.2	Características de modelos baseados em agentes.....	44
2.4.3	Características do modelo computacional baseado em agentes.....	48
2.4.4	Arquiteturas para modelagem de agentes	49
2.4.5	Técnicas de modelagem para simulação baseada em agentes	55
2.4.6	Ferramentas computacionais para simulação baseada em agentes	60
2.4.7	Síntese dos resultados da RBS	61
2.5	Considerações finais acerca dos referenciais conceituais	63

3	METODOLOGIA: PROCESSO DE MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE EVENTOS DISCRETOS E BASEADO EM AGENTES	68
3.1	Introdução	68
3.2	Contexto do problema do modelo de simulação	68
3.2.1	Caracterização do problema da “puxada na produção”	70
3.3	Racionalidade da pesquisa	71
3.4	Método de pesquisa.....	72
4	DESENVOLVIMENTO DO MODELO EVENTOS DISCRETOS-AGENTES	75
4.1	Objetivos do modelo de simulação	75
4.2	Modelo SED.....	75
4.2.1	Formulação do modelo conceitual SED.....	76
4.2.2	Dados de entrada e saída do modelo SED	78
4.2.3	Coleta de dados	79
4.2.4	Programação do modelo computacional SED	84
4.2.5	Etapas de construção do modelo SED	85
4.2.6	Dinâmica de funcionamento do modelo computacional SED	85
4.2.7	Verificação do modelo computacional SED	87
4.2.8	Validação do modelo computacional SED	87
4.2.9	Considerações sobre modelo SED	90
4.3	Modelo SBA	90
4.3.1	Definição da sociedade de agentes.....	90
4.3.2	Especificação dos agentes	91
4.3.3	Programação do modelo SBA.....	95
4.3.4	Modificações necessárias no modelo SED	97
4.3.5	Verificação e Validação do modelo SBA	97
4.4	Modelo híbrido SED-SBA	98
4.5	Projeto experimental	99

4.6	Resultados da simulação	100
4.7	Considerações finais sobre o desenvolvimento do modelo SED-SBA.....	106
5	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	107
5.1	Introdução	107
5.2	Caracterização conceitual do modelo SBA.....	107
5.3	Análise dos resultados quantitativos do modelo SED-SBA	108
5.4	Reflexões sobre o processo de modelagem e simulação SED-SBA.....	109
5.4.1	Formulação do problema e definição dos objetivos do modelo.....	109
5.4.2	Modelo conceitual.....	109
5.4.3	Coleta de dados	112
5.4.4	Programação do modelo computacional.....	112
5.4.5	Verificação do programa.....	113
5.4.6	Validação.....	114
5.4.7	Projeto experimental	114
5.5	Contribuições do modelo híbrido para representação de sistemas de produção.....	115
5.5.1	Contribuições do processo de modelagem e simulação.....	115
5.5.2	Dificuldades e limitações do processo de modelagem e simulação SED-SBA.....	117
5.6	Proposta de roteiro para modelagem e simulação SED-SBA	118
5.7	Considerações finais sobre o processo de modelagem e simulação SED-SBA.....	125
6	CONCLUSÃO	126
6.1	Conclusões acerca das questões de pesquisa	126
6.2	Conclusões acerca do problema de pesquisa	128
6.3	Limitações e trabalhos futuros	130
	BIBLIOGRAFIA	131

1 INTRODUÇÃO

No campo teórico e prático da Engenharia de Produção há a necessidade de trabalhar com modelos para compreender o funcionamento dos sistemas produtivos. Existe uma dualidade na representação do conceito de modelo (de produção) a qual remete ao próprio significado da palavra modelo, ou seja, designando uma representação articulada do real ou uma referência positiva a ser atingida (ZILBOVICIUS, 1999). Os modelos de simulação remetem ao primeiro uso, ou seja, uma representação articulada do real, a qual considera a dinâmica temporal e/ou a dinâmica de eventos. Considera ainda a probabilidade como elemento representativo da variabilidade do sistema de produção, sendo efetivamente importante para a compreensão e concepção de sistemas de produção, além de dar suporte nos processos decisórios.

1.1 Problema de pesquisa

Os modelos de Simulação de Eventos Discretos (SED) possuem uma série de dificuldades para representar a dinâmica e complexidade de sistemas produtivos. As simplificações e limitações dos *softwares* utilizados para simulação do sistema diminuem a legitimidade do modelo, devido às dificuldades de inserção de práticas condicionadas pelo ambiente econômico, social e cultural (TORRES, 2007). Esta parcialidade da modelagem pode proporcionar desvios nos resultados do modelo em relação ao sistema real. O autor cita exemplos, características em sistemas de produção, que são complexos para representar em ambientes de simulação: ganhos de produtividade de longo prazo, devido a mudanças na organização do trabalho ou de intervenções ergonômicas, ganhos de produção obtido pelo rearranjo do trabalho no curto prazo, mas que podem causar danos à saúde dos trabalhadores no médio e longo prazo.

Baines e Kay (2002) argumentam que o principal problema dos *softwares* SED é que estes são direcionados para modelagem de dispositivos técnicos do sistema de produção, como máquinas, esteiras e robôs. Estes dispositivos possuem comportamentos relativamente fáceis de serem representados com a lógica de eventos discretos, onde é possível atribuir distribuições de probabilidade para os tempos de processamento. Nestes *softwares*, os operadores são representados como entidades passivas, semelhante ao funcionamento de peças, máquinas e transportadores (BAINES; KAY, 2002; WANG; SOWDEN; MILEHAM, 2013). Esta forma de representação causa lacunas nos resultados obtidos na simulação, em comparação

com os resultados do sistema real, principalmente em processos produtivos que possuem operações manuais (BAINES; KAY, 2002; BAINES et al., 2003; WANG; SOWDEN; MILEHAM, 2013).

Nestes contextos, **a representação simplificada dos operadores pode influenciar nos resultados pretendidos com o modelo, como o volume de produção, taxa de utilização dos recursos, tempo de atendimento, entre outros.**

Na literatura são encontrados diversos estudos que visaram melhorar a forma de modelar o comportamento dos operadores em relação aos tempos atribuídos às tarefas destas entidades. Alguns estudos buscaram inserir aspectos fisiológicos e o efeito da idade dos operadores em relação à perda de produtividade (BAINES et al., 2004; BOENZI et al., 2014). Já Wang, Sowden e Mileham (2013) estabeleceram curvas de aprendizagem associadas com atributos físicos e psicológicos dos operadores como fatores determinantes da performance humana na simulação SED. Estes métodos possuem uma série de dificuldades operacionais para obtenção e validação dos dados de *input* para os modelos. Além disso, há consenso entre os autores sobre a necessidade de **consideração de comportamentos emergentes que surgem na dinâmica do sistema produtivo.**

Manson et al. (2005) desenvolveram um modelo chamando de HPV (*Human Performance Variation* – modelo de Variação da Performance Humana) em linhas de montagem de motores. Os resultados bimodais das curvas de distribuição de probabilidade mostraram **o efeito do comportamento individual do operador, que possui diferentes formas de realizar o trabalho.** Além disso, neste estudo **foram eliminados fatores imprevisíveis que podem acontecer durante o processo, como perturbações na linha, problemas de qualidade e comportamentos incomuns do trabalhador.**

A Simulação Baseada em Agentes (SBA) é apresentada pelos pesquisadores da área de Pesquisa Operacional (PO) como uma abordagem emergente de modelagem orientada para a individualização das entidades, representadas como Agentes (BALDWIN; SAUSER; CLOUTIER, 2015; HOAD; WATTS, 2012; MACAL; NORTH, 2010; SIEBERS et al., 2010). Nesta abordagem, os agentes são autônomos, com capacidade de tomar decisões devido às informações percebidas no ambiente. Estes autores defendem a utilização de modelos híbridos, integrando a abordagem de eventos discreta com a abordagem baseada em agentes (SED-SBA).

Porém, a abordagem de simulação com agentes ainda não está profundamente fundamentada na área de Gestão de Operações (MACAL 2016). O autor constata que há um crescimento nas publicações neste tema, contudo, verifica que a SBA não é aceita ou entendida pela comunidade científica, quando comparada com outros tipos de simulação. Na visão do

autor, não há clareza em relação às características essenciais da SBA e seus aspectos metodológicos

Diante dessa descrição, algumas questões são colocadas para investigação nesta pesquisa:

- **Como a abordagem de agentes¹ pode ser explorada para melhorar a representação de sistemas de produção em ambientes de simulação computacional?**
- **Quais as contribuições de um modelo híbrido SED-SBA para análise e projeto de sistemas de produção?**

Estas questões direcionam a pesquisa para o estudo dos conceitos, práticas, aplicações e limites da simulação com agentes existentes na literatura e, a partir dos resultados desta pesquisa, reunir um conjunto de ferramentas visando o desenvolvimento de uma estrutura instrumental que suporte a construção de modelos SED-SBA.

Desta forma, a Revisão Bibliográfica reúne os referenciais conceituais sobre as duas abordagens de simulação objeto de pesquisa. Neste aspecto, a SBA é analisada de forma sistemática para levantar as práticas metodológicas no contexto da manufatura, logística e gestão da cadeia de suprimentos. O processo de modelagem e simulação SED-SBA proposto será utilizado para representar um sistema produtivo considerado complexo, devido a situações dinâmicas que ocorrem no chão de fábrica.

Este sistema é caracterizado por uma linha de embalagem de ventiladores oscilantes, inserido em um ambiente externo, onde a concorrência é baseada na capacidade da empresa entregar pedidos urgentes. Em determinados dias de trabalho, o setor de vendas solicita ao setor de embalagem de oscilantes, a embalagem de itens adicionais à programação do dia. Neste contexto, ocorre uma tentativa de aumentar a velocidade da linha de produção para atender ao pedido solicitado (o problema da “puxada na produção”).

A “puxada na produção” é realizada pela equipe de processistas da empresa, que se deslocam para a embalagem de oscilantes quando ocorre esta situação, para auxiliar o líder do setor. Do ponto de vista técnico, a “puxada” consiste em aumentar a frequência dos inversores, para acelerar a esteira. Nesta situação, os processistas, verificam a possibilidade de remanejar operadores de outros setores para ajudar nos postos de trabalho com a linha

¹ O termo “abordagem de agentes” foi utilizado, inicialmente, para realizar a pesquisa dos referenciais teóricos para o trabalho. Os resultados da Revisão Bibliográfica Sistemática evidenciaram o recorte para a Simulação Baseada em Agentes (SBA).

acelerada, visando reduzir o Tempo de Ciclo (TC) da linha. Este remanejamento é realizado negociando a liberação dos operadores, com o responsável pelo setor, que verifica essa possibilidade, conforme a rotina do dia em seu setor.

Durante o período da “puxada”, os processistas permanecem verificando as condições dos postos de trabalho da linha, buscando aumentar a taxa de saída de produtos, alterando os postos de trabalho ocupados pelos operadores adicionais, pela identificação visual dos gargalos.

O atendimento a estes pedidos urgentes pode alterar a programação da produção planejada para o setor de embalagem de oscilantes. Desta forma, o Gerente Industrial monitora os pedidos urgentes e delibera sobre a programação da produção no setor.

Do ponto de vista técnico da modelagem e simulação, esta situação é caracterizada por diversas interações entre entidades do modelo de simulação, que precisam realizar checagens recorrentes no sistema para tomada de decisão. Essas características são consideradas as partes mais difíceis de serem modeladas pela SED, devido a necessidade de recursos avançados de programação.

Portanto, a construção deste modelo computacional híbrido SED-SBA demanda a pesquisa de métodos e técnicas específicas que possibilite representar o sistema produtivo com maior grau de aderência e que facilite o processo de modelagem e simulação.

1.2 Objetivos da pesquisa

Com base nas questões de pesquisa o objetivo desta Tese é **propor uma abordagem para modelagem e simulação de eventos discretos integrado com a abordagem de agentes**. De maneira específica, esta pesquisa visa:

- Identificar as características da Simulação Baseada em Agentes no contexto da Gestão de Operações;
- Especificar uma arquitetura para modelagem baseada em agentes em ambiente de simulação de Eventos Discretos;
- Validar este ferramental pelo desenvolvimento de um modelo SED-SBA, baseado em um contexto real;
- Propor um roteiro para o processo de modelagem e simulação de modelos híbridos Eventos Discretos-Baseado em Agentes.

1.3 Justificativa

Os modelos de Simulação de Eventos Discretos (SED) são típicos da Pesquisa Operacional, que se alinham com a visão clássica do processo de Projeto de Engenharia, onde busca-se otimização dos objetivos do projeto, dentro de um espaço de restrições (PAHL et al., 2013). Porém, Duarte (2002) e Menegon (2003), argumentam que o processo de projeto de situações produtivas é duplamente orientado por duas perspectivas antagônicas e conflitantes: abordagem descendente, relacionada com a lógica de eficácia produtiva e uma abordagem ascendente, com lógica antropocêntrica.

Para Thiollent (1983), esta visão clássica do projeto de engenharia possui orientação metodológica que considerando somente os elementos normativos da estrutura técnica-organizacional, voltada para obtenção de sistemas prescritivos, focando as exigências do poder efetivo da abordagem descendente sobre o processo de produção com a questão da eficiência produtiva. Em contraste com esta orientação, a abordagem descritiva visa incorporar os elementos do sistema produtivo nos seus contextos sociais e culturais. O autor afirma a necessidade de uma orientação metodológica que leve em consideração os aspectos normativos e descritivos para projeto de processos.

Conforme exposto na seção 1.1, parece haver um consenso entre os pesquisadores da área sobre a complementariedade entre os modelos SED e os modelos SBA para simulação de sistemas complexos. Porém, permanece o desafio de desenvolver métodos e técnicas para SBA que sejam coerentes com os seus pressupostos conceituais e práticos de ambas abordagens de simulação, e que sejam aceitos pelos pesquisadores da área.

1.4 Estrutura de Tese

Esta Tese está estruturada em 6 capítulos, iniciada **pelo capítulo de Introdução**, que busca discutir o contexto e a problemática do tema abordado e, apresentar os objetivos e justificativa para a pesquisa.

Na Revisão Bibliográfica (**capítulo 2**) são apresentados os referenciais teóricos sobre a problema de pesquisa. A primeira seção apresenta a Teoria dos Sistemas Técnicos como racionalidade para representação de sistemas de produção em modelos de simulação. Na segunda seção são apresentados os conceitos teóricos-conceituais e metodológicos para SED, destacando o problema de modelar o comportamento humano. A seção 3 concentra sobre os referenciais conceituais para SBA. Nesta seção foi realizada uma Revisão Bibliográfica

Sistemática (RBS) sobre os conceitos de simulação com agentes, aspectos técnicos e metodológicos aplicados no contexto da manufatura, logística e cadeia de suprimentos. Por fim, nas considerações finais acerca dos referenciais conceituais, é apresentada uma síntese sobre a base teórica e conceitual discutida nas seções anteriores e conclui com uma arquitetura para construção de modelos SBA.

No **capítulo 3** é realizada uma breve descrição do contexto desta pesquisa, e detalhamento do sistema produtivo do setor de embalagem de oscilantes e do caso da “puxada na produção”. Na sequência é apresentado e discutido o método de pesquisa proposto para o desenvolvimento deste estudo. O método foi elaborado partindo-se do processo tradicional de modelagem e simulação de eventos discretos, com adaptação para inserir o modelo baseado em agentes.

O modelo SED-SBA construído é apresentado no **capítulo 4**, onde são detalhadas todas as fases do processo de modelagem e simulação proposto no capítulo anterior.

No **capítulo 5** são apresentados os resultados sobre o processo de modelagem e simulação SED-SBA, como uma reflexão sobre as etapas do processo e, os resultados (*outputs*) quantitativos obtidos com o modelo de simulação SED-SBA.

Por fim, no **capítulo 6** é realizada uma discussão com olhar teórico sobre os resultados da pesquisa, com as considerações finais sobre a arquitetura e método proposto para modelagem e simulação de Eventos Discretos integrado com Baseado em Agentes.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Introdução

Este capítulo possui 3 temas principais. No primeiro tema é apresentado a Teoria dos Sistemas Técnicos e suas formas de representação de sistemas produtivos, como embasamento para entender a racionalidade dos modelos SED. No segundo tema são apresentados os elementos, funcionamento e limitações dos modelos deste paradigma de simulação.

A partir destas limitações, são apresentadas as possibilidades para criação de modelos de Simulação Baseada em Agentes (SBA), como possível alternativa para superar os problemas dos modelos SED. Nesta temática foi realizada uma Revisão Bibliográfica Sistemática (RBS) com objetivo de levantar as práticas (métodos, técnicas e ferramentas) utilizadas para simulação SBA.

A reunião destas práticas conduziu para a construção do método de modelagem e Simulação de Eventos Discretos, integrado com a simulação Baseada em Agentes.

2.2 A ciência do *Design* e os Sistemas Técnicos

A Ciência do Design ou “*Design Science*” proposta por HUBKA e EDER (1995) estabelece que o “ato de projetar” ou a projeção é definida como conversão de informações de um estado primário (requisitos, necessidades dos clientes, restrições) em um estado secundário, que são informações relativas a descrição de um Sistema Técnico (Figura 2-1). Essa transformação de informações (Processo de Projeto) está influenciada pelos objetivos da organização (lucratividade, produtos, satisfação dos clientes, funcionários, etc). Um Sistema Técnico é um artefato, objeto que pode ser entendido como um sistema.



Figura 2-1: Significado do termo projeção
Fonte: Hubka e Eder (1995).

Os autores apresentam a estrutura da *Design Science* composta em dois níveis de recursos. O primeiro nível é de caráter metodológico, considerando uma orientação prescritiva, relacionada com os conhecimentos práticos, e outra descritiva, relacionada com as teorias. Um segundo nível de recurso é a consideração do objeto, sendo uma orientação para o processo de projeto e seus operadores e outro sobre os objetos em projeto (sistema técnico). Desta forma, são estabelecidas 4 classes ou quadrantes, conforme a Figura 2-2.

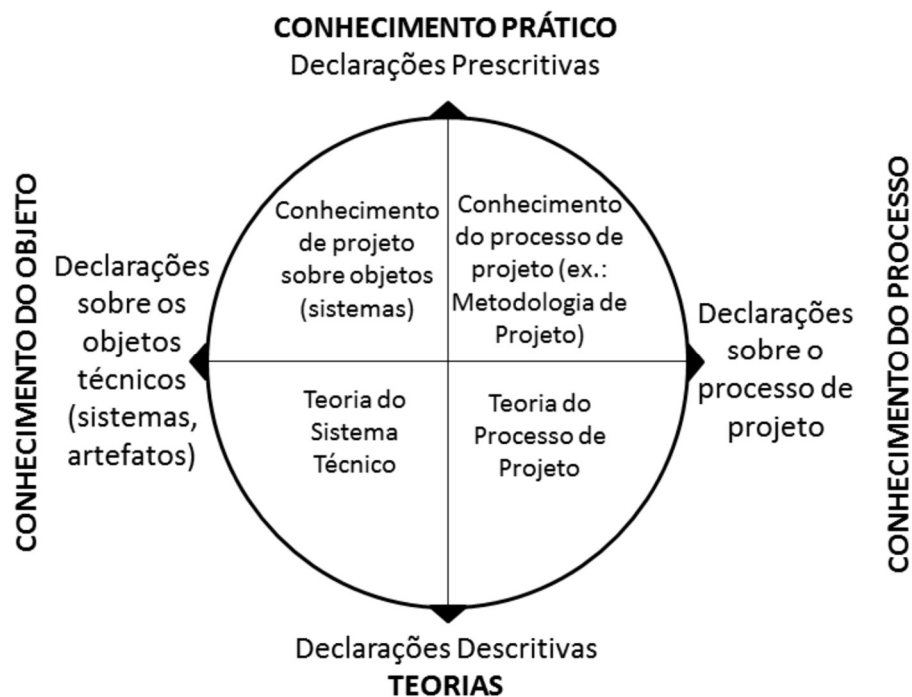


Figura 2-2: Estrutura de conhecimentos da *Design Science*
Fonte: Hubka e Eder (1995).

As declarações descritivas são oriundas de teorias específicas que definem, tanto o objeto em projeto, como o processo de projeto, para apresentar informações que explicam e justificam o objeto técnico real projetado e o processo de concepção. A teoria para definição do objeto surge da combinação entre os fenômenos físicos, químicos, biológicos, com as interações organizacionais e sociais para conceber sistemas técnicos, que incorporam conhecimentos científicos e uma série de tecnologias para atender as especificações e necessidades, técnicas e sociais, demandadas por um conjunto de atores sociais.

Já o processo advém de teorias sobre o comportamento humano, como psicologia, cognição, criatividade, relacionamento interpessoal, que explicam as ações, resultados e sucessos de transformação das necessidades de entrada para garantir os resultados do objeto em concepção. Os agentes atuantes que deliberam neste processo de transformação estão relacionados com os operadores no contexto sócio técnico, que atuam emergindo valores e manifestações pessoais de caráter heurístico para que o processo técnico seja capaz de ser operado como esperado.

Os conhecimentos prescritivos (práticas do sistema técnico) são conjunto de conhecimentos específicos sobre o objeto projetado (sistema técnico real) de forma normativa: aplicações pré-determinadas, os elementos que formam o sistema, dimensões, natureza dos materiais e procedimentos de montagem. No quadrante prescritivo do Processo de Design estão as informações sobre procedimentos dos *designers* em tarefas concretas de projeto. Práticas relacionadas com **atividade** humana em relação ao objeto real: estratégias, táticas, métodos aplicados para atender uma necessidade específica de aplicação. Logo estão em jogo aspectos normativos (formais e explícitos) e aspectos da intuição e criatividade (informal e implícito).

Estabelecendo os modelos de simulação como uma estratégia para projetar sistemas de produção, é necessário apresentar sua racionalidade enquanto abordagem de processo de projeto e as formas de representação do sistema técnico objeto de projeto (sistema de produção).

2.2.1 Formas de representação dos sistemas de produção em modelos de simulação

Os modelos de simulação podem ser construídos como representação de modelos de tecnologias, segundo a visão da racionalidade produtiva, onde são analisados indicadores de eficiência e desempenho econômico (TORRES, 2007). A legitimidade dos modelos de simulação está relacionada com seus elementos (procedimentos, equipamentos e comportamento dos dispositivos) representam a realidade do sistema de produção, através de

variáveis globais quantitativas (peças/produtos produzidos, tamanho de fila, ociosidade e disponibilidade), validadas por meio de testes estatísticos.

Estes modelos assumidos como institucionalizados dentro das organizações, são confrontados com as práticas internas, causando imprevistos devido ao modelo não ser construído considerando o sistema sócio cultural vigente. As práticas surgem da interação com o ambiente econômico, social e cultural, onde são confrontados os resultados aceitáveis, com as condições tecnológicas do sistema de produção. Neste sentido, a legitimidade dos modelos é influenciada pela consideração de elementos reconhecidos pelo ambiente.

Os elementos da tecnologia não considerados no modelo devem ser adaptados para que o modelo atinja os resultados estipulados. Por outro lado, a inclusão de maiores detalhes das práticas existentes (dos modos de ação), demanda conhecimento do sistema de produção real e suas familiaridades. Esta tecnologia de processo (como fazer) está disponível em duas formas (TORRES, 2007): a primeira é formal prescrita pela organização e disponível com os responsáveis pelo projeto do processo, a segunda é a forma real (executada) executada pelos operadores. “Modelar o prescrito levará a uma produção nominal e não à resultante das atividades realizadas” (TORRES, 2007 p. 118).

Para Thiollent (1983), esta orientação metodológica, considerando somente os elementos normativos da estrutura técnica-organizacional é voltada para obtenção de sistemas prescritivos, focando as exigências do poder efetivo da abordagem descendente sobre o processo de produção com a questão da eficiência produtiva. Em contraste com esta orientação, a abordagem descritiva visa incorporar os elementos do sistema produtivo nos seus contextos sociais e culturais. O autor afirma a necessidade de uma orientação metodológica que leve em consideração os aspectos normativos e descritivos para projeto de processos.

A incorporação de indicadores, que sejam diferentes do desempenho econômico, podem aumentar a legitimidade dos modelos de simulação e sua validação junto aos usuários da empresa. Isto implica a necessidade de o modelo incorporar novas tecnologias, que aumentam a complexidade do modelo e demandam novas técnicas para modelagem e simulação (TORRES, 2007).

2.3 Conceitos sobre modelagem e simulação de Eventos Discretos

Existem diversas definições para o conceito de modelagem e simulação. As definições dos principais autores citados na literatura são apresentadas no Quadro 2-1.

Quadro 2-1: Definições do conceito de simulação

Autor	Definição
Kelton, Sadowki e Sadowski (1998)	“Simulação é o processo de projetar e criar um modelo em computador de um sistema real ou proposto com o propósito de conduzir experimentos numéricos para uma melhor compreensão do comportamento de um dado sistema, dada uma série de condições”
Pidd (2000)	“O princípio básico é simples. Analistas constroem modelos do sistema de interesse, escrevem programas destes modelos e utilizam um computador para inicializar o comportamento do sistema e submetê-lo a diversas políticas operacionais. A melhor política deve ser selecionada.”
Freitas Filho (2001)	“A simulação computacional de sistemas, ou simplesmente simulação, consiste na utilização de determinadas técnicas matemáticas, empregadas em computadores digitais, as quais permitem imitar o funcionamento de, praticamente, qualquer tipo de operação ou processo (sistemas) do mundo real”.
Robinson (2004)	“A experimentação com uma imitação simplificada (em um computador) de um sistema de operações como um processo que avança ao longo do tempo, com o objetivo de uma melhorar a compreensão e/ou melhorar esse sistema”.
Prado (2004)	“Simulação é uma técnica de solução de um problema pela análise de um modelo que descreve o comportamento do sistema usando um computador digital”

Existem diferenças entre as nomenclaturas utilizadas pelos autores, porém existem três conceitos que estão mais ou menos explícitos em todas as definições e que são direcionadores para esta Tese:

- As definições remetem a simulação realizada em computador onde são utilizados programas, *softwares*, algoritmos;
- Um sistema representa um conjunto de elementos organizados de forma a cumprir um objetivo;
- Um modelo é a representação dos elementos de um sistema, com certo nível de simplificação, mas que visa reproduzir o comportamento real deste sistema.

Law (2013) apresenta três dimensões para os modelos de simulação:

- i) Em relação ao tempo: os modelos podem ser estáticos ou dinâmicos. Os modelos estáticos representam um sistema em instante específico ou quando o tempo não é uma variável importante no sistema. Já os modelos dinâmicos representam sistemas em que ocorrem mudanças no sistema com o avanço do tempo;
- ii) Em relação aos resultados: os modelos podem ser determinísticos ou estocásticos. Nos modelos determinísticos não existem componentes e relações probabilísticas entre as entidades. Os resultados destes modelos são determinados, como uma única solução possível dentre as variáveis de entrada, não possibilitando a modelagem das variabilidades existente no sistema real, representado pelo modelo. Já os modelos estocásticos possuem componentes e relações entre componentes estabelecidas com certa aleatoriedade, que possibilita variabilidade nas relações durante a simulação e, conseqüentemente, a obtenção de diversas soluções factíveis. Geralmente, esta aleatoriedade é inserida utilizando distribuições de probabilidade;
- iii) Em relação ao avanço do tempo: os modelos podem ser contínuos ou discretos. Nos modelos contínuos o tempo avança de forma contínua e mudanças de estado ocorrem ao longo do tempo. Já nos modelos discretos ocorrem mudanças de forma discreta no tempo conforme a ocorrência de eventos que mudam o estado do modelo.

2.3.1 Funcionamento da Simulação de Eventos Discretos (SED)

Na Simulação de Eventos Discretos (SED) somente são representados os instantes em que ocorrem mudanças no estado do sistema (ROBINSON, 2004). Estes instantes são os eventos, ou acontecimentos, que provocam alterações nas variáveis do programa e por consequência alteram o estado do modelo (FREITAS FILHO, 2001). Exemplos de acontecimentos podem ser “uma peça chegando para ser processada por uma máquina, um cliente chegando em um banco para realizar uma transação ou a chegada de uma requisição em um servidor de arquivos em uma rede local de computadores, podem ser considerados eventos” (FREITAS FILHO, 2001, p. 18).

Segundo Robinson (2004) existem diversos mecanismos para criação de SED: baseado em eventos, baseado em atividade, baseado em processo e a abordagem de três fases. O autor argumenta que este último mecanismo é o mais utilizado nos *softwares* comerciais de simulação. A abordagem de três fases classifica os eventos em dois tipos:

- Eventos vinculados (B): são mudanças de estado agendadas para ocorrer em algum ponto de tempo, aplicados para relatar chegadas ao modelo ou a conclusão de uma atividade. Por exemplo, o tempo de chegada de peças ocorre a cada 5 minutos e o tempo de processamento é de 3 minutos. Supondo que uma peça chegou no tempo 10, será previsto um evento de completar a atividade de processamento três minutos depois. Isto aplica-se mesmo quando existe uma variabilidade no modelo, ao prever antecipadamente quanto tempo uma atividade específica terá.
- Eventos condicionais (C): são mudanças de estado que dependem de condições do modelo. Por exemplo, um operador só pode começar a servir um cliente, se houver um cliente esperando para ser atendimento e se operador não estiver ocupado. Este tipo de evento está relacionado com início de alguma atividade.

Na Figura 2-3 é apresentado o mecanismo de funcionamento da SED baseado na abordagem de três fases. Na **fase A** é determinado o tempo do próximo evento consultando a lista de eventos e ocorre o avanço do relógio de simulação. Na **fase B** são executados todos os eventos do tipo B programados para o tempo atual do relógio de simulação. Na **fase C** são checadas as condições para ocorrência dos eventos do tipo **condicional (C)** e são executados aqueles que as condições são atendidas. A execução de um evento do tipo **C** pode desencadear em condições para que outros eventos **C** possam ocorrer. Desta forma, a simulação contínua executando eventos do tipo **C** até que não haja mais este tipo de evento para ocorrência. Em seguida a simulação retorna a **fase A** ou é encerrada.

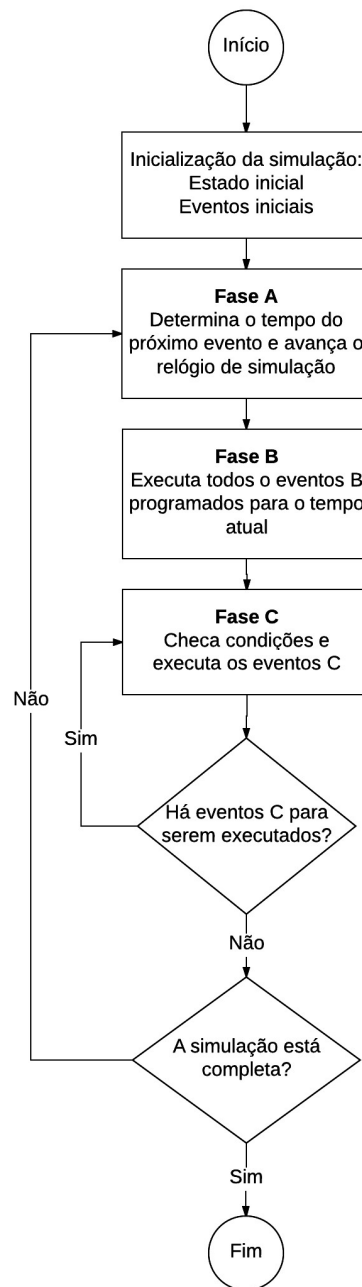


Figura 2-3: Abordagem das três fases para funcionamento dos modelos de eventos discretos
Fonte: Robinson (2004)

Com base no funcionamento da SED é possível combinar diferentes componentes de um modelo para construir sistemas em *softwares* de simulação.

2.3.2 Componentes de um modelo SED

Os modelos SED possuem um conjunto de componentes e uma lógica de organização destes componentes que são compartilhados entre todos os modelos. Law (2013) justifica esta afirmativa alegando a grande diversidade de sistemas reais que a SED pode ser aplicada. Estes componentes são:

- Estado do sistema: a coleção de variáveis necessárias para descrever o sistema em um instante particular;
- Relógio de simulação: uma variável que retorna o tempo atual da simulação;
- Lista de eventos futuros: contém os instantes de tempo e eventos que ocorrerão no futuro, durante a execução da simulação;
- Contadores estatísticos: variáveis utilizadas para armazenar informações estatísticas sobre o desempenho do sistema;
- Rotina de inicialização: um subprograma utilizado para iniciar a simulação no tempo 0 (zero);
- Rotina de tempo: um subprograma que consulta a lista de eventos para determinar qual o próximo evento e avança o relógio de simulação para o seu instante de ocorrência;
- Rotina de eventos: um subprograma que atualiza o estado do sistema, quando ocorre um tipo particular de evento. Existe uma rotina de evento para cada tipo de evento (LAW, 2013);
- Rotina de biblioteca: um conjunto de subprogramas utilizados para gerar observações aleatórias a partir de distribuições de probabilidade definidas no modelo;
- Gerador de relatórios: um subprograma que calcula estimativas das métricas definidas no modelo e gera relatórios quando a simulação acaba;
- Programa principal: um subprograma que chama a rotina de tempo para determinar o próximo evento e transferir o controle para rotina de eventos correspondente. Esta rotina do evento específico é responsável por atualizar o estado do sistema.

2.3.3 Processo de modelagem e simulação

O processo de modelagem e simulação, ou também chamado de metodologia de simulação, está difundido na literatura em publicações de diversos autores (LAW; KELTON, 1991; BERENDS; ROMME; 1999; PIDD, 2001; KELTON; SADOWSKI; SADOWSKI, 2002; BERTRAND; FRANSOO, 2002; MORABITO; PUREZA, 2011). Robinson (2004) apresenta uma estrutura com quatro fases principais, conforme ilustrado na Figura 2-4:

- Construção de um **modelo conceitual** que contém uma descrição do modelo a ser desenvolvido. Este modelo deve representar o sistema real e ser capaz de atender aos objetivos/resolver o problema do sistema real;
- Construção do **modelo computacional** em um *software*. Esta fase consiste em “traduzir” o modelo conceitual para uma linguagem de programação utilizada em algum *software* de simulação;
- Realização de **experimentos** com este modelo computacional para melhorar a compreensão do mundo real e para encontrar a solução do problema;
- A última fase consiste na **implantação** da solução, definida pelos experimentos com modelo computacional, no sistema real.

Entre cada fase existem diversas etapas de validação. A primeira validação está relacionada com a adequação do modelo conceitual em representar o problema investigado na realidade, “como o modelo representa o ‘mundo real’” (PIDD, 2001 p. 154). Após a construção do modelo conceitual existe uma etapa especial de validação, denominada de verificação. A verificação consiste em checar se o modelo computacional corresponde aos objetivos estipulados para ele, ou seja, verificar se o código computacional construído no *software* de simulação está representando o modelo conceitual corretamente.

A terceira validação está relacionada com checagem dos resultados do modelo em relação aos resultados reais do sistema. Por fim, a quarta validação está relacionada com o monitoramento dos resultados obtidos no sistema real com a implantação das soluções obtidas pelo modelo de simulação.

A validação do tipo “caixa-preta” (*black box*) é realizada somente pelo conhecimento dos dados de entrada e saída do sistema. Não são utilizados os elementos internos e interações do sistema. No outro extremo está a validação “caixa-branca” (*white box*), onde são conhecidos e identificados os elementos, estrutura e parâmetros internos do sistema, além dos dados de entrada e saída.

No centro desta estrutura está a atividade de coleta de dados. Esta atividade é fundamental para realização de todas as fases do processo de modelagem e simulação. A validação dos dados coletados no modelo computacional construído pode ser realizada nos dois extremos. Na Figura 2-4 é ilustrado o processo de modelagem e simulação.

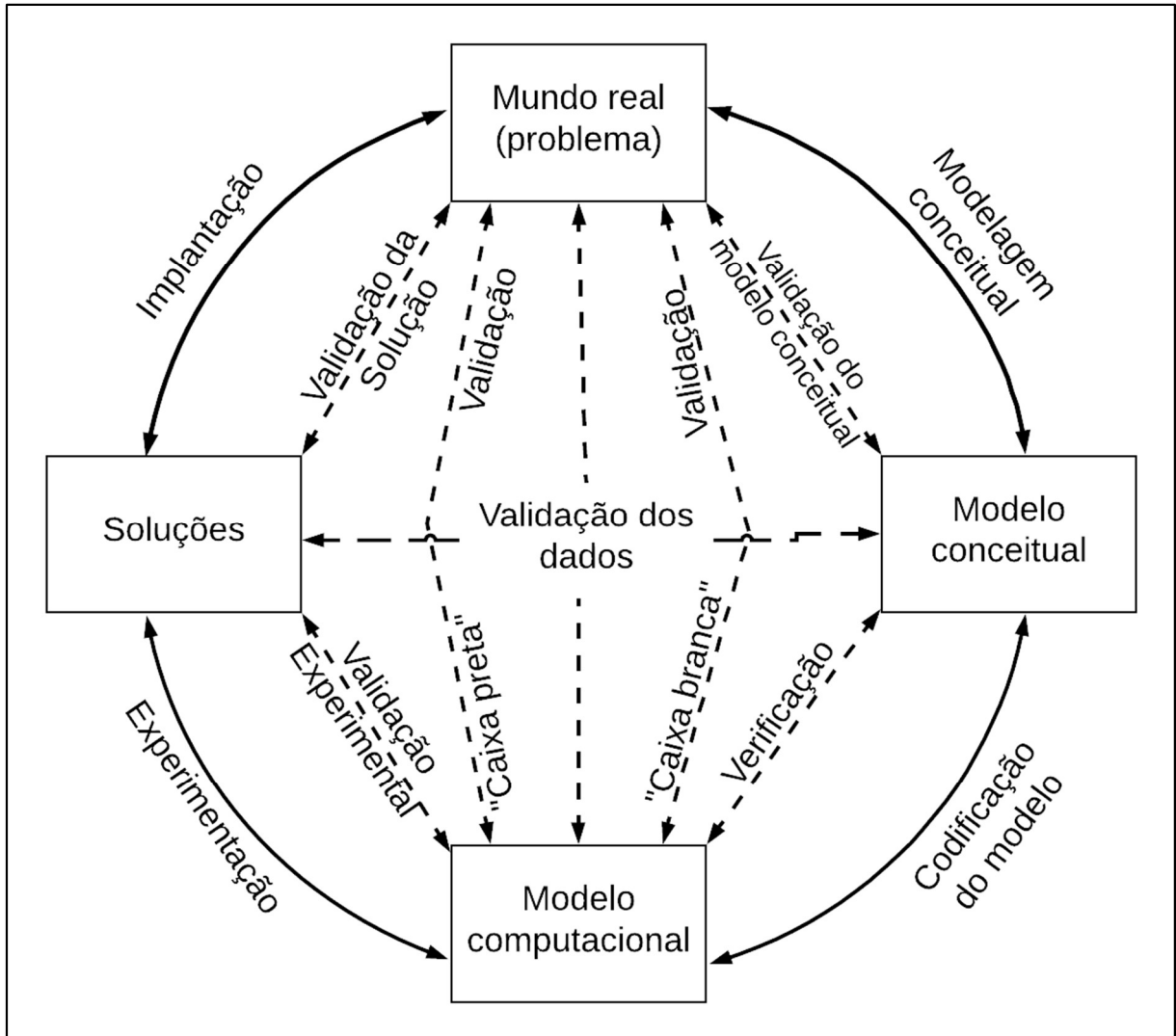


Figura 2-4: Processo de modelagem e simulação
Fonte: Robinson (2004)

2.3.4 Inserção da variabilidade nos modelos SED

Nos sistemas de manufatura ocorrem situações imprevistas que alteram a composição ou atributos dos seus componentes. Nos modelos SED são utilizados mecanismos matemáticos para inserção da variabilidade. Robinson (2004) classifica as variabilidades em dois tipos: previsíveis e as não previsíveis. As variabilidades previsíveis são mudanças no estado do sistema que devem obrigatoriamente acontecer. Para modelar este tipo de variabilidade basta definir quando um evento vai ocorrer. Já as variabilidades imprevistas são

inseridas nos modelos SED utilizando-se distribuições de probabilidade (FREITAS FILHO, 2001; ROBINSON, 2004). Um valor na distribuição de probabilidade é definido para representar o tempo de ocorrência de um evento. Freitas Filho (2001) apresenta alguns exemplos clássicos utilizados em sistemas de manufatura: os tempos decorridos entre as falhas de equipamentos, tempo necessário para repará-las, intervalo de tempo entre chegadas de clientes num sistema, o tempo de passagem de entidades por um sistema, entre outros.

