

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**ANÁLISE DA REPRESENTAÇÃO DO FATOR HUMANO  
PRESENTE EM UM SISTEMA DE MANUFATURA ATRAVÉS  
DA SIMULAÇÃO HÍBRIDA**

**João Paulo Barbieri**

**ITAJUBÁ  
2016**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**João Paulo Barbieri**

**ANÁLISE DA REPRESENTAÇÃO DO FATOR HUMANO  
PRESENTE EM UM SISTEMA DE MANUFATURA ATRAVÉS  
DA SIMULAÇÃO HÍBRIDA**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

**Área:** Engenharia de Produção

**Orientador:** Prof. Dr. Alexandre Ferreira de Pinho

**ITAJUBÁ**

**2016**

# DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho, primeiramente, a Deus, a todas as pessoas que me acompanharam nessa jornada, em especial aos meus queridos pais Laercio e Dete, a minha querida irmã Ana Clara, e a minha amada Flávia.

## AGRADECIMENTOS

Mergulhado na escuridão cósmica está um planeta que emite seu tom azulado no universo. Dentro desse planeta existe uma aleatoriedade infinita de acontecimentos que ocorre tanto no nível macro como no nível micro. É preciso ter fé para acreditar que Deus é o engenheiro responsável pela criação da vida e de todos os elementos presentes no cosmo. É preciso ter fé. Deus colocou em meu caminho oportunidades e pessoas importantes que me ajudaram no meu desenvolvimento. Deus, obrigado! Obrigado por estar presente nos detalhes mais singelos da minha vida.

Na vida de cada um de nós existem pessoas essenciais. Para mim, essas pessoas são os meus pais e a minha irmã. Papai e mamãe, obrigado por me ensinarem o valor da honestidade, da bondade, da amizade, do amor, da tolerância, da determinação, do trabalho e do respeito ao próximo. Agradeço a você também irmã por estar presente nos momentos que precisei. A sua ajuda e os seus palpites foram muito relevantes.

Outra pessoa que hoje também é essencial na minha vida é a Flávia, minha noiva. É com muita alegria que decidi estar com você. A sua companhia, atenção e amor são fundamentais para mim. Flávia, te agradeço por estar ao meu lado nos momentos importantes da minha vida. Te agradeço também por compartilhar os meus sonhos. Ao seu lado quero estar quando esses sonhos se tornarem realidade.

Não poderia deixar de agradecer a todos os professores que contribuíram de maneira positiva para o meu desenvolvimento intelectual e acadêmico. De modo especial, gostaria de agradecer imensamente ao Prof. Dr. Alexandre Ferreira de Pinho por ter acreditado e confiado na minha dedicação e no meu trabalho. Obrigado Pinho por ter me orientado nessa pesquisa.

Agradeço também aos meus amigos e colegas de classe pelas sugestões de melhoria durante essa pesquisa de dissertação. Em especial, quero deixar meus agradecimentos ao Danillo, à Tábata, ao David, à Ana Paula, ao Renato e à Elisa. Vocês dividiram comigo várias conversas e diversos conhecimentos. Ademais, quero agradecer consideravelmente ao Flavio Vilela por ter compartilhado informações relevantes de sua pesquisa comigo. Flavio, muito obrigado.

Concluindo, gostaria de agradecer a todos da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo apoio e incentivo à pesquisa.

*"Tudo o que temos de decidir é o que fazer com o tempo que nos é dado."*

(J. R. R. Tolkien)

## RESUMO

Os sistemas de manufatura são sistemas complexos, onde ocorrem diversas ações voltadas para a transformação de matérias-primas em produtos de valor agregado. Dentro deles, ocorrem processos de transformação envolvendo pessoas, máquinas e equipamentos, sistemas computacionais, processos e planejamento. No ambiente manufatureiro, os recursos humanos desempenham um papel relevante e, nesse sentido, diversas pesquisas abordando o elemento humano em seu ambiente de trabalho foram desenvolvidas e abordadas sob diferentes pontos de vista. Uma dessas pesquisas é o estudo de tempos e movimentos, que trata, dentre outros assuntos, da questão do ritmo de trabalho. É verdade que o comportamento humano é regido por princípios complexos. Esse fato corrobora a dificuldade em modelar o comportamento humano. Dentro da área de modelagem e simulação, representar o elemento humano através de seu comportamento é um dos principais desafios. Na Simulação a Eventos Discretos (SED), a modelagem mais detalhada do elemento humano é difícil de se realizar. Logo, o elemento humano em modelos de SED é considerado como recurso simples. Essa dificuldade em modelar o elemento humano pode ser superada com a Simulação Baseada em Agentes (SBA). A SBA é uma nova abordagem de modelagem e simulação que surgiu recentemente. Ela traz a oportunidade de modelar o comportamento humano de maneira mais detalhada. Além dessa oportunidade, a SBA ainda pode ser combinada com a SED, dando origem à simulação híbrida. A combinação dessas duas abordagens distintas de simulação proporciona ao pesquisador a oportunidade de simular características relevantes do sistema real. Portanto, essa pesquisa de dissertação almeja contribuir cientificamente na área de simulação e de sistemas de produção trazendo uma análise sobre a representação do fator humano em um sistema de manufatura através da simulação híbrida. Nessa pesquisa, a combinação dessas duas abordagens ocorrerá dentro do contexto metodológico da Modelagem e Simulação por meio da adaptação da fase conceitual que faz parte da sequência de passos sugeridos para projetos de simulação. Essa proposta de adaptação tem como objetivo auxiliar a construção de modelos híbridos de simulação. O sistema real de manufatura que foi modelado e simulado é uma linha de montagem composta por dez postos de trabalho e quatorze operadores. Esses quatorze operadores são representados no modelo híbrido como agentes. Tendo como base o Sistema Westinghouse para avaliação do ritmo, cada agente possui um ritmo de trabalho que se altera no decorrer da simulação em função da meta diária de trabalho. Por meio dos resultados do modelo híbrido, nota-se que os agentes agem dentro do modelo de maneira autônoma e tomam decisões com base nas metas de produção. Assim, pode-se concluir que é possível superar o desafio de retratar o fator humano no contexto fabril utilizando a simulação híbrida como ferramenta.

**Palavras-chave:** Sistemas de Manufatura; Simulação a Eventos Discretos; Simulação Baseada em Agentes; Simulação Híbrida; Fator Humano; Ritmo de Trabalho.

# ABSTRACT

Manufacturing systems are complex systems where actions are taken to transform raw materials into value added products. In these systems transformation processes occur involving people, machines and equipment, computational systems, processes and planning. In the manufacturing environment, human resources play a relevant role and, in this sense, several researches addressing the human resources in their work environment have been developed and approached from different points of view. One of these researches is the time and motion study that deals, among other subjects, with the question of the rhythm of work. It is true that human behavior is governed by complex principles. This fact corroborates the difficulty in modeling human behavior. In the area of modeling and simulation, representing the human element through its behavior is one of the main challenges. In Discrete Event Simulation (DES), the more detailed modeling of the human element is difficult to perform. Therefore, the human element in DES models is considered a simple resource. This difficulty in modeling the human element can be overcome with Agent-Based Simulation (ABS). The ABS is a new modeling and simulation approach that has emerged recently. This new approach brings the opportunity to model human behavior in more detail. In addition to this opportunity, the ABS can still be combined with the DES, resulting in hybrid simulation. The combination of these two distinct simulation approaches gives the researcher the opportunity to simulate relevant characteristics of the real system. Therefore, this dissertation research aims to contribute scientifically in the area of simulation and production systems bringing an analysis about the representation of the human factor in a manufacturing system through the hybrid simulation. In this research, the combination of these two approaches will occur within the methodological context of Modeling and Simulation through the adaptation of the conceptual phase that is part of the sequence of steps suggested for simulation projects. This adaptation proposal aims to help the construction of hybrid simulation models. The real manufacturing system that was modeled and simulated is an assembly line composed of ten work stations and fourteen operators. These fourteen operators are represented in the hybrid model as agents. Based on the Westinghouse System for rhythm evaluation, each agent has a work rhythm that changes during the simulation according to the daily work goal. Through the results of the hybrid model, it is noticed that agents act within the model autonomously and make decisions based on production goals. Thus, it can be concluded that it is possible to overcome the challenge of representing the human factor in the factory context using hybrid simulation as a tool.