Estas distribuições podem ser puramente teóricas ou empíricas. Quando não existem dados históricos sobre o comportamento do sistema, é escolhida uma distribuição de probabilidade e seus parâmetros são definidos conforme a experiência do usuário (CHWIF; MEDINA, 2014). Já as distribuições empíricas, são coletados dados reais do sistema e realizados testes de aderência destes dados as distribuições teóricas.

Para determinar qual valor será escolhido na distribuição de probabilidade, os *softwares* de simulação possuem um mecanismo com equações para geração de números aleatórios (ROBINSON, 2004). Dado a ocorrência de um evento, o mecanismo buscará um valor, uniformemente distribuído entre $[0,1]$, na função geradora de números aleatórios (CHWIF; MEDINA, 2014). Este número representa uma certa porcentagem acumulada na Função de Distribuição de probabilidade Acumulada (FDA). Para Robinson (2004) a função de números aleatórios pode ser uniformemente distribuída entre $[0, 1]$, números inteiros entre $[0, 9]$ ou $[0, 99]$.

Tomando o exemplo apresentado pelo autor: uma distribuição de probabilidade Normal, com média igual a 5 e desvio padrão igual a 1, $N(5,1)$. Foi gerado um número aleatório que representa 30% na FDA. Este valor representa um valor x de 4,48 na distribuição $N(5,1)$. A Figura 2-5 ilustra o exemplo descrito acima.

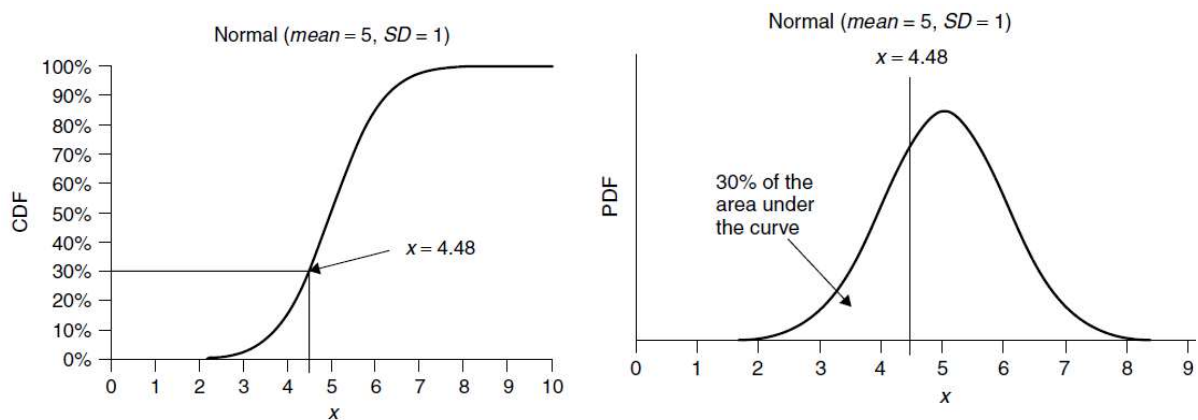


Figura 2-5: Mecanismo para geração de aleatoriedade nos modelos SED
Fonte: Robinson (2004)

2.3.5 Problemática dos modelos SED

Para Baines e Kay (2002), o principal problema dos modelos SED está relacionado com a modelagem da performance humana no sistema. Os autores argumentam que os *softwares* para modelagem SED são direcionados para modelagem de componentes tecnológicos, como máquinas, esteiras e robôs, pois seus comportamentos são relativamente fáceis de serem representados com a lógica de eventos discretos. Porém, a modelagem de componentes que não seguem a lógica de eventos discretos, como operadores ainda é um desafio. Os operadores são representados como recursos, da mesma forma que peças, máquinas e transportadores. Esta técnica de modelagem pode causar lacunas nos resultados obtidos na simulação, em comparação com os resultados do sistema real, principalmente quando os sistemas são constituídos de operadores que realizam tarefas manuais (BAINES; KAY, 2002; BAINES et al., 2003; WANG, SOWDEN, MILEHAM, 2013).

Estes autores constataram este problema estudando linhas de montagem de motores para carros. Para a literatura, este tipo de sistema de produção é caracterizado pela produção em massa, com alto volume e baixa variedade de produtos. Este contexto sugere maior simplicidade de projeto. Porém Baines et al. (2005) argumentam que as tendências atuais dos mercados, que demandam variedade de produtos, melhor qualidade, customização, melhor desempenho de entrega e redução de custos transformaram a linha de produção tradicional de Henry Ford em sistemas de produção com estrutura e rotinas mais complexas.

2.3.6 Modelagem do comportamento humano em modelos SED

Na literatura são encontradas algumas publicações sobre a modelagem do comportamento humano em SED voltados para linhas de produção. Os modelos encontrados forem desenvolvidos em linhas de produção reais de montagem de motores para carros. Um resumo de cada modelo é apresentado no Quadro 2-2.

Autores	Framework	Descrição
Baines et al. (2004)	Micromodelagem	Performance baseada na idade e ritmo circadiano do operador
Baines et al. (2005) Baines e Benedettini (2007)	Key human centred factors	Utiliza uma relação de fatores chave centrados no ser humano
Manson et al. (2005)	HPV	Exploração de diferentes distribuições de probabilidade
Wang, Sowden e Mileham (2013)	Curva de aprendizagem	Redução do tempo de ciclo das operações baseado na experiência dos operadores

Quadro 2-2: Pesquisas sobre modelagem comportamento humano em SED

Baines et al. (2004) investigaram a variação da performance humana a partir de dois modelos existentes na literatura. O primeiro modelo estabelece uma relação entre a perda de produtividade do operador e o envelhecimento, e também contém estimativas de formação profissional e experiência adquirida com o tempo. O segundo modelo define o desempenho do operador em relação ao seu ritmo circadiano. O ritmo circadiano possui diversas funções no corpo humano, como a regulação na produção hormonal e o relógio biológico do ser humano, controlando o sono e o apetite. O ciclo circadiano possui período relativamente curto de 24 horas (1 dia). Desta forma, os autores utilizaram um estudo realizado por Spencer (1987), que estabelece determinado desempenho na realização de tarefas conforme um horário específico no dia e o tempo desde o sono.

A simulação foi construída utilizando-se um *software* para SED, integrando os dois modelos de performance humana pelo *software* Excel (Figura 2-6). Para cada operador na linha de produção, o *software* SED envia para o Excel os dados do operador (idade, horário no dia, tempo acordado e o tempo de ciclo). O Excel define um novo tempo de ciclo, baseado em relações entre os dados recebidos referente ao operador com os dois modelos de performance humana definidos neste estudo. Os autores definem esta abordagem de “micro modelagem” e os modelos individuais de “micromodelos” (BAINES et al. (2004).

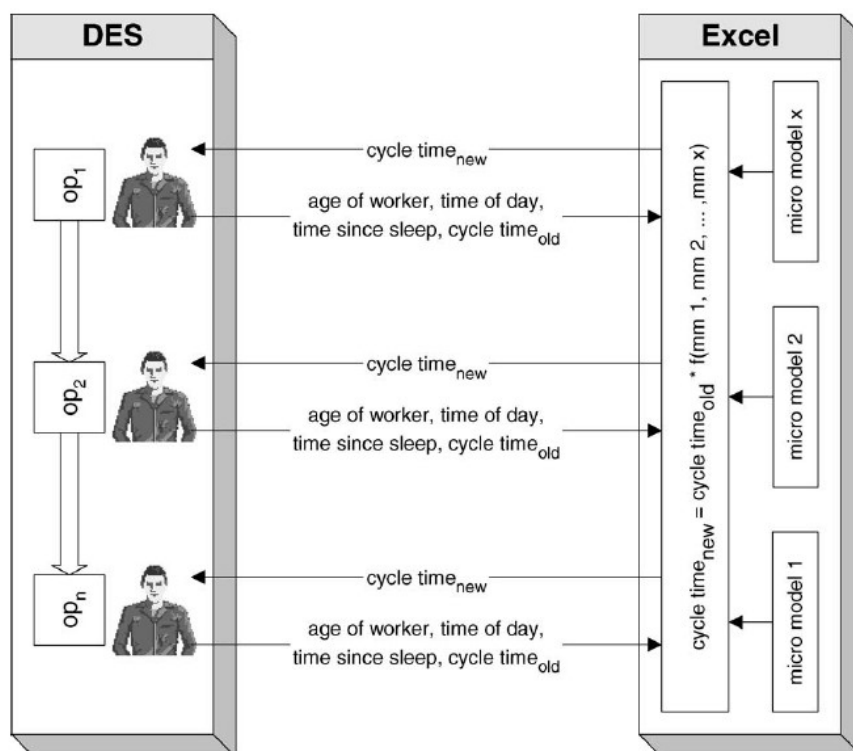


Figura 2-6: Modelo de performance do operador baseado na idade e ritmo circadiano
Fonte: Baines et al. (2004)

Os autores concluem que a precisão da simulação depende da validação dos micromodelos e que esta tarefa é complicada, pois os dados são de natureza pessoal e necessitaria acompanhar o desempenho individual dos operadores.

Na mesma linha de estudos, Baines et al. (2005) desenvolveram um quadro teórico (“*framework*”) para modelagem da performance humana em modelos de simulação (Figura 2-7). Este quadro foi desenvolvido a partir do levantamento de publicações que investigaram os fatores humanos que influenciam na modelagem da performance humana em tarefas manuais. Os autores identificaram 65 fatores chaves para inclusão no quadro teórico. Este conjunto de fatores foram classificados em três categorias:

- Fatores individuais do operador: estes fatores foram agrupados em seis subclasses (personalidade, demografia, fisiologia, cognição, motivação e habilidades);
- Fatores relacionados ao ambiente físico: nível de ruído, temperatura do ar, nível de iluminação, humidade e ventilação;
- Ambiente organizacional: turno de trabalho, trabalho em grupo, suporte, treinamento, comunicação, diversidade de pessoas, estrutura hierárquica e clima organizacional.

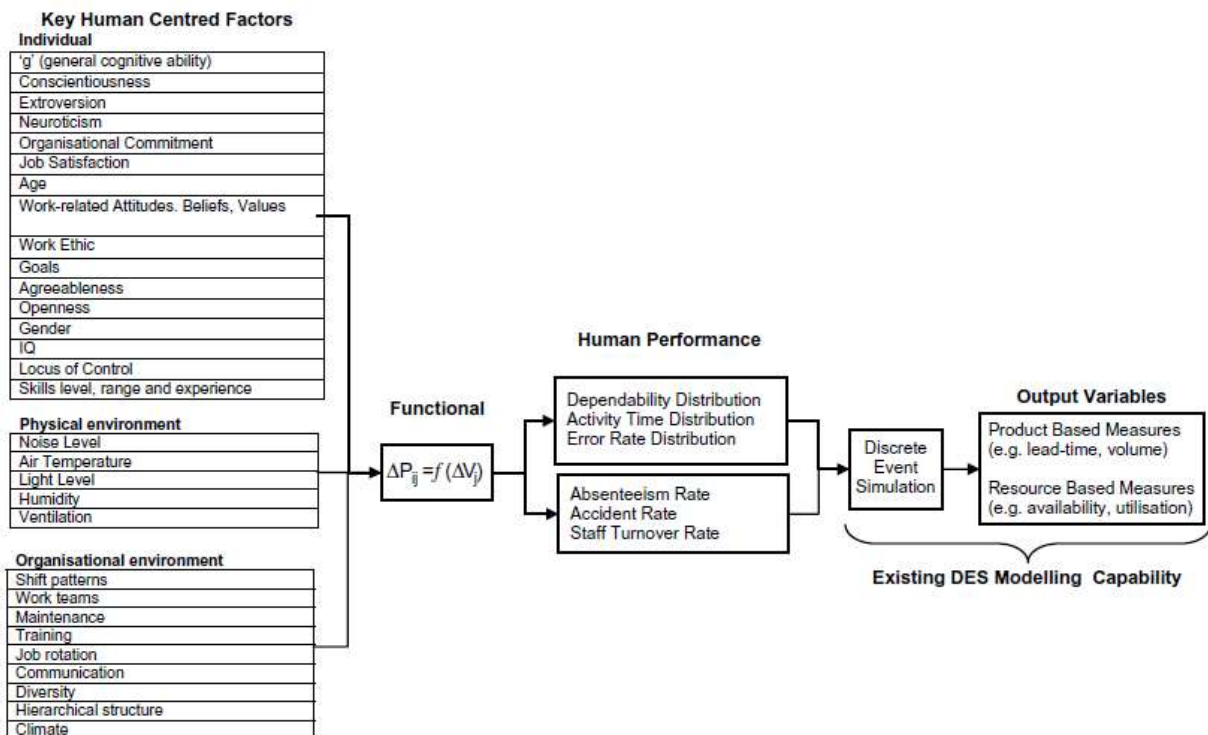


Figura 2-7: Fatores para modelagem da performance de operadores em linhas de produção
 Fonte: Baines et al. (2005)

O resultado desta estrutura teórica são relações funcionais que descrevem o efeito dos fatores chave na performance dos operadores. Este quadro foi testado em uma linha de montagem de motores por Baines e Benedettini (2007). Segundo os autores, “o quadro inclui uma representação qualitativa dessas relações na forma de uma função de transformação genérica ligando fatores de entrada e medidas de desempenho (BAINES; BENEDETTINI, 2007 p. 124)”.

Os resultados mostraram as dificuldades de operacionalizar este modelo, tanto pelo grande esforço na coleta de dados, como no tratamento estatístico para se obter os principais fatores que afetam a performance do operador. Além disso, os autores concluem que a variabilidade do desempenho humano que é relevante para o comportamento dos operadores não é efetivamente descrita pelos fatores da estrutura.

Manson et al. (2005) desenvolveram um modelo chamando de HPV (Human Performance Variation – modelo de Variação da Performance Humana) avaliando os resultados da simulação com diferentes distribuições de probabilidade e modelagem de falhas (paradas não programadas – *breakdowns*).

Para os autores a performance de um operador pode ser medida de diversas formas: tempo para completar uma tarefa, quantos ciclos de tarefa são completados e também podem incluir medida de qualidade da tarefa. Para trabalhadores diretos é interessante medir a performance pela duração de tempo para realização de uma tarefa discreta. Os autores utilizam a seguinte definição no artigo: “A variação no tempo necessário para concluir uma tarefa por um trabalhador direto sob condições normais de trabalho.” A expressão condições normais de trabalho implica que o sistema de produção esteja funcionando sem perturbações, problemas de qualidade e comportamentos incomuns do operador.

A pesquisa foi realizada em uma linha de montagem de automóveis. Foram coletados tempos de atividades de dez tarefas manuais por um período de 12 semanas, totalizando 200.000 atividade. Cada operação na linha de montagem foi realizada por um grupo de operadores que revezava, em diferentes posições da linha, permanecendo uma hora em cada posto.

Os histogramas construídos com os tempos coletados apresentaram distribuição com comportamento bimodal. Os autores argumentam que os picos ocorreram devido as diferentes formas de realização das tarefas pelos operadores, ou ainda pelo fato do operador de um posto não conseguir passar o material processado para o próximo posto devido ao bloqueio causado pelo estoque em processo (*buffer*) cheio do posto seguinte.

Os autores realizaram testes de aderência a distribuições estáticas utilizando o Método dos Mínimos Quadrados (MMQ). O coeficiente de correlação obtido para cada distribuição evidencia que os dados possuem maior aderência com a distribuição Pearson IV, diferentemente das distribuições encontradas na literatura para representar a variabilidade nos sistemas produtivos (Normal, Exponencial, Gamma, Weibull e Erlang). Desta forma, o modelo HPV foi construído utilizando a distribuição de Pearson IV.

Para testar o modelo HPV proposto, os autores construíram cinco modelos de simulação, variando-se os parâmetros da modelagem dos tempos de processo e falhas durante a execução do modelo (Quadro 2-3).

Modelo	Descrição
Modelo 0	<ul style="list-style-type: none"> • Tempo de ciclo determinístico • Ausência de falhas
Modelo 1	<ul style="list-style-type: none"> • Tempo de ciclo determinístico • Modelagem estocástica de falhas
Modelo 2	<ul style="list-style-type: none"> • Tempo de ciclo modelado por distribuição Normal • Modelagem estocástica de falhas
Modelo 3	<ul style="list-style-type: none"> • Tempo de ciclo modelado por distribuição Pearson IV • Modelagem estocástica de falhas
Modelo 4	<ul style="list-style-type: none"> • Tempo de ciclo modelado por uma superfície de densidade de probabilidade da distribuição Pearson IV • Modelagem estocástica de falhas

Quadro 2-3: Cenários de teste do modelo HPV (MANSON et al., 2005)

Os resultados dos modelos mostram que, embora fosse esperado que a utilização do HPV aumentasse a variabilidade dos resultados, ocorreu justamente o contrário nos cenários 3 e 4. A modelagem estocástica de falhas na linha causou maior impacto nos resultados do que a inserção de variabilidade baseada na distribuição Pearson IV e a técnica de superfície de densidade de probabilidade da Pearson IV. Os autores argumentam que esse resultado é explicado pela complexidade da linha de produção que possui cerca de 200 operações manuais e automatizadas separadas. Desta forma, “o desempenho do sistema é dominado pela dinâmica do próprio sistema” (MANSON et al., 2005, p. 52).

Para Wang, Sowden e Mileham (2013), a aplicação do quadro teórico proposto por Baines et al. (2005) é praticamente impossível de ser realizada no ambiente fabril devido aos esforços operacionais. Os autores desenvolveram uma metodologia para modelagem da performance dos operadores levando-se em consideração idade, destreza e experiência do operador para gerar curvas de aprendizagem em função dos tempos de ciclo dos postos de

trabalho da linha. Segundo os autores, esta modelagem é justificada pelo objetivo do projeto em realizar mudanças na organização dos postos da linha e o critério de aprendizado foi definido como prioritário. A reorganização consistia em tornar os operadores flexíveis para se movimentar entre todos os postos de trabalho da linha, ao invés de ficarem fixos, como na linha de produção tradicional. Segundo os autores, esta reorganização era necessária para cadenciar os tempos de ciclo dos postos da linha, reduzindo os custos com materiais em processo (estoques intermediários) existentes entre os postos da linha.

Além disso, argumentam que a maioria dos atributos físicos e psicológicos propostos na estrutura teórica podem ser identificados em entrevistas de emprego ou melhorados por treinamento profissional. Os autores concluem que esta metodologia para modelagem da performance de operadores pode ser utilizada para atribuir as tarefas de montagem mais adequadas de acordo com seus respectivos desempenhos operacionais de cada operador.

Boenzi et al. (2014) corroboram com o efeito da faixa etária da força de trabalho sobre o desempenho ou produtividade do sistema de produção. Os autores apresentam uma survey com diversos estudos deste efeito na performance dos operadores. Porém, argumentam que outros fatores como mudanças tecnológicas, contexto social, mercado de trabalho e a cooperação entre os trabalhadores também afetam a produtividade do operador.

2.3.7 Considerações sobre a Simulação de Eventos Discretos

Conforme apresentado na Seção 0, a SED é uma abordagem adequada para representação global de sistemas de produção, utilizando entidades passivas em um fluxo determinado de eventos que representa as etapas do processo produtivo.

O principal problema identificado na SED é a dificuldade na modelagem da performance humana ao longo do processo de produção. Parte deste problema é resolvido quando são utilizadas distribuições de probabilidade como tempo de processamento e chegada de materiais, que insere ao modelo a variabilidade natural existente nos processos produtivos. Esta variabilidade é inserida implicitamente nas curvas de probabilidade geradas a partir da coleta de dados. Porém, existe uma parte da performance que não é explicada pelo uso das distribuições de probabilidade, que podem afetar os resultados da simulação.

O modelo HPV (MANSON et al., 2005) buscou utilizar distribuições de probabilidade diferente das tradicionais utilizadas para uma melhor representação da performance humana. No entanto, os resultados mostraram que situações externas ao processo

produtivo, como as falhas, podem causar maior impacto no desempenho do sistema, conforme a complexidade do sistema modelado.

Os modelos apresentados para modelagem do comportamento humano em SED (tópico 2.3.6) buscaram melhorar a representação da performance humana inserindo parâmetros diferentes das distribuições estatística (curvas de aprendizagem, idade e ritmo circadiano). Os resultados mostraram os esforços para operacionalização, devido a necessidade de dados individuais dos operadores.

Além disso, a modelagem SED possui dificuldades para inserir decisões tomadas no chão de fábrica por líderes de setores ou supervisores, que surgem no momento da simulação, e que podem impactar na mudança de estratégias de produção (troca de produto, aceleração de ritmo, alteração da capacidade produtiva, entre outros). Estas situações dinâmicas de interação entre entidades aumentam o nível de complexidade do modelo, mas podem ser requeridas para melhorar a representação do sistema real. Estas regras de interações são possíveis de serem representadas por um modelo SED, porém exigem modelagem penosa com estruturas de controle pesadas e checagens recorrentes.

O Simulação Baseada em Agentes (SBA) é apresentada pelos pesquisadores da área de Pesquisa Operacional (PO) como uma abordagem emergente de modelagem orientada para a individualização das entidades, representadas como Agentes (BALDWIN; SAUSER; CLOUTIER, 2015; HOAD; WATTS, 2012; MACAL; NORTH, 2010; SIEBERS et al., 2010). Nesta abordagem de simulação, os agentes são autônomos, com capacidade de tomar decisões devido as informações percebidas no ambiente. Estes autores defendem a utilização de modelos híbridos, integrando a abordagem de eventos discreta com a abordagem baseada em agentes. Desta forma, a simulação baseada em agentes surge como uma nova abordagem de simulação que possui potencial para resolver estas limitações da SED.

2.4 RBS: Simulação baseada em agentes

A abordagem de simulação com agentes ainda não está devidamente fundamentada na área de Gestão de Operações. Segundo Macal (2016) há um crescimento nas publicações neste tema, porém também constata que SBA não é aceita ou entendida pela comunidade científica, quando comparado com outros tipos de simulação. Na visão do autor, não há clareza em relação i) as características essenciais de modelo SBA; ii) aos métodos e técnicas para construção dos modelos e iii) o relacionamento da SBA com outros tipos e técnicas de simulação.

Macal (2016) argumenta que parte desta confusão é causada pela diversidade de áreas de pesquisa que utilizam SBA. Além desta diversidade de comunidades, não há consenso sobre o que é Simulação Baseada em Agentes. Parte da comunidade posiciona a SBA como técnica de modelagem distinta das já existentes (Simulação de Eventos Discretos, Monte Carlo, Dinâmica de Sistemas e Simulação Contínua), necessitando de desenvolvimento curricular e ferramentas próprias dedicadas para SBA. Porém, outra parte da comunidade científica argumenta que a SBA é um subconjunto da SED ou uma outra abordagem para atingir os mesmos resultados que poderiam ser obtidos com Sistemas Dinâmicos.

Perante o exposto, neste tópico é apresentada uma Revisão Bibliográfica Sistemática (RBS) sobre os conceitos, métodos e práticas de simulação com agentes voltados para área de Gestão de Operações. O roteiro de RBS utilizado nesta pesquisa segue a proposta de Conforto, Amaral e Silva (2011). As etapas deste roteiro e o conteúdo de cada etapa são apresentados nos subtópicos a seguir.

- **Problema de pesquisa e objetivos**

Estabelecendo a modelagem e simulação baseada em agentes como novo paradigma de modelagem e simulação para resolver problemas complexos é necessário evidenciar:

- a) Quais as características dos fenômenos que a SBA visa resolver?
- b) Qual o tipo de modelo?
- c) Quais entidades foram modeladas como agentes?
- d) Quais os comportamentos destes agentes?
- e) Qual arquitetura utilizada?
- f) Quais ferramentas/métodos de modelagem utilizados?
- g) Quais softwares e/ou linguagens de programação?

A proposta é utilizar a simulação de agentes para simulação de sistemas de manufatura, com foco na logística interna de movimentação de materiais. Desta forma, o objetivo desta RBS foi identificar as características metodológicas de modelagem e simulação baseada em agentes com contexto da manufatura e logística.

- **Fontes primárias**

As fontes primárias são os artigos publicados em periódicos e congressos nacionais e internacionais, considerados relevantes para assunto pesquisado. Para esta pesquisa,

foram definidas as bases de dados *ScienceDirect* e *Scopus*. Estas bases foram escolhidas por reunirem os principais periódicos na área de manufatura, como *International of Production Research* e também na área de simulação, como *Journal of Simulation*, *Simulation Modelling Practice and Theory*, entre outros.

- **Strings de busca**

Uma *string* de busca é uma combinação de termos relevantes para pesquisa (palavras-chave) que serão utilizadas para realizar a busca pelos artigos nas bases de dados. A construção de uma *string* envolve combinar as palavras-chave, utilizando operadores lógicos (AND, OR, NOT, entre outros).

Nesta pesquisa busca-se identificar quais as metodologias utilizadas para modelagem e simulação de agentes utilizadas no contexto da manufatura e logísticas e suas principais características. Desta forma, a *string* foi construída com três elementos principais. O primeiro conjunto de palavras-chave que busque artigos relacionados com simulação de agentes. O segundo relacionado com metodologia, e o terceiro no contexto da manufatura e/ou logística. Os campos dos artigos estabelecidos para realizar a pesquisa foram: “título”, “resumo” e as “palavras-chave”. Foi definida a seguinte *string* de busca para cada base de dados:

- ((Simulation) AND ("Agent simulation model" OR "Agent based model*" OR "Intelligent simulation" OR "Agent based framework" OR "Agent methodol*" OR "agent architecture") AND ("Manufacturing" OR "shop-floor" OR "flow line" OR "scheduling" OR "Operational Research" OR "Management Science" OR "Operational Management" OR "Supply Chain" OR Logistic OR "layout" OR "facilities design"))

- **CrITÉrios de inclusão**

Os critÉrios de inclusão são filtros que definem se o artigo encontrado, após a aplicao da *string* de busca, será considerado para escrita da RBS. Estes critÉrios foram definidos em filtros das caracterÍsticas da publicao e filtro de conteúdo do artigo. Foram definidos os seguintes critÉrios para inclusão:

- i) CritÉrio de inclusão 1: artigos publicados em periódicos de lÍngua inglesa;
- ii) CritÉrio de inclusão 2: artigos publicados a partir de 2006;

- iii) Critério de inclusão 3: apresentar métodos, técnicas e ferramentas para modelagem e simulação baseado em agentes aplicados no contexto da manufatura, logística ou cadeia de suprimentos;
- iv) Critério de inclusão 4: apresentar discussão sobre pressupostos conceituais para SBA.

- **Critérios de exclusão**

Foi definido um único critério de exclusão, sendo desconsiderados os artigos que não apresentaram detalhamento de um modelo ou discussão conceitual na temática de agentes, pois alguns artigos citam apenas brevemente esta temática.

- **Critérios de qualificação**

Os critérios de qualificação auxiliam a identificar a importância do artigo para a pesquisa (CONFORTO, AMARAL e SILVA, 2011). Desta forma, é importante classificar os artigos sobre diversas perspectivas de análise. Desta forma, cada artigo foi classificado como:

- a) Contexto da aplicação
 - Manufatura
 - Logística
 - Cadeia de suprimentos
- b) Escopo da aplicação
 - Estudo de caso real
 - Experimentos/testes em laboratório
- c) Perspectiva metodológica do artigo
 - Artigo conceitual-teórico: que discute características, métodos e ferramentas relacionadas com modelagem de agentes
 - Cita uma metodologia de modelagem de agentes e uma aplicação
 - Aplicação: artigos que apresentam desenvolvimento de modelos com agentes
- d) Tipo do modelo de agentes:
 - Agente único;
 - Multiagente;
 - Híbrido: Agentes – Heurísticas.
 - Híbrido: Agentes – SED.
- e) Técnicas de modelagem
- f) *Softwares/linguagens de programação utilizadas*

- **Métodos e ferramentas**

Para condução desta RBS foi utilizado o *software* StArt, desenvolvido pelo LaPES (Laboratório de Pesquisa em Engenharia de *Software*) do Departamento de Computação (DC) da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar). As etapas de condução do método são descritas a seguir.

Primeiramente foi elaborado o protocolo de pesquisa, contendo o objetivo da revisão, as bases de dados selecionadas, as palavras-chave, os critérios de inclusão/exclusão e os critérios de qualificação. Na sequência foi realizada a pesquisa nas bases selecionadas. A pesquisa inicial retornou um total de 772 artigos. Os critérios de inclusão 1 e 2 foram aplicados diretamente nas bases, filtrando 330 artigos.

Os metadados dos artigos classificados foram importados para o software StArt. Dos 330 artigos foram identificados 50 artigos duplicados nas duas bases de dados. Após a aplicação dos critérios de inclusão 3, 4 e do critério de exclusão, foram extraídas 42 referências para análise. Os metadados destes artigos foram exportados para planilha eletrônica para *download* e leitura na íntegra. Neste processo não foi possível acesso a 4 destes artigos. Desta forma, o total de artigos disponível foi 38, sendo que 10 são teóricos conceituais, conforme o critério 4 de inclusão. Um resumo da quantidade de artigos durante o processo de pesquisa é apresentado na Figura 2-8.

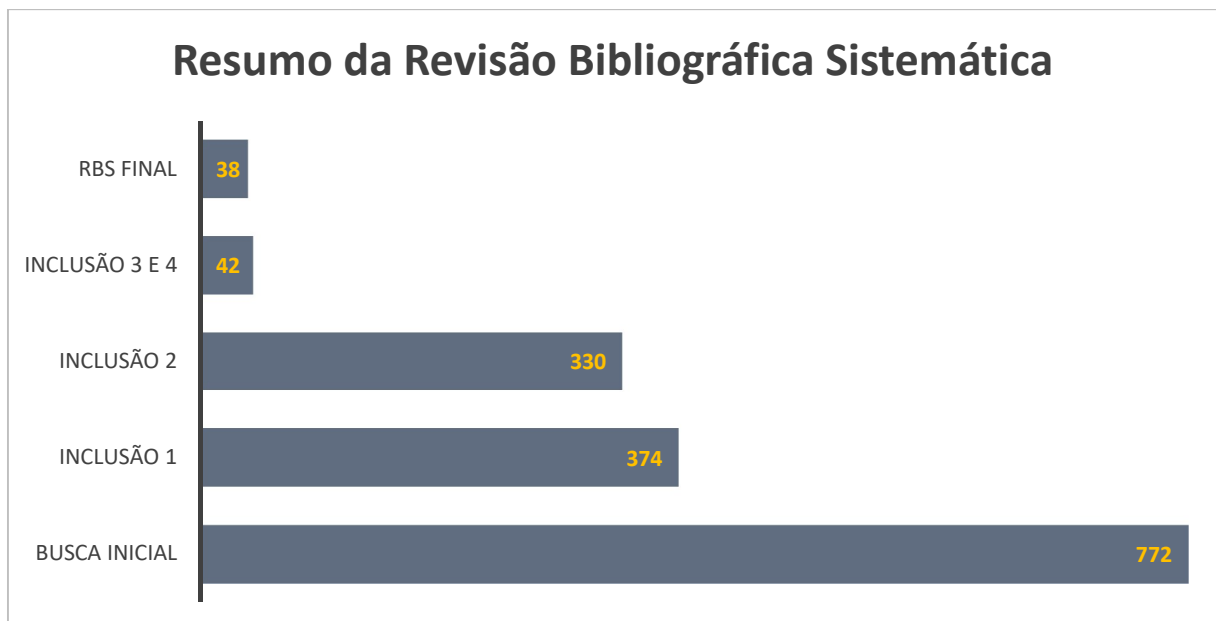


Figura 2-8: Resumo da RBS sobre simulação baseada em agentes

Com a leitura dos 38 artigos foram aplicados os critérios de qualificação e elaborado os resultados da RBS.

2.4.1 Conceito de agente

Para Macal (2016) há uma certa dificuldade em distinguir os Sistemas Multi-Agentes (do inglês Multi-Agent System – MAS) da modelagem e Simulação Baseada em Agentes (Agent-Based Modelling and Simulation – ABMS). O MAS é mais antigo que ABMS e está alinhado com a robótica e a Inteligência Artificial (IA) distribuída, visando identificar as regras de comportamento individual que os agentes devem operar para alcançar um objetivo comum, voltado para a otimização. Esta abordagem é típica do design de engenharia voltada para projeto de sistemas normativos, onde o objetivo é desenvolver a melhor solução possível para um sistema, analisando todas as possibilidades.

Já os modelos ABMS possuem características descritivas, isto é, visam descrever da melhor forma possível como os agentes se comportam e interagem em um sistema. Para o autor, ambas as abordagens de simulação compartilham do mesmo problema técnico de entender a ligação entre o nível micro (comportamentos locais e adaptativos) com o nível macro (comportamentos no nível do sistema).

Desta forma, a simulação de agentes pode ser caracterizada por duas categorias: os estudos classificados como Simulação Baseada em Agentes (ABMS) e os estudos classificados como Multi-Agentes (MAS). Estas duas categorias podem ser utilizadas na mesma área e contexto de aplicação, porém com objetivos diferentes: MAS voltada para otimização do sistema e a ABMS para descrição do sistema.

Os resultados da RBS mostram essa dicotomia na abordagem conceitual dos agentes nos diferentes contextos de aplicação de modelos de simulação de agentes. Renna (2010) modelou um Sistema Flexível de Manufatura (FMS) composto por três linhas de produção e três tipos de peças. Neste modelo as máquinas possuem a inteligência de alterar o nível de produção de cada peça ou trocar o tipo de peça, devido a ocorrência de problemas na linha, como quebra de máquinas e tempo de *setup*. Neste estudo, as entidades agentes trocam informações e tomam decisões visando maximizar a produção.

Por outro lado, Cicirelli, Furfaro e Nigro (2011) também realizaram a modelagem de um FMS composto por duas máquinas e um robô, modelados como agentes que podiam assumir diferentes comportamentos durante a simulação. Neste modelo, as entidades agentes tomavam decisões conforme suas informações locais. Com este estudo, os autores conseguiram obter o impacto das diferentes combinações dos agentes na utilização dos recursos.

Na primeira pesquisa, busca-se a melhor combinação de recursos e decisões dos agentes para o sistema global, enquanto que na segunda possui abordagem descritiva em relação ao comportamento dos agentes e seu impacto no sistema global.

No contexto da Engenharia de Produção e nas áreas de manufatura, logística e cadeia de suprimentos são utilizadas 3 abordagens principais de modelos de simulação computacional: Simulação de Eventos Discretos (SED), Sistemas Dinâmicos (SD) e Simulação Baseada em Agentes (SBA). Estas três abordagens possuem diferentes aspectos conceituais e formas para representação de um sistema real. Para Chwif e Medina (2014) estas três abordagens de simulação possuem diferenças significativas a ponto de classificá-las como pertencentes a diferentes paradigmas.

Um modelo é considerado híbrido quando representa um sistema utilizando dois paradigmas de simulação de forma integrada. Domingos, Politano e Pereira (2015) apresentam uma proposta de modelo híbrido SED-SD para modelar um sistema de produção integrado com as estratégias de Planejamento de Vendas e Operações (*Sales and Operations Planning – SOP*). Neste modelo a abordagem SED foi utilizada para representar as operações no chão de fábrica, enquanto que a abordagem SD foi utilizada para representar as decisões ao nível do planejamento tático.

A integração da SBA com outros paradigmas de simulação ainda é um desafio, segundo Macal (2016). Para o autor, existem dois aspectos para serem resolvidos: o primeiro é como ligar os modelos de forma a obter sentido lógico em relação ao sistema representando; e o segundo, como vincular dois modelos, que utilizam ferramentas de modelagem diferentes.

No Quadro 2-4 é apresentado um resumo de todos os artigos qualificados para ambas perspectivas da simulação com agentes no contexto da manufatura, logística e cadeia de suprimentos.

Conceito de Agente	Classificação do modelo	Contexto de aplicação do modelo	Técnica de modelagem	Software/Linguagem de programação	Autores
ABMS	Híbrido: DES-Multi Agente	Logística	Fluxograma	Java	Yu et al (2012)
			Fluxograma e UML	Repast	North e Macal (2009)
			UML	AnyLogic	Rouzafzoon e Helo (2016)
		Manufatura	Fluxograma e UML	AnyLogic	Sun et al (2016)
			UML	Java	Savino, Mazza e Neubert (2013)
			UML		Cicirelli, Furfaro e Nigro (2011)
	Serviços	UML		Komma, Jain e Metha (2007)	
		UML	AnyLogic	Siebers e Aickelin (2011)	
	Multi Agente	Logística	Fluxograma	Java	Ponte et al (2016)
			UML	Não especificado	Nilsson e Darley (2006)
UML			AnyLogic	Lättilä (2011)	
Manufatura		UML	Repast	Garro e Russo (2010)	
		Fluxograma	Veja Logistics	Grobarcikova e Sosedova (2016)	
		UML	Não especificado	Anand et al (2016)	
Diagrama de atividades	UML	Repast	Negahban e Nall (2014)		
	Diagrama de atividades	Java	Ruiz et al (2014)		
MAS	Híbrido: DES-Multi Agente	Manufatura	UML		Renna (2010)
			Descrição textual	ARENA	Renna (2011)
			Fluxograma		Renna (2010)
			UML		Renna (2012)
	Híbrido: Multi Agente-Heurística	Manufatura	Esquema do processo (sem padrão)	Gams	Chu et al (2014)
			UML	ORIN 2.0	Nejad, Sugimura e Iwamura (2010)
			Descrição textual	Repast	Jules e Saadat (2016)
	Multi Agente	Logística	Fluxograma	Gams	Chu, You e Wassick (2013)
			Fluxograma	Não especificado	Fabricio, Chaile-Alfaro e Ribas-Xirgo (2016)
Multi Agente	Manufatura	Fluxograma	Java	Renna (2015)	
		Mapa de atividades	Netlogo	Rolón e Martínez (2012)	

Quadro 2-4: Características dos modelos ABMS e MAS

É importante destacar que nos resultados da RBS foram qualificados dois artigos aplicados no setor de serviços (SIEBERS; AICKELIN, 2011) e SIEBERS et al. (2011). Estes artigos foram considerados por apresentarem um conjunto de regras de comportamento dos agentes, baseado em informações empíricas e detalhamento da modelagem destas regras.

A partir da diferenciação da ABMS e MAS, é estabelecido o interesse desta pesquisa em discutir os aspectos que fundamentam a **Simulação Baseada em Agentes (ABMS)** e seus aspectos práticos de modelagem (métodos, ferramentas e *softwares*)

2.4.2 Características de modelos baseados em agentes

Para Macal e North (2010) a SBA é considerada uma nova abordagem de modelagem de sistemas complexos, onde entidades são modeladas como agentes. Para os autores, a principal característica que define um agente é sua capacidade de agir de forma autônoma, sem a intervenção externa. Os agentes são ativos e iniciam suas ações através de comportamentos programados para atingir seus objetivos internos. Esses comportamentos podem ser do tipo reativo, programados com regras do tipo “if then” ou regras complexas programadas com técnicas de Inteligência Artificial (IA). Para os autores, as características fundamentais para modelagem baseada em agentes são:

- Um agente é auto-suficiente e individual;
- Um agente é autônomo e seus comportamentos são derivados de informações percebidas no ambiente;
- Um agente possui um estado que é dinâmico no tempo. Este estado (também chamado de estado interno) é composto de um conjunto ou sub-conjunto de seus atributos. Os autores afirmam que quanto mais rico for o conjunto de estados que um agente tem, mais rico são os comportamentos que o agente pode expressar durante a simulação;
- Um agente possui interação social com outros agentes, que pode influenciar seu comportamento. Esta interação ocorre por protocolos de comunicação, movimento, disputa por espaço e capacidade de responder ao ambiente.
- Um agente pode possuir características adaptativas. Ele pode aprender e acumular comportamentos baseados em experiência individual ou na população de agentes;

- Um agente pode ser orientado para atingir objetivos em relação aos seus comportamentos. Estes objetivos não são necessariamente orientados para otimização;
- Os agentes podem ser heterogêneos. As características e comportamentos devem variar em relação a extensão, sofisticação, nível de informação considerada para tomada de decisão, visão de mundo, relação com outros agentes, memória interna, recursos e níveis de recursos utilizados.

Nesta Tese será utilizada a definição defendida por Siebers et. al (2010) para Simulação Baseada em Agentes:

“SBA é o processo de concepção de modelo baseado em agentes que represente um sistema real, e realização de experimentos com este modelo, buscando compreender o comportamento do sistema e/ou avaliar várias estratégias de operação do sistema” (SIEBERS, 2010 et. al p. 206).

Um modelo SBA típico possui três elementos (MACAL; NORTH, 2010):

- um conjunto de agentes, com seus atributos e comportamentos;
- um conjunto de relacionamentos e métodos de interação com outros agentes;
- um ambiente onde os agentes podem interagir com outros agentes e com o próprio ambiente.

Na figura abaixo Figura 2-9 é apresentado uma ilustração de um modelo SBA genérico.

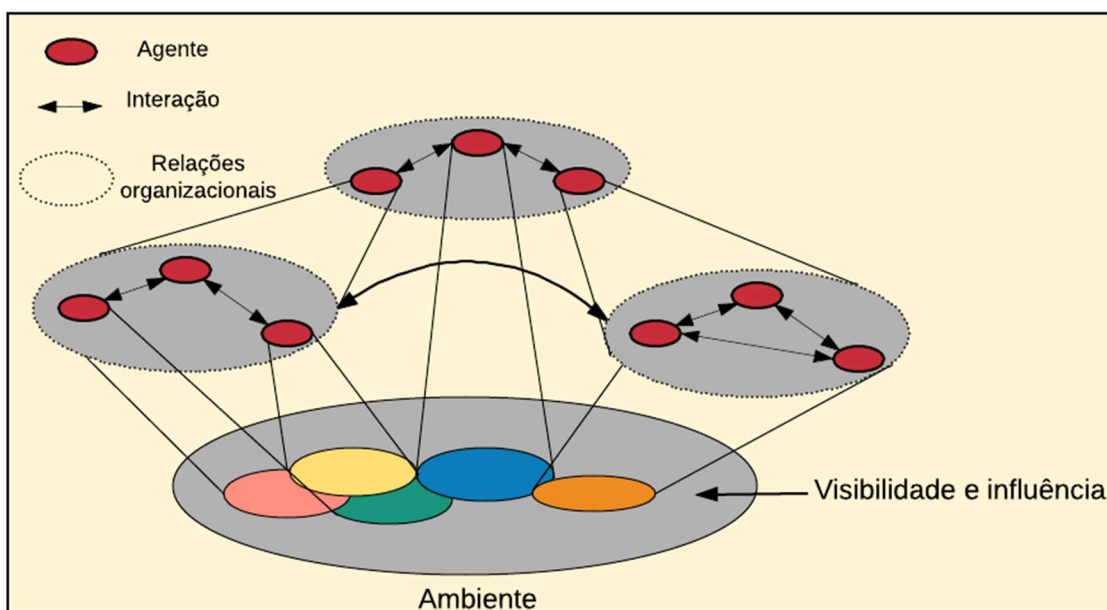


Figura 2-9: Modelo genérico de SBA

Fonte: Jennings e Bussmann (2003) – tradução nossa.

Na literatura os modelos SBA que apresentam a interação entre diversos agentes são denominados como modelos multiagentes. A arquitetura utilizada para modelagem dos agentes estabelece como serão seus comportamentos e interações no ambiente do modelo.

Para Brailsford (2014), tanto os modelos SED, como os modelos SBA compartilham da mesma lógica de funcionamento do modelo. Ambos possuem entidades com atributos ou características que determinam seu comportamento dentro do sistema. Porém, Siebers et al. (2010) argumentam que as entidades em um modelo SBA são ativas, com possibilidade de tomar decisões individualmente. Para os autores, a SBA inverte a lógica de construção dos modelos de simulação: de uma lógica “*top down*”, voltada para ao nível do sistema, para uma lógica “*bottom up*”, baseada nas interações locais das entidades. No Quadro 2-5 são apresentas as principais características dos modelos SED em comparação com as características da abordagem SBA.

Abordagem de Eventos Discretos	Abordagem baseada em Agentes
Macro especificações revelam microestruturas (modelagem <i>top-down</i>)	Micro especificações geram macroestruturas (modelagem <i>bottom-up</i>)
Orientado pelo processo produtivo	Baseado na individualidade dos agentes
É modelado macro comportamento do fluxo de entidades pelo sistema	Não existe conceito de fluxo das entidades. Ele surge das micro decisões individuais de cada agente.
Foco na modelagem do sistema e não das entidades	Foco na modelagem das entidades e das interações entre elas
Controle centralizado	Controle descentralizado
Entidades passivas, onde ações ocorrem, somente quando existe um evento atribuído	Entidades ativas, onde podem tomar iniciativa de ações.
Inteligência das entidades é previamente conhecida e modelada como parte do sistema	Inteligência é representada individualmente em cada entidade.
Filas são o principal elemento	Não existe conceito de filas
Os eventos impactam em todas as entidades	Os agentes interagem em distintas partes da simulação
Estado interno das entidades é desconhecido	Emergem eventos
Dados de entrada são coletados/medidos de forma objetiva	Dados de entrada são baseados em teorias ou em dados subjetivos.
Fácil para testar	Dificuldade para validar
Busca-se a validação do modelo através da precisão dos resultados	Busca-se plausibilidade do modelo através do provável comportamento dos agentes
Implementação dos resultados ao sistema real	Melhora a compreensão e aprendizado do sistema real

Quadro 2-5: Principais diferenças entre os modelos SED e SBA
Fonte Siebers et. al (2010_ - tradução nossa.

Macal (2016) propõe uma classificação para os modelos de simulação baseados em agentes, conforme 4 propriedades dos agentes, conforme ilustrado na Figura 2-10.

		Propriedades dos agentes			
		Individualidade	Comportamento	Interação	Adaptabilidade
Tipos de modelos de simulação baseados em agentes (Nível de complexidade)	SBA adaptativo (4)	Agentes heterogêneos	Autônomo, com comportamento dinâmico conforme estado do agente durante a simulação.	Com outros agentes e com o ambiente	Mudança de comportamento durante a simulação
	SBA interativo (3)	Agentes heterogêneos	Autônomo, com comportamento dinâmico conforme estado do agente durante a simulação.	Com outros agentes e com o ambiente	Ausente
	SBA autônomo (2)	Agentes heterogêneos	Autônomo, com comportamento dinâmico conforme estado do agente durante a simulação.	Limitada	Ausente
	SBA Individual (1)	Agentes heterogêneos	Prescrito, descrito conforme características exógenas a simulação.	Limitada	Ausente

Figura 2-10: Tipos de modelos SBA e propriedades dos agentes
Fonte: Adaptado de Macal (2016)

A primeira propriedade é a *individualidade dos agentes*. Esta propriedade estabelece que os agentes possuem um conjunto de características heterogêneas, que possibilita diferenciá-los em uma população.

A segunda propriedade é sobre *os comportamentos* que os agentes possuem no modelo. Estes comportamentos podem ser prescritos, baseados exclusivamente por condições que são exógenas aos eventos durante a simulação, ou autônomo e dinâmico, quando as ações são baseadas pelo estado interno do agente, durante a simulação. Agentes autônomos são capazes de detectar qualquer condição que ocorra dentro do modelo a qualquer momento e de agir sobre o comportamento apropriado em resposta.

A terceira propriedade é sobre a capacidade de *interação* dos agentes durante a simulação. As interações estão relacionadas com a capacidade dos agentes se comunicarem e cooperarem durante a simulação. Essa propriedade pode ser: i) limitada,

ou seja, não ocorrem nenhum tipo de interação entre os agentes ou ii) quando o comportamento dos agentes depende do estado e comportamento de outros agentes e/ou do estado do ambiente.

A última propriedade dos agentes é sua possibilidade de adaptabilidade. Essa propriedade diz a respeito à capacidade dos agentes mudarem seus comportamentos durante a simulação, à medida que aprendem, encontram situações novas ou quando as populações ajustam sua composição para incluir proporções maiores de agentes que se adaptaram com sucesso.

Os resultados da RBS mostram que maioria dos artigos classificados com modelos de simulação baseados em agentes possuem agentes interativos (10 dos 17 artigos), 6 artigos apresentam agentes autônomos e somente 1 agente individual. Não foi encontrado nenhum artigo que apresente agentes com capacidade de adaptação.

2.4.3 Características do modelo computacional baseado em agentes

Em termos computacionais, existem diferenças no avanço do tempo de simulação nas diferentes abordagens. Como descrito anteriormente, a SED é orientada por eventos (*event driven*), isto é, o tempo de simulação avança discretamente conforme a ocorrência de eventos. Outra forma de orientação da simulação computacional é a simulação contínua no tempo (*time driven*). Nesta orientação, o relógio é incrementando em uma unidade de tempo.

A abordagem *System Dynamics* (SD) é utilizada para representar sistemas complexos onde a realimentação ou *feedback* no sistema são elementos para seu funcionamento (CHWIF; MEDINA, 2014). Segundo Tergolina (2015), um modelo SD pode ser representado pelos dois tipos de orientação do relógio de simulação. Os modelos orientados pelo tempo são elaborados utilizando-se equações diferenciais, variando-se o tempo. Exemplos de aplicação deste modelo são sistemas para representar fenômenos térmicos e químicos. Já em modelos SD orientados por eventos, o sistema é representado por Álgebra de Boole, Álgebra Dióide, Autômatos finitos, redes de Petri e programas computacionais, que são discretos no tempo (orientados por eventos). Neste tipo de SD são modelados sistemas de lógica Booleana (“1-0”, “on-off”, “sim-não”).

Um exemplo de modelo SD aplicado em logística é apresentado por Lättilä (2011). Neste modelo, o autor desenvolve um modelo para simular aumento de capacidade de movimentação de carga em um porto, com base no nível de utilização dos

recursos. A simulação é baseada em uma equação que monitora continuamente o nível de utilização dos recursos do porto. Quando esta utilização atinge determinado nível é realizado um investimento para aumentar a capacidade do porto.

Os modelos SBA também podem ser construídos orientados pelo tempo ou orientados por eventos. A análise dos artigos classificados na RBS mostra os dois tipos de avanço no relógio de simulação. Para Nilsson e Darley (2006), um modelo SBA compartilha das características da SED, como comportamento probabilístico-estocástico. Porém, o autor cita três diferenças entre a SED e a SBA. A primeira diferença é sobre as regras que estabelecem o comportamento das entidades. Nos modelos SED, as entidades seguem políticas globais e externas, enquanto que na SBA, os agentes são baseados em regras internas. A segunda diferença é que o foco da modelagem é no agente e sua adaptação dentro do sistema. Por fim, o autor indica que a maioria dos modelos SBA são orientados pelo tempo.

2.4.4 Arquiteturas para modelagem de agentes

Para modelagem de agentes é necessário a definição de uma arquitetura. Segundo Maes (1991 p. 115), a arquitetura de agente pode ser definida como:

“Uma metodologia particular para construir agentes. Ela especifica como o agente pode ser decomposto na construção de um conjunto de módulos e como esses módulos devem interagir. O conjunto total de módulos e suas interações respondem como os dados de entrada e seu estado interno determinam as ações e o estado interno futuro dos agentes”.

Para Kaelbling (1991, p. 86) uma arquitetura é: “Uma coleção específica de software (ou hardware) e módulos, normalmente designado por caixas com setas indicando o fluxo de dados e controle entre os módulos”.

Müller (1999) classifica as arquiteturas dos agentes em quatro tipos: agentes reativos, agentes deliberativos, agentes de interação, agentes híbridos. Estas arquiteturas são oriundas dos estudos da Inteligência Artificial dos anos 90. Porém, as publicações atuais envolvendo agentes utilizam estas mesmas arquiteturas ou extensões.

Os agentes reativos escolhem definem uma ação (resposta) relacionada com a ocorrência de estímulos (eventos) que ele percebe no ambiente ou na interação com outros agentes. As decisões são baseadas em um conjunto de informações limitadas e com regras simples de ação. Estas arquiteturas também podem ser denominadas como baseadas em comportamento, situado ou reativo.

Os agentes cognitivos ou deliberativos possuem um processo explícito para escolha da ação a ser realizada. Nestas arquiteturas, os agentes possuem uma representação interna de seu mundo, e há um estado mental explícito que pode ser modificado por alguma forma de raciocínio simbólico. As arquiteturas cognitivas são baseadas na arquitetura *Belief-Desire-Intention* (BDI) ou em extensões dela. Esta arquitetura é composta por i) Crenças (*Belief*), que representa as informações que o agente possui do ambiente, ii) Desejo (*Desire*), que representa o estado de motivação do agente e iii) Deliberação (*Intention*) que representa a ação do agente no ambiente.

Segundo Wooldridge (1996) as informações que o agente possui do ambiente (*Belief*) podem ser incompletas ou incorretas. Já os desejos (*Desire*) são as tarefas ou objetivos que foram atribuídas ao agente. A arquitetura BDI parte do pressuposto que nem todos os desejos os agentes são capazes de cumprir. Desta forma, as intenções (*Intention*) representam os desejos que o agente se comprometeu a atingir mobilizando e executando ações e recursos. Por fim, a estrutura final da arquitetura BDI é uma biblioteca de planos, que contém um conjunto de planos específicos para cada curso de ação que um agente pode seguir para alcançar suas intenções. Segundo o autor, uma biblioteca de planos de um agente representa:

“conhecimento procedimental, ou know-how. Um plano contém duas partes: um corpo ou programa, que define um curso de ação; e um descritor, que afirma ambas as circunstâncias em que o plano podem ser usados (pré-condição), e quais as intenções que o plano pode ser usado para atingir os objetivos (pós-condição)” (WOOLDRIDGE, 1996 p. 2, tradução nossa).

O Interpretador é responsável por atualizar as crenças a partir de informações detectadas no ambiente, gerando novos desejos (tarefas). Dessa díade, o interpretador seleciona uma ação a ser executada com base nas intenções atuais e conhecimento procedural do agente. Na Figura 2-11 é ilustrada a estrutura lógica da arquitetura BDI.

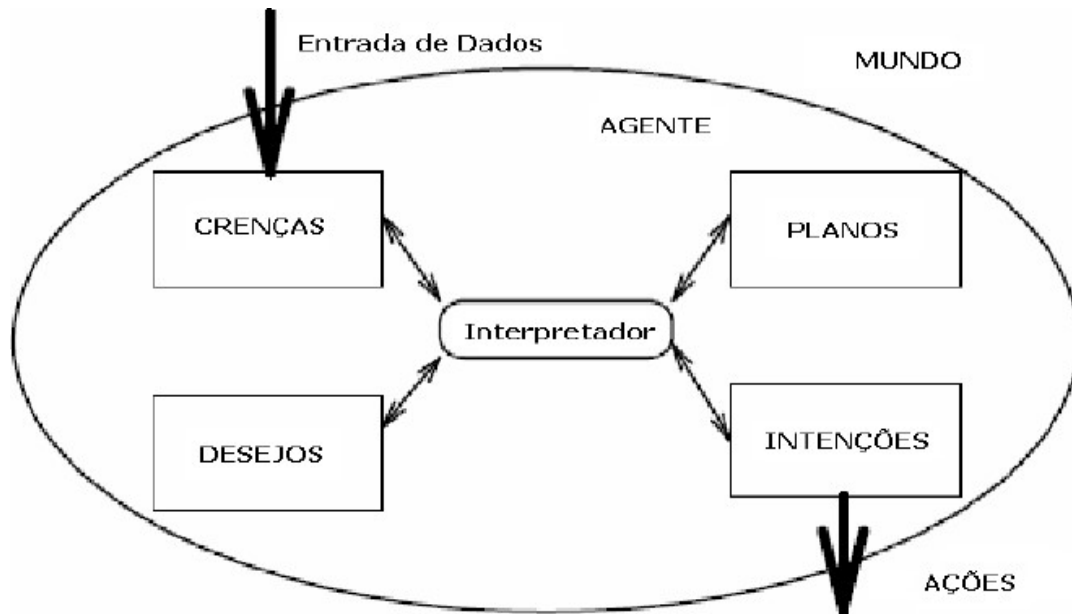


Figura 2-11: Estrutura lógica da arquitetura BDI
 Fonte: Wooldridge (1996)

Com base nos referenciais conceituais apresentados acima, as arquiteturas utilizadas nos artigos classificados na RBS foram qualificadas com os seguintes critérios:

- Quanto a orientação do estudo;
- Quanto a natureza do comportamento dos agentes;
- Quanto à existência de estado interno explícito dos agentes.

A orientação do estudo possui o objetivo de identificar os trabalhos que apresentaram aplicações de SBA com orientação para prática em um sistema real, existente ou em desenvolvimento (projeto), ou orientação para um sistema teórico-abstrato (ou de laboratório).

Já o critério da natureza do comportamento dos agentes visa identificar os pressupostos para criação das regras de comportamento dos agentes no sistema. Os resultados da RBS mostram que existem diversas lógicas para definição das regras de comportamento e interação dos agentes. Cada autor utilizou um conjunto de regras criadas específicas para aplicação no modelo. Analisando os artigos classificados na busca é possível classificar as regras em 3 categorias:

- i) Regras baseadas em modelos teóricos existentes na literatura:
 - Algoritmos de sequenciamento da produção;
 - Modelos de comportamento de consumidores;
 - Modelos probabilísticos teóricos.
- ii) Regras ad hoc:

- Regras lógicas de funcionamento do sistema;
 - Transcrição de fluxogramas e mapas de processo.
- iii) Regras baseadas em informações empíricas:
- Pesquisa de campo com coleta de comportamentos observados;

Os artigos também foram classificados conforme sua orientação para prática. Esta classificação indica se o modelo construído possui fundamento para um sistema real e existente, ou para um modelo teórico abstrato. Por fim, foram analisadas se as arquiteturas utilizadas possuem estado interno explícito dos agentes, ou seja, se permite identificar as regras individuais de cada agente e como são definidas as ações dele no ambiente (planos de atuação, estruturas condicionais, atualizações de estado, entre outros). Um resumo desta classificação é apresentado no Quadro 2-6.

Orientação para prática	Princípios metodológicos da arquitetura	Características das regras	Autores
Abstrato	Modelos teóricos	Comportamento de consumidores	Negahban e Nall (2014)
		Regras de fornecimento do <i>Beer Game</i>	North e Macal (2009)
		Equações matemáticas para definição de tamanhos de lote de reposição	Ponte et al (2016)
	Pesquisa de campo	Algoritmo de sequenciamento da produção	Savino, Mazza e Neubert (2013)
		Arquitetura dos agentes baseado na lógica BDI e validação do comportamento dos agentes por usuários reais	Anand et al (2016)
	Regras Ad hoc	Regras gerais de funcionamento que permitem o sistema rodar na lógica desejada	Cicirelli, Furfaro e Nigro (2011)
Diagramas de sequência, mostrando a comunicação/negociação entre os agentes.		Komma, Jain e Metha (2007)	
		Transcrição de mapas de processo	Ruiz et al (2014)
Real	Modelos teóricos	Modelo probabilístico teórico	Rouzafzoon e Helo (2016)
	Pesquisa de campo	Pesquisa para descobrir as políticas da empresa	Nilsson e Darley (2006)
		Identificação de comportamentos de consumidores	Siebers e Aickelin (2011)
		Identificação de comportamentos de consumidores	Siebers et al (2011)
	Regras Ad hoc	Políticas de gestão de movimentação de materiais	Garro e Russo (2010)
		Regras lógicas de funcionamento do sistema	Grobarcikova e Sosedova (2016)
		Estados dos agentes que mudam a capacidade de guias, conforme o nível de utilização.	Lättilä (2011)
Fluxograma sequencial com regras de decisão e equações matemáticas		Sun et al (2016)	
		Transcrição de mapas de processo	Yu et al (2012)

Quadro 2-6: Características da arquitetura utilizada para construção dos agentes

A análise dos artigos indica que a maioria das arquiteturas foi construída utilizando-se regras ad hoc, logicamente encadeadas para viabilizar a modelagem do sistema, real ou abstrato. É importante observar que os mapas de processo, fluxogramas e políticas de gestão não são considerados como pesquisas de campo, por representarem uma orientação normativa e prescritiva do sistema. A pesquisa de campo foi realizada em somente 4 artigos dos 17 selecionados.

A pesquisa de Nilsson e Darley (2006) mostra o desenvolvimento um modelo para simular o sistema produtivo de uma empresa de embalagens. Os autores relatam o discurso dos representantes da empresa para necessidade de possuírem um sistema produtivo flexível, para lidar com alto *mix* de produtos. Para construção do modelo foram realizadas entrevistas e workshops para levantar as regras de comportamento e interações envolvidas entre os agentes

Siebers e Aickelin (2011) e Siebers et. al (2011) desenvolveram um modelo híbrido para simular o processo de atendimento a clientes em lojas de departamento, inserindo comportamento proativo nos funcionários modelados como entidades-agentes. O objetivo era avaliar se esta abordagem de modelagem com agentes permite uma melhor representação da dinâmica do sistema real, atribuindo maior credibilidade ao modelo. A construção do modelo envolveu coleta de dados através de observação participante, entrevistas semi-estruturadas com gerentes e funcionários e análise de relatórios. Estes dados foram validados com funcionários que possuíam experiência e conhecimento sobre os quatro departamentos abordados no estudo. Foram realizados dois tipos de coleta de dados. Primeiramente, foram coletados dados sobre o processo: quantidade de funcionários, tamanho de filas e tipos de clientes. Em seguida os dados sobre comportamento das pessoas: diferentes estados que os clientes e funcionários podem assumir e o tempo associado com cada estado dos funcionários.

Anand et. al (2016) desenvolveram uma estrutura conceitual (*framework*) para validar o comportamento dos agentes (Figura 2-12). Os autores argumentam que um agente é construído para realizar uma ação em determinada situação, conforme um conjunto de regras que regem seu estado interno. Os agentes são modelos seguindo a arquitetura Belief-Desire-Intention (BDI). Esta arquitetura, apresentada por Rao e Georgeff (1995), é composta por Crenças (Belief), que representa as informações que o agente possui do ambiente, Desejo (Desire), que representa o estado de motivação do agente e Deliberação (Intention) que representa a ação do agente no ambiente.

Para validar o comportamento dos agentes, Anand et. al (2016) criaram um jogo para que um usuário do sistema (stakeholder) possa interagir com o modelo e permitir a coleta de informações sobre a escolha e validar os agentes.

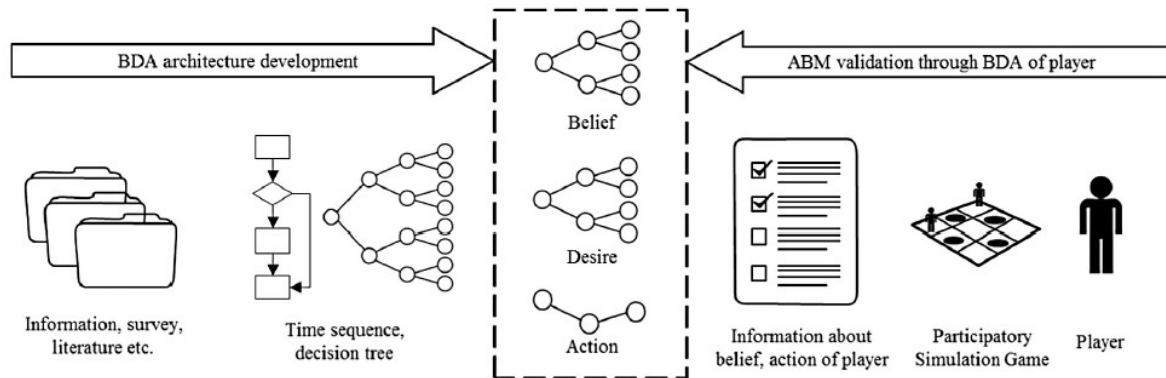


Figura 2-12: Arquitetura baseada em lógica BDI e validação por atores sociais
Fonte: Anand et. al (2016)

Para testar esta estrutura, foi criado um modelo abstrato para simular a logística de movimentação de mercadorias em uma cidade.

2.4.5 Técnicas de modelagem para simulação baseada em agentes

Os resultados da RBS mostram que a grande maioria dos artigos com modelos baseados em agentes utilizaram a linguagem *Unified Modeling Language* (UML) para modelagem conceitual dos agentes (em 12 dos 17 artigos). O uso do fluxograma de processo, tradicionalmente utilizado em diversas aplicações na Engenharia de Produção, foi utilizado em 4 artigos. Em três artigos, os autores combinaram o fluxograma de processo com linguagem UML para construir o modelo híbrido. O fluxograma foi utilizado para modelar os fluxos logísticos, e a linguagem UML para modelar o comportamento e interações dos agentes.

A UML é uma linguagem que utiliza diagramas padrão para especificar, construir, visualizar e documentar sistemas de informações orientados por objetos (NUNES, O'NEILL, 2003). Esta linguagem foi revisada inserindo novos diagramas e elementos sintáticos, passando a ser denominada UML. Os diagramas da UML podem ser divididos em **estruturais** e **comportamentais**, conforme ilustrado na Figura 2-13. Os diagramas estruturais são utilizados para especificar aspectos estáticos de um sistema, como suas características de origem e tipos de interações. Já os diagramas comportamentais são empregados para especificar aspectos dinâmicos de um sistema, aspectos que podem sofrer alterações a longo do tempo.

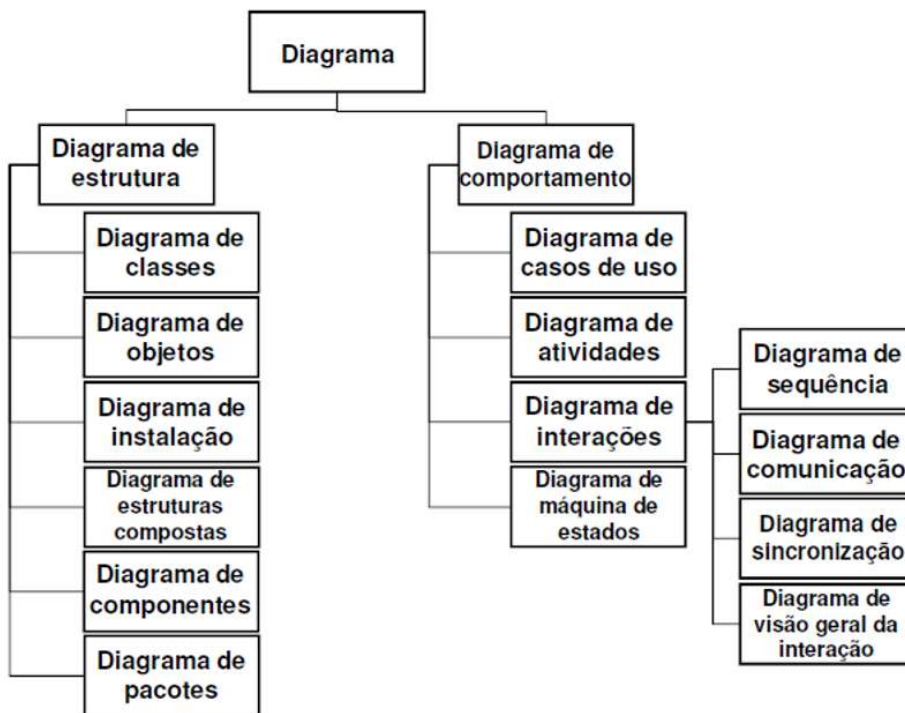


Figura 2-13: Classificação dos Diagramas da linguagem UML 2

Para Bersini (2012), a UML é a linguagem mais simplificada para programar interações entre objetos (agentes), os locais físicos onde eles vivem, os recursos que eles consomem, suas compras ou ainda serem o próprio vendedor. No Quadro 2-7 são apresentados quatro tipos de diagramas UML que podem ser utilizados para modelar agentes. Porém, o autor destaca que a UML é uma linguagem de programação e não uma metodologia. Isto significa que não é estabelecida uma ordem para utilização dos diagramas, nem quais devem ser utilizados e os conteúdos necessários: “o resultado é fruto da prática correta adquirida através da experiência” (BERSINI; 2012, p. 3 – tradução nossa). Na visão do autor, a linguagem UML se tornará linguagem padrão para projetos de simulação baseados em agentes, pois ela permite implementação em qualquer plataforma. Neste sentido, esta linguagem pode ser utilizada de suporte para implementar os agentes nos *softwares* SED comerciais que são orientados a objetos como Promodel, Automod, Arena, Flexsim e AnyLogic.

Nome do diagrama	Função
Diagrama de classe	Descrever os tipos de agentes no sistema e os tipos relacionamentos estáticos com outros agentes
Diagrama de caso de uso	Utilizado para comunicação entre agentes-chave do sistema
Diagrama de sequência	Descreve como grupos de agentes colaboram um com outro (mandando mensagens) em um cenário específico (diagrama de caso de uso)
Diagrama de máquina de estado (ou Diagrama de estado)	Expressam o comportamento do agente através de estados, desencadeados por eventos e as relações que possam ocorrer.
Diagrama de atividade	Descrever comportamento dos agentes como um fluxo procedural de passos (semelhante aos fluxogramas)

Quadro 2-7: Diagramas UML para modelagem de agentes
 Fonte: Adaptado de Bersini (2012).

Siebers e Aickelin (2011) desenvolveram um modelo híbrido para simular o processo de atendimento a clientes em lojas de departamento, inserindo comportamento proativo nos funcionários modelados como entidades-agentes. O objetivo era avaliar se esta abordagem de modelagem com agentes permite uma melhor representação da dinâmica do sistema real, atribuindo maior credibilidade ao modelo.

A construção do modelo envolveu coleta de dados através de observação participante, entrevistas semi-estruturadas com gerentes e funcionários e análise de relatórios. Estes dados foram validados com funcionários que possuíam experiência e conhecimento sobre os quatro departamentos abordados no estudo. Foram realizados dois tipos de coleta de dados. Primeiramente, foram coletados dados sobre o processo: quantidade de funcionários, tamanho de filas e tipos de clientes. Em seguida os dados sobre comportamento das pessoas: diferentes estados que os clientes e funcionários podem assumir e o tempo associado com cada estado dos funcionários.

Os autores argumentam que a modelagem de agentes em aplicações na área de PO devem ser orientadas para coleta e validação de dados empíricos, onde a tomada de decisão é representada por probabilidades ou regras simples. Neste sentido, os diferentes estados que os agentes podem assumir foram modelados atribuindo “atrasos” entre as transições, para representar o tempo de processamento. Estes “atrasos” foram modelados utilizando distribuições de probabilidade empíricas.

O modelo conceitual foi construído utilizando diagramas de estado para representar o comportamento dos clientes e funcionários. Na Figura 2-14 é apresentado o

modelo conceitual da loja de departamentos com os diagramas de estado dos funcionários e clientes (consumidores).

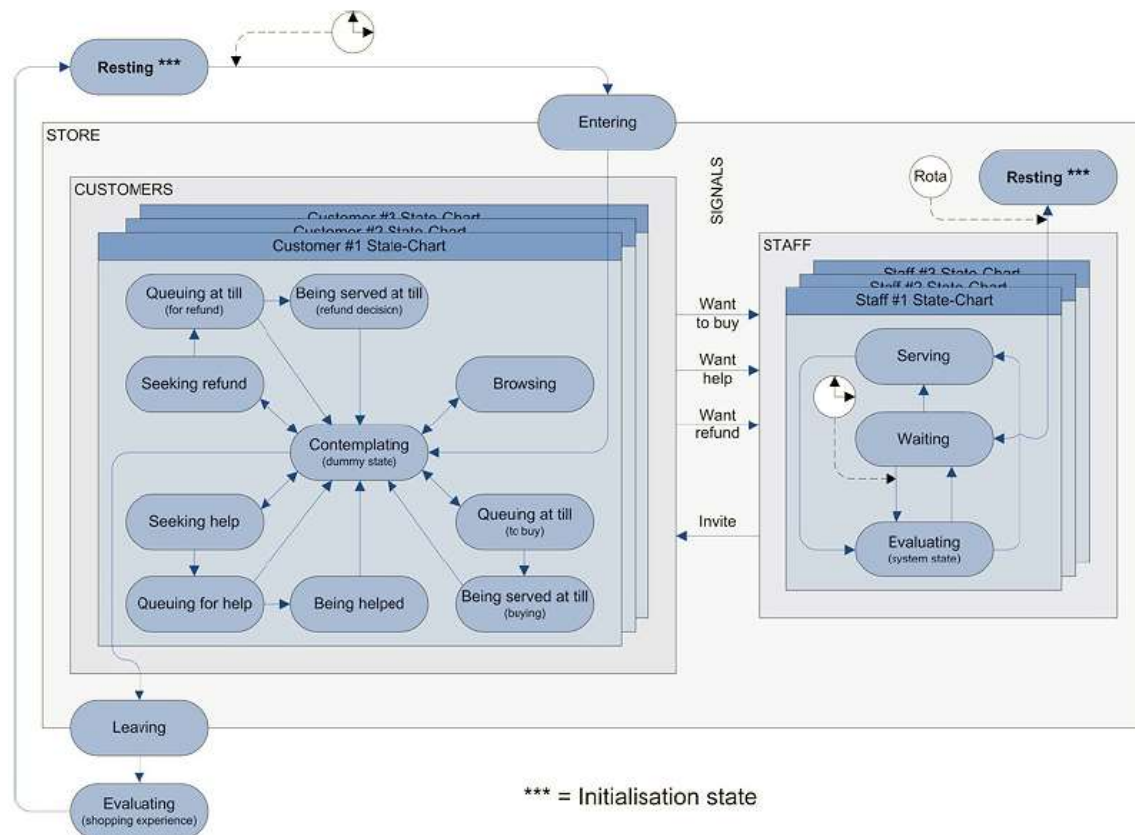


Figura 2-14: Diagramas de estado do comportamento dos clientes e funcionários
Fonte: Siebers e Aickelin (2011)

No início da simulação é gerada uma população de agentes como clientes heterogêneos com memória de longo prazo, que influencia o seu processo de decisão dentro do modelo. Também é criada uma equipe de agentes como funcionários da loja que possuem diferentes níveis de conhecimento e experiência no trabalho. Depois de criadas e definidas a população de clientes e equipe de funcionários, não se pode mais alterar suas características durante a execução do modelo.

Durante a simulação, os clientes entram na loja de acordo com a taxa de chegada, definida empiricamente e, os funcionários aguardam serem abordados pelos clientes através de um sinal solicitando serviço. Os clientes podem ou não necessitar da ajuda de um funcionário. Este comportamento depende das características da população de clientes que foi carregada no modelo no início da simulação.

Quando os clientes necessitam de ajuda, “procuram” por um funcionário disponível. Se não houver nenhum disponível, o cliente entra em uma fila aguardando para ser atendido. Nesta fila, este cliente pode tomar uma atitude autônoma de abandoná-la caso julgue

demorado a espera. Mas esta decisão não significa que o cliente desistiu de realizar a compra. Ele pode efetua-la mesmo sem a ajuda de um funcionário. Estas regras de comportamento foram criadas utilizando distribuição estatística empírica, com base nos dados coletados.

Outra razão para o cliente ir à loja de departamentos pode ser para pedir reembolso ou trocar produtos. Este tipo de atendimento também foi considerado como uma atividade de ajuda ao cliente, que pode aumentar ainda mais o tempo de espera na fila de atendimento de clientes, pois o procedimento de reembolso ou troca pode exigir a solicitação de autorização da gerência. Após concluído o reembolso, o cliente pode continuar a realizar compras ou deixar a loja.

Antes de sair da loja, os clientes avaliam sua experiência de compras. Este nível de satisfação irá influenciar seu nível de paciência com o atendimento durante a próxima visita (memória interna). Depois de realizar a avaliação, o cliente volta a um estado de repouso, até ser escolhido novamente de forma aleatória para realizar a atividade de compras. A Figura 2-15 ilustra o funcionamento do cálculo do nível de satisfação do cliente. Quando o cliente necessita de ajuda, ele procura por atendimento. Se a sua necessidade for prontamente atendida, seu nível de satisfação recebe +2. Caso o cliente tenha que aguardar atendimento na fila, seu nível de satisfação recebe -2. Quando o cliente abandona a fila seu nível de satisfação recebe -4.