**Keywords:** Manufacturing Systems; Discrete Event Simulation; Agent Based Simulation; Hybrid Simulation; Human Factor; Rhythm of Work.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - <i>Inputs e outputs</i> de um Sistema de Manufatura _____	17
Figura 2.2 – As três categorias de sistemas de produção _____	18
Figura 2.3 - Tipos de processos conforme a relação volume-variedade _____	19
Figura 3.1 - Maneiras de se estudar um sistema _____	27
Figura 3.2 - Elementos de um agente _____	40
Figura 4.1 - Sequência de passos para um projeto de simulação _____	48
Figura 4.2 - Modelagem proposta para construção de modelos híbridos de simulação _____	49
Figura 4.3 - Os sete elementos do Protocolo ODD _____	50
Figura 5.1 - Modelo conceitual da linha de manufatura de placas de circuito impresso _____	55
Figura 5.2 - Diagrama de estado de cada agente trabalhador _____	59
Figura 5.3 - Modelo computacional MSED da linha de manufatura _____	68
Figura 5.4 - Relação entre os conjuntos de recursos e os agentes _____	69
Figura 5.5 - Parâmetros, variáveis e funções de tabela dos agentes _____	70
Figura 5.6 - Diagrama de estado dos agentes _____	71
Figura 5.7 - Comportamento de cada agente dentro do modelo híbrido _____	71
Figura 5.8 - Teste de Normalidade da amostra dos Dados Reais _____	74
Figura 5.9 - Teste de Normalidade da amostra dos dados do modelo MSED _____	75
Figura 5.10 - Teste de Normalidade da amostra dos dados do modelo MSH _____	75
Figura 5.11 - Teste de Grubbs da amostra da amostra dos Dados Reais _____	76
Figura 5.12 - Teste de Grubbs da amostra dos dados do modelo MSED _____	76
Figura 5.13 - Teste de Grubbs da amostra dos dados do modelo MSH _____	77
Figura 5.14 - Relação entre as médias das amostras _____	79
Figura 5.15 - Gráfico relacionando as metas diárias dos sete cenários _____	82
Figura 5.16 - Gráfico relacionando as metas semanais dos sete cenários _____	82

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Estimativas de desempenho _____	23
Tabela 2.2 - Avaliação dos quatro fatores _____	24
Tabela 3.1 - Amostragem de publicações sobre a Simulação Baseada em Agentes _____	36
Tabela 3.2 - Definições para SBA com base nas propriedades do agente _____	38
Tabela 3.3 - Características dos modelos de SED e de SBA _____	43
Tabela 5.1 - Medidas de posição dos tempos de processamento _____	64
Tabela 5.2 - Medidas de dispersão dos tempos de processamento _____	64
Tabela 5.3 - Distribuições de probabilidade dos tempos de cada processo _____	65
Tabela 5.4 - Elementos do Anylogic® usados nos modelos MSED e MSH _____	66
Tabela 5.5 - Elementos do Anylogic® usados no modelo MSH _____	67
Tabela 5.6 - Classificação das técnicas de validação _____	73
Tabela 5.7 - Valores a serem considerados para o experimento da meta _____	80
Tabela 5.8 - Resultados do experimento _____	81

## **LISTA DE SIGLAS**

FIFO – *First In, First Out*

IDEF-SIM – *Integrated Definition Methods - Simulation*

MSED – *Modelo de Simulação a Eventos Discretos*

MSH – *Modelo de Simulação Híbrido*

ODD – *Overview, Design concepts, and Details*

SED – *Simulação a Eventos Discretos*

SBA – *Simulação Baseada em Agentes*

# SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1. Objetivos da dissertação	14
1.2. Estrutura da dissertação	15
2. SISTEMAS DE MANUFATURA	16
2.1. Conceitos e definições	16
2.2. Classificação de sistemas de manufatura	18
2.3. Estudo do trabalho: medida do trabalho	21
2.4. Estudo de tempos: avaliação do ritmo de trabalho	22
3. SIMULAÇÃO	25
3.1. Conceitos e Definições	27
3.2. Simulação a Eventos Discretos	33
3.3. Simulação Baseada em Agentes	35
3.4. A simulação híbrida	41
4. METODOLOGIA DE PESQUISA	45
4.1. Modelos de Simulação	47
5. APLICAÇÃO DO MÉTODO	54
5.1. Concepção	54
5.1.1. Objetivo e definição do sistema	54
5.1.2. Construção do Modelo Conceitual	55
5.1.3. Validação do Modelo Conceitual	57
5.1.4. Elaboração do modelo de SBA	58
5.1.5. Documentação do Modelo Conceitual	62
5.1.6. Modelagem dos dados de entrada	63
5.2. Implementação	65
5.2.1. Construção do Modelo Computacional	65
5.2.2. Verificação do Modelo Computacional	72
5.2.3. Validação do Modelo Computacional	73
5.3. Análise	79
5.3.1. Definição do projeto experimental	80
5.3.2. Execução dos experimentos	80
5.3.3. Análise estatística	81

5.4.	Considerações finais	84
6.	CONCLUSÕES	85
6.1.	Conclusões e contribuições da pesquisa	85
6.2.	Sugestões para trabalhos futuros	87
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	89
	ANEXO A - Resultados produzidos pelo modelo MSH	96

# 1. INTRODUÇÃO

Tomar decisões de modo a garantir um aceitável nível de desempenho de determinado sistema é um dos principais desafios dos gestores que atuam no ambiente empresarial (MORABITO NETO; PUREZA, 2012). Esse é o mesmo desafio encontrado pelos gestores de sistemas de manufatura.

A busca pela flexibilidade e otimização de custo e tempo estão transformando progressivamente os sistemas de manufatura em sistemas complexos. Tais sistemas manifestam um comportamento dinâmico e não-linear. Além disso, o planejamento da produção é afetado significativamente por esse comportamento que carrega como característica intrínseca a imprevisibilidade (EFTHYMIOU *et alia*, 2014). Nessas situações, a simulação aparece como uma das mais eficientes ferramentas analíticas disponíveis aos gerentes de sistemas complexos, permitindo a criação de modelos para analisar o desempenho de tais sistemas (SHANNON, 1983; BERTRAND; FRANSOO, 2002).

No âmbito industrial, a simulação é utilizada para avaliar alternativas e testar estratégias ou regras operacionais que são demasiadamente complexas de serem modeladas de maneira analítica (BRAILSFORD *et alia*, 2012). Conforme Chwif e Medina (2015), perdendo a primeira colocação para a área militar, a área de manufatura é o segundo setor onde a simulação é mais aplicada. No ambiente de manufatura, a simulação pode ser usada em diversos segmentos, como: Sistemas de movimentação e armazenagem, Linhas de montagem, Células automatizadas, Programação da produção, Análise de estoques e de *kanban*.

Dentre as abordagens de simulação existentes, a Simulação a Eventos Discretos é a mais popular. Na manufatura, por exemplo, esse tipo de simulação é muito aplicado para compreender e analisar a dinâmica do sistema real (NEGAHBAN; SMITH, 2014; RAUNAK; OLSEN, 2014).