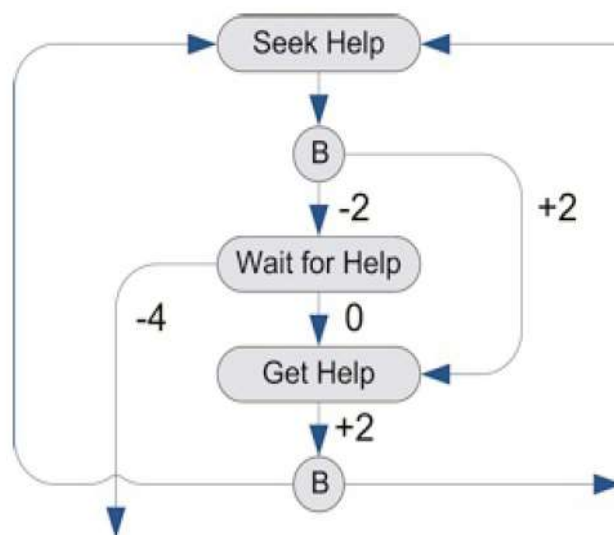


Figura 2-15: Modelagem da satisfação dos clientes da loja de departamentos
Fonte: Siebers e Aickelin (2011)

O comportamento proativo dos funcionários foi modelado atribuindo a possibilidade de abrir e fechar caixas disponíveis para os clientes realizarem pagamento de compras. Segundo os autores, a quantidade de caixas disponíveis influencia na dinâmica do sistema global. Quanto mais caixas estiverem abertos, menos funcionários estarão disponíveis

para realizar atendimento aos clientes que solicitam ajuda. Este cenário causa diminuição na fila do caixa, mas aumenta a fila de atendimento ao cliente. O cenário inverso diminui a fila de atendimento ao cliente, mas aumenta a fila do caixa.

As regras para abertura ou fechamento de caixas são definidas em três estratégias que permitem os funcionários trabalharem como caixas temporários, com regras para retornarem para suas atividades normais:

- A primeira estratégia de retorno as atividades normais é quando a quantidade de clientes atendidos no caixa chega a uma certa quantidade;
- A segunda estratégia é quando a fila de clientes necessitando ajuda atinge um tamanho crítico;
- A terceira estratégia é uma combinação das duas primeiras. O funcionário pode tomar decisão da primeira ou segunda estratégia, dependendo do que ocorrer primeiro.

Siebers e Ackelin (2011) concluem que são válidos os esforços operacionais e custos para o aprimoramento de modelos de serviços que possuem uma grande proporção de interação humana. Mas ainda ressaltam a dificuldade em validar os comportamentos definidos como proativos, devido a variabilidade e aleatoriedade em que estes comportamentos aparecem no sistema real.

2.4.6 Ferramentas computacionais para simulação baseada em agentes

Para a implantação computacional dos modelos conceituais foi observado que 6 artigos não utilizaram um software específico para simulação, mas a linguagem de programação orientada a objetos Java. Deste total, 4 utilizaram um *framework* próprio para desenvolvimento de aplicações com agentes chamado Java Agent Development (JADE).

Outros 5 artigos utilizaram *software* AnyLogic, que possibilita a modelagem em três diferentes abordagens de simulação: SD, SED e SBA, além de permitir construção de modelos híbridos. Neste *software*, os comportamentos dos agentes são modelados como transições de estado, conforme a ocorrência de eventos no ambiente.

O Respast é um *software open source*, em linguagem JAVA, para construção de modelos de SBA, que foi utilizado em 3 estudos. Este *software* permite a criação de agentes que interagem em um ambiente no formato de um grid ou baseado em um Sistema de Coordenadas Geográficas. Nos outros 3 artigos classificados como SBA, os autores não especificaram sobre o *software* utilizado.

2.4.7 Síntese dos resultados da RBS

A SBA é um tipo de simulação em que o processo de modelagem é baseado na construção do comportamento individual das entidades agentes e suas interações com outros agentes e o ambiente. As características principais de um modelo SBA são: individualidade dos agentes, autonomia, capacidade de interação com outros agentes, adaptação e aprendizado. Além disso, a síntese da RBS evidenciou pelo menos quatro aspectos de conflito metodológico de definição e utilização da SBA:

- Confusão no uso de termos;
- Classificação dos modelos de simulação;
- Técnicas de modelagem;
- Ferramentas computacionais aplicadas na SBA.

O primeiro aspecto de conflito é a confusão no uso dos termos para definir o tipo de simulação com agentes. Os resultados da RBS mostram que a Simulação Baseada em Agentes é confundida com a simulação de Sistemas de Multi-Agentes pelo fato de ambas utilizarem o conceito de agentes para construir seus modelos. No entanto, a perspectiva dos objetivos do modelo é diferente. Na *MAS* busca-se a melhor combinação de recursos e decisões dos agentes para o sistema global, enquanto que na *ABMS*, busca-se descrever o comportamento dos agentes e seu impacto no sistema global. Esta diferenciação de orientação dos objetivos estabelece diferentes características para o processo de modelagem e construção do modelo.

O segundo aspecto de conflito é em relação a classificação dos modelos SBA. Não há um consenso quanto a sua estrutura e forma de avanço do tempo de simulação. Os modelos de SBA classificados como multi-agentes são modelos que apresentam diversos agentes interagindo em um ambiente, conforme seu estado interno modelado com equações matemáticas. Nestes estudos, a orientação do tempo de simulação é contínua, como na simulação de Sistemas Dinâmicos. Já os modelos classificados como híbridos SED-Multi Agente são modelos que também possuem agentes interagindo em um ambiente, porém seu comportamento e interações são orientados de forma discreta no tempo, conforme a ocorrência de eventos. Estas duas formas de construir modelos SBA devem ser aceitas, desde que permaneçam os princípios de orientação dos objetivos para descrição do comportamento dos agentes e modelagem de interação entre entidades.

O terceiro aspecto de conflito é quanto as técnicas de modelagem utilizadas para construção dos modelos SBA. Para modelagem SED, Pereira e Chwif (2012) citam diversas técnicas de modelagem como Diagrama de Ciclo de Atividade (ACD), IDEF0 (*Integration*

Definition for Function. Modeling), SIPOC (*Suppliers Inputs Process Outputs Customer*) ou o fluxograma do processo. A maioria dos artigos classificados na RBS utilizaram a linguagem UML para modelar as interações e comportamento dos agentes no sistema. Esta linguagem é utilizada na Engenharia da Computação para modelagem de *softwares* orientados a objetos, que geralmente não é de domínio da Engenharia de Produção. Porém, como destacado por Bersini (2012), a UML possui potencial para modelagem SBA, devido sua flexibilidade de uso em diferentes plataformas.

Por fim, quanto as ferramentas computacionais, o conflito existe devido à falta de *softwares* específicos para SBA de alto nível e facilidade de modelagem, como os *softwares* comerciais para SED. Os estudos de SBA utilizam linguagens de programação diretamente, sem o uso de *softwares* específicos para simulação, ou ainda, utilizam *softwares* comerciais de SED, utilizando-se de recursos de programação. No caso específico do AnyLogic, o funcionamento do modelo computacional, com transição de estados de uma entidade agente, desencadeada por eventos, é semelhante ao funcionamento do modelo computacional dos modelos SED.

Este contexto acaba contribuindo para falta de aceitação da SBA na comunidade científica em relação as definições do que é a SBA em contraposição com SED, fortalecendo argumentos que a SBA é um complemento para SED.

Analisando-se o processo de modelagem dos artigos classificados como *ABMS*, é possível identificar 3 conjuntos de artigos que utilizaram modelos SBA com diferentes características.

O primeiro conjunto são os artigos que apresentaram sistemas que possuem situações dinâmicas, que necessitam que sejam tomadas decisões em “tempo real”. Estas decisões envolvem a troca de informações entre atores da empresa (gerentes, supervisores, operadores, entre outros) para atuar sobre o sistema. Nestes estudos, os agentes trocam mensagens com outras entidades, para obter informações do modelo (variáveis de estado, atributos de outras entidades ou eventos futuros), processam internamente estas informações e atuam no ambiente que estão inseridos.

Estas situações dinâmicas possuem diferentes origens. Primeiramente, elas podem surgir de eventos externos ao modelo, como forma de verificar o comportamento dos agentes diante de perturbações propositais no ambiente. Uma segunda fonte de origem, é pela emersão, causada por estado de variáveis globais dos do sistema, resultante das interações entre agentes.

Em geral, as arquiteturas utilizadas são compostas de agentes individuais, que possuem estado interno modelado com equações matemática ou lógica condicional, onde a informação contida na mensagem trocada é a variável independente ou parâmetro para decidir qual será a ação no ambiente. As estruturas das trocas de mensagens na sociedade de agentes são modeladas utilizando diagrama UML de sequência. Considerando-se a classificação de modelos SBA proposta por Macal (2016), estes estudos apresentaram agentes **heterogêneos-autônomos-interativos**.

No segundo conjunto estão os artigos em que as entidades do modelo possuem uma variedade de possibilidades de ação no ambiente, condicionadas por estados de variáveis globais. Estas estruturas condicionais são programadas nos agentes antes do início da simulação, que não trocam mensagens com outros agentes, somente captam informações no ambiente para decidir suas ações. Portanto, possuem interação limitada. O estado interno dos agentes é construído utilizando-se diagrama UML de estado, mostrando as diferentes condições para mudanças de seus estados. Segundo a classificação de Macal (2016), estes estudos apresentaram agentes **heterogêneos-prescritos** ou **heterogêneos-autônomos**.

O terceiro conjunto de artigos apresenta características semelhantes às características do primeiro grupo, apresentando estado interno modelado com equações matemáticas, regras condicionais e de interação. A grande diferença é em relação a existência de populações de agentes. Enquanto que no primeiro grupo existe apenas uma única entidade de cada tipo de agente, neste grupo existem diversas entidades do mesmo tipo de agente (população), que possuem atributos diferentes para a mesma característica.

2.5 Considerações finais acerca dos referenciais conceituais

Neste capítulo foi discutida a teoria de projeto em Engenharia, com foco no uso dos modelos de simulação para projeto de sistemas produtivos. Para Thiollent (1983) existe uma demanda para desenvolvimento de métodos de projeto que levem em consideração os aspectos descritivos dos sistemas produtivos. Neste sentido, Torres (2007) argumenta que os modelos de simulação devem incluir as práticas que surgem da interação com o ambiente econômico, social e cultural. Portanto, fica estabelecida a necessidade de um método de modelagem e simulação de sistemas produtivos que incorpore estes elementos. Para isto, também foram apresentados os referenciais conceituais sobre simulação baseada em Eventos Discretos e uma Revisão Bibliográfica Sistemática sobre as metodologias de desenvolvido de modelos de agentes no contexto de manufatura e logística.

Partindo-se das características de modelagem SED que representa os operadores de forma análoga aos dispositivos físicos máquinas e equipamentos, espera-se ter demonstrado a problemática de representar um sistema real, principalmente quando este sistema produtivo é caracterizado por tarefas que envolvem trabalho manual. Este problema foi considerado ponto de partida para pesquisa, pois esta limitação na modelagem pode dificultar a representação do sistema real, principalmente quando este possui situações dinâmicas, que exigem tomada de decisão baseado em informações que surgem durante a simulação. Além disso, este paradigma de modelagem possui dificuldades para inserir decisões tomadas no chão de fábrica por líderes de setores ou supervisores, que podem mudar uma estratégia de produção quando surgem problemas no processo.

Conforme discutido no tópico 2.3.6 existem na literatura alguns métodos (ou modelos) desenvolvidos para lidar com este problema. Estes modelos possuem algumas limitações, seja na dificuldade em obter dados para alimentação dos métodos ou para validar seus resultados. Além disso, em todos os estudos realizados os autores argumentam a dificuldade e a necessidade de modelar comportamentos emergentes dos operadores. Neste ponto foi discutida a abordagem de modelagem baseada em agentes, como pressuposto conceitual para possibilitar a modelagem do comportamento humano para tomar decisões durante a execução da simulação, visando resolver problemas do processo produtivo que podem ocorrer durante a simulação.

Macal (2016) apresenta argumentos de que a SBA não é devidamente aceita pela comunidade científica, devido a conflitos de ordem conceitual e metodológica. Visando aplicar a SBA no contexto da manufatura e logística, foi realizada uma RBS, para identificar os principais conceitos relacionados com modelos de agentes, neste contexto e suas características operacionais: métodos, técnicas e *softwares* utilizados. Os resultados da RBS evidenciam os argumentos descritos por Macal (2016), mas mostram também que há certa consonância em termos dos métodos de modelagem, utilizando linguagem orientada a objetos UML.

Estes resultados sugerem que a abordagem SBA foi utilizada com objetivos pragmáticos, para facilitar a modelagem de sistemas em que as interações entre as entidades são difíceis de serem modeladas pela SED, devido a necessidade de esforços e recursos avançados de programação para simulação representar o sistema.

Portanto, fica estabelecido que um modelo híbrido SED-SBA pode ser útil para representar sistemas que possuem situações dinâmicas, conforme o problema da “puxada na produção” apresentado no capítulo introdutório desta pesquisa. A modelagem do fluxo de materiais no setor de Embalagem de Oscilantes é um problema típico da SED, com chegada de

pedidos e aleatoriedade nos tempos de processamento. Porém, as interações que ocorrem entre diretor industrial, líderes dos setores e processistas, são regras de decisões locais e individuais.

Em relação a arquitetura dos agentes, os resultados da RBS mostraram poucos estudos que construíram as regras dos agentes utilizando como base as características do sistema real, tanto para conhecer os fatores causadores dos comportamentos, como o próprio comportamento em si. De acordo com Macal (2016), os comportamentos, reações e interações humanas são elementos faltantes nos modelos baseados em agentes. Portanto, é necessário o desenvolvimento de uma arquitetura que leve em consideração os determinantes da atividade de trabalho dos humanos modelados como agentes. Para isto, é necessário realizar pesquisa de campo, utilizando observações diretas do trabalho, entrevistas e validação.

As subjetividades na definição das ações e os conflitos entre os tomadores de decisão são desafios para construção das regras dos agentes. A subjetividade vem da noção de que as ações são definidas com base na interpretação individual de cada sujeito, e que está relacionada com racionalidade limitada dos agentes em uma SBA. Esta característica permite a construção de regras locais, baseadas na percepção de cada sujeito. Do ponto de vista metodológico, para lidar com este desafio, é necessário realizar entrevistas e validação com os sujeitos tomadores de decisão. Os conflitos para estabelecimento das regras surgem desta visão local que cada sujeito possui sobre o ambiente. Neste ponto, estão em jogo questões de poder e hierárquicas dentro da organização. Se os objetivos da hierarquia superior forem colocados como meta para todos os agentes, de forma que suas ações sejam guiadas para seu alcance, este modelo pode estar fugindo das características da SBA e se aproximando da MAS.

É importante destacar que nem todos os comportamentos humanos são possíveis de serem modelados no modelo baseado em agentes proposto. A construção de um modelo é sempre uma abstração do sistema real, que possuem algumas simplificações, adaptações e até mesmo exclusão de aspectos que não influenciam os resultados pretendidos na simulação. Desta forma, estabelecendo um modelo híbrido SED-SBA o interesse está nos comportamentos emergentes que surgem durante o processo produtivo, que modificam os resultados das variáveis globais do sistema simulado.

Conforme o objetivo desta Tese, o modelo híbrido a ser desenvolvido, seguirá os fundamentos para modelagem SED por ser uma abordagem de simulação adequada para representação e simulação de sistemas produtivos. Desta forma, o modelo computacional também seguirá as técnicas para SED, sendo o modelo orientado por eventos. Portanto, os agentes desenvolvidos deverão seguir esta orientação. Para adequar os comportamentos que sejam contínuos no tempo (orientado pelo tempo), eles deverão ser discretizados, pela

identificação do momento ou circunstâncias (fatores) geradores deste comportamento e modelados como regras de ação, associado a determinado evento.

Silva (2007; 2009) apresenta uma metodologia para modelagem de *softwares* orientados a objeto, utilizando-se a linguagem UML. Nesta metodologia, os digramas da UML 2 são utilizados, para definir as funcionalidades do *software* (abordagem inicial do problema) e, avanço no detalhamento até se aproximar do código do programa.

Desta forma, a arquitetura proposta para modelagem e simulação de eventos discretos integrada com simulação baseada em agentes possui uma articulação conceitual para integrar macro especificações (abordagem *top-down*) com micro especificações (abordagem *bottom-up*), conforme a Figura 2-16.

O maior nível de detalhamento de um modelo SED possui objetivo de representar microestruturas, que acontecem em nível local e contextualizado, através de macro especificações. Esta orientação metodológica mantém a visão de modelagem em uma perspectiva *top-down*. Em contraste com a SBA, os interesses do modelo conceitual estão nas ações que os agentes tomam no ambiente, as interações necessárias para deliberação e os seus respectivos estados internos. Com estas necessidades, o uso da UML como ferramenta de modelagem conceitual permite representar os agentes em diferentes níveis de abstração, contribuindo para representar macroestruturas através de micro especificações.

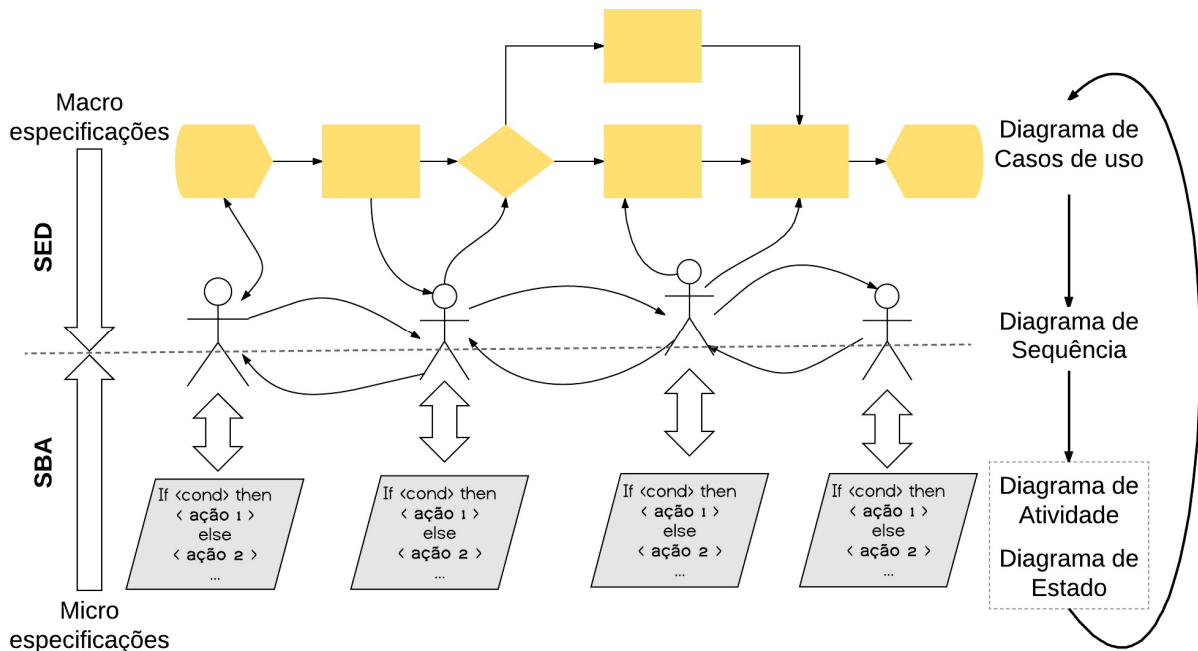


Figura 2-16: Arquitetura proposta para modelagem de SED-SBA

As **Macro especificações** reúnem as decisões de sistematização e simplificação do sistema para elaboração de um modelo conceitual sob o ponto de vista da orientação por

processo (SED). Já as **Micro especificações** são as deliberações dos atores sociais no ambiente, modeladas como um conjunto de regras de ação (SBA). Estas ações podem ser resultantes de troca de informações com outros atores sociais, percepção de condições do ambiente ou funções pré-programadas conforme a ocorrência de eventos.

O analista de simulação em campo, elabora macro especificações através dos métodos e técnicas para modelagem SED, e também é capaz de realizar micro especificações através de observações e entrevistas com atores sociais. O encontro destas especificações antagônicas ocorre em um nível intermediário, que pode gerar conflitos quando as Macro especificações não são suficientes para explicar as Micro especificações e vice-versa. Esta situação conflitante impede a construção de um modelo de simulação que represente o sistema real. Do ponto de vista do processo de projeto, estes conflitos são fruto dos diferentes mundos-objeto existente entre os atores sociais, que enxergam o sistema conforme o escopo no qual estão inseridos.

O analista de simulação possui dificuldades para articular essas duas especificações devido à falta de um ferramental adequado, tanto para modelar conceitualmente estas duas visões integradas (ponto de vista técnico), quanto para discutir os conflitos com os atores (ponto de vista social). Para lidar com esta situação, o analista de simulação reduz ou elimina uma das origens de especificações, geralmente micro especificações e, assume uma série de pressupostos para conseguir obter um modelo computacional.

Desta forma, para suportar o analista de simulação no desenvolvimento de um modelo SED-SBA, é proposto o uso da linguagem UML como ferramenta de construção técnica, para desenvolvimento de modelo conceitual SBA, e de construção social, para discutir possíveis conflitos entre os níveis de especificação com os atores sociais.

No próximo capítulo é apresentado um método de pesquisa para suportar o desenvolvimento de modelos SED-SBA.

3 METODOLOGIA: PROCESSO DE MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE EVENTOS DISCRETOS E BASEADO EM AGENTES

3.1 Introdução

No capítulo anterior foram apresentados os problemas de modelagem do comportamento humano em SED e a SBA como novo paradigma que possui potencial para lidar com este problema e melhorar a representação de sistema de produção em *softwares* de simulação.

Este capítulo tem objetivo de fornecer os pressupostos metodológicos para atingir o objetivo proposto para esta pesquisa. Para justificar as escolhas metodológicas realizadas neste trabalho, no primeiro tópico é realizado uma apresentação do caso que será alvo de modelagem e, em seguida, é discutida a racionalidade adotada na pesquisa para geração de conhecimento. Por fim, é apresentado o método elaborado para modelagem e simulação SED-SBA.

3.2 Contexto do problema do modelo de simulação

O desenvolvimento deste modelo de simulação está inserido dentro do contexto de um projeto de pesquisa e extensão que envolve o Laboratório de Ergonomia, Simulação e Projeto de Situações Produtivas (PSPLab) com uma empresa eletro metalúrgica que fabrica ventiladores e espremedores. O PSPLab é um laboratório de Departamento de Engenharia de Produção (DEP) da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) com mais de 20 anos que desenvolve projetos de pesquisa e extensão em parceria com empresas.

Para desenvolvimento deste projeto foi utilizada a metodologia SimuCAD para condução de projetos de instalações industriais (COSTA; CAMAROTTO; MENEGON, 1996). Esta metodologia parte do nível micro da situação produtiva (operações nos postos de trabalho) em direção ao nível macro (Plano Diretor de ocupação de um prédio). As etapas da metodologia SimuCAD são apresentadas na Figura 3-1.

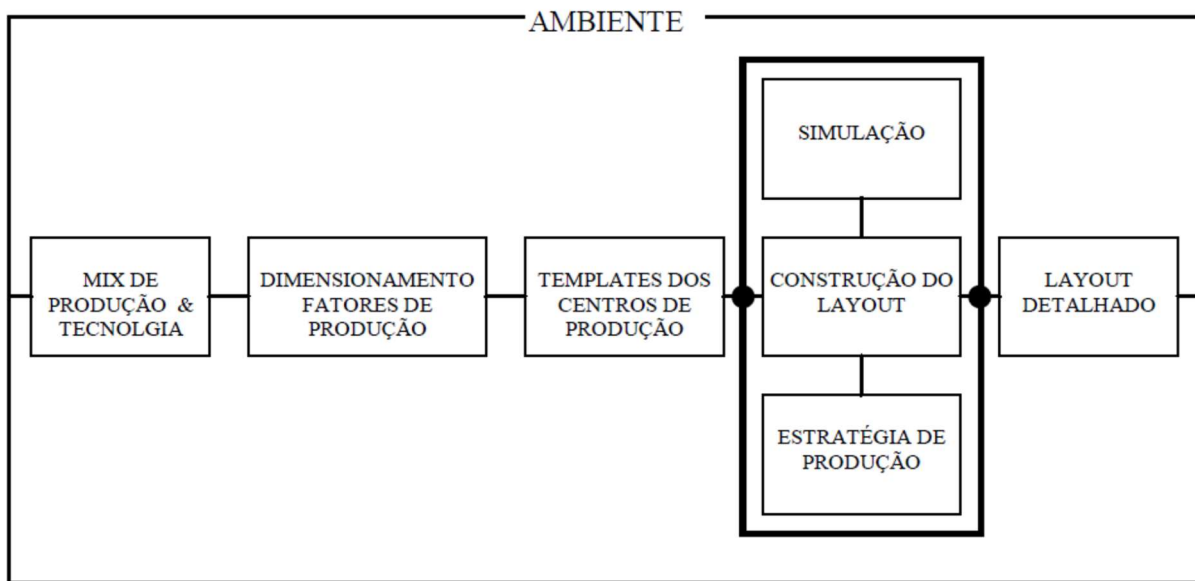


Figura 3-1: Metodologia SimuCAD

Fonte: Costa, Camarotto e Menegon (1996)

As três primeiras etapas desta metodologia possuem o objetivo de levantar as características relacionadas: i) com mix de produtos e os processos produtivos necessários para sua fabricação, ii) as necessidades de recursos físicos (homens, materiais e equipamentos) para atendimento de determinada demanda e iii) as necessidades espaciais para os centros de produção, considerando requisitos operacionais, manutenção, fluxos de materiais, serviços e segurança.

Estes dados levantados são a base de entrada para o processo iterativo entre a estratégia de produção adotada, construção do *layout* e a simulação. A construção do *layout* é guiada pela estratégia de produção da empresa, que é condicionada pelas características do ambiente externo. O ambiente representa as condições de mercado, que são externas para a unidade de negócios em estudo. Essas variáveis impactam na estratégia adotada, por consequência impactam nas decisões referentes ao *layout* (mix de produtos, tecnologias, recursos e necessidades espaciais). Desta forma a simulação é um processo importante para avaliar as diferentes estratégias de produção possíveis, evidenciando todas as consequências para todos os envolvidos.

A estratégia de produção definida pode trazer impactos no dimensionamento dos fatores de produção, ocasionando aumento (ou diminuição) de setores da fábrica, e também pode apontar para necessidade de mudanças na estratégia adotada (terceirização de partes da produção, aquisição de novas áreas para construção ou aluguel de instalações prontas). Por fim, com a definição de uma estratégia de produção adequada, parte-se para a última etapa da metodologia com a construção do *layout* detalhado.

A empresa fabricante dos ventiladores possui estrutura verticalizada, possuindo mais de 10 processos de produção. Os processos podem ser tratados de forma independentes, separados como se fossem diferentes unidades de negócios ou “mini fábricas”, pois possuem diferentes características em relação aos aspectos dos produtos fabricados, organização da produção, organização do trabalho, e estratégia de produção.

Durante a execução do projeto foram realizadas observações do funcionamento do processo produtivo e reuniões com representantes da empresa para identificar um setor ou um conjunto de setores que possui maior dinamismo, mudanças e tomadas de decisão emergentes durante os turnos de trabalho. Foi destacado uma situação recorrente no setor de embalagem de oscilantes, quando ocorrem vendas urgentes. Nesta situação, ocorre mobilização e articulação do Diretor Industrial e Líderes dos setores produtivos para conseguir acelerar (“puxada na produção”) a linha de embalagem de oscilantes para atender os pedidos urgentes. Segundo os representantes da empresa, atender aos pedidos urgentes é uma dimensão importante do mercado em que a empresa está inserida.

Este problema surgiu em um momento posterior ao processo de modelagem do sistema produtivo da empresa. Para construção do modelo híbrido SED-SBA, foi tomado como base o modelo SED construído para simulação das “minis fábricas” da empresa de ventiladores. Este modelo foi construído para analisar a capacidade do setor de oscilantes para suportar uma demanda futura, com uma visão global do sistema, sem considerar os aspectos que acontecem no nível micro do sistema.

3.2.1 Caracterização do problema da “puxada na produção”

O setor de **Embalagem de Oscilantes** é responsável por realizar a última etapa de produção dos ventiladores, antes do carregamento e entrega dos produtos. O setor é organizado em duas linhas que realizam operações manuais ou com auxílio de pequenos equipamentos.

As operações consistem em pegar os motores previamente montados, realizar a montagem final (colocar chave de liga/desliga, espelho, etiquetas), embalar e dispor, juntamente com a hélice e acessórios dentro de caixas e selar. A empresa possui cerca de 161 Stock Keep Unit (SKU) somente de ventiladores oscilantes. Todos embalados nestas duas linhas.

O setor trabalha com uma meta diária de produção de cada modelo, que se mantém relativamente constante ao longo do tempo. Porém, de acordo com os processistas da

empresa, em determinados dias, é necessário dar uma “puxada na produção” na linha de embalagens de oscilantes. Esta puxada é caracterizada pela tentativa de aumentar a meta de produção diária, devido a ocorrência de fatores externos, como vendas urgentes. A “puxada” também ocorre nos dias em que ocorrem falhas na linha que reduzem a disponibilidade no processo. Nesta condição, ocorre uma tentativa de acelerar o ritmo de produção, após o retorno do funcionamento da linha, para atingir a meta de produção estabelecida no dia.

Esta situação da “puxada na produção” é iniciada quando o setor de vendas comunica o Gerente Industrial sobre a necessidade de uma entrega urgente de determinado modelo de ventilador oscilante. Esta entrega urgente é um complemento da programação do dia (meta diária) de algum modelo de oscilante.

Depois do comunicado, o Gerente Industrial consulta o nível de estoque do modelo solicitado. Caso a quantidade seja suficiente, autoriza o carregamento e entrega do pedido urgente. Caso a quantidade não seja suficiente, dispara uma ordem de produção urgente para o setor de embalagem dos oscilantes.

A “puxada na produção” é realizada pela equipe de processistas da empresa, que se deslocam para o setor de embalagem de oscilantes quando ocorre esta situação, para auxiliar o líder do setor. Do ponto de vista técnico, a “puxada” consiste em aumentar a frequência dos inversores, para aumentar a velocidade da esteira e, eles mesmos, abastecem a esteira com os motores. Ao mesmo tempo, verificam a possibilidade de remanejar operadores de outros setores para ajudar nos postos de trabalho com a linha acelerada. Durante o período da puxada, os processistas permanecem verificando os postos de trabalho na linha, buscando aumentar a taxa de saída de produtos, pela identificação visual de gargalos dos postos com operadores ociosos.

3.3 Racionalidade da pesquisa

O problema analisado mostra a importância de simular sistemas com eventos que demandam tomadas de decisão no nível de micro especificações. Esta situação é considerada esporádica ao nível macro do sistema e, geralmente, é reduzida ou eliminada do modelo para facilitar a modelagem. Porém, as ações para atendimento dos pedidos urgentes são influenciadas pelo ambiente externo à organização e possuem importância estratégica para concorrência no mercado.

O modelo SED é um modelo típico de simulação, com variáveis exclusivamente quantitativas, e que existe o método tradicional de modelagem e simulação difundido na

literatura. Porém, o contexto apresentando nesta pesquisa com decisões no nível micro do sistema, sugere a adoção de práticas metodológicas utilizadas em pesquisa social, como o estudo de caso.

O modelo SBA possui características qualitativas quanto ao comportamento dos agentes. Segundo Vicente (2005), as principais limitações do uso da simulação em ciências sociais é fato de gerar fenômenos artificiais e necessitar de um modelo operante onde as variáveis interagem. Desta forma, o método de pesquisa construído para este trabalho visa desenvolver este modelo operante, tornando as variáveis qualitativas operacionalizantes para a simulação.

Conforme o problema da “puxada na produção” e o método de pesquisa apresentado, o modelo SED foi utilizado para simular o fluxo de materiais e a utilização dos recursos produtivos nas linhas de embalagem de oscilantes. O modelo SBA foi construído visando representar as interações dos atores sociais da empresa, participantes do contexto da “puxada”, capturando informações do ambiente SED como parâmetros para as suas decisões autônomas. Neste contexto, esta pesquisa visa produzir conhecimentos a partir de duas perspectivas.

A primeira perspectiva é quantitativa. As saídas dos modelos SED e SED-SBA serão comparadas e analisadas estatisticamente para verificar se existe diferença significativa nos resultados da simulação.

A segunda perspectiva é instrumental. Os objetivos definidos para este estudo visam produzir conhecimento para prática da SBA. Neste contexto, o próprio objeto de pesquisa é alvo de reflexão. Segundo Schön (1983), a reflexão sobre a experiência é a base para construção de conhecimentos. Portanto, o próprio método proposto para execução desta pesquisa será objeto de reflexão e discussão na análise dos resultados.

3.4 Método de pesquisa

O método definido para esta pesquisa é a modelagem e simulação. Segundo Martins (2010) este método é indicado para o pesquisador manipular as variáveis e seus níveis em um modelo abstrato da realidade. O processo de modelagem e simulação seguem as recomendações dos autores da área de simulação de Eventos Discretos (LAW; KELTON, 1998, BANKS, 2005; CHWIF, MEDINA, 2014). Para inserir o modelo baseado em agentes, este processo foi adaptado, criando-se novas etapas e loops de verificação, conforme a Figura 3-2.

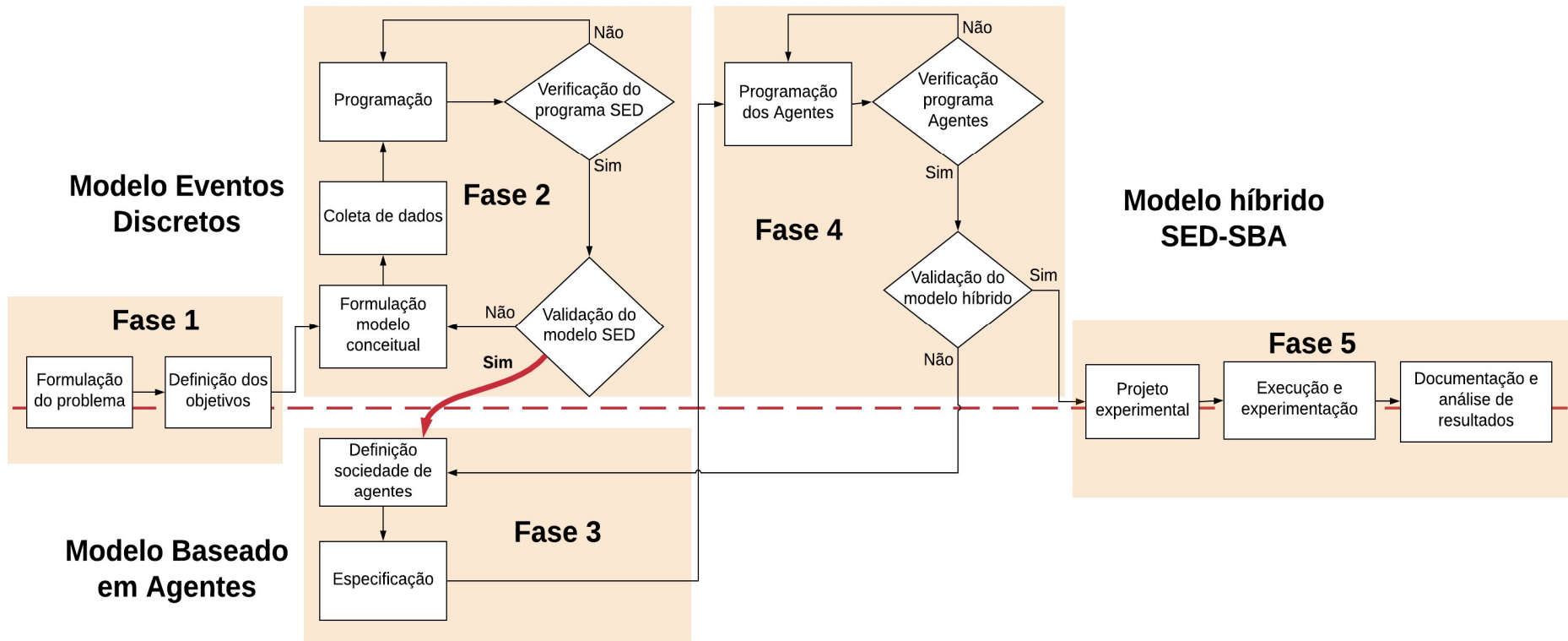


Figura 3-2: Método de pesquisa

O método de pesquisa é composto por 5 fases, com diferentes etapas para modelagem e simulação. Primeiramente foi criada uma linha divisória tracejada, que separa o processo de modelagem SED dos SBA. Esta divisão é necessária para ilustrar as atividades de modelagem que são específicas para cada tipo de modelo. As atividades que estão sobrepostas a linha divisória são as atividades comuns que devem ser realizadas de maneira integrada.

A primeira fase (Fase 1) é a **Formulação do problema e Definição dos objetivos** do modelo de simulação. Nesta etapa é realizada uma caracterização do contexto no qual o sistema a ser modelado está inserido. A partir disto, são definidos os objetivos para o modelo de simulação.

A Fase 2 do método foi a construção do modelo de Eventos Discretos. As atividades desta fase são as mesmas recomendadas pelos pesquisadores da área, conforme discutido na Seção 0. Nesta etapa destaca-se a importância do **Modelo conceitual**, que segundo Pereira e Chwif (2010), é uma das etapas mais importantes do processo de simulação. Após a construção do modelo conceitual, foi estruturada a **Coleta de dados**. Também foram analisados dados já existentes em relatórios fornecidos pela empresa. Com o modelo conceitual e os dados de entrada, foi realizada a **Programação** do modelo no *software* FlexSim. O modelo foi **Verificado** várias vezes até obter o funcionamento correto. A **Validação** do modelo SED foi realizada comparando-se a produção mensal de embalagem dos oscilantes, com dados históricos fornecidos pela empresa, com nível de significância de 95%.

A terceira Fase (Fase 3) é o processo de construção do modelo Baseado em Agentes. Esta fase foi colocada após a validação do modelo de Eventos Discretos para evidenciar a contribuição dos agentes para os resultados do modelo. A primeira atividade desta etapa é a **Definição da sociedade de agentes**, que pode ser entendida como uma analogia com a atividade de Formulação do modelo conceitual para Eventos Discretos. Nesta atividade foi identificado o ambiente no qual está inserido o sistema que será simulado, quem são os agentes pertencentes a este ambiente e quais são os acontecimentos (fatos, ocorrências, etc) que fazem com que estes agentes atuem no ambiente.