Nos modelos de Simulação a Eventos Discretos, a inclusão do desempenho humano gera oportunidade de conhecimento quanto ao impacto e à importância do fator humano no sistema (BAINES *et alia*, 2004). Ademais, o aumento da fidedignidade de um modelo está relacionado ao ato de representar de modo mais realista o fator humano presente no sistema real dentro desse modelo (BAINES *et alia*, 2005). Entretanto, a inclusão de características humanas em modelos de simulação acontece de modo limitado através da Simulação a Eventos Discretos.

É verdade que os modelos de Simulação a Eventos Discretos são capazes de representar detalhadamente as máquinas (BAINES *et alia*, 2004). Todavia, o elemento humano nesse tipo de simulação é considerado como recursos simples e, frequentemente, o seu comportamento dinâmico é negligenciando (DIGIESI *et alia*, 2009). De fato, não é fácil realizar uma modelagem mais detalhada do elemento humano por meio da Simulação a Eventos Discretos (BAINES; KAY, 2002).

Nessas circunstâncias, a Simulação Baseada em Agentes surge como uma nova abordagem de simulação, que permite modelar e simular elementos comportamentais inerentes ao fator humano. Essa nova abordagem pode ser combinada com a Simulação a Eventos Discretos. Dessa combinação, surgem modelos híbridos que são capazes de retratar sistemas reais com um nível superior de detalhamento.

A modelagem híbrida constitui-se em um dos desafios de pesquisa da área de Simulação Baseada em Agentes. O desafio está em vincular de modo consistente dois modelos com lógicas distintas que utilizam ferramentas de modelagem que também possuem características distintas (MACAL, 2016). É nesse contexto que essa pesquisa se encontra inserida.

A representação do fator humano através da combinação da Simulação a Eventos Discretos com a Simulação Baseada em Agentes é o cerne da presente pesquisa. Nesse contexto, uma linha de montagem do ramo de manufatura foi escolhida devido ao elevado grau de trabalho manual. Essa linha, que será retratada por meio da Simulação a Eventos Discretos, é composta por quatorze operadores. Esses operadores serão modelados através da Simulação Baseada em Agentes. Logo, tendo como referência o Sistema Westinghouse, o comportamento de cada operador será retratado com base nos fatores esforço e consistência de trabalho.

Por fim, vale salientar que essa dissertação almeja contribuir cientificamente na área de simulação, mais especificamente na área de simulação híbrida, trazendo uma análise sobre a representação do fator humano por meio da combinação das técnicas provenientes da Simulação a Eventos Discretos e da Simulação Baseada em Agentes.

## **1.1. Objetivos da dissertação**

O objetivo geral dessa dissertação consiste em analisar a representação do fator humano em uma linha de manufatura, utilizando a Simulação Baseada em Agentes combinada com a Simulação a Eventos Discretos. Sob este objetivo geral, são elencados os seguintes objetivos específicos:

- Propor uma modelagem conceitual que auxilie a construção de modelos híbridos de simulação;
- Avaliar a capacidade do modelo híbrido de simulação de auxiliar a tomada de decisão com relação à variação da meta de produção.

## 1.2. Estrutura da dissertação

Esta dissertação aborda a representação do fator humano presente em uma linha de manufatura. A representação do fator humano ocorrerá através de um modelo de simulação híbrida. Sendo assim, para dissertar sobre esse assunto, esta pesquisa de mestrado é composta por 6 (seis) capítulos.

No *Capítulo 1* é feita uma introdução sobre o tema. Nessa introdução, encontram-se a contextualização, as justificativas e os objetivos da dissertação. A metodologia de pesquisa e a estruturação da pesquisa também fazem parte desse capítulo. Na sequência, o *Capítulo 2* e *3* trazem, respectivamente, um embasamento teórico sobre os temas sistemas de manufatura e simulação. Dentro desses temas, serão tratados os conceitos e definições de sistemas de manufatura, a classificação de sistemas de manufatura, o estudo do trabalho, o estudo de tempos, os conceitos e definições de simulação, a Simulação a Eventos Discretos, a Simulação Baseada em Agentes e a aplicação da simulação em sistemas de manufatura.

O *Capítulo 4* apresenta a metodologia de pesquisa de maneira mais detalhada e o método de modelagem e simulação que serão aplicados. No *Capítulo 5*, encontra-se a aplicação do método de modelagem e simulação. Essa aplicação é composta por concepção, implementação e análise. Em seguida, vem o *Capítulo 6* com as conclusões e sugestões para trabalhos futuros. Por último, estão as referências utilizadas nessa dissertação e um anexo com informações complementares.

## 2. SISTEMAS DE MANUFATURA

A manufatura é uma parte importante da economia global mesmo após a transição da Era Industrial para a Era Digital (FOWLER; ROSE, 2004). Hoje, a competitividade em nível global, a exigência dos consumidores por produtos mais customizados e o rápido avanço tecnológico são tendências que desafiam as organizações manufatureiras a estabelecerem sistemas de manufatura capazes de produzir grande quantidade de produtos com elevado nível de variedade em um cenário onde a demanda futura para cada tipo de produto é desconhecida (SCHÖNEMANN *et alia*, 2015). Esses desafios têm impacto direto no desempenho da produção.

Nas próximas seções, os conceitos e definições envolvendo as palavras sistema e manufatura serão dissertados com base na literatura. Em seguida, haverá uma classificação dos sistemas de manufatura. Por fim, será abordado o estudo do trabalho envolvendo conceitos como medida do trabalho e avaliação do ritmo de trabalho.

### 2.1. Conceitos e definições

Existem diversas definições para a palavra sistema. Para Law e Kelton (1991), um sistema é composto por entidades que agem e interagem conjuntamente para desempenhar determinado fim racional. Segundo Oliveira (2008), sistema é uma união de elementos interdependentes que se interagem com determinado objetivo e executam determinada função. Shannon (1975) define sistema como a união de um grupo ou conjunto de objetos que são interdependentes e que se interagem de maneira regular para executar uma atividade específica. Logo, com base nessas três definições, sistema é a junção de elementos ativos e interdependentes que se interagem regularmente para atingir determinado objetivo.

A palavra manufatura é a combinação de duas palavras que vêm do latim, sendo elas *manus* (mão) e *factus* (fazer), e significa obra feita à mão (FIGUEIREDO, 1913; GROOVER, 2008). Todavia, essa palavra tem um significado mais amplo no contexto atual. Poli (2001) afirma que a manufatura é a composição de processos físicos que transformam materiais em forma, propriedades ou estado. Já Scallan (2003) define manufatura como sendo a fabricação de produtos conforme um plano detalhado utilizando equipamentos, matérias-primas, recursos humanos, operações e processos. Uma definição mais precisa é feita por Groover (2008), em que manufatura consiste em um conjunto de processos físicos e químicos aplicados para

modificar a aparência, a geometria e/ou as propriedades de um determinado material, assim resultando em peças ou produtos.

O termo sistema de manufatura possui significados diversos na literatura. Por exemplo, Black (1998) afirma que um sistema de manufatura é um arranjo complexo que envolve pessoas, processos, estoque, equipamentos e manuseio de materiais, sendo todos esses elementos caracterizados por parâmetros mensuráveis. De maneira simples, Scallan (2003) declara que um sistema de manufatura pode ser definido como aquele em que as matérias-primas são transformadas em produtos de valor agregado que, por sua vez, geram um montante de dinheiro em forma de lucro. Usando outras palavras, Groover (2008) define que um sistema de manufatura corresponde à união de recursos humanos e de equipamentos integrados (máquinas, ferramentas manuais e sistemas computacionais), que atuam em um ou mais processos operacionais a partir de matérias-primas.