A partir desta atividade, foi possível realizar a **Especificação dos agentes**. Nesta etapa foi executada a coleta de dados através de entrevistas com representantes da empresa que serão agentes, para entender seus respectivos comportamentos no contexto real da fábrica. A especificação destes comportamentos foi realizada utilizando-se os diagramas da UML, conforme a arquitetura proposta na Figura 2-16:

- Os diagramas de Casos de uso para identificar as funcionalidades desejadas para o modelo SBA. Com estes diagramas foi possível obter uma especificação, de alto nível, dos agentes necessários para o modelo, suas ações e interações com outros agentes;
- Os diagramas de Sequência para modelagem de interações entre agentes e com o ambiente que devem ocorrer durante a simulação. Sua funcionalidade é detalhar um Caso de uso especificado anteriormente;
- Os diagramas de atividade são úteis para modelagem de comportamentos individuais, ou seja, as ações dos agentes diretas no ambiente. Este diagrama possui formato semelhante ao fluxograma de processo, representando uma sequência de ações atômicas;
- Os digramas de Máquina de estado modelam diferentes possibilidades de ações como sendo uma evolução de estados que o agente pode assumir. Para mudar de um estado para o outro é necessário que seja satisfeita uma condição de guarda (condição booleana). Este diagrama também pode ser utilizado para modelagem de comportamentos individuais dos agentes.

Na Fase 4 foi realizada a **Programação dos Agentes** destes agentes no ambiente (modelo computacional SED) e **Verificação do programa de agentes**. A partir deste ponto, modelo torna-se híbrido, tanto na perspectiva conceitual, quanto computacional. A próxima foi a **Validação do modelo híbrido**, pela perspectiva de eventos discretos, ou seja, os as ações dos agentes para mudança de estados e variáveis do modelo SED.

Por fim, na última fase (Fase 5) foi estruturado um **Projeto de experimentos**, com definição de cenários para simulação do modelo. Estes cenários foram definidos tanto para as variáveis globais do modelo (abordagem *top down*), quanto para as decisões dos agentes (abordagem *bottom up*). Após a definição dos cenários, os modelos foram **Executados e Experimentados**. A última etapa foi a **Documentação e análise dos resultados da simulação**.

No capítulo 4 será apresentado desenvolvimento do modelo SED-SBA, detalhando cada etapa definida no processo de modelagem e simulação. Espera-se com este modelo híbrido simular as práticas que favorecem o atendimento dos pedidos urgentes e, ao mesmo tempo, verificar o impacto destas decisões dos agentes nos resultados do modelo.

4 DESENVOLVIMENTO DO MODELO EVENTOS DISCRETOS-AGENTES

Neste capítulo são detalhadas as etapas de construção do modelo SED-SBA, definido para esta Tese, conforme o processo de modelagem definido na Seção 3.4. Os tópicos deste capítulo foram separados de acordo com a abordagem de simulação de cada parte do modelo híbrido, evidenciando seu processo de modelagem.

Durante o processo de modelagem ocorreram interações que demandaram retorno a etapas anteriores para adequar a modelagem conceitual. Estas considerações foram mantidas na sequência do texto para descrever as necessidades do processo de modelagem e simulação SED-SBA.

4.1 Objetivos do modelo de simulação

Com base no problema do sistema, foram definidos os objetivos para o modelo de simulação SED-SBA:

- i) Identificar os gargalos existentes que surgem durante a “puxada na produção”;
- ii) Quais combinações de tomada de decisão dos agentes conseguem atingir as metas de montagem de oscilantes;

O primeiro objetivo será atendido com modelo de Eventos Discretos, sem a necessidade de ação dos agentes. Já o segundo objetivo, depende da combinação de diferentes tomadas de decisão dos agentes durante a simulação. Neste caso, este objetivo será atendido pelo modelo híbrido.

4.2 Modelo SED

Nesta Seção são detalhadas as etapas de desenvolvimento do modelo SED, conforme o processo de modelagem e simulação apresentado na Seção 0.

O desenvolvimento do modelo SED foi baseado em um modelo construído anteriormente para simulação das “minis fábricas” da empresa de ventiladores. Este modelo antigo foi adaptado para torná-lo probabilístico através de uma análise de dados históricos de tempo e entrevista com processistas para entender o comportamento da variabilidade nos postos da linha de embalagem

4.2.1 Formulação do modelo conceitual SED

O modelo conceitual foi especificado a partir do Fluxograma de Fabricação e Montagem (FFM) do setor de embalagem de ventiladores oscilantes, que foi elaborado em etapas anteriores do projeto do “Plano Diretor e Operacional”, desenvolvido pela equipe do PSPLab.

Este FFM foi validado pelos atores sociais da empresa e comparado com o desenho *Computer Aided Design* (CAD) da planta do setor para verificar se a representação do *layout* estava de acordo com a realidade observada. Após esta checagem, o desenho em CAD foi utilizado como representação conceitual do modelo, conforme ilustrado na Figura 4-1.

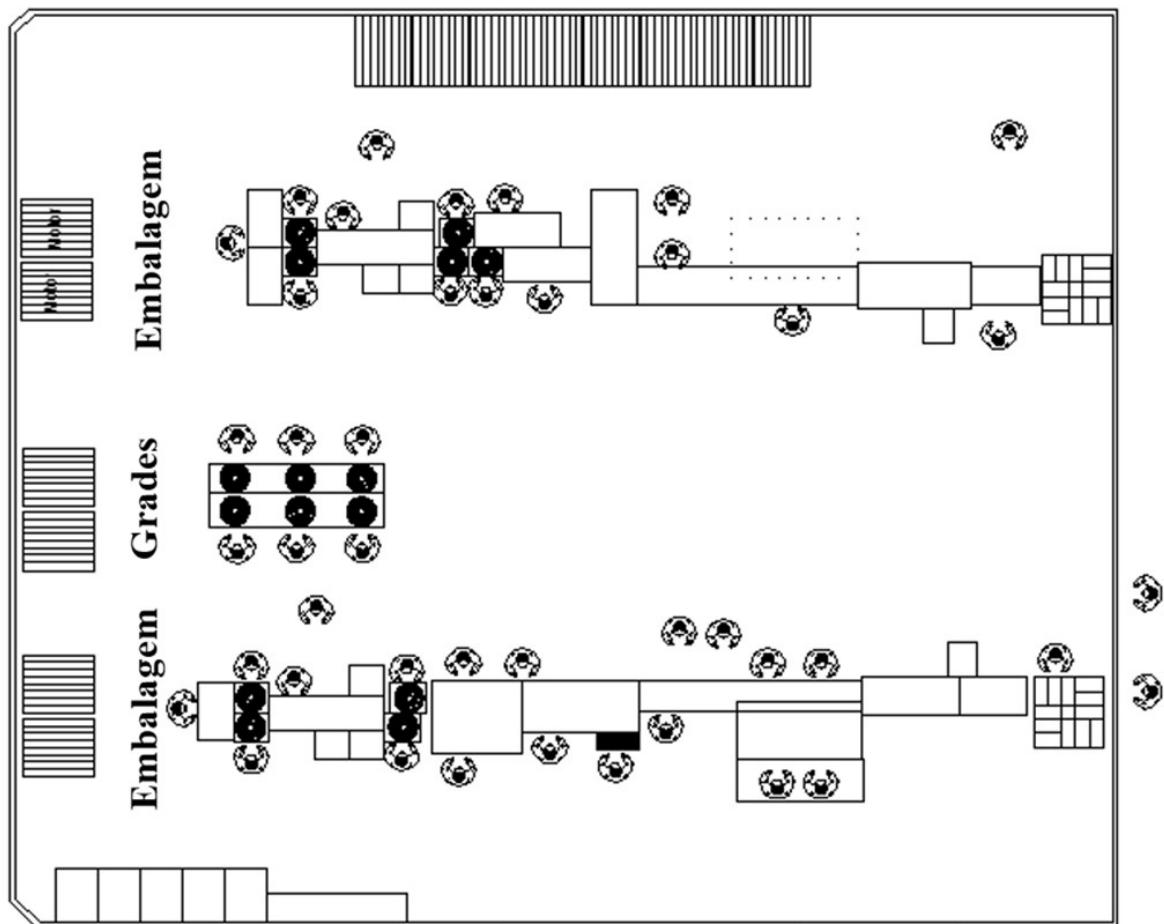


Figura 4-1: Modelo conceitual de embalagem de oscilantes

O setor de embalagem de oscilantes é composto de 3 linhas, sendo que as duas das extremidades são linhas de embalagem dos ventiladores, e a central é uma linha de teste de qualidade da grade. Depois do teste de qualidade, é inserido o logotipo da empresa no furo central do produto. Na sequência a grade é embalada e disponibilizada para abastecer as linhas de embalagem.

O processo nas linhas de embalagem é iniciado com abastecimento de motores, previamente montados e fornecidos pelo setor de montagem de motores oscilantes. Na sequência são realizadas as operações de teste do motor, colagem de etiqueta e embalagem do motor. Conforme ilustrado na Figura 4-1, nesta primeira parte da linha é possível trabalhar dos dois lados com estações em paralelo.

A próxima etapa é a montagem do motor com a grade recebida da linha central. Nesta operação, o motor é acoplado com a grade traseira do ventilador. Em seguida, a hélice é montada no motor e, encaixada a grade frontal do ventilador. No posto seguinte são realizadas diversas operações: teste do motor com a hélice, colagem de etiqueta e embalamento do motor acoplado com as grades e hélices.

Na parte final da linha, são montadas as caixas de papelão e inserido divisórias. Na operação seguinte, o motor acoplado é inserido dentro da caixa, juntamente com kit (termo de garantia, manual do produto, etc) e a caixa é disposta em um pallet. O pallet é formado por 30 caixas que é transportado para a expedição quando está completo.

As linhas de embalagem possuem entre 9 e 10 postos de trabalho, conforme a quantidade de operadores disponíveis e o tipo de ventilador que está sendo embalado. Além disso, é possível trabalhar na primeira parte das linhas de ambos os lados (postos em paralelo), dobrando a capacidade de cada linha. Como as duas linhas possuem a mesma configuração (postos de trabalho e instrumentos utilizados), foi assumido que não existe diferença entre elas. O modelo será executado sempre com as duas linhas funcionando.

A classificação ABC dos modelos de oscilantes identificou que 9 modelos representavam maior parte do volume de produção (cerca de 77%). Desta forma, a demanda para estes SKUs foi considerada como meta de produção para o modelo, acrescida de um percentual proporcional a contribuição de cada modelo para cobrir todos os SKUs.

Foi realizado estudo das etapas do processo de embalagem dos 9 modelos considerados para verificar se existiam diferenças entre as etapas e os tempos de processamento de cada modelo. Esta análise indicou a existência de 4 tipos de modelos diferentes, sendo definidos 4 produtos Padrão (Padrão 1, Padrão 2, Padrão 3 e Padrão 4), para simular os 9 modelos.

A linha de preparação de grades abastece as linhas de embalagem de oscilantes. As Grades A e B são fabricadas com arame metálico e necessitam passar na linha de preparação para verificar a qualidade. Já a Grade C é constituída de plástico, não necessitando passar pelo teste de qualidade na preparação de grades. O tipo de grade utilizada em cada produto padrão é descrito a seguir:

- Grade A: produto padrão 1 e produto padrão 2.
- Grade B: produto padrão 3.
- Grade C: produto padrão 4.

4.2.2 Dados de entrada e saída do modelo SED

As entradas do modelo são:

- **Demanda diária de cada modelo de oscilante:** a demanda de cada modelo foi agrupada conforme o tipo de produto definido (Tipo 1, Tipo 2, Tipo 3 ou Tipo 4);
- **Regime de trabalho:** a quantidade de turnos, o tamanho do turno e quantidade de dias trabalhos por mês e a quantidade de linhas abertas em cada mês;
- **Tempo de processamento dos postos de trabalho das linhas:** tempo de ciclo de cada posto de trabalho na linha de grades e nas linhas de embalagem.
- **Pedidos urgentes:** quantidade e o modelo do oscilante.

Os resultados (saídas) do modelo definidas para cada linha de embalagem:

- Taxa de utilização dos postos de trabalho;
- Produção mensal.

No Quadro 4-1 é apresentado um resumo das variáveis de entrada e as saídas para o modelo de Eventos Discretos.

Variáveis de entrada	Saídas do modelo
Ordem diária de produção contendo a quantidade e o tipo de oscilante (oscilantes/dia)	Taxa de utilização dos postos de trabalho (%)
Quantidade de turnos para cada dia (turnos/dia)	
Tamanho do turno (horas/turno)	
Quantidade de dias trabalhados a cada mês (dias/mês)	Produção mensal (oscilantes/mês)
Tempos de processamento na linha de preparação de grades (segundos/peça)	
Tempos de processamento nas linhas de embalagem (segundos/peça)	
Pedido Urgente (Tipo de Oscilante)	

Quadro 4-1: Variáveis de entrada e saídas definidas para o modelo de simulação.

4.2.3 Coleta de dados

- **Demanda diária**

A demanda diária foi calculada com base na previsão de vendas mensal da empresa para cada tipo de produto. A demanda diária foi estabelecida dividindo-se a demanda mensal pela quantidade de dias trabalhados no mês (Tabela 4-1 e Tabela 4-2). Foi estabelecido regime de trabalho diário de 1 turno de 8,8 horas, em todos os meses do ano.

Produto	Label (Processo)	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maiο	Junho
Padrão 1	1	48,252	64,379	36,181	12,204	13,300	26,449
Padrão 2	2	10,393	13,867	7,793	2,629	2,865	5,697
Padrão 3	3	1,303	1,738	977	330	359	714
Padrão 4	4	6,066	8,094	4,549	1,534	1,672	3,325
Quantidade de linhas funcionando		2	3	2	1	1	1
Dias trabalhados no mês		21	20	23	21	22	22
Ordem de produção diária	Produto Padrão 1	2298	3066	1723	581	633	1259
	Produto Padrão 2	495	660	371	125	136	271
	Produto Padrão 3	62	83	47	16	17	34
	Produto Padrão 4	289	385	217	73	80	158

Tabela 4-1: Ordem de produção diária de cada tipo de produto (Janeiro a Junho)

Produto	Label (Processo)	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
Padrão 1	1	35,974	49,802	74,128	64,788	73,422
Padrão 2	2	7,748	10,727	15,966	13,955	15,814
Padrão 3	3	971	1,345	2,002	1,749	1,982
Padrão 4	4	4,523	6,261	9,319	8,145	9,230
Quantidade de linhas funcionando		2	2	3	3	3
Dias trabalhados no mês		23	22	21	22	22
Ordem de produção diária	Produto Padrão 1	1713	2372	3530	3085	3496
	Produto Padrão 2	369	511	760	665	753
	Produto Padrão 3	46	64	95	83	94
	Produto Padrão 4	215	298	444	388	440

Tabela 4-2: Ordem de produção diária de cada tipo de produto (Julho a Dezembro)

A quantidade de linhas funcionando está relacionada com as estações de trabalho da primeira parte do processo que possibilita trabalhar nos dois lados com postos em paralelo:

- Quando uma linha está funcionando, significa que apenas uma das duas linhas de embalagem (extremidades) está operando, e com operadores de um único lado da esteira (sem estações em paralelo);
- Quando estão funcionando duas linhas, significa que as duas linhas de embalagem estão operando, e com operadores de um único lado da esteira;
- Já com três linhas, significa que as duas linhas de embalagem estão operando, e uma delas está funcionando com postos de trabalho dos dois lados da esteira (estações em paralelo).

- **Tempos de processamento**

Para definição dos tempos de processamento, foi realizado estudo estatístico baseado em amostras de tempos históricos fornecidos pela empresa. A estatística descritiva dos tempos analisados é apresentada na Tabela 4-3.

Operações e tempos de embalagem dos oscilantes (em segundos)							
Produto Padrão 1							
N. Op.	Operações	n	Menor	Média	Maior	s	CV (%)
1	Abastecimento motor	1					
2	Teste de motor	10	17,13	19,95	23,59	1,753	8,8%
3	Colar etiquetas	7	5,96	9,06	11,22	2,125	23,5%
4	Embalar motor na divisória	4	6,91	7,79	9,16	0,977	12,6%
5	Disponer motor dentro da caixa	4	7,78	7,99	8,30	0,224	2,8%
6	Disponer hélice/grade dentro da caixa	4	3,14	4,70	7,18	1,807	38,5%
7	Disponer chavinha/ espelho/ suporte na caixa	3	4,01	4,06	4,16	0,09	2,2%
8	Disponer kit, fechar caixa e embalar	4	5,10	5,68	7,20	1,02	18,0%
9	Selar caixa	20	2,62	3,05	3,98	0,34	11,1%
10	Disponer caixa embalada no pallet e levar expedição	4	6,23	6,41	6,56	0,155	2,4%
11	Transporte de pallets para expedição	1					
Produto Padrão 2							
N. Op.	Operações	n	Menor	Média	Maior	S	CV (%)
1	Abastecimento motor	1					
2	Teste de motor	10	17,13	19,95	23,59	1,75	8,8%
3	Colar etiquetas	7	5,96	9,06	11,22	2,13	23,5%
4	Embalar motor na divisória	4	6,91	7,79	9,16	0,98	12,6%
5	Disponer motor dentro da caixa	4	7,78	7,99	8,30	0,22	2,8%
6	Disponer hélice/grade dentro da caixa	4	3,14	4,70	7,18	1,81	38,5%
7	Disponer kit, fechar caixa e embalar	4	5,10	5,68	7,20	1,02	18,0%
8	Selar caixa	20	2,62	3,05	3,98	0,34	11,1%
9	Disponer caixa embalada no pallet e levar expedição	4	6,23	6,41	6,56	0,15	2,3%
Produto Padrão 3							
N. Op.	Operações	n	Menor	Média	Maior	S	CV (%)
1	Abastecimento motor	1					
2	Montar grade no motor	1					
3	Montar hélice	1					
4	Montar grade com grapa	1					
5	Testar motor e colar etiqueta	1					
6	Disponer divisória e pezinho dentro da caixa	1					
7	Montar caixa e dispor motor dentro da caixa	1					
8	Disponer kit fechar caixa e selar	1					
9	Selar caixa	20	2,62	3,05	3,98	0,34	11,1%
10	Transporte de pallets para expedição	1					
Produto Padrão 4							
N. Op.	Operações	n	Menor	Média	Maior	S	CV (%)
1	Abastecimento motor	6	19,03	40,59	58,45	13,67	33,7%
2	Montar grade no motor	8	21,08	24,83	26,87	2,06	8,3%
3	Montar hélice	6	10,45	13,79	18,56	3,25	23,6%
4	Montar grade PLAST. + LOGO	25	11,88	17,40	28,48	3,11	17,9%
5	Testar motor, colar etiqueta e ensacar	19	20,23	27,73	33,38	3,90	14,1%
6	Carimbar e colar etiqueta na caixa	12	2,04	2,66	3,23	0,35	13,2%
7	Abrir caixa, dispor divisória, dispor suporte, dobrar divisória	10	9,58	11,17	12,51	1,01	9,0%
8	Disponer motor, dispor kit e selar caixa	11	8,33	11,00	13,88	1,87	17,0%

Tabela 4-3: Estatística descritiva das amostras de tempos de processamento

Uma análise preliminar dos dados fornecidos mostra que:

- i) A quantidade de tempos por operação não são suficientes para realizar estudo estatístico com alto grau de confiança;
- ii) Existem operações similares entre diferentes produtos.

Para melhorar a abordagem de tempos para o modelo SED, foi realizada uma entrevista com a equipe de processistas da empresa para entender o comportamento da variabilidade nas operações. Também foi questionado sobre esta similaridade nas operações. Segundo eles, os postos de trabalho foram organizados com operações elementares, de forma que não há variabilidade acentuada, sendo significativa somente quando ocorrem problemas durante a operação. Em termos percentuais, eles consideram “normal” uma variação de até 20% acima do valor esperado para a operação.

Quanto à similaridade das operações, foi relatado que existe semelhança nas operações do produto Padrão 1 e 2. As operações são exatamente as mesmas, porém com peças de códigos diferentes. Desta forma, os tempos das operações semelhantes foram pareados, para aumentar o tamanho da amostra. Para modelar os tempos de forma probabilística, foi adotada a seguinte estratégia:

- Operações com um único tempo representativo: tempo determinístico, representado por seu valor coletado;
- Operações com mais 10 elementos na amostra: análise no *software* ExpertFit para elaboração de testes de aderência;
- Operações com mais de 1 elemento na amostra e menos que 10: aproximação para distribuição triangular, com mínimo = mínimo da amostra; moda = média da amostra; e máximo = máximo da amostra). Esta abordagem para distribuição triangular foi assumida após análise descritiva dos dados, mostrando que a média causava uma assimetria negativa na distribuição.

Os tempos de processamento modelados para cada produto são apresentados na Tabela 4-4.

Operações e tempos de embalagem dos oscilantes (em segundos)			
Produto Padrão 1			
Op.	Operações	Abordagem	Ajustado para o FlexSim
1	Abastecimento motor	Determinístico	16,5
2	Teste de motor	ExpertFit	loglogistic(11,766312; 8,025529; 8,844034)
3	Colar etiquetas	triangular	triangular (5,43; 11,8; 11,1; 0)
4	Embalar motor na divisória	triangular	triangular (6,91; 9,16; 7,785; 0)
5	Disponer motor dentro da caixa	triangular	triangular (7,78; 8,3; 7,985; 0)
6	Disponer hélice/grade dentro da caixa	triangular	triangular (3,14; 7,18; 4,6975; 0)
7	Disponer chavinha/ espelho/ suporte na caixa	triangular	triangular (4,01; 4,16; 4,06; 0)
8	Disponer kit, fechar caixa e embalar	triangular	triangular (5,1; 7,2; 5,6775; 0)
9	Selar caixa	ExpertFit	pearsont6(2,295673; 0,043108; 99,974938; 6,664015)
10	Disponer caixa embalada no pallet e levar expedição	triangular	triangular (6,23; 6,56; 6,4125; 0)
11	Transporte de pallets para expedição	Determinístico	16,5
Produto Padrão 2			
Op.	Operações	Abordagem	Ajustado para o FlexSim
1	Abastecimento motor	Determinístico	16,5
2	Teste de motor	ExpertFit	loglogistic(11,766312; 8,025529; 8,844034)
3	Colar etiquetas	triangular	triangular (5,43; 11,8; 11,1; 0)
4	Embalar motor na divisória	triangular	triangular (6,91; 9,16; 7,785; 0)
5	Disponer motor dentro da caixa	triangular	triangular (7,78; 8,3; 7,985; 0)
6	Disponer hélice/grade dentro da caixa	triangular	triangular (3,14; 7,18; 4,6975; 0)
7	Disponer kit, fechar caixa e embalar	triangular	triangular (5,1; 7,2; 5,6775; 0)
8	Selar caixa	ExpertFit	pearsont6(2,295673; 0,043108; 99,974938; 6,664015)
9	Disponer caixa embalada no pallet e levar expedição	triangular	triangular (6,23; 6,56; 6,4125; 0)
Produto Padrão 3			
Op.	Operações	Abordagem	Ajustado para o FlexSim
1	Abastecimento motor	Determinístico	38,07
2	Montar grade no motor	Determinístico	23,60
3	Montar hélice	Determinístico	19,36
4	Montar grade com grapa 1	Determinístico	31,22
5	Testar motor e colar etiqueta 1	Determinístico	29,47
6	Disponer divisória e pezinho dentro da caixa	Determinístico	11,37
7	Montar caixa e dispor motor dentro da caixa	Determinístico	7,05
8	Disponer kit fechar caixa e selar	Determinístico	4,01
9	Selar caixa	Probabilístico	triangular (2,48; 4; 2,68, 0)
10	Transporte de pallets para expedição	Determinístico	38,07
Produto Padrão 4			
Op.	Operações	Abordagem	Tempo ajustado FlexSim
1	Abastecimento motor	triangular	triangular (19,03; 58,45; 40,59)
2	Montar grade no motor	triangular	triangular (17; 24; 19,1; 0)
3	Montar hélice	triangular	triangular (10; 19; 10,9; 0)
4	Montar grade PLAST. + LOGO	ExpertFit	loglogistic(0,000000; 17,150125; 11,931536)
5	Testar motor, colar etiqueta e ensacar	ExpertFit	beta(15,181859; 34,607460; 3,357964; 1,837774)
6	Carimbar e colar etiqueta na caixa	ExpertFit	inversegaussian(0,665492; 1,992841; 68,997432)
7	Abrir caixa, dispor divisória, dispor suporte, dobrar divisória	ExpertFit	beta(9,404742; 12,626552; 1,043941; 0,863780)
8	Disponer motor, dispor kit e selar caixa	ExpertFit	erlang(7,571305; 1,143807; 3,000000)

Tabela 4-4: Tempos de processamento para embalagem dos oscilantes

Do mesmo modo foram analisados os tempos para o preparo de grades. As operações de preparo para as grades são as mesmas para os dois tipos (conforme a Tabela 4-5), porém os tempos de processamento são diferentes devido a suas diferenças de tamanho, que dificultam o manuseio.

Grade A (tempos em segundos)							
N. Op.	Operações	n	Menor	Média	Maior	s	CV (%)
1	Abastecer calhar de peças	1					
2	Abastecedor de linha	1					
3	Bater grade	14	2,71	4,33	7,52	1,37	31,6%
4	Montar logo	5	4,92	5,62	6,26	0,48	8,5%
Grade B (tempos em segundos)							
N. Op.	Operações	n	Menor	Média	Maior	s	CV (%)
1	Abastecer calhar de peças	1					
2	Abastecedor de linha	1					
3	Bater grade	14	2,71	3,86	4,48	0,60	15,5%
4	Montar logo	3	5,56	5,64	5,70	0,07	1,2%

Tabela 4-5: Estatística descritiva dos tempos de preparação de grades

Os tempos probabilísticos para as grades são apresentados na Tabela Tabela 4-6.

Grade A (tempos em segundos)			
N. Op.	Operações	Abordagem	Tempo ajustado FlexSim
1	Abastecer calhar de peças	Determinístico	16,50
2	Abastecedor de linha	Determinístico	16,50
3	Bater grade	ExpertFit	loglogistic(2,083769, 1,929926; 3,176513)
4	Montar logo	triangular	triangular (4,92; 6,26; 5,62; 0)
Grade B (tempos em segundos)			
N. Op.	Operações	Abordagem	Tempo ajustado FlexSim
1	Abastecer calhar de peças	Determinístico	16,50
2	Abastecedor de linha	Determinístico	16,50
3	Bater grade	ExpertFit	johnsonbounded(2,608651; 4,487877; -0,555977; 0,477032)
4	Montar logo	triangular	triangular (5,56; 5,70; 5,64; 0)

Tabela 4-6: Tempos de preparação das grades

- **Pedido Urgente**

Os pedidos urgentes podem estar relacionados com qualquer um dos 4 Tipos de Produtos considerados para o modelo de simulação. Não existe um histórico formal e registrado sobre essas ocorrências. Desta forma, esta variável de entrada foi definida conforme os relatos dos processistas:

- Produto Tipo 1: é o mais vendido (mais de 75% das vendas), e que geralmente chega pedidos urgentes de maiores quantidades (até 400 itens);
- Produto Tipo 2: possui uma saída intermediária (15% das vendas). Os pedidos urgentes podem chegar até 200 itens;

- Produto Tipo 3 e Tipo 4: são os menos vendidos. Os pedidos urgentes geralmente são feitos para completar uma carga. Podem variar de 20 a 50 itens.

Porém, independentemente do tamanho do pedido urgente, o lote de produção é de múltiplos de 30, para completar o *pallet*. Para o modelo de simulação, foram definidos pedidos urgentes constantes, considerando a quantidade de *pallets* para cada Tipo de Produto, conforme a Tabela 4-7.

Dia da simulação	Produto	Quantidade de <i>pallets</i>
Dia 1	Tipo 1	10
Dia 2	Tipo 2	5
Dia 3	Tipo 3	2
Dia 4	Tipo 4	2
Dia 5	Tipo 1	10
Dia 6	Tipo 2	5
Dia 7	Tipo 3	2
Dia 8	Tipo 4	2
Dia 9	Tipo 1	10
Dia 10	Tipo 2	5
Dia 11	Tipo 3	2
Dia 12	Tipo 4	2
Dia 13	Tipo 1	10
Dia 14	Tipo 2	5
Dia 15	Tipo 3	2
Dia 16	Tipo 4	2
Dia 17	Tipo 1	10
Dia 18	Tipo 2	5
Dia 19	Tipo 3	2
Dia 20	Tipo 4	2
Dia 21	Tipo 1	10

Tabela 4-7: Quantidade de *pallets* de cada Tipo de Produto para pedido urgente

4.2.4 Programação do modelo computacional SED

O modelo computacional foi construído no *software* de simulação de Eventos Discretos FlexSim. Este *software* possui diversas características desejáveis para um *software* de simulação, conforme critérios definidos por Chwif e Medina (2014). Para desenvolvimento do modelo proposto, as principais características são: análise de dados de entrada, análise estatística dos resultados, capacidade de geração de vídeos, módulo depurador do modelo, integração com outros *softwares*, uso de distribuições de probabilidade, modelagem orientada

a objetos e documentação (manual) detalhada. O FlexSim também possui animação em 3D, o que facilita a visualização do comportamento e validação informal do modelo. Outra vantagem da animação em 3D é a maior qualidade de representação do sistema real, que facilita a apresentação e entendimento da simulação.

4.2.5 Etapas de construção do modelo SED

As linhas de preparação de grades e embalagem de oscilantes foram construídas independentes, para observar os seus comportamentos internos. Posteriormente, foram criados os 4 tipos de motores e grades que irão circular pelo modelo. Na sequência foram inseridos os tempos de processamento analisados estatisticamente (Seção 4.2.3).

Em seguida foi programado o abastecimento de grades para as linhas de embalagem. As grandes metálicas, que são preparadas na linha central (grade A e B), possuem fornecimento limitado a capacidade de preparação, porém não ocorrem faltas de abastecimento. Desta forma, foram realizados testes para definição de um nível de estoque inicial, que suporte a produção do turno do dia sem interromper o abastecimento das linhas embalagem. A grade plástica (grade C) é produzida externamente e não possui etapa de controle de qualidade (preparação), sendo abastecida diretamente na linha, sem que ocorra falta. Estes abastecimentos são representados na animação como filas.

Com a lógica funcionando para uma das linhas de embalagem (fluxo de entidades e tempos de processamento), os mesmos procedimentos foram replicados para a segunda linha de embalagem.

Por fim, foram criados os gráficos para acompanhar em tempo real de simulação as estatísticas do modelo.

4.2.6 Dinâmica de funcionamento do modelo computacional SED

A entrada de dados foi realizada pela importação de planilha eletrônica. A cada rodada o modelo recebe as ordens diárias de embalagem de oscilantes, definidas como tempo entre chegadas ao setor de embalagem. De maneira análoga funcionam as ordens para preparação de grades.

Quando os motores e as grades chegam ao setor elas vão para uma fila esperando para serem colocados na linha para processamento. Os motores e grades são colocados nas suas respectivas linhas até se encontrarem na junção da primeira com a segunda parte de cada linha

de embalagem. Neste ponto são agrupados e tornam-se uma única entidade. Em seguida, o motor com a grade traseira acoplada é processado pela continuidade da linha. No ponto final de cada linha de embalagem, há um recurso que recebe um *pallet* e, aguarda a chegada de 30 caixas de oscilantes para ser transportado para a expedição, representada por racks. Na Figura 4-2 é mostrada uma imagem (vista superior) do modelo SED programado no *software* FlexSim.

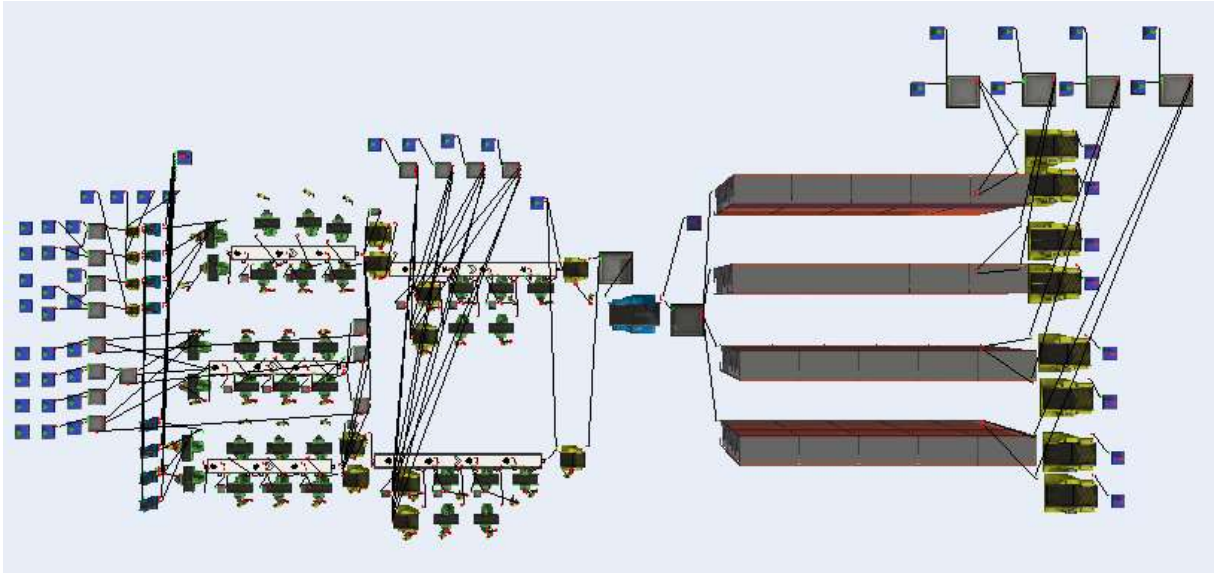


Figura 4-2: Imagem do modelo de simulação SED programado no FlexSim

Na parte final do modelo, logo após os racks, há uma lógica criada para separação da produção “normal” dos pedidos urgentes. Os *pallets* que saem da “Chegada de Pallet 1”, “Chegada de Pallet 2”, “Chegada de Pallet 3” e “Chegada de Pallet 4” são referentes da produção “normal” com a mesma taxa de chegada da entrada do processo. Já as chegadas “PU 1”, “PU 2”, “PU 3” e “PU 4” são os *pallets* de pedidos urgentes, com uma chegada única por dia. Na Figura 4-3 é mostrada uma imagem do FlexSim ilustrando essa lógica de separação dos pedidos.

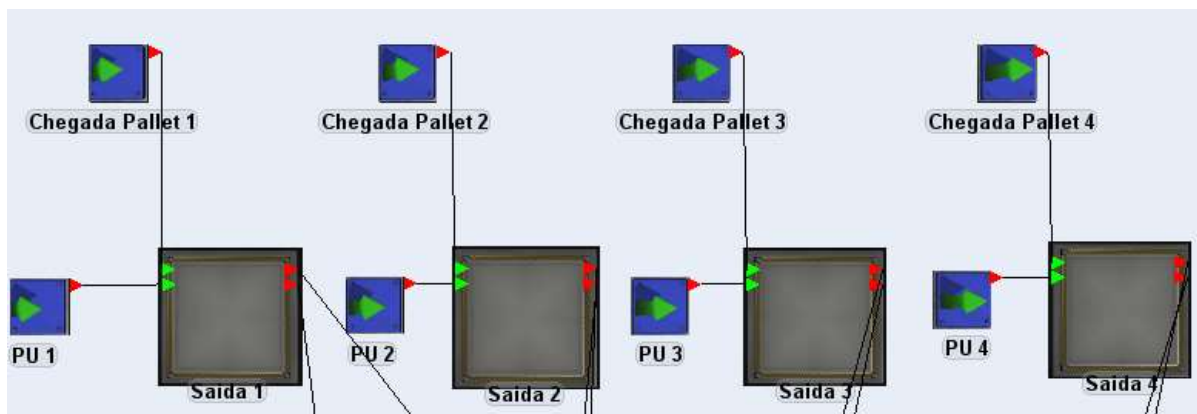


Figura 4-3: Imagem do FlexSim ilustrando a lógica de Pedidos Urgentes no modelo SED

Em termos de animação, foi considerado somente o motor e a grade como representante do oscilante, e os *pallets*. Os outros componentes foram suprimidos para não sobrecarregar o modelo durante sua execução.

4.2.7 Verificação do modelo computacional SED

O modelo computacional foi verificado seguindo as técnicas apresentadas por Chwif e Medina (2014). Conforme descrito no item anterior, é possível observar que o modelo foi construído de forma modular, ou seja, cada parte foi programada e testada, antes de passar para programação da próxima parte: modelo foi iniciado por uma linha de embalagem, depois duplicou-se para obter a segunda, depois linha de preparação de grades e por fim, os abastecimentos externos. Além da construção modular, o modelo foi verificado acompanhando a evolução dos eventos futuros pelo depurador do FlexSim. O funcionamento de cada parte implementada pôde ser observado pela visualização da animação do modelo.

4.2.8 Validação do modelo computacional SED

A validação de um modelo de simulação é o processo de verificação se o seu comportamento funciona como sistema real (CHWIF; MEDINA, 2014). Segundo os autores, não é possível validar um modelo na prática, mas sim aumentar a confiança com que ele representa a realidade. Existem procedimentos diferentes para validação do modelo conforme seu comportamento terminal ou não-terminal.

O sistema de embalagem de oscilantes pode ser classificado como um sistema terminal, pois a cada rodada o modelo possui as mesmas condições iniciais (variáveis de entrada) e o fim da rodada é caracterizado pelo encerramento do turno. Para sistemas terminais, a validação do modelo pode ser realizada verificando se os resultados de interesse (saídas do modelo) apresentam intervalo de confiança aceitável.

O modelo do setor de embalagem de oscilantes foi analisado em um horizonte mensal. Na Figura 4-5 é apresentado um gráfico comparativo da Produção real em relação do modelo de simulação, para cada Tipo de Produto. Este modelo foi executado com 5 replicações.