De modo a complementar a definição do termo sistema de manufatura, Moreira (2008) expõe a ideia de *inputs* (entradas) e *outputs* (saídas) quando afirma que um sistema de manufatura engloba atividades e operações necessárias para fabricar produtos, seguindo a sequência lógica: insumos, processo de transformação e produtos acabados. Desse modo, é através do processo de transformação de *inputs* em *outputs* que qualquer operação faz produtos e serviços (SLACK *et alia*, 2009). Scallan (2003) acrescenta à essa ideia de *inputs* e *outputs* fatores externos como competição, forças de mercado, legislação, pressões sociais e tecnologia. A Figura 2.1 representada os fatores externos, os *inputs* e os *outputs* de um sistema de manufatura.

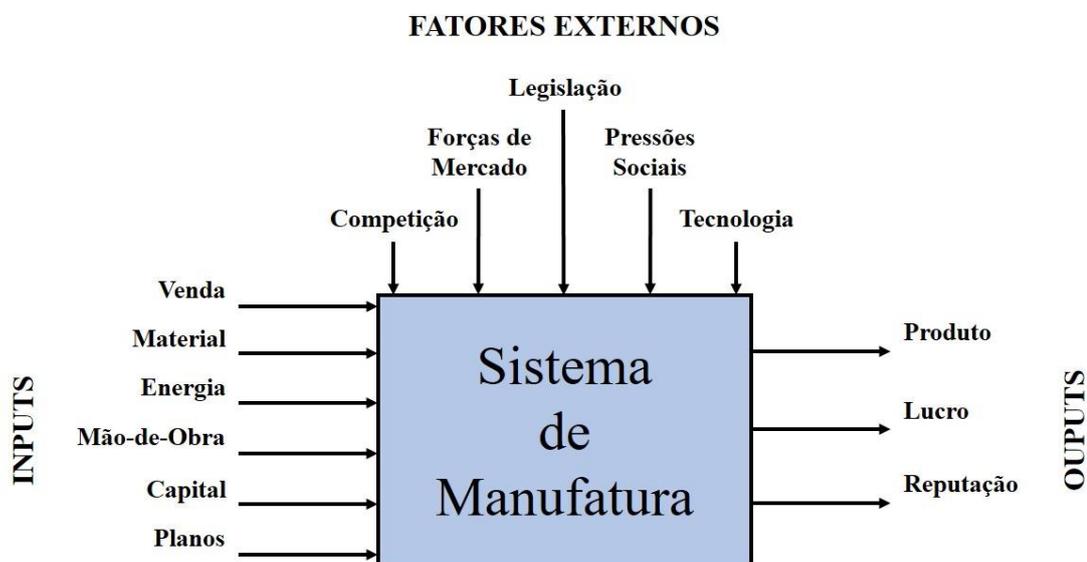


Figura 2.1 - *Inputs* e *outputs* de um Sistema de Manufatura  
Fonte: Scallan (2003)

Portanto, um sistema de manufatura é um sistema complexo, composto por um grupo de pessoas interdependentes e que se interagem de maneira regular dentro de um contexto em que o objetivo está em transformar matérias-primas em produtos tangíveis e intangíveis de valor agregado, utilizando instrumentos específicos na execução de processos operacionais.

## 2.2. Classificação de sistemas de manufatura

A influência humana nos sistemas de manufatura é perceptível e possui variações. Segundo Groover (2008), em muitos sistemas de manufatura as pessoas executam algum ou todo o trabalho de valor agregado de peças ou produtos. O mesmo autor classifica em três categorias básicas a participação do elemento humano em processos efetuados em sistemas de manufatura. Essa classificação pode ser vista através da Figura 2.2.

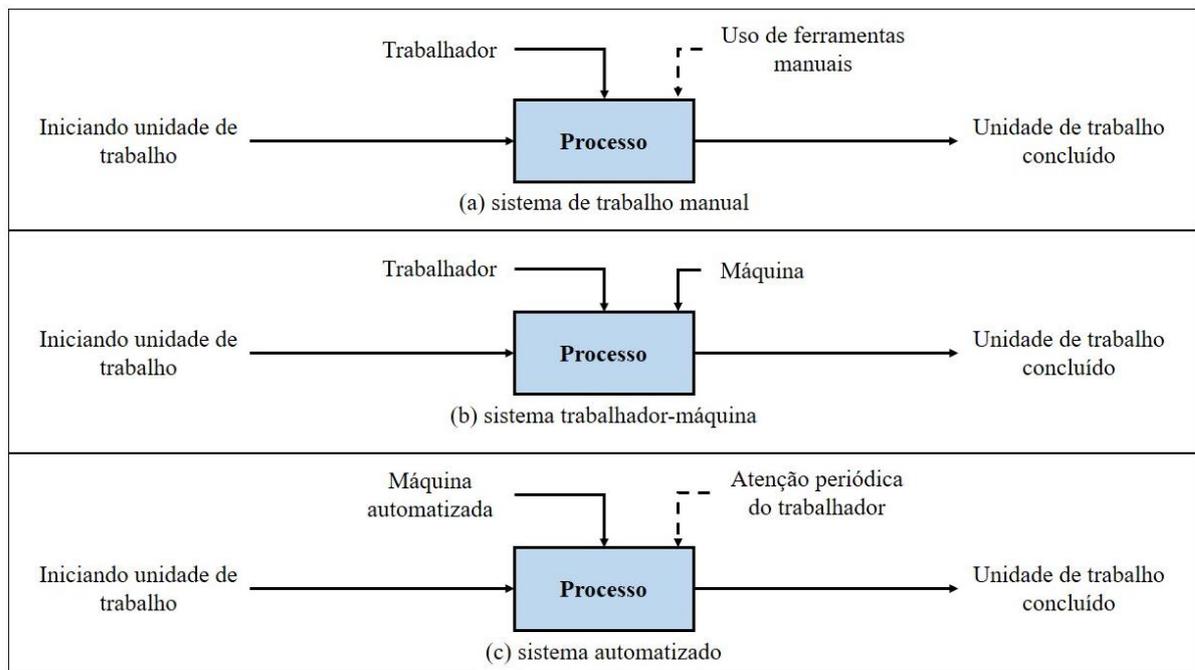


Figura 2.2 - As três categorias de sistemas de produção  
Fonte: Groover (2008)

A primeira categoria recebe o nome de sistema de trabalho manual (a). Esse tipo de sistema de manufatura é composto por um ou mais trabalhadores que executam determinadas atividades usando ferramentas manuais. A segunda categoria de sistema de manufatura é o sistema trabalhador-máquina (b). Esse sistema consiste na combinação de um ou mais trabalhadores operando máquinas de produção. Vale mencionar que o sistema trabalhador-máquina é comumente visto nas indústrias de manufatura. Por fim, a terceira categoria se chama sistema automatizado (c). Esse tipo de sistema possui a característica de executar

processos operacionais por meio de máquinas sem a participação direta do trabalhador (GROOVER, 2008).

Groover (2008) ainda ressalta que sempre haverá algum grau de automação em um sistema de manufatura do tipo trabalhador-máquina. Portanto, não existe uma distinção exata entre sistemas trabalhador-máquina e sistemas automatizados.

Os sistemas de manufatura também são classificados em tipos de processos de acordo com o volume e a variedade de produtos. Slack *et alia* (2009) afirmam que, geralmente, operações de alto volume têm baixo grau de variedade de produtos e, de modo oposto, operações de baixo volume possuem elevado grau de variedade de produtos. A Figura 2.3 mostra a dependência entre as dimensões volume e variedade de produtos.