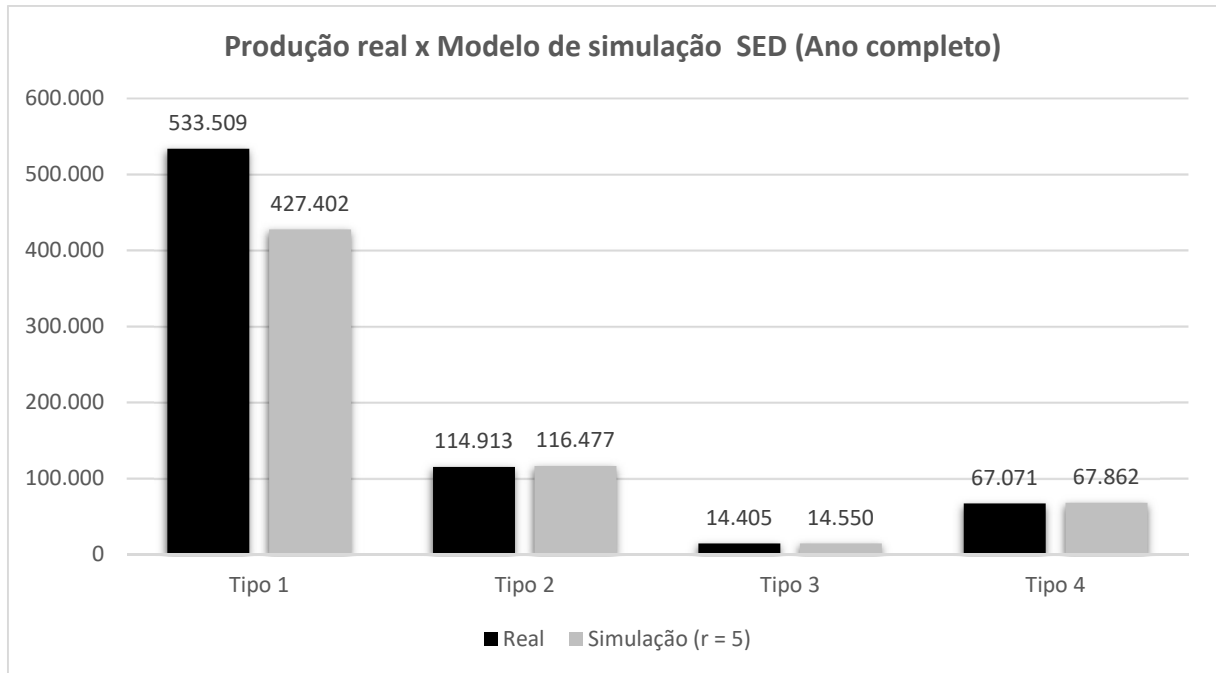


Figura 4-4: Produção real x modelo de simulação por tipo de produto

É possível observar que os resultados para os Produtos 2, 3 e 4 ficaram muito próximos dos dados históricos, com variações de 1,4%, 1,0% e 1,2% respectivamente. A maior diferença foi obtida para o Produto 1 (106.107 itens). Comparando-se essa diferença em horizonte diário (considerando 12 meses x 20 dias/mês), a diferença é de 443 itens, o que representa quase 15% da meta diária.

Para avaliar a variabilidade do processo, o modelo também foi executado com 10 replicações. Os resultados da estatística descritiva e inferência são apresentados na Tabela 4-8.

r	Média (unid.)	Desvio padrão amostral (unid.)	Coefficiente de variação (Cv%)	Confiança 100 (1 - α)	α	$t_{n-1, \alpha/2}$	Precisão (h)	Intervalo de Confiança (unid.)
5	626.292	96	0,02%	95%	0,05	2,78	119	(626.162; 626.428)
10	626.295	107	0,02%	95%	0,05	2,26	76	(626.218; 626.372)

Tabela 4-8: Estatística descritiva e inferência estatística do modelo para 5 e 10 replicações

A estatística mostra que o modelo de simulação apresenta uma baixa variabilidade. Tanto para 5 ou 10 replicações o Cv obtido foi de 0,02%. O aumento do número de replicações tende a reduzir o intervalo de confiança. Desta forma, pode-se concluir que o modelo está operando de modo estável, porém com resultados que não contém a produção anual histórica (729.899 unidades). Estes resultados podem ter sido influenciados pela quantidade insuficiente de dados para modelar os tempos de processamento.

A comparação anual entre os resultados do modelo e os dados históricos é apresentada na Figura 4-5.

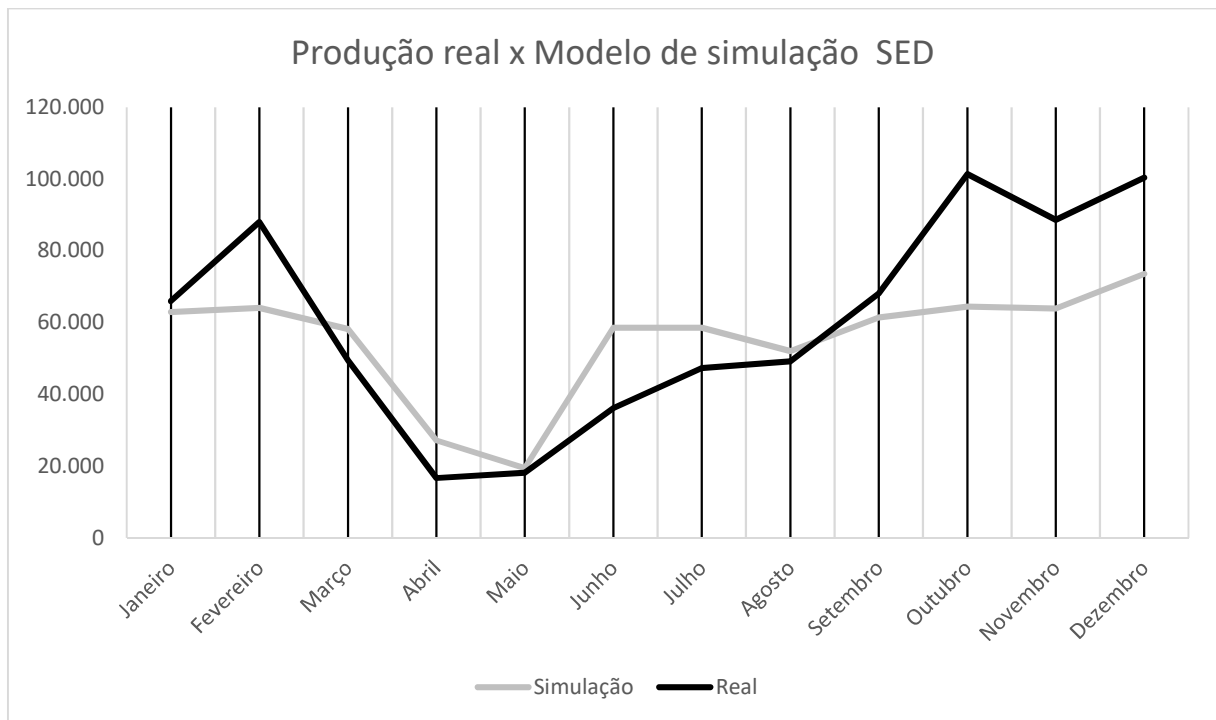


Figura 4-5: Série temporal comparando os resultados do modelo SED com a produção real.

As curvas mostradas na Figura 4-5 ilustram a dificuldade para validação do modelo. A empresa trabalha com um produto de característica sazonal, com picos de vendas nos meses do ano que a temperatura está elevada. Para o histórico do ano analisado estes picos ocorreram em Fevereiro, Outubro, Novembro e Dezembro. Nestes meses a empresa busca aumentar sua capacidade de produção, através de reorganizações internas. Por outro lado, nos meses Junho e Julho, o resultado da simulação é superior aos dados históricos. Esta diferença também pode ter sido causada pela diminuição momentânea de operadores da linha, por exemplo, para auxiliar na manutenção de equipamentos, inventário de estoque ou férias. Estas reorganizações são aumento ou diminuição de capacidade informais, difíceis de serem representadas em um modelo de simulação.

É importante salientar que o modelo SED construído será utilizado para comparar com o modelo SED-SBA, mostrando a contribuições dos agentes para o caso da “puxada na produção”. Apesar dos desvios em relação a produção histórica, o conhecimento do sistema real permite comparação com os resultados obtidos nos modelos construídos.

Para explorar a proposta de abordagem com agentes, foi definido o mês de Fevereiro para comparação com os resultados do modelo SED-SBA.

4.2.9 Considerações sobre modelo SED

Com o modelo computacional SED verificado e validado, o ambiente está pronto para interação dos agentes. Este modelo computacional possui todas entidades construídas como objetos, que permitem modelar interações e ações no ambiente, representando as tomadas de decisões dos agentes. A Figura 4-6 ilustra a estrutura de objetos do modelo computacional SED.

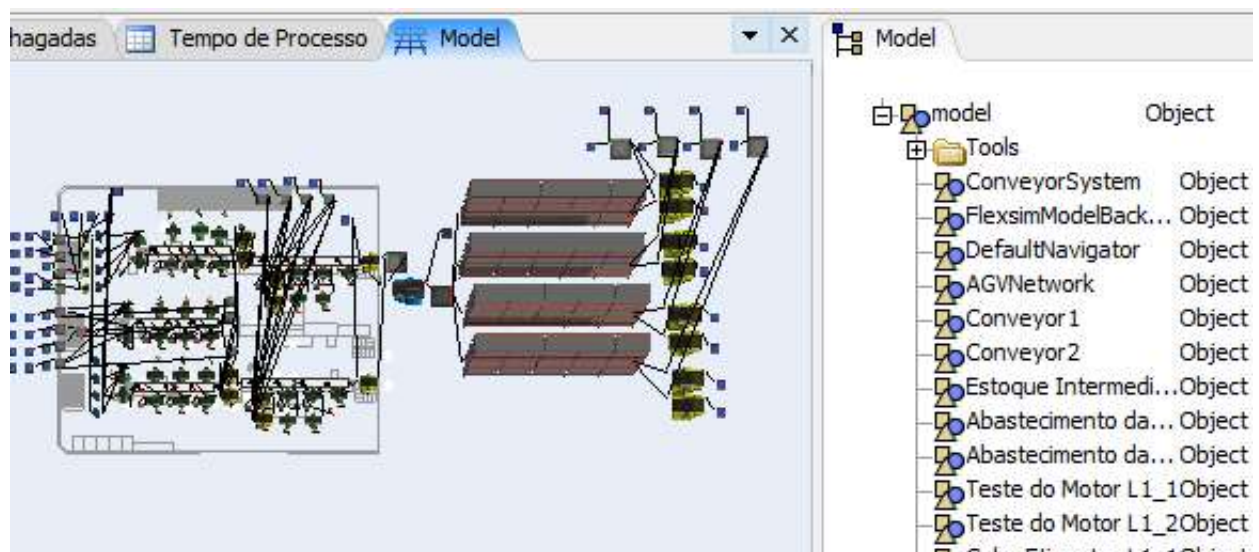


Figura 4-6: Imagem do FlexSim mostrando a estrutura de objetos do modelo SED

Na próxima etapa do processo de modelagem SED-SBA é iniciado a construção do modelo SBA.

4.3 Modelo SBA

Nesta Seção são apresentadas as etapas para construção do modelo SBA. Este modelo é baseado nas ações e decisões que os atores sociais realizam no processo produtivo (real) para atender ao pedido urgente. No ambiente computacional, este processo produtivo é representado pelo ambiente do modelo SED e os atores sociais modelados como agentes.

4.3.1 Definição da sociedade de agentes

A partir do estabelecimento das relações dos agentes com ambiente e outros agentes, é possível iniciar o processo de modelagem das interações e ações dos agentes utilizando a linguagem UML.

- **Funcionalidades do modelo SBA**

O conjunto de funcionalidades do modelo SBA é apresentado no diagrama de Caso de uso apresentado na Figura 4-7.

Erro! Fonte de referência não encontrada. Figura 4-7: Casos de uso para a “puxada na produção” no modelo SBA

Neste diagrama, o modelo SED é abordado como sendo um sistema externo onde os atores sociais (agentes) acessam para realizar procedimentos. Cada elipse representa situações de uso do sistema quando ocorre o problema da “puxada na produção” e mostram as interações que existem entre os agentes no modelo SBA.

O Caso de uso “**Analisar pedido urgente**” representa as ações que o agente Gerente Industrial (aGI) realiza no ambiente para calcular a Ordem de Produção Líquida Esperada (OPLP) para atendimento do pedido urgente. Para realizar esta análise, o aGI verifica o estoque de Produto Acabado (PA) de oscilante. Após calcular a Ordem de Produção Líquida Planejada (OPLP), envia estas informações para o agente Líder de Embalagem de Oscilantes (aLEO) e para o agente Processista (aP).

O Caso de uso “**Acelerar linha de embalagem**” representa a negociação entre o aP e o Agente Líder de Peças Plásticas (aLPP) para liberar os agentes Operadores Extras (aOE) para trabalharem na linha embalagem de oscilantes. A partir desta liberação, o Ap coordena o trabalho nas linhas interagindo com o aOE.

4.3.2 Especificação dos agentes

- **Caso de uso analisar pedido urgente**

Para detalhamento do Caso de uso analisar pedido urgente, foi utilizado um diagrama de Sequência mostrando as interações que o aGI deve realizar no sistema para analisar o pedido urgente. A análise do pedido urgente é apresentada na Figura 4-8.

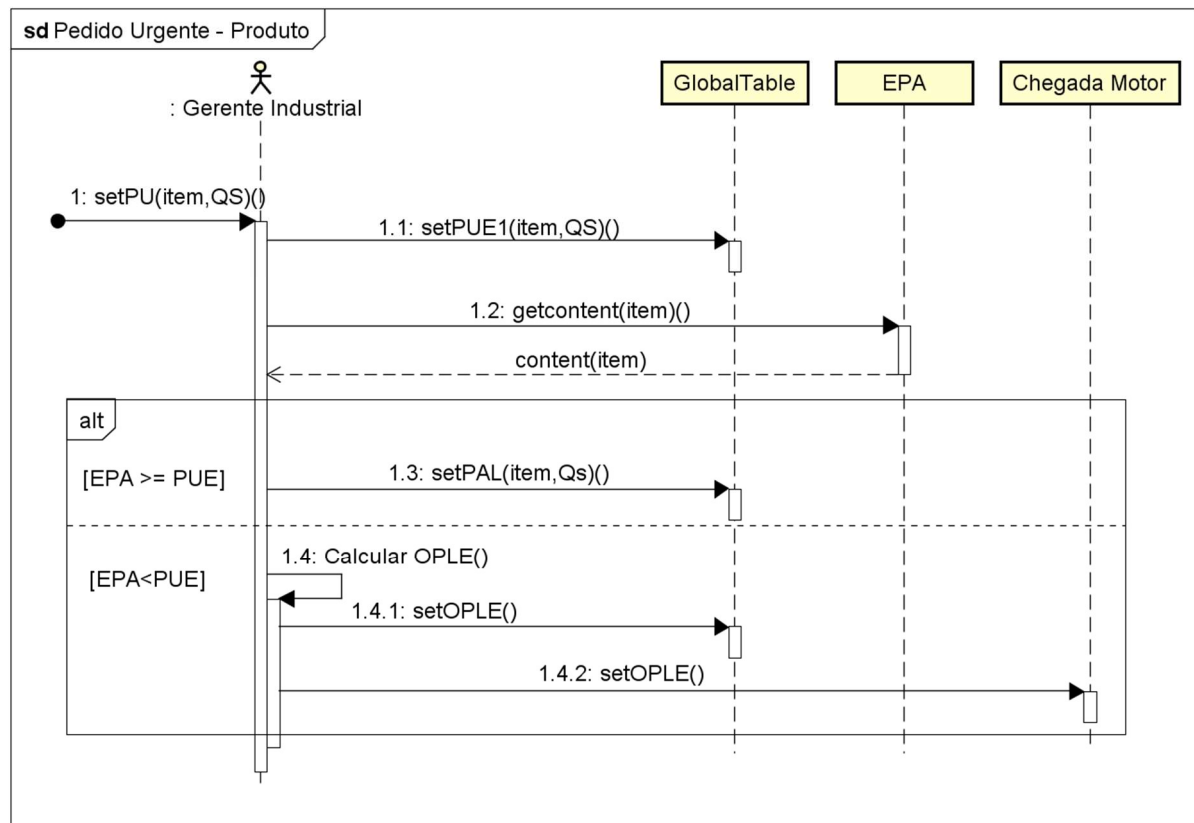


Figura 4-8: Comportamento aGI para o Pedido Urgente

Este diagrama deve ser interpretado como uma sequência de mensagens que são enviadas de um objeto para outro (setas apontam com diferentes origem e destino) ou mensagens enviadas para o mesmo objeto (seta com mesma origem e destino). As mensagens são enviadas solicitando informações sobre estados do sistema ou evocando a execução de métodos (ações no ambiente). Estas mensagens são síncronas, ou seja, apesar da leitura hierárquica e sequencial do diagrama, conforme o número das mensagens, não ocorre avanço do relógio de simulação.

Este diagrama de Sequência é iniciado com a chegada do Pedido Urgente (evento externo), contendo o tipo de produto solicitado e a quantidade. A partir deste evento, o aGI executa uma série de interações com outros objetos do modelo

Quando ocorre um pedido urgente, o agente Gerente Industrial (aGI) percebe no ambiente (1) e registra este pedido em uma tabela de histórico (1.1). De maneira síncrona, o aGI consulta o estoque de produto acabado de item solicitado no pedido urgente (1.2). Se o Estoque de Produto Acabado (EPA) for maior que o Pedido Urgente Esperado (PUE), o aGI libera o produto para carregamento (1.3). Caso o EPA seja menor que PUE, o aGI calcula a Ordem de Produção Líquida Esperada (OPLE), registra na tabela histórica e envia para setor de

embalagem de oscilantes (mensagens 1.4, 1.4.1 e 1.4.2). No **Erro! Fonte de referência não encontrada.** é apresentado o comportamento do aGI

- **Caso de uso acelerar linha de embalagem**

Quando a OPLE é enviada para o setor de embalagem de oscilantes, o aP se dirige para as linhas de embalagem para coordenar o trabalho. Neste momento, negocia com o aLPP a liberação de operadores do seu setor para tentar aumentar o ritmo da linha de embalagem.

No contexto real, para liberar os operadores, o Líder do Setor de Peças Plásticas realiza uma série de consultas nas condições do setor, como a verificação da programação da produção, o estoque atual de componentes, consulta o plano de manutenção preventiva. Estas consultas são realizadas buscando alterar a rotina do setor para atender à solicitação do Processista.

Como esta situação possui uma série de características condicionais que dificultam a construção de regras, a modelagem foi simplificada inserindo-se uma distribuição de probabilidade Uniforme variando de 0 a 2. Portanto, a cada dia que é necessário realizar a “puxada” esta variável sorteia um valor uniformemente variado entre 0 e 2, representando a quantidade de operadores liberados para o setor de Embalagem de Oscilantes. A quantidade de operadores liberados é independente do tamanho do pedido urgente. A interação entre o aP e o aLPP é apresentada na Figura 4-9.

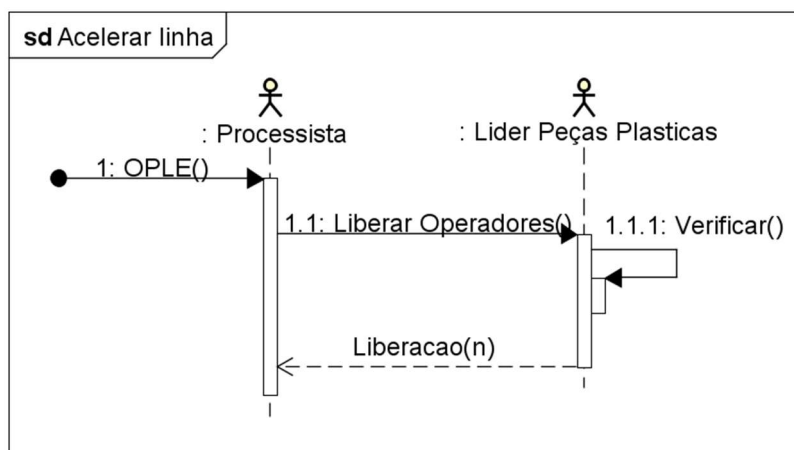


Figura 4-9: Interação entre o aP e o aLPP

No momento em que a OPLE é enviada para o setor de embalagem de oscilantes, o aP recebe esta informação (1) e negocia com o aLPP a liberação de operadores extras (1.2).

O aLPP, então, executa ação de “Verificar()”, onde é sorteado um número entre [0, 2], representando a quantidade de operadores extras liberados para trabalhar no setor de embalagem de oscilantes, e envia esta quantidade para o aP. Estes operadores liberados são os agentes Operadores Extras (aOE). A modelagem conceitual do aOE foi realizada utilizando-se diagrama de Estado conforme Figura 4-10.

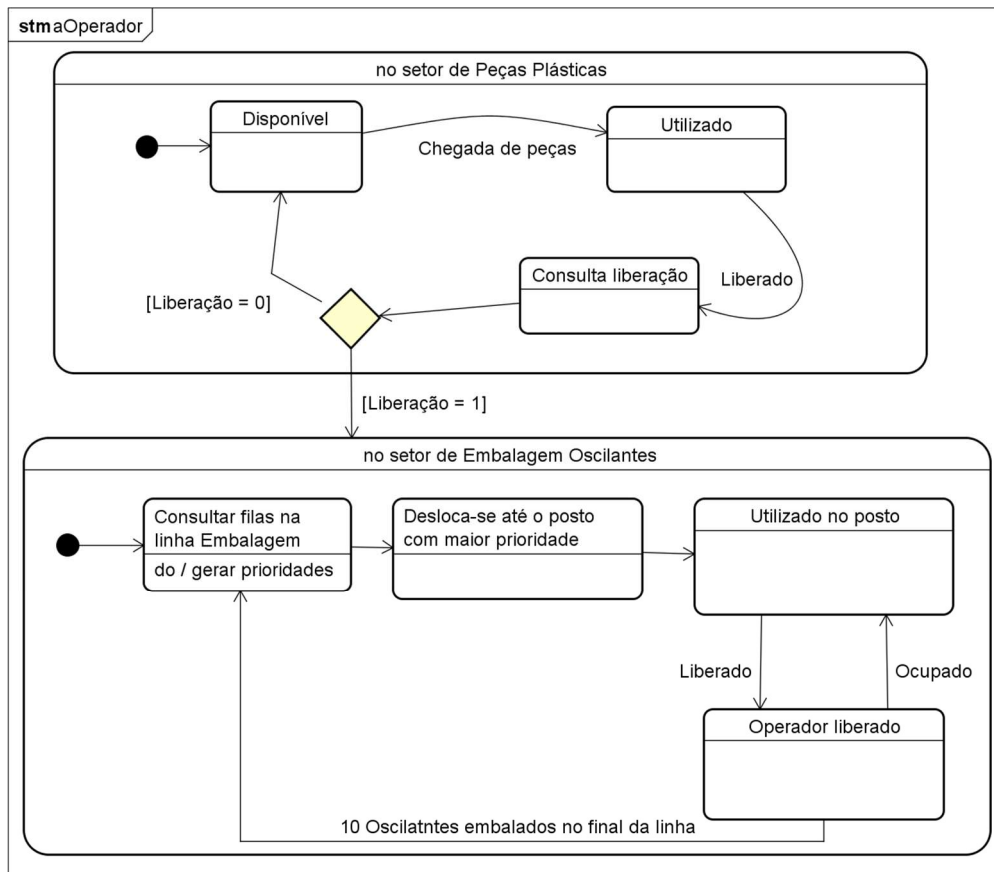


Figura 4-10: Comportamento do aOE

Este diagrama mostra os diferentes estados que o aOE pode assumir durante a simulação e as condições de guarda. Ao executar a simulação, este operador é automaticamente alocado no setor de peças plásticas e assume estado “Disponível”. Quando peças chegam ao seu posto de trabalho, o seu estado é alterado para “Ocupado”. Ao terminar a operação em uma peça este operador passa para o estado de “Consulta liberação”. Neste estado, o operador consulta se foi liberado pelo aLPP para trabalhar no setor de embalagem de oscilantes. Caso ele não seja liberado (condição de guarda Liberação = 0), o aOE permanece trabalhando no seu setor de origem.

Caso a condição de guarda mude para “Liberação = 1”, este operador desloca-se para o setor de embalagem de oscilantes, onde é gerada uma lista de prioridades de postos para que seja utilizado como operador extra. Este aOE permanece no posto processando 10 motores

e consulta novamente uma lista de prioridades. No final do turno, este aOE retorna para o setor de peças plásticas.

É importante observar que durante o detalhamento das funcionalidades do modelo baseado em agentes, não foi identificada nenhuma regra de comportamento atribuída ao Líder de Embalagem de Oscilantes para simular o caso da “puxada”, sendo possível eliminá-lo do projeto de agentes. Segundo Silva (2009) esta é uma prática recorrente na modelagem de *softwares* orientados a objetos, que acontece a partir do refinamento dos Casos de uso, ou seja, quando é iniciado o detalhamento das funcionalidades do sistema projetado.

4.3.3 Programação do modelo SBA

A programação do modelo SBA foi realizada com a interpretação dos diagramas UML, construídos na etapa anterior, para a linguagem FlexScript. Uma parte da programação dos agentes foi possível de ser realizada com uma ferramenta específica do FlexSim, denominada “Process Flow”. Esta ferramenta possui uma série de *templates* para modelar a lógica de um modelo SED, como desencadear ações a partir de eventos e modelar evolução de estados de uma entidade. Porém, as regras de comportamento foram programadas via código.

- **agente Gerente Industrial (aGI)**

Para programação do aGI foi utilizado um evento desencadeador que consulta diariamente a chegada de um pedido urgente com base em uma tabela. Com a consulta a este pedido, o aGI consulta o estoque de produto a e manda a ordem de produção urgente para embalagem de oscilantes, conforme diagrama de sequência apresentado na Figura 4-8.

Para representar este comportamento no ambiente SED foi utilizada a lógica de funcionamento do FlexSim, baseada no fluxo de entidades por controle de portas. Desta forma, foi criada uma nova chegada de motores para cada Tipo de Produto. Estas chegadas permanecem com as portas de saída fechadas, até que ocorra o pedido urgente, que necessite ser produzido. Estes motores receberam um atributo (“*Label*”) diferente dos motores da produção “normal” do dia para que seja possível identificá-lo no final do processo.

As portas abertas para liberar a chegada de motores permanecem abertas até o final do dia e só reabrem quando chegar um novo pedido urgente relacionado ao respectivo Tipo de Produto.

- **agente Operador Extra (aOE)**

Para programar o aOE foi necessário alterar a lógica de funcionamento dos operadores, que já estavam alocados as estações de trabalho para mudar de estações, conforme as necessidades do aP. Para alcançar este objetivo foi necessário programar os aOE para perceberem as prioridades das estações de trabalho geradas pelo aP.

Para entender a programação destes agentes, primeiramente é importante entender a lógica de funcionamento do FlexSim em relação a alocação de operadores. Os “*processors*” são as entidades fixas que utilizam os operadores para realizar sua atividade no modelo SED. O “*processor*” é o responsável pelo ciclo de “Segurar-Esperar-Liberar” (Seize-Delay-Release) dos operadores.

Quando o sistema demanda que vários operadores possam ser utilizados em um mesmo “*processor*” é necessário realizar a modelagem utilizando um “dispatcher” para controlar a alocação dos operadores. Porém, este “*processor*” deve estar disponível no momento da ocorrência de algum evento no modelo para que ele possa realizar suas funções.

Para que ocorra mais operadores trabalhando nas linhas de embalagem, é necessário que um “*processor*” correspondente a uma determinada estação de trabalho, esteja modelado e programado para ser utilizado quando necessário. Desta forma, o aP foi programado para elaborar prioridades de trabalho nas estações conforme o tamanho da fila do respectivo “*processor*” e controlar a possibilidade de uso não deste “*processor*”.

Quando o aOE entra no “*processor*”, este é liberado para receber os itens que serão processados. Esta lógica impediu de programar o modelo para que os aOE pudessem ser utilizados em todos os postos de trabalho da linha, conforme os requisitos especificados para estes agentes. Desta forma foram definidos dois postos de trabalho próximos para que os agentes pudessem trabalhar.

Para definir quais postos de trabalho teriam a possibilidade de receber operadores extras, foi observado os resultados da validação do modelo que apontaram para o maior erro, em relação aos dados históricos, para o Produto Tipo 1. Para este produto foram observados os postos de trabalho que possuem maior tempo de processamento. Desta forma, foram definidos os postos que realizam “Abastecimento Motor” e “Teste do Motor” como possibilidades de postos extras.

4.3.4 Modificações necessárias no modelo SED

Conforme a modelagem conceitual do modelo SBA, foi necessário realizar algumas modificações no modelo SED para possibilitar programar as regras de comportamento dos agentes. Para o aGI foi necessário somente inserir a chegada de motores e grades extras.

Para demonstrar o comportamento dos operadores como agentes, trocando de setores, foram criadas estações de trabalho (“processors”) próximo a embalagem de oscilantes representando o setor de Peças Plásticas com os operadores conectados a um “*dispatcher*” que controla a alocação dos operadores. A Figura 4-11 ilustra o novo modelo computacional.

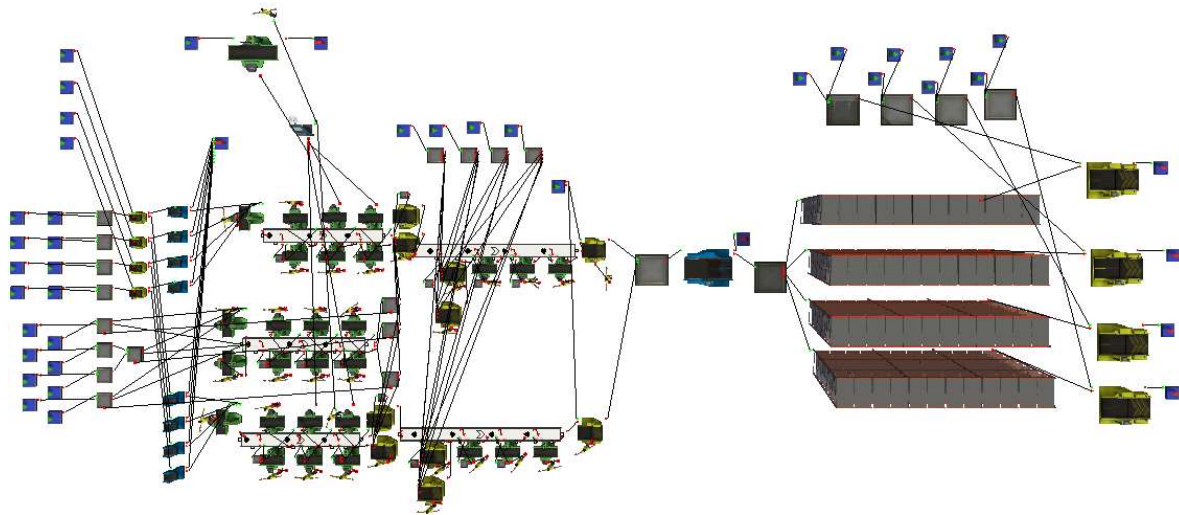


Figura 4-11: Novo modelo computacional após as mudanças necessárias para SBA

Com a modelagem conceitual dos agentes e alterações no ambiente SED, foi possível realizar a etapa de programação do modelo SBA.

4.3.5 Verificação e Validação do modelo SBA

De maneira análoga ao modelo SED, a verificação do modelo SBA foi realizada em partes (modular). As regras de comportamento especificadas nos diagramas UML foram sendo implementados individualmente e, as modificações no ambiente SED realizadas para suportar as ações dos agentes. Além disso, o depurador do FlexSim também foi utilizado na verificação, identificando os erros de programação durante a execução do modelo.

Já a validação ocorreu durante testes com execução da simulação, para verificar o comportamento dos agentes:

- Para o aGI foram monitorados os estoques dos Produtos e abertura ou não das portas para chegada de motores, representando os pedidos urgentes;
- Para o aP foram monitoradas as prioridades das estações de trabalho no momento em que os operadores são liberados para a linha.

4.4 Modelo híbrido SED-SBA

O modelo SED-SBA possui funcionamento semelhante ao modelo SED. A atuação dos agentes (modelo SBA) inicia-se somente quando ocorrer um Evento de Pedido Urgente. A dinâmica de funcionamento do modelo é a seguinte:

- O modelo será executado simulando 1 dia de trabalho, com turno de 8,8 horas/dia durante o mês de Fevereiro (21 dias trabalhados);
- Os estoques de produto acabado gerados a cada dia de trabalho são mantidos durante os dias trabalhados no mês;
- A cada dia chega um pedido urgente, conforme a Tabela 4-7;
- O **aGI** receberá o pedido urgente, iniciando o modelo SBA, com a execução de seu comportamento descrito na Seção 4.3.2, conforme o tipo do produto solicitado. Caso a quantidade em estoque seja suficiente, ele autoriza o carregamento, registra o histórico e o modelo SBA é encerrado neste dia. Caso contrário, calcula a Ordem de Produção Líquida Esperada (OPLE) para a embalagem de oscilantes;
- Com a liberação da OPLE, o **aP** negocia com o **aLPP** a liberação de operadores para compor a linha de embalagem. Neste momento, o **aLPP** executa seu comportamento e sorteia a quantidade de operadores que podem ser liberados. Estes operadores, modelados como agentes (**aOE**), se deslocam para os postos de trabalho priorizados para tentar acelerar a linha (diagrama de Estado apresentado na Figura 4-10).

Na Figura 4-12 é apresentada uma ilustração conceitual do ambiente SED-SBA.

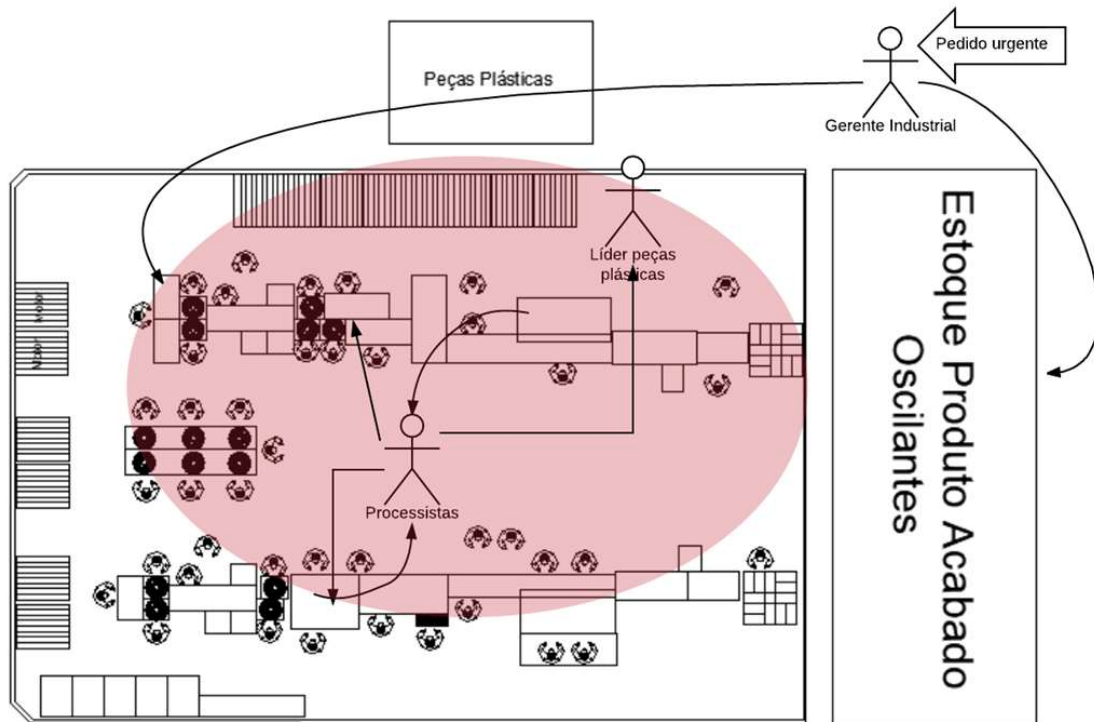


Figura 4-12: Ilustração conceitual do modelo SED-SBA

Com a finalização da construção do modelo é possível realizar os experimentos para investigar o desempenho do sistema e comportamento dos agentes.

4.5 Projeto experimental

Conforme o caso da “puxada na produção”, o modelo SED-SBA foi utilizado para avaliar quais as condições ambientais que favorecem a realização da “puxada”. Neste caso foram definidos os seguintes cenários:

- **Cenário 1:** modelo de simulação puramente baseado em Eventos Discretos, ocorrendo os eventos de Pedido Urgente diariamente, mas sem a inserção dos agentes;
- **Cenário 2:** modelo de simulação SED-SBA, com a ocorrência dos Pedidos Urgentes e as ações dos agentes para atingir a meta diária de produção.

Os resultados quantitativos do modelo foram comparados estatisticamente para verificar se existe diferença significativa nos resultados da simulação com a inserção dos agentes.

4.6 Resultados da simulação

Os resultados quantitativos dos cenários são apresentados na Tabela 4-9.

Produção	SED		SED-SBA	
	Média	s	Média	s
Tipo 1	38.117	55	21.002	270
Tipo 2	15.331	4	14.950	28
Tipo 3	1.800	0	12.363	985
Tipo 4	8.851	1	17.755	109
Total	64.099	58	66.070	844

Tabela 4-9: Resultados quantitativos dos cenários simulados

Analisando-se os resultados da simulação é possível observar que o modelo SED-SBA apresentou maior produção mensal, além de aumentar a variabilidade do modelo. Esta maior produção é causada pelo aumento do número de operadores na linha que contribuíram para diminuir o tempo de ciclo dos produtos e ao mesmo tempo causaram desbalanceamento das estações de trabalho, gerando essa maior variabilidade. Já o aGI foi responsável pelo maior balanceamento do mix processado, devido a liberação dos motores extras para atender aos pedidos urgentes. O gráfico de BoxPlot apresentado na Figura 4-13 mostra que os resultados destes modelos possuem diferença significativa no nível de 95% de confiança.

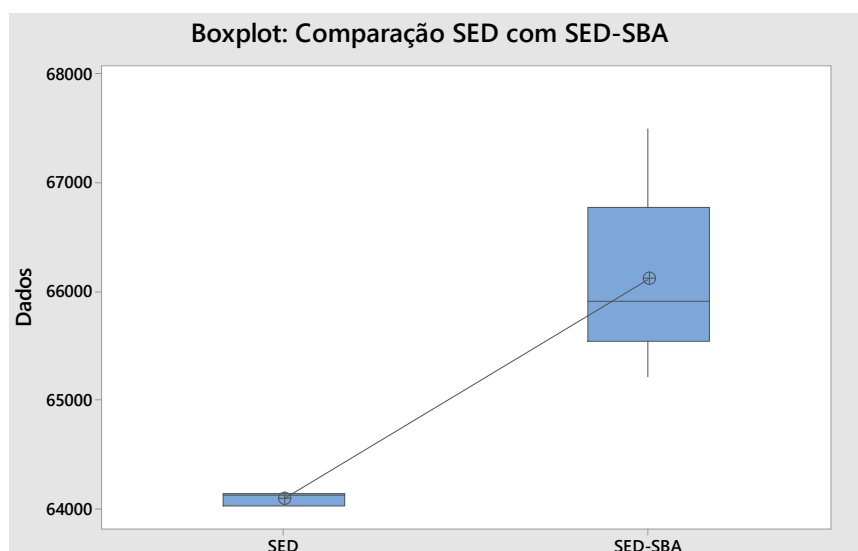


Figura 4-13: Análise estatística entre o modelo SED e o modelo SED-SBA

Os gráficos apresentados nas Figura 4-14 e Figura 4-15 mostram a formação dos *pallets* e atendimento de pedidos urgentes para cada tipo de produto, em relação ao tempo, para os modelos SED e SED-SBA respectivamente.