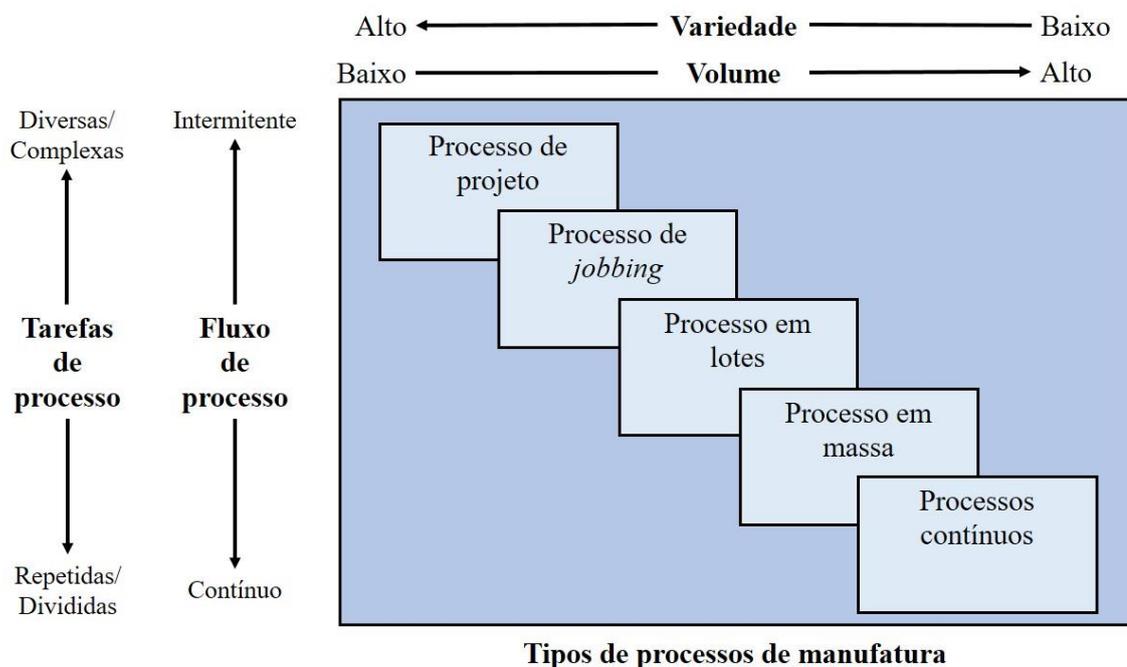


Figura 2.3 - Tipos de processos conforme a relação volume-variedade  
Fonte: Slack *et alia* (2009)

Em um processo de projeto, o nível de customização é alto e o período de produção de cada produto é longo. Esses fatos justificam a alta variabilidade e o baixo volume dos produtos que derivam de um processo de projeto. Outra característica desse tipo de processo de sistema de manufatura é que os recursos transformadores são direcionados de modo específico para cada produto. A construção de navios, a produção de filmes e a construção de pontes são exemplos de processos de projetos (SCALLAN, 2003; SLACK *et alia*, 2009).

Nos processos de *jobbing*, há um compartilhamento de recursos de operação entre os produtos. A quantidade de itens produzidos nos processos de *jobbing* é usualmente maior do

que a quantidade de itens produzidos nos processos de projeto. Outra característica dos processos de *jobbing* é a variedade de produtos produzidos, ou seja, devido ao baixo grau de repetitividade dos processos, os produtos possuem características únicas. Usinagem de moldes de metal por encomenda, serviços de ferramentaria e produção de móveis sob medida são exemplos de processos de *jobbing* (KRAJEWSKI *et alia*, 2009; SLACK *et alia*, 2009).

Apesar das semelhanças entre os processos de *jobbing* e os processos em lote, a diferença está principalmente na variedade. Nos processos em lote são feitos produtos com baixo grau de variedade, pois a cada processo em lote mais de uma unidade do mesmo produto é produzida. Quanto ao volume, a quantidade de itens varia de acordo com o tamanho do lote. São exemplos de processos em lote a produção de componentes automotivos, produção de componentes eletrônicos e fabricação de peças de reposição para produtos aeroespaciais (SCALLAN, 2003; SLACK *et alia*, 2009).

Alto volume e baixa variedade de produtos são características dos processos de produção em massa. Ademais, nesse tipo de processo, os produtos vão para o estoque para antecipar a demanda. Produção de eletrodomésticos, montagem de componentes automotivos e produção de produtos alimentícios são exemplos de processos de produção em massa (SCALLAN, 2003; SLACK *et alia*, 2009).

Operando por períodos de tempo muito longos, os processos contínuos possuem uma variedade muito baixa e o volume muito elevado. Normalmente nos processos contínuos, a produção segue um fluxo ininterrupto. De fato, as tecnologias utilizadas nos processos contínuos são inflexíveis e é insignificante a variação dos processos. São exemplos de processos contínuos a produção de energia elétrica, processos das refinarias petroquímicas e fabricação de aço (KRAJEWSKI *et alia*, 2009; SLACK *et alia*, 2009).

A escolha de um tipo de processo depende das necessidades da organização e da estratégia de produção e estoque. Não há impedimentos para a adoção de mais de um tipo de processo dentro de uma organização. Portanto, operações produtivas distintas podem adotar diferentes tipos de processo dentro de uma mesma operação (SLACK *et alia*, 2009).

O sistema de manufatura escolhido para ser explorado nessa pesquisa é uma linha de montagem de placas de circuito impresso de uma organização de médio porte. O trabalho manual é uma característica notável nesse sistema. Logo, o mesmo é classificado como sistema de trabalhos manuais. Quanto ao tipo de processo, esse sistema encontra-se na categoria de processo em massa, pois possui alto volume e baixa variedade de produtos.

### **2.3. Estudo do trabalho: medida do trabalho**

A tecnologia, os sistemas, os procedimentos e as instalações são partes não humanas da organização que frequentemente são abordadas no gerenciamento de operações. Porém, há nesse campo de estudo uma parte de característica mais humana comumente chamada de recursos humanos, os quais são relevantes para as organizações e possuem funções relacionadas à operação. Existe, portanto, uma relação importante entre a gestão dos recursos humanos e a eficácia das funções operacionais dos mesmos (SLACK *et alia*, 2010).

Os princípios que regem o comportamento humano são complexos (YODER, 1955). Conseqüentemente, diversos estudos abordando o elemento humano em seu ambiente de trabalho foram desenvolvidos e abordados sob diferentes pontos de vista. Um desses estudos é o estudo de tempos e movimentos.

O estudo de movimentos, desenvolvido por Frank B. Gilbreth e Lillian M. Gilbreth no final do século XIX e início do século XX, fundamenta-se na determinação de um método de trabalho adequado por meio de procedimentos analíticos e científicos. O estudo de tempos, originado dos trabalhos desenvolvidos por Frederick W. Taylor durante o mesmo período, baseia-se na avaliação do trabalho humano sob a perspectiva do tempo. Intrinsecamente associados com a abordagem da Administração Científica, esses estudos são complementares e, juntos, recebem o nome de estudo de tempos e movimentos (MUNDEL, 1955).

Contudo, com o passar dos anos, o termo “estudo de tempos e movimentos” foi substituído pelo termo “estudo do trabalho”. Isso ocorreu porque o estudo de tempos e movimentos se desenvolveu e começou a ser aplicado de modo mais amplo em diversas atividades (INTERNATIONAL LABOUR OFFICE, 1969). Portanto, o estudo do trabalho passou a ser uma expressão mais abrangente e adequada.

Sendo um termo lato, o estudo do trabalho engloba dois campos de estudos, o estudo do método e a medida do trabalho, que são aplicados com o objetivo de conquistar melhorias a partir da investigação sistemática de todos os fatores que possam interferir na eficiência do trabalho humano (SLACK *et alia*, 2009). Vale acrescentar que o estudo do trabalho se atenta em aumentar a produção por meio de uma quantidade determinada de recursos, fazendo o mínimo de investimento de capital possível (INTERNATIONAL LABOUR OFFICE, 1969).

De modo particular, o estudo do método foca na redução dos custos por meio do desenvolvimento e aplicação de métodos de trabalho mais simples e eficazes a partir do

registro sistemático e análise crítica dos métodos de trabalho existentes e praticados no contexto produtivo (SLACK *et alia*, 2009).

Sendo usada como sinônimo do termo estudo de tempos, a medida do trabalho envolve a aplicação de técnicas para determinar o tempo necessário que um trabalho especificado deve possuir, visto que esse trabalho é efetuado em um ritmo normal por um trabalhador treinado e qualificado. Portanto, o tempo de execução necessário, obtido através da medida do trabalho, para realizar determinada atividade recebe o nome de tempo-padrão (MUNDEL, 1955; BARNES, 1977).

O processo de medida do trabalho abrange a atividade de avaliação do ritmo. Essa atividade determina o ritmo de trabalho de um operador com base em diversos fatores (BARNES, 1977). Nesse sentido é importante salientar que essa pesquisa aborda a representação do fator humano por meio de seu ritmo de trabalho.

## **2.4. Estudo de tempos: avaliação do ritmo de trabalho**

A ocorrência de variação do ritmo de trabalho humano é notável ao longo do tempo no contexto organizacional. A velocidade empregada na execução de determinada tarefa difere de pessoa para pessoa. Ademais, o ritmo de trabalho de um único operador, mesmo que treinado e qualificado, não se mantém constante no decorrer do tempo. Essa oscilação do ritmo de trabalho humano se deve a diversos fatores envolvendo questões motivacionais, ambientais, sociais, psicológicas e fisiológicas.

Durante o processo de avaliação do ritmo, o analista de medida do trabalho pode considerar fatores como velocidade, esforço, habilidade, consistência, condições ambientais, movimento dos membros superiores e inferiores, peso e pulsação (BARNES, 1977; SLACK *et alia*, 2009). A escolha desses fatores depende do método de avaliação de ritmo adotado pelo analista.

Avaliar o ritmo de trabalho de um operador talvez seja a parte mais relevante e difícil do processo de medida do trabalho. Isso porque há uma dependência do julgamento pessoal do analista de medida de trabalho no instante em que é efetuada a avaliação do ritmo utilizado pelo trabalhador (BARNES, 1977). Em outras palavras, o analista determina qual o desempenho médio que um trabalhador precisa possuir para realizar determinada operação.

De acordo com Altamuro (1996), o desempenho médio de um operador não é determinado através da estatística, ele é estabelecido por definição. Ou seja, o desempenho médio esperado

de um trabalhador qualificado é estabelecido com base na concepção do analista de medida de trabalho.

O tempo normal de uma operação é obtido após a aplicação do fator de ritmo sobre o tempo coletado. Existem diversos métodos para definir o fator de ritmo. Um desses métodos fundamenta-se na definição de um fator de ritmo abrangendo toda a operação. Nesse caso, o fator de ritmo é determinado a partir do nível médio de trabalho executado pelo operador durante a coleta de dados. Outro método baseia-se na determinação de um fator de ritmo para cada ação efetuada dentro da operação (BARNES, 1977).

Além desses métodos de avaliação do ritmo de trabalho, Barnes (1977) apresenta mais seis sistemas que podem ser aplicados para definir o fator de ritmo, sendo eles: (1) Avaliação do Ritmo através da Habilidade e do Esforço, (2) Sistema Westinghouse para Avaliação do Ritmo, (3) Avaliação Sintética do Ritmo, (4) Avaliação Objetiva do Ritmo, (5) Avaliação Fisiológica do Nível de Desempenho e (6) Desempenho do Ritmo.

Dentre os métodos de avaliação de ritmo apresentados por Barnes (1977), o escolhido para ser aplicado nessa dissertação é o Sistema Westinghouse para Avaliação do Ritmo. A escolha desse método está relacionada com a oportunidade de explorar os valores que estimam o desempenho de um trabalhador. Esses valores podem ser vistos por meio da Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Estimativas de desempenho

HABILIDADE			ESFORÇO		
+0,15	A1	<i>Super-hábil</i>	+0,13	A1	<i>Excessivo</i>
+0,13	A2		+0,12	A2	
+0,11	B1	<i>Excelente</i>	+0,10	B1	<i>Excelente</i>
+0,08	B2		+0,08	B2	
+0,06	C1	<i>Bom</i>	+0,05	C1	<i>Bom</i>
+0,03	C2		+0,02	C2	
0,00	D	<i>Médio</i>	0,00	D	<i>Médio</i>
-0,05	E1	<i>Regular</i>	-0,04	E1	<i>Regular</i>
-0,10	E2		-0,08	E2	
-0,16	F1	<i>Fraco</i>	-0,12	F1	<i>Fraco</i>
-0,22	F2		-0,17	F2	
CONDIÇÕES			CONSISTÊNCIA		
+0,06	A	<i>Ideal</i>	+0,04	A	<i>Perfeita</i>
+0,04	B	<i>Excelente</i>	+0,03	B	<i>Excelente</i>
+0,02	C	<i>Boa</i>	+0,01	C	<i>Boa</i>
0,00	D	<i>Média</i>	0,00	D	<i>Média</i>
-0,03	E	<i>Regular</i>	-0,02	E	<i>Regular</i>
-0,07	F	<i>Fraca</i>	-0,04	F	<i>Fraca</i>

Fonte: Barnes (1977)

O Sistema Westinghouse para Avaliação do Ritmo foi desenvolvido pela companhia Westinghouse em 1927 para estimar a eficiência do trabalhador com base nos fatores: (1) habilidade, (2) esforço, (3) condições e (4) consistência. Mostrado através da Tabela 2.1, cada fator do Sistema Westinghouse é representado por um conjunto de valores numéricos.

Tendo como referência o Sistema Westinghouse, o analista avalia o nível de habilidade que um determinado operador possui e o esforço empregado pelo mesmo durante a execução de uma operação. Além disso, questões ligadas às condições do ambiente de trabalho e à consistência de trabalho do operador também são avaliadas pelo analista. Assim, a avaliação desses quatro fatores que podem interferir no ritmo de trabalho do operador ocorre com base no julgamento pessoal do analista.

Para se obter o tempo normal (TN), faz-se necessário a multiplicação do tempo selecionado (TS) pela soma dos valores definidos para cada fator ( $\Sigma F$ ) da tabela de estimativas de desempenho do Sistema Westinghouse. A equação (2.1) mostra o cálculo do TN.

$$\mathbf{TN} = \mathbf{TS} \times \left[ \mathbf{1} + \left( \sum \mathbf{F} \right) \right] \quad (2.1)$$

Por exemplo, suponha-se que o tempo selecionado para executar uma determinada operação seja 0,5 minuto e que a Tabela 2.2 representa as avaliações do analista quanto aos quatro fatores (BARNES, 1977).

Tabela 2.2 - Avaliação dos quatro fatores

HABILIDADE		ESFORÇO		CONDIÇÕES		CONSISTÊNCIA	
B2	+0,08	C2	+0,02	C	+0,02	C	+0,01

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Logo, substituindo os valores na equação (2.1) teremos:

$$\mathbf{TN} = \mathbf{0,5} \times \left[ \mathbf{1} + \left( \mathbf{0,08} + \mathbf{0,02} + \mathbf{0,02} + \mathbf{0,01} \right) \right] \quad (2.2)$$

O resultado da equação (2.2) é 0,565 minuto. Isso significa que, com base na avaliação dos quatro fatores do Sistema Westinghouse, 0,565 minuto é o tempo normal que o operador leva para executar a operação (BARNES, 1977).

O breve exemplo abordado anteriormente demonstra como o Sistema Westinghouse funciona. Contudo, é importante ressaltar que nesse trabalho os fatores Habilidade e Condições não serão considerados. Isso porque os trabalhadores, no contexto real, não possuem a autonomia de alterar esses dois fatores em um curto espaço de tempo. Logo, os fatores Esforço e Consistência terão maior relevância para a presente pesquisa.