Atendimento de Pedidos Urgentes – Modelo SED

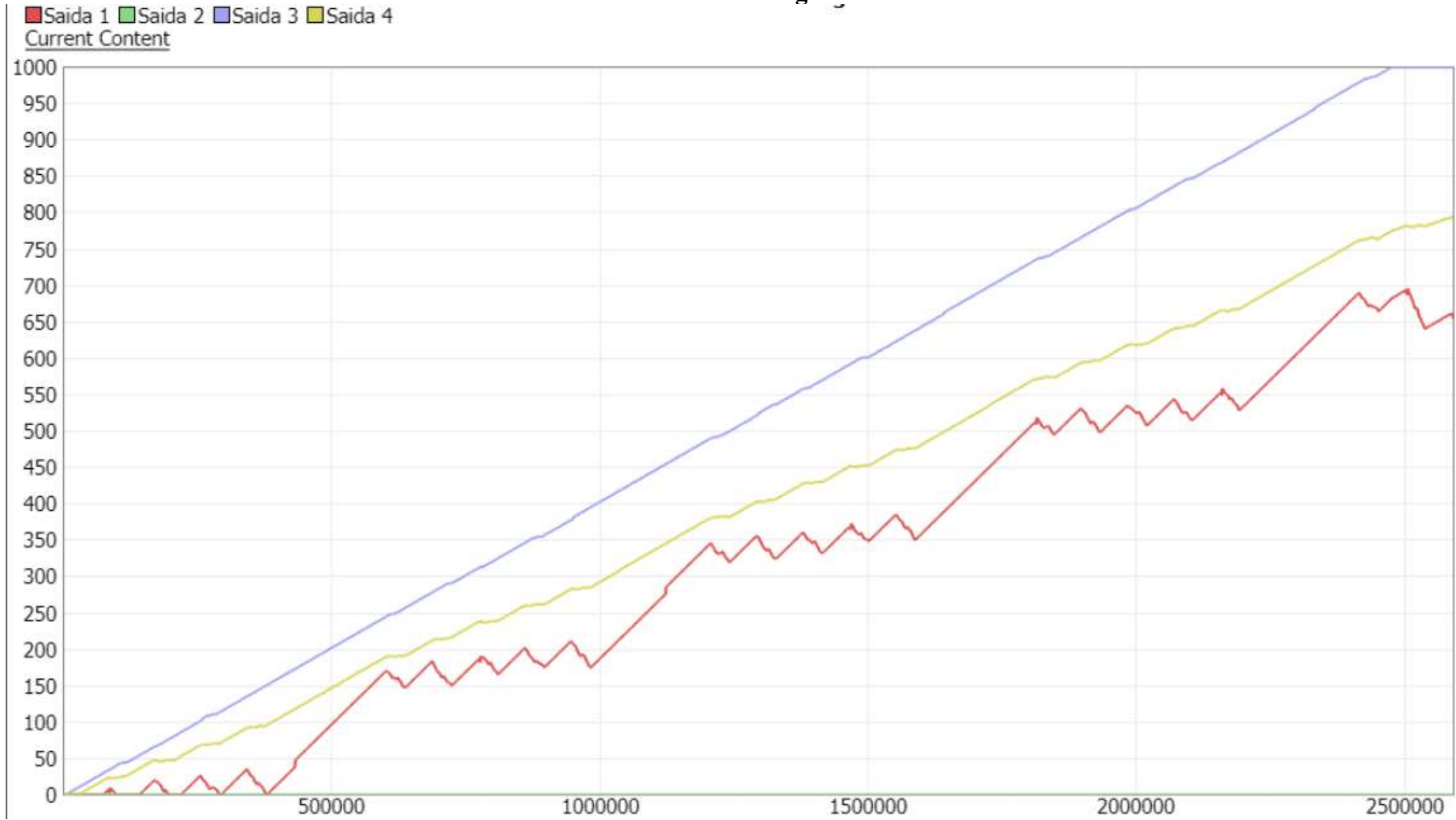


Figura 4-14: Atendimento de pedidos urgentes no modelo SED

Atendimento de Pedidos Urgentes – Modelo SED-SBA

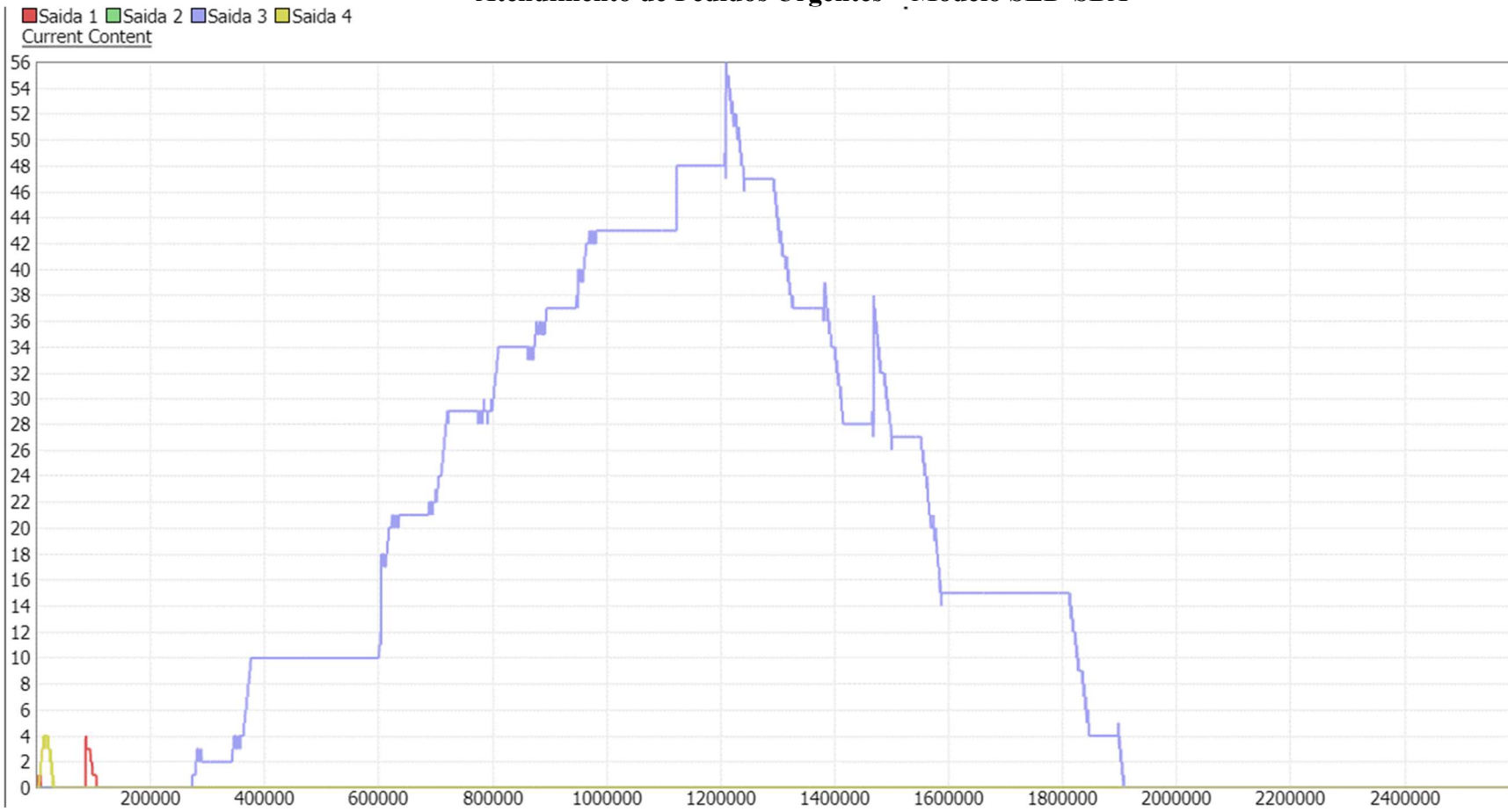


Figura 4-15: Atendimento pedidos urgentes no modelo SED-SBA

Nestes gráficos, o crescimento das curvas mostra chegada de pedidos urgentes. Quando o pedido é atendido, ocorre decréscimo (queda) no perfil da curva. De modo geral é possível observar que:

- Ambos modelos conseguiram atender ao Produto Tipo 2, sem necessitar de pedido urgente, ou seja, sempre havia quantidade suficiente de itens em estoque;
- Para o modelo SED: o Produto Tipo 1 foi atendido algumas vezes e outros Produtos não conseguiu atender;
- Para o modelo SED-SBA: todos os pedidos urgentes foram atendidos no dia, menos o Produto Tipo 3, que apresentou atraso.

4.7 Considerações finais sobre o desenvolvimento do modelo SED-SBA

Neste capítulo foi apresentado o desenvolvimento de um modelo SED-SBA, para simular um problema, baseado em um contexto real. Para construção deste modelo foi conduzido pelas etapas do processo de modelagem e simulação proposto na Seção 3.4. Para construção dos agentes buscou-se aplicar os pressupostos conceituais da SBA e a arquitetura proposta na Seção 2.5.

No próximo capítulo são apresentadas as reflexões sobre o processo de modelagem e simulação e suas contribuições para representação de sistemas de produção.

5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.1 Introdução

Neste capítulo são discutidos os resultados obtidos nesta pesquisa, considerando os referenciais de representação de sistemas técnicos em modelos de simulação e as características das abordagens de simulação de eventos discretos e da simulação baseada em agentes.

Na segunda Seção é apresentada uma caracterização do modelo SED-SBA desenvolvimento, conforme as características e definições da simulação baseada em agentes, encontradas na literatura e sintetizadas na RBS sobre o tema (seção 2.4).

Na sequência são discutidos os resultados quantitativos dos cenários definidos para o modelo, evidenciando a contribuição dos agentes na simulação do caso da “puxada na produção”.

Na quarta sequência são apresentadas reflexões sobre o processo, com objetivo de discutir a contribuição das técnicas e ferramentas de modelagem utilizadas. Como o processo de modelagem e simulação SED foi utilizado como base para estruturar o método voltado para o modelo híbrido, a análise reflexiva dos resultados foi estruturada, comparando-se suas etapas com o processo para SED

Por fim são discutidas as contribuições do modelo híbrido para representação do sistema de produção.

5.2 Caracterização conceitual do modelo SBA

A caracterização do modelo SED-SBA construído será realizada para validar suas características conceituais e pressupostos metodológicos.

O modelo SBA é composto de 4 agentes heterogêneos: Gerente Industrial (aGI), Líder Peças Plásticas (aLPP), Processista (aP) e Operadores Extras (aOE). Esta sociedade de agentes possui diferentes propriedades e nível de complexidade conforme a classificação proposta por Macal (2016). Os três primeiros agentes listados são classificados como agentes externos, objetos que não existem (não instanciados) no modelo. Já o aOE pode ser considerado como um pequeno grupo que está inserido dentro do modelo (interno).

O aGI e aLPP possuem estado interno formado por equações matemáticas que atualizam valores de variáveis e estados do modelo. Conforme as dificuldades para modelagem

das regras para o aLPP, suas regras foram reduzidas para uma distribuição de probabilidade, tornando-se um **agente-prescrito**. Do mesmo modo, o aP também possui comportamento limitado em mudar as prioridades e abrir e fechar as portas dos “processors”.

Já o aGI possui comportamento dinâmico em relação ao relógio de simulação, sendo considerado como pseudo-autônomo, pois é capaz de agir em resposta a aspectos do ambiente. Para forçar seu estímulo é necessário um evento disparador (*trigger*). Por fim, o aGI interage com objetos do ambiente, capturando informações para tomada de decisão. Desta forma pode ser classificado como **heterogêneo-autônomo-interativo**.

O grupo de agente aOE possuem estado interno complexo, especificado pelo FlexSim. Porém, as dificuldades em alterar suas funcionalidades para trabalharem de forma autônoma nos postos de trabalho, contribuíram para classificar estes agentes como **prescritos**.

A arquitetura utilizada para construção do modelo SBA é caracterizada como **reativa**, pois os agentes “atuam” no ambiente baseado em eventos e com regras de ações simples.

O modelo SBA construído permite classificá-lo como sendo, de fato, baseado em agentes (ABMS), diferenciando-o da simulação de multi agentes (MAS), conforme os referenciais conceituais sobre simulação com agentes apresentados na seção 2.4.

A abordagem do modelo foi definida para que as informações capturadas no ambiente e as decisões fossem executadas de modo descentralizado e com racionalidade limitada, ou seja, somente resultante de suas regras de interação e atuação programadas, independentes de outros estados do modelo SED.

Além disso possuem racionalidade limitada. O aGI não tem acesso a lista de pedidos urgentes para gerar um sequenciamento “ótimo” de produção, baseado em algum algoritmo ou heurística.

5.3 Análise dos resultados quantitativos do modelo SED-SBA

Os resultados quantitativos da simulação mostram o efeito da combinação de “atuação” dos agentes em um sistema. Com o aumento da quantidade de operadores nas estações com maior tempo de ciclo era esperado o aumento da produção.

Porém, a mudança do mix de produção, diminuindo a produção do Tipo 1, que possui tempos de processamento menor e, aumentando do Tipo 3 e 4 (maiores tempos de processamento), era esperado a redução da produção mensal. Estes resultados mostram o

potencial da complementariedade da SED com a SBA para analisar situações dinâmicas, tornando a simulação mais holística.

5.4 Reflexões sobre o processo de modelagem e simulação SED-SBA

A empresa fabricante dos ventiladores oscilantes possui estrutura verticalizada, com mais de 12 processos, que funcionam de forma independente, separados como sendo diferentes unidades de negócios ou “mini fábricas”, pois possuem diferentes características em relação aos aspectos dos produtos fabricados, organização da produção e organização do trabalho.

O sistema produtivo global funciona com uma lógica de cadeia de fornecimento entre setores internos, conforme a estratégia de produção e política de estoques, definidas pela empresa. O mercado consumidor em que a empresa atua é caracterizado pela concorrência em custos e pela velocidade de atendimento ao cliente. Segundo representantes da empresa, uma dimensão importante do mercado é a responsividade.

O ambiente dinâmico de gestão do processo de embalagem de oscilantes, caracterizado pela necessidade constante de solicitar abastecimento de componentes, trocas de produção e tentativas de acelerar a velocidade das linhas, foi o elemento propulsor para desenvolvimento do modelo SED-SBA.

5.4.1 Formulação do problema e definição dos objetivos do modelo

As discussões iniciais com os representantes da empresa para entender o sistema e o problema da “puxada na produção”, indicava que as funcionalidades dos *templates* do FlexSim não seriam suficientes para representar o sistema, necessitando de recursos de programação via código. Neste contexto, a noção de entidades inteligentes, modeladas como como agentes, surgiu como uma alternativa para simular o problema.

5.4.2 Modelo conceitual

O processo de modelagem e simulação envolve a construção de dois modelos distintos: um modelo conceitual e outro modelo computacional. O desenvolvimento do modelo conceitual é o ato de observar o funcionamento de um sistema real e traduzir em uma representação gráfica que suporte a construção do modelo computacional. Além disso, também

serve como um elemento de comunicação entre as partes interessadas no desenvolvimento do modelo (analista de simulação, programador, empresa contratante, etc).

Já o desenvolvimento do modelo computacional é a conversão deste modelo conceitual em um programa que represente o sistema, com auxílio de um *software* de simulação ou diretamente via código, utilizando uma linguagem específica. Desta forma, é importante discutir as contribuições da SBA para representação de sistemas produtivos, pela racionalidade de construção do seu modelo.

Chwif (1999) apresenta diversas ferramentas que podem ser utilizadas para construção de modelos conceituais em SED (ACD, IDEF0, RAD, SIPOC, OCER e fluxograma). Estas ferramentas são adequadas para a lógica de eventos discretos, por utilizarem visão de processo (entrada-processamento-saída), onde o sistema é representado por um conjunto de atividades sequenciais.

Porém, o uso de ferramentas com perspectiva de processo para modelagem conceitual dos agentes exigiria uma estrutura com muitos elementos sintáticos e processos de checagem, dificultando a conversão deste modelo para o código. Conforme os resultados da pesquisa, a linguagem UML permitiu construir um modelo conceitual SBA, partindo-se das funcionalidades dos agentes ao nível do sistema (Macro especificações), até o nível do código do programa (Micro especificações).

Além disso, esta linguagem é de alto nível de abstração, funcionando como elemento de comunicação entre o cliente e a equipe de desenvolvimento do *software*. A UML funciona como um suporte para obtenção do código do programa. Quanto maior for o nível de detalhes dos diagramas, maior será a facilidade que o analista de simulação terá para programar o código.

O desenvolvimento do modelo conceitual para SBA engloba toda a Fase 3 do método de pesquisa (Definição da sociedade de agentes e especificação). Este modelo foi pensado como sendo pessoas externas (agentes) que atuam no ambiente (modelo SED). Desta forma, o modelo conceitual de agentes foi construído com o objetivo de identificar quem eram as pessoas que tomavam decisões e quais são suas ações no contexto da “puxada na produção”.

Para identificar os usuários de um programa, Silva (2009) recomenda o uso do diagrama de Casos de uso, para representar funcionalidades de um software, mostrando os elementos externos que interagem com este programa. Desta forma foi possível identificar os agentes e obter uma declaração (em alto nível) do que eles devem fazer no ambiente. Além disso, também mostrou funcionalidades que são compartilhadas entre dois agentes, evidenciando necessidade de interações no ambiente.

Já a especificação dos agentes é o detalhamento das funcionalidades identificadas no diagrama de Casos de uso, visando especificar seus comportamentos. As ações identificadas podem ser divididas em dois conjuntos:

- i) Regras de execução: ações diretas no ambiente, onde os agentes consultam seu estado interno e atuam no ambiente, alterando parâmetros de variáveis e estados do sistema;
- ii) Estruturas de interação: troca de mensagens com envio e/ou solicitação de parâmetros;

As regras de execução podem ser representadas como sequências de ações atômicas (não divisíveis) que seguem um formato de procedimento (semelhante ao fluxograma). Já as estruturas de interação mostram como os agentes interagem entre si e com o ambiente e, quais procedimentos são executados durante as interações, evidenciando o dinamismo durante a simulação.

A especificação pode ser considerada como um desdobramento do modelo conceitual, para detalhar as funcionalidades dos agentes. Neste aspecto, a modelagem com UML foi utilizada para tais funcionalidades:

- Diagrama de Casos de uso: identificar as funcionalidades necessárias para os agentes;
- Diagrama de Sequência: modelagem das interações entre agentes e com o ambiente que devem ocorrer durante a simulação;
- Diagrama de Máquina de estado: modelagem de comportamento de agentes, quando possuem muitas possibilidades de mudança conforme eventos do ambiente (agentes: Operadores Extras).

Outra característica observada no desenvolvimento do modelo conceitual da SBA foi a dificuldade em separar esta etapa da coleta de dados. Durante a entrevista para entender o problema da “puxada na produção”, à medida que os agentes iam sendo identificados, os processistas já descreviam quais eram os fatos e ações que ocorriam no ambiente.

5.4.3 Coleta de dados

A coleta de dados em SED é realizada para preencher os parâmetros das variáveis de entrada do modelo, que possuem características essencialmente quantitativas. Neste aspecto, as principais variáveis de entrada são os tempos de utilização dos recursos (tempos de processo). Estes dados foram fornecidos pela empresa, com base em um estudo realizado anteriormente.

Para SBA, a coleta de dados teve características qualitativas e quantitativas. Os dados qualitativos são as possibilidades de ação e interação dos agentes durante a simulação. Já os dados quantitativos foram os parâmetros, que os agentes monitoram e capturam no ambiente para tomada de decisão e atuação. Estes dados qualitativos, foram denominados como informações para distinguir da coleta de dados tradicional e, representam descrições do sistema produtivo real.

Para coletar as informações e dados para o modelo SBA, foram utilizadas as técnicas de observação do sistema real e entrevistas com os representantes da empresa. As observações do sistema real permitiram identificar e amadurecer os conhecimentos sobre o sistema, por parte do analista de simulação. Já as entrevistas possibilitaram confrontar as observações do sistema real, com os relatos dos atores sociais. Este espaço de confrontação, também serviu para melhorar os conhecimentos do sistema por parte destes atores sociais, reduzindo a visão institucionalizada do sistema.

5.4.4 Programação do modelo computacional

A programação do modelo SED foi realizada sem a necessidade de uma especificação para detalhar o funcionamento do modelo. Como o FlexSim é um *software* SED, possui *templates*, voltados para orientação por processo. Desta forma, o FFM foi suficiente para programar o ambiente SED, dispensando esforços adicionais de modelagem. Foram realizadas pequenas inserções de código para controlar e atualizar variáveis e atributos.

Por outro lado, a programação dos agentes foi realizada via código de programação, quase que integralmente. Neste aspecto, destaca-se a utilidade da especificação dos agentes com a UML, que contribuiu para obtenção do código correto. O uso da Ferramenta “Process Flow” contribuiu para facilitar a programação, porém permanece a necessidade de programar a racionalidade dos agentes.

A programação dos agentes pode ser classificada em duas classes conforme suas características de comportamento no ambiente. Na primeira classe estão os agentes que capturam informações no ambiente, trocam mensagens e atualizam variáveis/estados, mas não são representados como entidades (objetos) no ambiente. A obtenção do código para estes agentes “externos” foi mais fácil, sendo puramente a conversão do modelo conceitual elaborado em UML para a linguagem FlexScript. Nesta primeira classe estão os agentes aGI, e aLPP e aP.

Por outro lado, na segunda classe estão os agentes que são representados no ambiente como entidades. Este grupo de agentes é mais difícil de ser programado, pois o seu comportamento especificado nos digramas UML pode quebrar as regras de funcionamento da SED. Não foi possível programar o aOE como uma entidade totalmente autônoma, pois as estações de trabalho que estes agentes poderiam atuar tiveram que ser definidas anteriormente ao início da simulação, para que fosse criado o recurso fixo extra (objeto) para utilização pelo agente.

5.4.5 Verificação do programa

A verificação é realizada para analisar se o modelo computacional representa o modelo conceitual, definido anteriormente. Neste trabalho, foram utilizadas as principais técnicas recomendadas pelos pesquisadores da área para verificação de modelos SED: construção modular, depurador do *software*, animação e discussão em grupo.

Como o comportamento dos agentes são relacionados com as entidades individuais, pode ocorrer que algum comportamento não se manifeste durante a execução da simulação, por não atender a alguma condição de interação e/ou ação específica, o que dificulta a verificação. Desta forma, para verificar o modelo SBA foi necessário “forçar” situações durante a simulação, que continham condições específicas de interação e/ou ação, para verificar os comportamentos modelados nos diagramas UML, quando já estavam programados no FlexSim. De maneira análoga a modularização da verificação SED, a verificação SBA foi realizada programando o comportamento especificado em cada digrama de Sequência e de Estado individualmente e, observado os resultados nas mudanças que devem ocorrer no ambiente.

5.4.6 Validação

A validação do modelo SED foi realizada comparando-se as saídas do modelo com dados históricos de produção, que é abordagem tradicional para validação de modelos de simulação. A abordagem adotada para trabalhar com os tempos de processamento para o caso da “puxada na produção” permitiu obter um modelo SED, que representasse o setor de embalagem de oscilantes, mesmo com ausência de uma amostragem considerável dos tempos de processamento para modelá-los com maior garantia de qualidade. Esta limitação não impediu de simular a “puxada”.

Já os dados coletados para o modelo SBA são mais difíceis de serem validados com testes estatísticos, devido suas características qualitativas. As saídas de um modelo puramente SBA são tomadas de decisão e interações, que necessitam de condições específicas para analisar sua validade com o sistema real. Neste ponto, as entrevistas realizadas com os representantes da empresa, em dois momentos distintos, para conhecimento e refinamento das tomadas de decisão foram consideradas com uma abordagem de validação.

A validação do modelo híbrido (SED-SBA) é possível de ser realizada com abordagem tradicional, analisando as saídas quantitativas do modelo, com dados históricos de dias em que ocorrerão “puxadas”. Porém, esta validação não foi realizada devido à falta de dados reais sobre pedidos urgentes e registro da produção obtidas nestes dias.

Os modelos SED e SBA foram validados individualmente, conforme suas respectivas racionalidades: a SED com perspectiva quantitativa e a SBA com perspectiva qualitativa. Desta forma, é esperado que esta abordagem de validações separadas seja capaz de validar um modelo híbrido SED-SBA.

5.4.7 Projeto experimental

Em modelos SED o projeto experimental é estabelecido, definindo-se um conjunto de parâmetros para serem inseridos nas variáveis de entrada (cenários de teste). Para simular cada cenário, a execução do modelo é interrompida para mudança do parâmetro e, o modelo é executado novamente.

No caso específico do modelo SED do setor de embalagem de oscilantes, não foi planejado nenhuma alteração nos parâmetros das variáveis de entrada, mas era possível alterar os turnos de trabalho, a quantidade de linhas em operação e a configuração do mix de produtos programado para um dia de operação.

Estas variáveis são consideradas como independentes e os seus parâmetros definidos, a priori, externamente ao modelo. Em comparação com o modelo SBA construído, não existem variáveis externas que podem ser manipuladas. A única possibilidade de alteração é nos parâmetros que os agentes usam para decidir suas ações no ambiente.

É importante destacar que, quando os comportamentos dos agentes são estabelecidos a partir de situações reais, coletados em entrevistas e validados com os próprios atores sociais, representantes destes comportamentos, não há espaço para alteração dos parâmetros. Nestas condições, alterar o valor dos parâmetros que eles usam do ambiente, significa modificar a racionalidade do ator social, ou seja, há alterações do contexto social, tecnológico e cultural que a organização possui.

Quando estes comportamentos são programados e o modelo é executado, forma um sistema aberto, onde a ação dos agentes impacta sobre o desempenho quantitativo do modelo SED.

5.5 Contribuições do modelo híbrido para representação de sistemas de produção

O modelo SED-SBA contribuiu para obtenção de uma simulação mais descritiva em relação ao sistema real. Neste modelo foi possível alterar de forma dinâmica o mix de produção e a capacidade de algumas estações de trabalho, como ocorre na realidade em dias em que ocorrem “puxadas na produção”.

Os resultados obtidos com o modelo híbrido também são possíveis de serem obtidos em modelo SED. Para isto, a dinâmica mais complexa obtida no modelo SED-SBA poderia ser reduzida, realizando as análises do sistema em diferentes cenários de simulação no projeto experimental. Ou ainda, buscar representar esta dinâmica em um modelo SED, utilizando-se recursos avançados de programação. Ambas alternativas exigem maiores recursos no projeto de simulação.

5.5.1 Contribuições do processo de modelagem e simulação

A SBA contribuiu para facilitar a modelagem de agentes externos. O papel dos agentes externos (Gerente Industrial, Líder de Peças Plásticas e Processista) foi de representar como os atores sociais (pessoas reais da empresa) decidem questões operacionais de gestão do processo. Do ponto de vista computacional, estes agentes serviram como intermediadores para

programação das interações que representam tais decisões nos objetos reais existentes no modelo SED.

As simulações destas interações podem causar pouco ou nenhum impacto visível no ambiente. As maiores contribuições foram para atualizar variáveis e parâmetros a nível global do sistema. Este tipo de modelagem é comum de ser realizada pelo paradigma da SED, porém acredita-se que o uso da SBA facilita a modelagem pela possibilidade de decompor as funcionalidades requeridas para os agentes com uso dos diagramas da UML. Além disso, o código obtido é encapsulado em cada agente, proporcionando maior flexibilidade para modificações e reúso.

Por outro lado, a simulação dos operadores como agentes foi o maior obstáculo para o modelo SBA. Estas entidades já possuem uma lógica de funcionamento (estado interno) conforme o *software* SED utilizado. O objetivo inicial era programá-los para serem totalmente autônomos, independentes da lógica de prioridades do processista. Devido as dificuldades operacionais para programação destes agentes operadores, o controle sobre suas ações permaneceu com o agente processista, que troca as prioridades dos postos de trabalho, “forçando” os operadores a alterarem os postos de trabalho. Este mecanismo de funcionamento do modelo de simulação é a maior contribuição da simulação baseada em agentes, que incorpora uma lógica de funcionamento diferente ao *software* SED.

A abordagem proposta para modelagem dos Agentes Operadores é baseada em uma lógica dinâmica, que interage com as condições do ambiente simulado. Comparando-se esta abordagem com os modelos de representação de performance humana discutidos na Seção 2.3.6, a modelagem utilizada contribui para redução dos elevados esforços de coleta de dados necessários para aplicar as propostas de Baines et al. (2004) e Baines e Benedettini (2007). Além disso, também contribuiu para reduzir a arbitrariedade do uso de curvas de aprendizagem conforme a proposta de Wang, Sowden e Mileham (2013).

Por fim, a modelagem possui característica descritiva do sistema produtivo, visando inserir aspectos diferentes da abordagem tradicional de uso distribuições de probabilidade. A realização de um estudo estatístico detalhado para modelar os tempos de processamento na linha de embalagem poderia melhorar a representação da variabilidade nas estações da linha em que os operadores extras não trabalharam. No entanto, nas estações em que estes operadores atuaram, ocorre duplicação dos postos, por tempo determinado, e em momentos aleatórios durante a aceleração da linha. Se estes dados de tempo fossem considerados como sendo elementos da amostra de uma mesma estação de trabalho, poderiam ser considerados *outliers* e eliminados da modelagem dos tempos. As curvas de distribuição de

probabilidade são úteis para inserir a variabilidade natural que existe no processo produtivo. Porém, elas não são suficientes para modelar aspectos organizacionais, como a coordenação do trabalho, que ocorre na linha de embalagem acelerada.

Mesmo com as dificuldades encontradas para programação do modelo, a proposta de utilizar um *software* SED como base para uma modelagem de agentes por UML, apresenta um avanço nas práticas encontradas na literatura. Conforme os resultados da RBS, a maioria dos pesquisadores construíram o modelo SED-SBA ou somente SBA na íntegra via código em linguagem JAVA. Do ponto de vista de projeto dos agentes, o encapsulamento permite reaproveitamento do código e facilidade na alteração dos parâmetros utilizados pelos agentes para tomar decisões.

5.5.2 Dificuldades e limitações do processo de modelagem e simulação SED-SBA

Conforme descrito anteriormente, a principal dificuldade para construção do modelo SED-SBA foi na programação dos agentes operadores que são entidades que já possuem comportamento programado pela SED. Esta dificuldade já era esperada uma vez que foi utilizado um *software* que não é específico para este tipo de aplicação. Porém, a decisão de utilizar um *software* SED é justificada pela necessidade de desenvolver conhecimentos que, além de contribuírem conceitualmente para a área de conhecimento da simulação, seja voltado para a prática na Engenharia de Produção.

As regras simplificadas construídas para os operadores no problema da “puxada na produção” diminuem as possibilidades de análise do problema, mas não invalidam abordagem utilizada para modelagem dos agentes, pela possibilidade de inserir aspectos qualitativos na modelagem, que são mais difíceis pela simulação SED.

Os limites para utilização de um modelo SED-SBA estão na transformação dos comportamentos desejáveis/observados no sistema real em regras racionais para a programação. Quando as regras não são possíveis de serem programadas como expressões booleanas e existe muitas condições para modelagem do comportamento, é necessário utilizar estruturas de checagem extensas que dificultam a programação. Nestes casos, geralmente a opção adotada é a simplificação das regras, tornando o comportamento menos aderente a realidade.

Além disso, o uso da animação em *softwares* SED é um recurso utilizado para tornar a construção do modelo em mais alto nível de abstração para facilitar o entendimento do usuário. No entanto, ela reduz a flexibilidade de possibilidades de programação. Por exemplo,

a inserção de mais estações de trabalho nas linhas pressupõe a existência de uma máquina alocada para aquela posição em que o operador pode atuar ou não. O *software* não permite instanciar (criar) determinados objetos durante a execução do modelo. Esta limitação implica em criar todos os objetos possíveis de serem utilizados na simulação antes da execução do modelo, tornando-o carregado e com dificuldades para processamento.

5.6 Proposta de roteiro para modelagem e simulação SED-SBA

O roteiro proposto para modelagem SED-SBA é originado a partir de um conjunto de conhecimentos e reflexões realizados durante esta pesquisa. A estrutura básica é o processo de modelagem e simulação SED, discutido na Seção 2.3.3. Este processo foi adaptado com os conhecimentos oriundos da RBS e da síntese acerca dos referenciais conceituais (Seções 2.4 e 2.5), para inserir a SBA, conforme o método de pesquisa apresentado na Seção 3.4. Por fim, após a construção do modelo híbrido do setor de embalagem de oscilantes para representar o problema da “puxada na produção” (Capítulo 4) e reflexão sobre o seu desenvolvimento foi possível estruturar um roteiro específico para modelagem e simulação SED-SBA e uma série de recomendações.

A aplicação deste roteiro para desenvolvimento de modelos híbridos SED-SBA possui um requisito: o *software* SED que será utilizado deve utilizar paradigma de programação orientado a objetos para permitir que a modelagem das entidades seja realizada utilizando-se a UML.

O roteiro possui formato de fluxograma com etapas sequenciais e estruturas de checagens em pontos de validação e/ou verificação, conforme ilustrado na Figura 5-1.

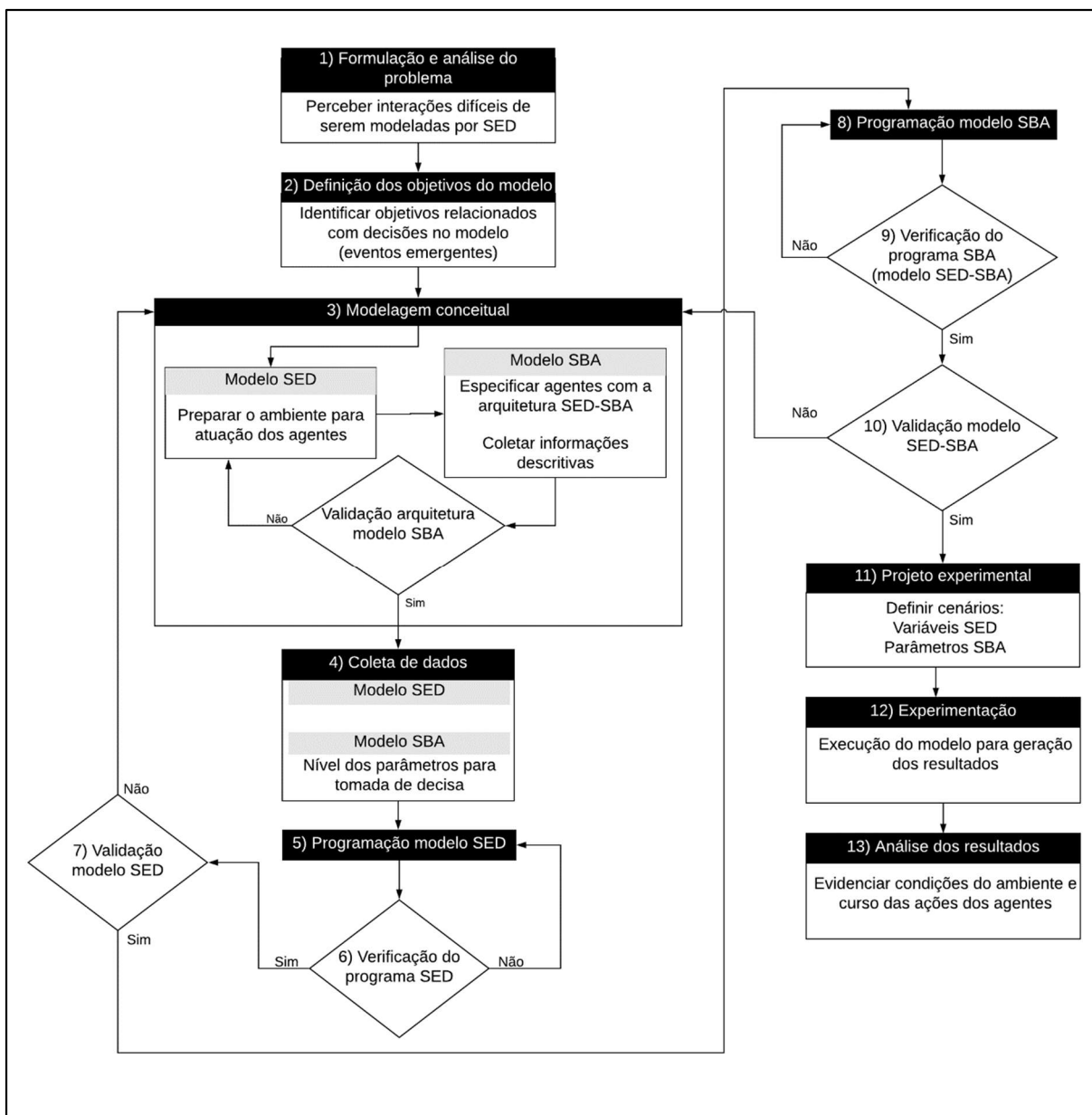


Figura 5-1: Roteiro para modelagem e simulação SED-SBA

Cada parte do roteiro será apresentada com uma figura relacionada com a sua respectiva etapa e um texto com recomendações para sua aplicação. A Figura 5-2 mostra as etapas 1 e 2 do roteiro para modelagem e simulação SED-SBA.

A etapa 1 deste roteiro é a **Formulação e análise do problema**. Esta etapa é semelhante a primeira etapa do processo para SED, que busca entender o problema do sistema que será simulado. Neste ponto, o analista de simulação já possui uma representação mental de como construirá este modelo para resolver o problema, e já consegue visualizar situações em que serão difíceis de serem simuladas em SED, devido a necessidade de interações entre

entidades. Conforme os resultados da RBS, nestas situações a SBA pode ser útil para lidar com o problema.

A etapa 2 é a **Definição dos objetivos do modelo**. Nesta etapa, o uso da SBA pode ficar mais evidente se a análise do problema for desdobrada em objetivos não relacionados com análise de parâmetro das variáveis de entrada, mas com decisões que surgem no modelo (eventos emergentes). Além disso, os objetivos vão estabelecer se o sistema será simulado com viés descritivo ou experimental. Estas duas perspectivas para o modelo, vão orientar o comportamento dos agentes para ser definido baseado em condições reais do sistema ou para testes de teorias, práticas e técnicas de gestão da produção (como políticas de estoque, produção puxada, nivelamento da produção, entre outras).

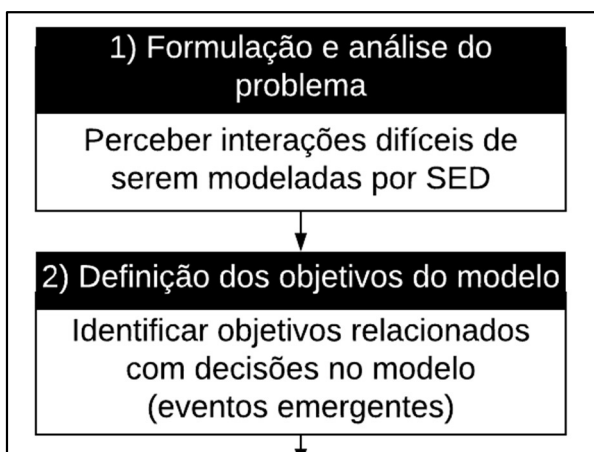


Figura 5-2: Etapa 1 e 2 do roteiro para modelagem e simulação SED-SBA

A etapa 3 do roteiro é o desenvolvimento do **Modelo conceitual**, conforme ilustrado na Figura 5-3.

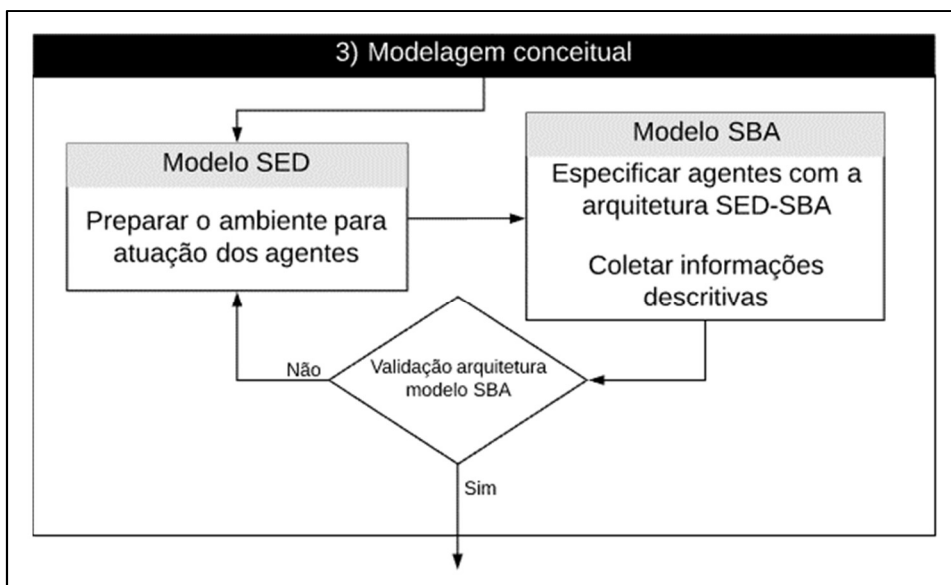


Figura 5-3: Modelo conceitual do roteiro SED-SBA

Para o roteiro proposto, a etapa de modelagem conceitual foi ampliada, incluindo a SBA juntamente com a SED, de modo interativo. Estas interações devem ocorrer até que todas as informações necessárias para os agentes, estejam devidamente modeladas no ambiente SED. De acordo com os resultados da pesquisa, o modelo conceitual para SBA deve ser construído utilizando-se os diagramas da UML, conforme a arquitetura proposta, apresentada na Figura 2-16, onde são coletadas informações descritivas das ações dos agentes (dados qualitativos).

É importante destacar que, mesmo com a modelagem conceitual sendo realizada integrada, é necessário manter a separação entre os dois modelos, permanecendo distintas as entradas e saídas, para que as etapas de verificação e validação continuem sendo realizadas com as técnicas já sistematizadas na literatura.

Com o modelo conceitual finalizado, pode ser realizada a coleta de dados (Figura 5-4). Para o modelo SED, a coleta de dados deve ser realizada conforme as orientações encontradas na literatura (LAW, 1991; FREITAS FILHO, 2001; ROBINSON, 2004; CHWIF; MEDINA, 2014). Já para SBA, uma primeira coleta de dados já foi realizada para programar as ações dos agentes (coleta descritiva). Nesta etapa, a coleta de dados visa definir o nível dos parâmetros (dados quantitativos) que os agentes enxergam no ambiente para tomar as decisões.

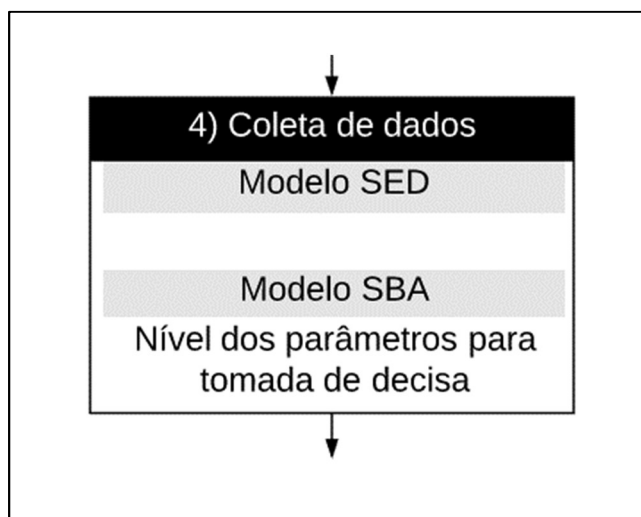


Figura 5-4: Etapa de coleta de dados do roteiro SED-SBA

A partir da coleta e análise dos dados de entrada, é realizada a **Programação do modelo SED**, conforme a Figura 5-5.

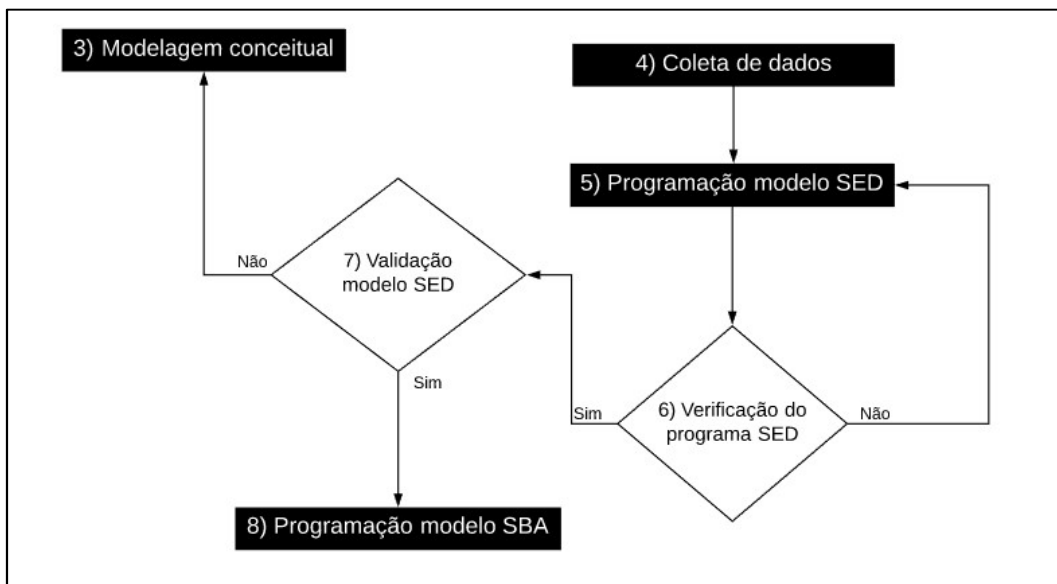


Figura 5-5: Programação, Verificação e Validação modelo SED no roteiro SED-SBA

Na etapa 5 o modelo conceitual SED é programado em um *software* específico. Nas etapas 6 e 7 ocorrem a **Verificação** (etapa 6) e **Validação** (etapa 7), conforme as técnicas já utilizadas para modelagem SED. Caso o modelo não seja validado, o analista deve retornar a análise dos dois modelos conceituais, para checar se as mudanças no modelo SED vão impactar no modelo SBA.

Com o modelo computacional validado, a próxima etapa é a **Programação do modelo SBA** (etapa 8), pela tradução dos diagramas UML para o código do *software* SED utilizado, conforme ilustrado na Figura 5-6.

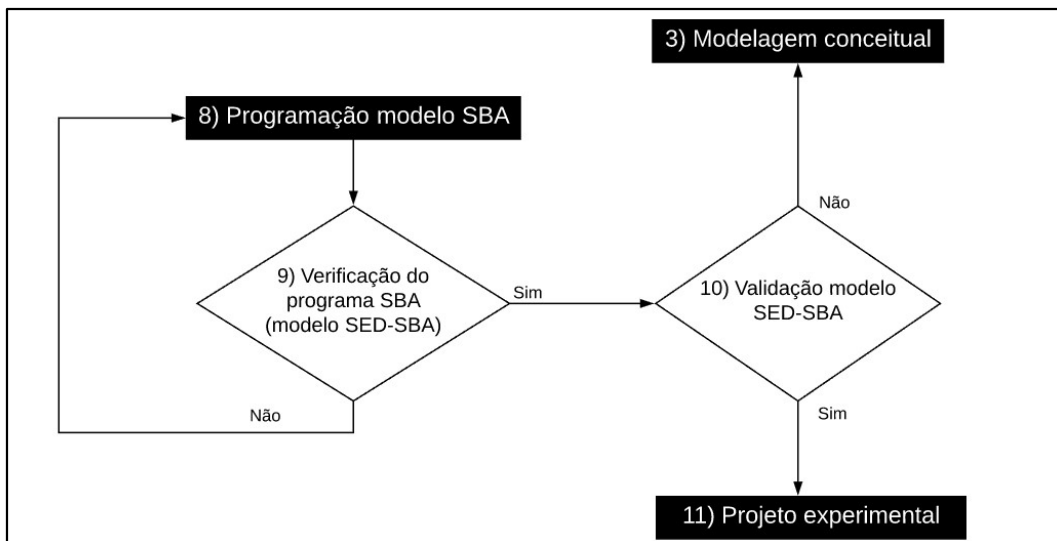


Figura 5-6: Programação, Verificação e Validação modelo SBA no roteiro SED-SBA

A etapa 9 é a **Verificação do programa SBA** (modelo SED-SBA). Nesta etapa recomenda-se “forçar” parâmetros do modelo SED para verificar o código de todas as funcionalidades dos Casos de uso, Diagrama de Sequência, Atividade e de Estado.

O último processo de **Validação é sobre o modelo SED-SBA** (etapa 10). Nesta etapa é possível analisar os resultados quantitativos do modelo (indicadores de desempenho do sistema), eventos emergidos e os comportamentos dos agentes. A reprovação do modelo nesta etapa do roteiro provoca retorno para analisar novamente os modelos conceituais, aumentando consideravelmente os esforços de retrabalho.

É importante observar que, para realização desta validação de forma completa, é necessário a existência de dados sobre os três níveis de modelo (SED, SBA e SED-SBA). Por exemplo, quando o modelo é construído com objetivo experimental e o comportamento dos agentes baseado em práticas e técnicas da literatura (para analisar impactos na implementação), é possível validar eventos (SED) e comportamentos (SBA), mas não os resultados quantitativos (SED-SBA).

Com o modelo híbrido programado, verificado e validado, são iniciadas as etapas finais do roteiro de experimentação e análise dos resultados (Figura 5-7).

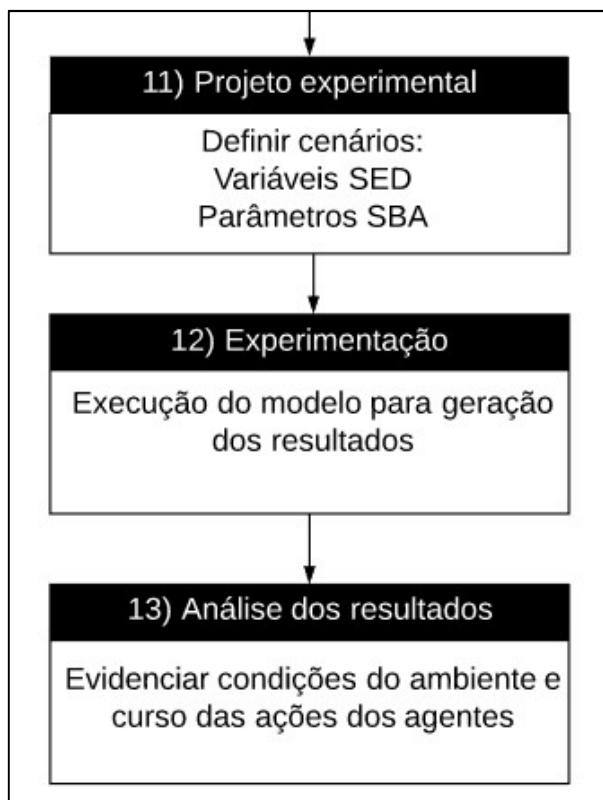


Figura 5-7: Etapas de experimentação e análise dos resultados do roteiro SED-SBA

Na etapa de **Projeto Experimental** (etapa 11) são definidos cenários para teste do modelo, onde são definidas variáveis para modelo SED e níveis de parâmetros para os agentes do modelo SBA. Conforme discutido na Seção 5.4.7, alterar o nível dos parâmetros que os agentes capturam no ambiente para tomar decisões, pode diminuir a aderência do modelo em representar o sistema real (modelo SBA). Porém, em um contexto de análise e projeto de sistemas produtivos, o interesse está exatamente em projetar uma situação futura, que modificará o modelo de produção institucional vigente. Desta forma, recomenda-se que os parâmetros dos cenários a serem experimentados, que envolvem decisões dos agentes, sejam discutidos e decididos com os atores sociais, representados como agentes, e outros atores que deliberam sobre o projeto.

Na etapa 12 o modelo é executado para geração dos resultados (etapa de **Experimentação**). Por fim, na etapa 13, é realizada **Análise dos resultados e documentação**. Esta etapa é realizada para averiguar os resultados da simulação quanto aos objetivos definidos para o modelo. Desta forma, recomenda-se que os resultados sejam apresentados ao nível dos agentes (SBA) e seus impactos no ambiente SED, ou seja, apresentação do curso das ações tomadas pelos agentes, as condições do ambiente que favoreceram estas ações e os impactos nas variáveis de saída quantitativas.

5.7 Considerações finais sobre o processo de modelagem e simulação SED-SBA

Neste capítulo foram apresentados os resultados do processo de modelagem e simulação SED-SBA. Estes resultados foram analisados sobre duas perspectivas: quanto aos resultados metodológicos e quanto as saídas quantitativas do modelo.

O modelo de simulação desenvolvido pôde ser caracterizado como baseado em agentes, devido aos princípios conceituais e metodológicos adotados durante o seu desenvolvimento. A utilização da UML como ferramenta para modelo conceitual e especificação dos agentes permitiu aplicar a arquitetura proposta na Figura 2-16. Esta etapa pode ser considerada uma das mais importante para o processo de modelagem SBA, semelhante a etapa do modelo conceitual para SED. Porém, a implementação destes diagramas no FlexSim foi a etapa que apresentou maior dificuldade para obtenção do modelo.

Os resultados quantitativos mostraram que a SBA pode contribuir com SED para obter um modelo mais descritivo em relação ao sistema real, inserindo aspectos que não são comuns na SED. Porém, adiciona novos desafios para o processo de modelagem, principalmente na validação destes modelos.

Por fim, o roteiro estruturado visa suportar o desenvolvimento de modelos SED-SBA, considerando as etapas do processo de modelagem e simulação SED, inserindo a perspectivas da SBA pela arquitetura proposta.

No capítulo 6 são apresentadas as conclusões da pesquisa, considerando as contribuições para a modelagem e simulação de sistemas produtivos.

6 CONCLUSÃO

O ponto de partida para desenvolvimento desta pesquisa foi a constatação das dificuldades e limitações da simulação de sistemas de produção em SED, principalmente para modelar o comportamento de operadores em modelos SED, que podem diminuir a legitimidade dos modelos construídos em relação ao sistema real.

Por outro lado, considerou-se também a SBA como paradigma de simulação emergente com potencial para superar os problemas da SED, pela modelagem orientada para simulação de agentes, como entidades ativas, que possuem autonomia e capacidade de tomar decisões com base em informações percebidas no ambiente.

Para desenvolvimento dos referenciais conceituais desta pesquisa foi conduzida uma RBS sobre a Simulação Baseada em Agentes com objetivo de analisar as principais características dos agentes, os métodos e técnicas de modelagem na área de gestão de operações, especificamente para o contexto da manufatura, logística e cadeia de suprimentos. Os resultados desta RBS forneceram os pressupostos conceituais e subsídios para desenvolvimento de ferramental aplicado para SBA.

Na parte prática, o método tradicional de modelagem e simulação SED foi adaptado para possibilitar a construção de modelos híbridos SED-SBA. Este método foi utilizado para simular situações dinâmicas que ocorrem em uma linha de montagem durante um turno de trabalho. Os resultados deste modelo foram analisados tanto do ponto de vista dos resultados quantitativos (saídas do modelo), como pela reflexão sobre o processo de modelagem e simulação.

6.1 Conclusões acerca das questões de pesquisa

Questão 1: Como a abordagem de agentes pode ser explorada para melhorar a representação de sistemas de sistemas de produção em ambientes de simulação computacional?

Os resultados RBS mostraram que existem duas perspectivas de modelagem com agentes na literatura: os modelos de sistemas multi-agentes (MAS) e os modelos de simulação baseado em agentes (ABMS). Estas duas perspectivas podem ser utilizadas para representar sistemas de produção. No entanto, existem diferenças em suas concepções metodológicas. Os modelos MAS voltados para projeto e análises de sistemas normativos, que buscam uma

solução ótima, com racionalidade de otimização do sistema. Já os modelos ABMS orientados para descrição do sistema, com objetivo de melhorar a compreensão do sistema real. Portanto, fica estabelecida a SBA (ABMS) como perspectiva metodológica mais adequada para representação de sistemas de produção em ambientes de simulação.

Esta diferenciação foi importante para orientar a pesquisa dos referenciais teóricos-conceituais e para o desenvolvimento do ferramental para desenvolvimento de modelos SED-SBA:

- Conforme argumentado por Siebers (2010), a principal diferença a SED e a SBA está no comportamento das entidades-agentes, que são classificadas como ativas, ou seja, possuem regras de comportamentos individualizados, com diferentes níveis de complexidade de seus comportamentos (individualidade, autonomia, interatividade e adaptabilidade);
- Para construção destas regras é necessário o estabelecimento de uma arquitetura, que estabelece como os agentes capturam informações no sistema, atuam no ambiente e interagem com outros agentes e/ou com o próprio ambiente;
- A arquitetura proposta possui uma abordagem que permite integrar macro especificações, relacionadas com o fluxo de materiais no processo (perspectiva da SED), com micro especificações, relacionadas com práticas contextualizadas resultantes do comportamento humano (perspectiva da SBA).

Por fim, o roteiro para modelagem e simulação SED-SBA complementa a resolução da questão de pesquisa com objetivo de operacionalizar os pressupostos conceituais sistematizados para SED-SBA.

Questão 2: Quais as contribuições desse modelo híbrido SED-SBA para análise e projeto de sistemas produtivos?

A obtenção de modelos de simulação mais descritivos exige uma maior caracterização do processo produtivo, no qual o estudo está relacionado. Este estudo pode exibir novas práticas adotadas na organização, que levam a diferentes comportamentos associados aos agentes adicionados no modelo. Contudo, o maior aprofundamento do conhecimento organizacional, para práticas que vão além do fluxo de materiais e decisões relacionadas a este fluxo, possuem características subjetivas, difíceis de serem representadas em um modelo de

simulação. Desta forma, espera-se que a utilização do roteiro proposto em conjunto com a arquitetura para modelagem dos agentes, contribua para melhorar a representação de sistemas produtivos em ambiente de simulação.

6.2 Conclusões acerca do problema de pesquisa

O problema de pesquisa buscou produzir conhecimento sobre a prática da Simulação Baseada em Agentes, no contexto da Gestão de Operações. A motivação para inserção deste novo paradigma de simulação surgiu, por um lado, dos resultados de pesquisas realizadas por diversos pesquisadores, que constataram limitações da modelagem de operadores pela SED, que podem influenciar nos resultados da simulação (BAINES; KAY, 2002; BAINES et al., 2004; MASON et al., 2005; WANG; SOWDEN; MILEHAM, 2013; BOENZI et al., 2014), e por outro lado, o aumento de pesquisas relacionadas com o tema em Gestão de Operações (MACAL, 2016).

Quanto as melhorias na representação de sistemas de produção em simulação, conclui-se que o uso da SED integrada com a SBA contribui para aumentar o poder de modelagem de sistemas, devido as novas formas de representar o comportamento das entidades de um modelo, diminuindo a necessidade de realizar simplificações operacionais para tornar o processo de modelagem e simulação viável.

Para discutir as contribuições da SED-SBA é importante posicionar a simulação como ferramenta de análise de problemas. Chwif e Medina (2014) apresentam características de um problema que justificam o uso da simulação (Figura 6-1).



<i>Problema</i>	<i>Ferramentas</i>	<i>Resultados</i>
<p><i>Maior</i></p> <p><i>Complexidade</i></p> <p><i>Dinâmica</i></p> <p><i>Aleatoriedade</i></p> 	<p><i>Simulação</i></p> <p>Planilhas</p> <p>Calculadora</p> <p>Lápis e Papel</p> <p>Intuição</p>	 <p><i>Maior</i></p> <p><i>Esforço</i></p> <p><i>Qualidade</i></p>

Figura 6-1: Características do problema para justificar o uso da simulação
Fonte: Chwif e Medina (2014)

Segundo os autores, a simulação é uma ferramenta adequada para analisar problemas “complexos”, que apresentam aleatoriedade e são dinâmicos no tempo. A definição dos conceitos do que é um sistema com aleatoriedade e dinâmico é apresentada pelos autores, é devidamente aceita pela comunidade científica e também possível de serem constatados na análise dos sistemas. Porém, a definição de “complexidade” é subjetiva, que remete a forma como o analista de simulação interpreta os acontecimentos e envolvidos no fenômeno para construir o modelo.

Alinhado a esta noção de “complexidade”, os modelos de simulação podem ser comparados com a metáfora discutida por Morgan (2006) que analisa as organizações sob duas perspectivas: mecanicista e orgânica. Em uma organização mecanicista o sistema é considerado fechado e com ambiente estável. Nesta visão as tarefas são pré-programadas e realizadas continuamente sem a interferência da ação humana. Já uma organização analisada pela metáfora orgânica apresenta um sistema aberto que interage com o ambiente. Nesta perspectiva prevalece a lógica da contingência, onde as tarefas dependem de circunstâncias ambientais. Busca-se “bons ajustamentos” ao invés da precisão.

Em sistemas considerados mecanicistas, os esforços de modelagem são reduzidos e, o ferramental de planilha é suficiente para resolver o problema. À medida que o sistema apresenta fatores e condições interdependentes, a noção de dinâmica e aleatoriedade demanda o uso da SED como ferramenta adequada para análise do problema, aumentando o grau de modelagem. O maior esforço para modelagem de um sistema está relacionado com a simulação de organismos vivos, como os sistemas biológicos, que apresentam elevado grau de complexidade. Nesse *continuum* mecanicista-orgânico, a SED-SBA, está posicionada na fronteira de inflexão destas perspectivas, inserindo uma grande parte da SED e aspectos de organicidade, como de interação com ambiente e a busca por soluções contingenciadas pela dinâmica do sistema. No entanto, ainda permanecem algumas dificuldades de programação destas entidades agentes, principalmente para entidades internas, pertencentes ao ambiente SED.

Por fim, os resultados e conclusões desta Tese contribuem para o conhecimento, pelas seguintes características:

- A sistematização obtida pela RBS contribui para o conhecimento dos pressupostos conceituais e características da SBA, permitindo posicioná-la corretamente entre os paradigmas de simulação e diminuindo as confusões conceituais;

- A arquitetura para modelagem SED-SBA, que busca tornar a simulação mais descritiva em relação ao sistema, conforme as orientações de Thiolllet (1983), Duarte (2002) Menegon (2003) e Torres (2007), pelas considerações de pressupostos conceituais de ambos paradigmas de simulação, buscando articular orientação macro e micro do sistema;
- O roteiro para modelagem e simulação SED-SBA, que busca orientar profissionais e pesquisadores, da área de simulação, para inserir em seus modelos racionalidade de agentes sem perder referência do paradigma vigente da SED.

6.3 Limitações e trabalhos futuros

A amostra dos tempos históricos utilizados para modelagem dos tempos probabilísticos não continha elementos suficientes para obter uma distribuição com alto grau de confiança, mas estes dados foram suficientes para validar o modelo SED. Além disso, o objetivo principal da simulação foi evidenciar a contribuição dos agentes, pela comparação de um modelo SED, com um modelo SED-SBA, sendo os modelos comparados em mesmas condições em relação aos tempos (fatores constantes na análise).

A segunda limitação foi a impossibilidade de validar o modelo SED-SBA diretamente, devido a falta de dados confiáveis sobre a produção em dias que aconteceram a “puxada na produção”. Mas, conforme discutido na Seção 0, o modelo integrado foi validado indiretamente pelo modelo SED e pelo modelo SBA.

No que tange à continuidade da pesquisa, vislumbram-se a aplicação do ferramental proposto em outros contextos e utilizando outros *softwares* SED para testar sua adequação e eficiência para melhorar a análise de sistemas simulados e refinar a articulação teórica-conceitual construída. Desta forma, contribuindo para o crescimento da Simulação Baseada em Agentes no contexto da Gestão de Operações.

BIBLIOGRAFIA

- ANAND, N. et al. Validation of an agent based model using a participatory simulation gaming approach: The case of city logistics. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 71, p. 489–499, 2016.
- BALDWIN, W. C.; SAUSER, B.; CLOUTIER, R. Simulation Approaches for System of Systems: Events-based versus Agent Based Modeling. **Procedia Computer Science**, v. 44, p. 363–372, 2015.
- 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.; HADFIELD, L.; MANSON, S.; LADBROOK, J. Using empirical evidence of variations in worker performance to extend the capabilities of discrete event simulations in manufacturing. In: Winter Simulation Conference, 2003. **Anais...2003**
- BAINES, T. S.; ASCH, R.; HADFIELD, L.; MANSON, J. P.; FLETCHER, S.; KAY, J. M. Towards a theoretical framework for human performance modelling within manufacturing systems design. **Simulations Modelling Praticce and Theory**, v. 13, p. 486-504, 2005.
- BAINES, T. S.; BENEDETTINI, O. Modelling human performance within manufacturing systems design: from a theoretical towards a practical framework. **Journal of Simulation**, v.1, p.121-130, 2007.
- BARBATI, M.; BRUNO, G.; GENOVESE, A. Applications of agent-based models for optimization problems: A literature review. **Expert Systems with Applications**, v. 39, n. 5, p. 6020–6028, 2012.
- BERENDS, P.; ROMME, G. Simulation as a Research Tool in Management. **European Management Journal**, v. 17, n. 6, p. 576–583, 1999.
- BERSINI, H. UML for ABM. **Journal of Artificial Societies and Social Simulation**, v. 15, n.2, 2012.
- BERTRAND, J. W. M.; FRANSOO, JAN C. . Operations management research methodologies using quantitative modeling. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 22, n. 2, p. 241–264, 2002.
- BOENZI, F.; MOSSA, G.; MUMMOLO, G.; ROMANO, V. A. Workforce Aging in Production Systems: Modeling and Performance Evaluation. **Procedia Engineering**, v. 100, p. 1108–1115, 2015.
- BRAILSFORD, S. Discrete-event simulation is alive and kicking! **Journal of Simulation**, v. 8, n. 1, p. 1–8, 2013.

CHU, Y.; YOU, F.; WASSICK, J. M. Hybrid method integrating agent-based modeling and heuristic tree search for scheduling of complex batch processes. **Computers and Chemical Engineering**, v. 60, p. 277–296, 2014.

CHU, Y. et al. Integrated planning and scheduling under production uncertainties: Bi-level model formulation and hybrid solution method. **Computers and Chemical Engineering**, v. 72, p. 255–272, 2015.

CICIRELLI, F.; FURFARO, A.; NIGRO, L. Modelling and simulation of complex manufacturing systems using statechart-based actors. **Simulation Modelling Practice and Theory**, v. 19, n. 2, p. 685–703, 2011.

CHWIF, L.; MEDINA, A. C. **Modelagem e simulação de eventos discretos: teoria e aplicações**. 3 ed. 2014. 254p

CLEGG, P. O. S. A. C. W. Towards the development of a simulator for investigating the impact of people management practices on retail performance. p. 247–265, 2011.

COSTA, M. A. B.; CAMAROTTO, J. A.; MENEGON, N. L. SimuCAD - Simulação & CAD: um sistema de apoio à decisão no planejamento e implantação de sistemas de produção. In: Encontro Nacional de Engenharia de Produção (ENEGEP), Piracicaba, 1996. **Anais...** 1996.

DUARTE, F. Complementaridade entre ergonomia e engenharia em projetos industriais. In: _____ (Org.). **Ergonomia e projeto na indústria de processo contínuo**. Rio de Janeiro: Lucerna, 2002. p. 11-21.

FABRICIO, I.; CHAILE-ALFARO, RIBAS-XIRGO, L. Running Agent-based-models Simulations Synchronized with Reality to Control Transport Systems. **Journal for Control, Measurement, Electronics, Computing and Communications**, v. 57, n. 2, 2016.

FORTINO, G.; NORTH, M. J. Simulation-based development and validation of multi-agent systems: AOSE and ABMS approaches. **Journal of Simulation**, v. 7, n. 3, p. 137–143, 2013.

FREITAS FILHO, P. J. **Introdução à modelagem e simulação de sistemas: com Aplicações em Arena**. 1 ed. Florianópolis: Visual Books, 2001.

GARRO, A.; RUSSO, W. EasyABMS: A domain-expert oriented methodology for agent-based modeling and simulation. **Simulation Modelling Practice and Theory**, v. 18, n. 10, p. 1453–1467, 2010.

GORE, R.; REYNOLDS, P. F. INSIGHT: understanding unexpected behaviours in agent-based simulations. **Journal of Simulation**, v. 4, n. 3, p. 170–180, 2010.

GROBARCIKOVA, A.; SOSEDOVA, J. Design of Agent-Based Model for Barge Container Transport. **Transport Problems**, v. 11, n. 4, p. 95–101, 2016.

GÜRCAN, Ö.; DIKENELLI, O.; BERNON, C. A generic testing framework for agent-based simulation models. **Journal of Simulation**, v. 7, n. 3, p. 183–201, 2013.

HOAD, K.; WATTS, C. Are we there yet? Simulation modellers on what needs to be done to involve agent-based simulation in practical decision making. **Journal of Simulation**, v. 6, n. 1, p. 67–70, 2012.

JASSS, C. Peer-Olaf Siebers and Uwe Aickelin (2011) A First Approach on Modelling Staff Proactiveness in Retail Simulation Models *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 14 (2) 2. v. 14, n. 2011, p. 1–13, 2011.

JENNINGS, N. R.; BUSSMANN, S. Agent-based control systems: Why are they suited to engineering complex systems? **Control Systems, IEEE**, v. 23, n. 3, p. 61–73, 2003.

JULES, G.; SAADAT, M. Agent Cooperation Mechanism for Decentralized Manufacturing Scheduling. **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems**, v. PP, n. 99, p. 1–12, 2016.

KELTON, W. D.; SADOWSKI, R. P; SADOWSKY, D. A. **Simulation with Arena**. New York: McGraw-Hill, 1998.

KOMMA, V. R.; JAIN, P. K.; MEHTA, N. K. Agent-based simulation of a shop floor controller using hybrid communication protocols. **International Journal of Simulation Modelling**, v. 6, n. 4, p. 206–217, 2007.

LATTILA, L. Modelling seaports with Agent-Based Modelling and System Dynamics. **International Journal of Logistics Systems and Management**, v. 10, n. 1, p. 90, 2011.

LAW, A. M. **Simulation modeling and analysis**. 5. ed. Tucson: McGraw-Hill, 2013.

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

LIKER, J. K.; MEIER, D. **O Modelo Toyota: manual de aplicação: um guia prático para implantação dos 4 PS da Toyota**. Porto Alegre: Bookman, 2009. 432 p.

LU, T. P.; CHANG, T. M.; YIH, Y. Production control framework for supply chain management--an application in the elevator manufacturing industry. **International Journal of Production Research**, v. 43, n. 20, p. 4219–4233, 2005.

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. Successful approaches for teaching agent-based simulation. **Journal of Simulation**, v. 7, n. 1, p. 1–11, 2013.

MACAL, C. M.; NORTH, M. J. Tutorial on agent-based modelling and simulation. **Journal of Simulation**, v.4, p.1510162, 2010.

MAES, P. The agent network architecture (ANA). **ACM SIGART Bulletin**, v. 2, n. 4, p. 115–120, 1991.

MANSON, S.; BAINES, T.; KAY, J. M.; LADBROOK, J. Improving the design process for factories: modeling human performance variation. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 24, n. 1, p. 47-54, 2005.

MENEGON, N. L. **Projeto de processos de trabalho: o caso da atividade do carteiro**. 2003. 259 p. Tese (Doutorado em Produto). COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2003.

MORABITO, R.; PUREZA, V. Modelagem e Simulação. In: MIGUEL, P. A. C. (Org.) **Metodologia de Pesquisa em Engenharia de Produção e Gestão de Operações**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2010, p. 165-194.

MORGAN, G. **Imagens da organização**. Atlas: São Paulo, 2002.

MÜLLER, J. P. Architectures and applications of intelligent agents: A survey. **The Knowledge Engineering Review**, v. 13, n. 4, p. 353–380, 1998.

NEGAHBAN, A.; YILMAZ, L.; NALL, T. Managing production level in new product diffusion: an agent-based simulation approach. **International Journal of Production Research**, v. 52, n. 17, p. 4950–4966, 2014.

NEJAD, H. T. N.; SUGIMURA, N.; IWAMURA, K. Agent-based dynamic integrated process planning and scheduling in flexible manufacturing systems. **International Journal of Production Research**, v. 49, n. 5, p. 1373–1389, 2011.

NILSSON, F.; DARLEY, V. On complex adaptive systems and agent-based modelling for improving decision-making in manufacturing and logistics settings. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 26, n. 12, p. 1351–1373, 2006.

NORTH, M. J.; MACAL, C. M. Product and process patterns for agent-based modelling and simulation. **Journal of Simulation**, v. 8, n. 1, p. 25–36, 2014.

NORTH, M. J.; MACAL, C. M. Agent-based modelling and systems dynamics model reproduction. **International Journal of Simulation and Process Modelling**, v. 5, n. 3, p. 256, 2009.

PAHL, G.; BEITZ, W.; FELDHUSEN, J.; GROTE, K. **Projeto na engenharia**. 6ed. São Paulo: Blucher, 2013. 413p. (tradução alemã).

PIDD, M. **Computer simulation in management science**. 4 ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2001.

PRADO, Darci. **Usando o Arena em simulação**. 2 ed. Nova Lima(MG): INDG-Tecnologia e Serviços, 2004. 305 p

PONTE, B.; SIERRA, E.; FUENTE, D.; LOZANO, J. Exploring the interaction of inventory policies across the supply chain: An agent-based approach. **Computers and Operations Research**, v. 78, p. 335–348, 2017.

- RAIL, A.; THOMSON, V. Agent-based control of manufacturing processes Zahir Albadawi Benoit Boulet Robert DiRaddo and Patrick Girard. v. 1, n. 4, p. 466–481, 2006.
- RAO, A. S.; GEORGEFF, M. P. BDI Agents: from theory to practice. In: Proceeding of the First International Conference on Multiagent-Systems, 1, 1995, San Francisco. **Proceedings...** San Francisco: ICMAS, 1995.
- RENNA, P. Job shop scheduling by pheromone approach in a dynamic environment. **International Journal of Computer Integrated Manufacturing**, v. 23, n. 5, p. 412–424, 2010.
- RENNA, P. Capacity reconfiguration management in reconfigurable manufacturing systems. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 46, n. 1–4, p. 395–404, 2010.
- RENNA, P. Multi-agent based scheduling in manufacturing cells in a dynamic environment. **International Journal of Production Research**, v. 49, n. 5, p. 1285–1301, 2011.
- RENNA, P. Controllable processing time policies for job shop manufacturing system. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 67, n. 9–12, p. 2127–2136, 2013.
- RENNA, P. Coordination strategies to support distributed production planning in production networks. **European J. of Industrial Engineering**, v. 9, n. 3, p. 366, 2015.
- RENNA, P. Deteriorating job scheduling problem in a job-shop manufacturing system by multi-agent system. **International Journal of Computer Integrated Manufacturing**, v. 28, n. 9, p. 936–945, 2015.
- ROBINSON, S. **Simulation: The Practice of Model Development and Use**. London: John Wiley & Sons Ltd, 2004.
- ROLÓN, M.; MARTÍNEZ, E. Agent-based modeling and simulation of an autonomic manufacturing execution system. **Computers in Industry**, v. 63, n. 1, p. 53–78, 2012.
- ROUZAFZON, J.; HELO, P. Developing service supply chains by using agent based simulation. **Industrial Management & Data Systems**, v. 116, n. 2, p. 255–270, 2016.
- RUIZ, N. et al. An intelligent simulation environment for manufacturing systems. **Computers and Industrial Engineering**, v. 76, n. 1, p. 148–168, 2014.
- SAVINO, M. M.; MAZZA, A.; NEUBERT, G. Agent-based flow-shop modelling in dynamic environment. **Production Planning & Control**, v. 25, n. 2, p. 110–122, 2014.
- SIEBERS, P. O.; MACAL, C.M.; GARNETT, J.; PIDD, M. Discrete-event simulation is dead, long live agent-based simulation! **Journal of Simulation**, v. 4, n. 3, p. 204–210, 2010.
- SIEBERS, P. O.; AICKELIN, U. A first approach on modelling staff proactiveness in retail simulation models. **Journal of Artificial Societies and Social Simulation**, v. 14, n.2, 2011.

- SIEBERS, P.-O. et al. Modeling and Simulating Retail Management Practices: a First Approach. **International Journal of Simulation and Process Modelling**, v. 5, n. 3, p. 215–232, 2009.
- SCHÖN, D. A. **The Reflective Practitioner: how professionals think in action**. Basic Books, 1983. 384 p.
- STEBLOVNIK, K.; ZAZULA, D. A novel agent-based concept of household appliances. **Journal of Intelligent Manufacturing**, v. 22, n. 1, p. 73–88, 2011.
- SUN, J-Y.; FU, W-P.; WANG, W.; YAO, D. Modelling and Simulation of the Supply Chain of Automobile Industry. **International Journal of Simulation, Systems, Science & Technology**, v. 17, n. 26 p. 1–11, 2016.
- THIOLLENT, M. Problemas de Metodologia, In: Fleury, A. C. C. & Vargas, N. (orgs.) **Organização do trabalho**, 2.ed.. Atlas, São Paulo, p. 54-83, 1983.
- TORRES, I. **Um formalismo relacional para o desenvolvimento de arranjo físico industrial**. 2007 f. 207. Tese (Doutorando em Engenharia de Produção) – Departamento de Engenharia de Produção, Universidade Federal de São Carlos, 2007.
- VICENTE, P. O uso da simulação como metodologia de pesquisa em ciências sociais. **Cadernos EBAPE**, v. 3, n. 1, 2004
- WANG, Q.; SOWDEN, M.; MILEHAM, A. R. Modelling human performance within an auto automotive engine assembly line. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 68, p.141-148, 2013.
- WOOLDRIDGE, M. Practical reasoning with procedural knowledge. **Practical Reasoning**, p. 663–678, 1996.
- YU, T.-T. et al. Approaches to Modeling the Gas-Turbine Maintenance Process. **Journal of Computing and Information Science in Engineering**, v. 12, n. 1, p. 11007, 2012.