### 3. SIMULAÇÃO

Em diversos ramos da ciência, o progresso científico se deu com base em duas metodologias: (1) análise teórica ou dedução e (2) análise empírica ou indução (HARRISON *et alia*, 2007). Inicialmente discutida como forma de raciocínio pelos gregos, especialmente por Platão, a dedução consiste em um processo em que conclusões, fundamentadas em argumentos teóricos ou lógicos e em um conjunto de premissas iniciais, são retiradas com relação a um fenômeno ou comportamento (BHATTACHERJEE, 2012; WALLIMAN, 2011).

A indução, sendo a primeira e a mais usual forma de atividade científica, foi a abordagem que deu sustentação à revolução científica no século XVII. Diferentemente do processo de dedução, conclusões são estabelecidas durante o processo de indução a partir dos fatos ou das provas observadas. Em outras palavras, no método indutivo são feitas observações a respeito das variáveis (dados) e, posteriormente, essas observações são analisadas com o objetivo de encontrar relações entre as variáveis (BHATTACHERJEE, 2012; HARRISON *et alia*, 2007; WALLIMAN, 2011).

Apesar das distinções existentes entre a simulação e as metodologias de dedução e de indução, há características análogas entre as abordagens. A simulação é semelhante à dedução pelo fato de que os resultados partem de um conjunto de premissas estabelecidas. A simulação também se assemelha à indução, pois ela possibilita inferências sobre as relações entre as variáveis através da análise dos dados de saída, mesmo que esses dados de saída sejam produzidos por programas de simulação (HARRISON *et alia*, 2007).

A história da simulação pode ser abordada sob diferentes pontos de vista. *Verbi gratia*, sob a perspectiva de sua utilização para fins de análise, treinamento ou pesquisa; sob o ponto de vista dos tipos de simulação existentes (Simulação a Eventos Discretos, Simulação Contínua, Simulação Baseada em Agentes); sob a ótica das linguagens de simulação ou ambientes de programação como GPSS®, SLAM®, Arena®, AutoMod®, Simio®, SIMSCRIPT®, SIMULA®; e sob o enfoque dos campos onde a simulação pode ser aplicada tais como a área militar e as áreas de manufatura, comunicações e transportes (GOLDSMAN *et alia*, 2010).

Segundo Nance e Sargent (2002), o período da Segunda Guerra Mundial (1939 - 1945) foi o pano de fundo histórico em que a simulação teve início. Foi nessa época que os modelos contínuos e de Monte Carlo foram desenvolvidos. Provavelmente, a simulação a eventos discretos nasceu durante a década de 1940; todavia, não há como afirmar a data correta conforme os autores. Quanto à Simulação Baseada em Agentes, Chwif e Medina (2015)

afirmam que ela se consolidou efetivamente na década de 1990, apesar da definição de sua base teórica ter ocorrido no final da década de 1940.

Nas décadas posteriores ao período da Segunda Guerra Mundial, a simulação ganhou uma aceitação mais abrangente da comunidade científica e começou a ser aplicada em diversos estudos das áreas de ciências naturais e, seguidamente, das áreas de ciências sociais (HARRISON *et alia*, 2007).

Há uma relação intrínseca entre a evolução computacional e o desenvolvimento científico na área de simulação. Durante a década de 1950 houve um aumento na disponibilidade de computadores eletrônicos para propósitos diversos. Esse fato tornou propícia a rápida difusão das técnicas de simulação e suas aplicações (GOLDSMAN *et alia*, 2010). Um dos fatores que influenciou esse aumento no uso das técnicas de simulação, especialmente na área de manufatura, foi o aperfeiçoamento das capacidades de hardware e o aprimoramento dos softwares de simulação (GIANNASI *et alia*, 2001).

No que se refere aos avanços na área de software e a relação desses avanços com a simulação, a emergência da linguagem de programação FORTRAN® ampliou, no final dos anos de 1950, a quantidade de semânticas úteis para a compreensão das representações de modelo. Em meados dos anos de 1960, surgiram a GASP® e a MILITRAN® (pacotes de simulação FORTRAN®) oferecendo capacidades funcionais, inibindo a difusão da *Simulation Programming Language (SPL)* –, um dos primeiros programas de simulação para construção de modelos. Em paralelo, a linguagem ALGOL® tinha ampla aceitação no continente europeu. A partir dessa linguagem surgiu a SIMULA 67®, inaugurando o estilo de programação orientada a objeto (NANCE; SARGENT, 2002).

Desde os anos de 1980, a evolução da capacidade de muitos softwares de simulação acompanhou o crescimento do poder computacional (BRAILSFORD *et alia*, 2012). Nas décadas de 1980 e 1990, a linguagem orientada a objeto se tornou popular através da Smalltalk e se estabeleceu como uma metodologia de software (NANCE; SARGENT, 2002).

É importante ressaltar que, segundo Fioretti (2012), a programação orientada a objeto proporcionou novas oportunidades de realizar simulações através do computador. De fato, pela linguagem orientada a objeto, a representação dos atores do mundo real pode ocorrer naturalmente por meio de objetos. Por exemplo, é possível reproduzir em ambiente virtual o comportamento dos tomadores de decisão, grupos ou organizações e suas interações, aproximando-se, assim, da realidade.

Dentro das organizações, as inter-relações existentes entre os diversos elementos organizacionais proporcionam a emergência da complexidade. Inerente aos diversos sistemas de manufatura, essa complexidade corrobora a aplicação de ferramentas mais apropriadas como a simulação. Na próxima seção, conceitos e definições envolvendo a simulação serão feitos com o objetivo de estabelecer parâmetros na exposição de ideias no decorrer desta dissertação.

### 3.1. Conceitos e Definições

Há no contexto organizacional diversos tipos de sistema. Esses sistemas surgem para atingir objetivos específicos de produção. Após um determinado período, esses sistemas podem ser analisados e revistos. Nesse sentido, Law (2007) afirma que haverá, em algum momento, a necessidade de realizar estudos sobre determinado sistema com o objetivo de obter *insights* sobre as possíveis correlações entre os elementos do sistema ou prever o desempenho do sistema sob novas condições. Um sistema pode ser estudado através de diferentes maneiras como mostra a Figura 3.1.

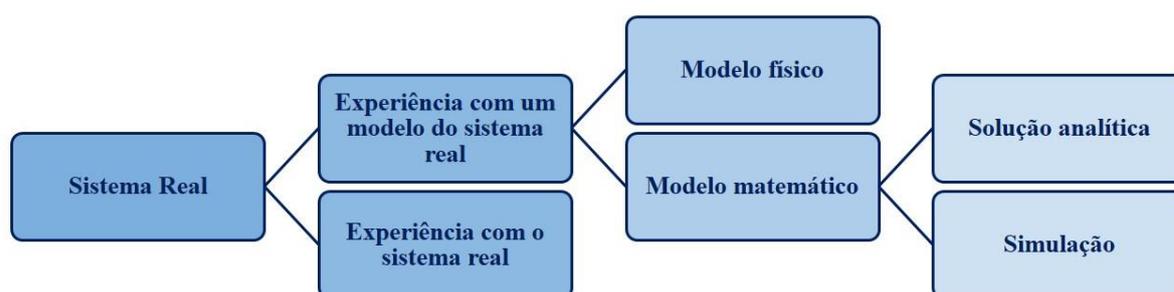


Figura 3.1 - Maneiras de se estudar um sistema  
Fonte: Law (2007)

A simulação, também chamada de modelagem e simulação, é uma das técnicas de se estudar um sistema. De acordo com Shannon (1975), a modelagem e simulação é, dentre outras ferramentas de análise, aquela com maior poder. Sendo influenciada pelas áreas de matemática, de ciência da computação, de probabilidade e de estatística, a modelagem e simulação possui um conceito simples e, intuitivamente, atraente. Ela permite que o analista realize experimentos com sistemas reais ou propostos.

Nessa mesma linha de raciocínio, Ingalls (2008) afirma que, se compreendida e usada de modo correto, a simulação se torna uma ferramenta poderosa. Harrison *et alia* (2007) acrescentam que a modelagem e simulação consiste em uma ferramenta metodológica poderosa capaz de fornecer avanços científicos sobre comportamentos e sistemas complexos.

Há na literatura diversas definições para simulação. Shannon (1975, p. 2) define simulação da seguinte forma:

Simulação é o processo de formular um modelo de um sistema real e de realizar experiências com este modelo como o propósito ou de compreender o comportamento do sistema ou de avaliar várias estratégias (dentro dos limites impostos por um ou mais critérios) para a operação do sistema.

Para Baines *et alia* (2004), simulação consiste em uma técnica que possibilita a construção de um modelo capaz de descrever o comportamento de um sistema do mundo real. A partir desse modelo, testes podem ser efetuados para verificar como o desempenho do sistema proposto reage sob diferentes condições de funcionamento.

Ingalls (2008) estabelece que, possuindo a finalidade de avaliar diferentes estratégias de operação ou compreender o comportamento do sistema, a simulação baseia-se na execução do processo de criação de um modelo dinâmico a partir de um sistema real dinâmico. Logo, é possível imitar o comportamento de um sistema dinâmico através da simulação.

Sturrock (2014) completa essas definições quando afirma que simulação consiste em um processo de descoberta, uma vez que conhecimentos são obtidos desde o esforço em descrever com precisão o sistema real até o alcance dos primeiros resultados gerados pela simulação.

Em contraste com as definições sobre o que é simulação citadas anteriormente, Chwif e Medina (2015) exploram o que não é simulação a partir do senso comum sobre o termo:

- ***A simulação não é uma bola de cristal.*** O futuro não pode ser previsto pela simulação. De fato, o que pode ser previsto com certo grau de confiança é o comportamento do sistema. Essa previsão ocorre com base em um conjunto de premissas e dados de entradas específicos.
- ***A simulação não é um modelo matemático.*** O uso de expressões matemáticas em um modelo de simulação é permitido. Todavia, a simulação não pode estar submetida apenas a um conjunto de fórmulas matemáticas, pois os resultados acerca do comportamento de um sistema não se originam de um conjunto de equações preestabelecidas.
- ***A simulação não é uma ferramenta estritamente de otimização.*** A simulação não é uma ferramenta que possui a capacidade de identificar a solução ótima de um sistema. Na realidade, ela é uma ferramenta utilizada para analisar cenários.

- *A simulação não substitui o pensamento inteligente.* Não há a possibilidade de substituir o processo de tomada de decisão dos seres humanos pela simulação.
- *A simulação não é uma técnica de último recurso.* O termo “técnica de último recurso” é pejorativo. Esse termo era utilizado para se referir à aplicação da simulação. Todavia, a complexidade dos sistemas reais e a necessidade de representá-los de maneira válida através de modelos fazem com que a simulação seja aplicada, cada vez mais, em diferentes situações (LAW, 2007).
- *A simulação não é uma panaceia.* A simulação não deve ser aplicada em todos os casos. É inadequado, em determinadas situações, utilizar a simulação como método para resolver questões mais simples. Contudo, apoiar-se em experiência ou intuição para tomar decisões a respeito de sistemas complexos não é um dos melhores métodos.

No ambiente organizacional, o ato de tomar decisões consiste em um dos principais desafios enfrentado pelos gestores, pois essas decisões precisam ser feitas para que o sistema consiga ter a melhor performance possível, considerando os diversos fatores. É nesse contexto que a melhor compreensão do sistema, a identificação de problemas, a formulação de estratégias e oportunidades, e o apoio e a sistematização do processo de tomada de decisão podem acontecer por meio do uso de modelos (MORABITO NETO; PUREZA, 2012).

Um modelo cumpre a função de reproduzir, de modo diverso, um objeto, um sistema ou uma ideia (SHANNON, 1975). Para Bertrand e Fransoo (2002), um modelo consiste sempre em uma abstração da realidade que não inclui todos os elementos dessa realidade. Robinson (2013) estabelece que um modelo é uma representação simplificada da realidade construído para uma finalidade específica; dessa maneira, não se pode afirmar que esse modelo é um modelo geral da realidade.

De modo abrangente, um modelo consiste em uma:

(...) representação de uma situação ou realidade, conforme vista por uma pessoa ou um grupo de pessoas, e construída de forma a auxiliar o tratamento daquela situação de uma maneira sistemática. Por um lado, um modelo deve ser suficientemente detalhado para captar elementos essenciais e representar o sistema real; por outro lado, ele deve ser suficientemente simplificado (abstraido) para ser tratável por métodos de análise e resolução conhecidos (MORABITO NETO; PUREZA, 2012, p. 170).

Assim, cumprindo a função de reproduzir elementos da realidade, um modelo exerce papel relevante na elucidação e resolução de problemas. É relevante mencionar que os modelos podem ser classificados em concretos e abstratos de acordo com Morabito Neto e Pureza (2012). Em forma de exemplos, os mesmos autores sugerem que modelos concretos são

protótipos e maquetes; modelos abstratos são aqueles representados por desenhos, gráficos, tabelas e modelos quantitativos.

Descritos em linguagem matemática ou computacional, os modelos quantitativos utilizam técnicas analíticas e experimentais para efetuar cálculos a respeito dos elementos característicos do sistema em estudo, e análises sobre os resultados obtidos considerando diferentes cenários aplicados ao sistema (MORABITO NETO; PUREZA, 2012).

A complexidade é um componente natural dos sistemas reais. Essa complexidade ocorre por conta da natureza dinâmica e aleatória presentes nesses sistemas. Em outras palavras, um sistema real é regido por variáveis aleatórias e pode mudar o seu estado no decorrer do tempo. Essas características podem ser assimiladas com mais fidelidade através de um modelo de simulação. Por meio do computador, um modelo de simulação procura reproduzir o comportamento de um sistema real. É importante lembrar que um modelo de simulação baseia-se em sentenças do tipo: “*O que acontece se...*”. Cenários heterogêneos podem emergir a partir desse tipo de sentença. De fato, diversas análises a respeito do sistema em estudo podem ser efetuadas com base em um modelo de simulação. Contudo, uma das limitações dos modelos de simulação é a quantidade de tempo gasto na construção do modelo e, conseqüentemente, a demora em se obter respostas quanto ao resultado que se deseja alcançar (CHWIF; MEDINA, 2015).

Portanto, não importa a quantidade de tempo ou de recursos gastos na construção de um modelo de simulação de um sistema complexo, pois esse modelo sempre será apenas uma aproximação do sistema real. Todavia, um modelo de simulação deve se aproximar ao sistema real, pois, do contrário, as conclusões feitas a partir desse modelo podem estar inclinadas ao erro, gerando decisões custosas (LAW, 2005).

O conjunto de relações lógicas e causais que ocorrem nos sistemas reais é o cerne de um modelo de simulação (SARGENT, 2014). Baseado em Little (1970), Shannon (1975, p. 22, grifo do autor) define que um bom modelo de simulação precisa conter os seguintes atributos:

- ***Simples*** de ser entendido pelo usuário;
- ***Meta*** ou propósito direcionado;
- ***Robusto***, na medida em que respostas absurdas não são dadas;
- ***Fácil de ser controlado*** ou manipulado pelo usuário, ou seja, deve ser fácil de se comunicar;
- ***Completo*** acerca de questões importantes;

- **Adaptativo**, com um procedimento fácil para efetuar uma modificação ou atualização do modelo;
- **Evolutivo**, na medida em que o modelo deve iniciar de forma simples e se tornar mais complexos, em junção com o usuário.

Além desses atributos mencionados por Shannon (1975), os modelos de simulação podem ser classificados como:

- **Estáticos**. Nos modelos de simulação estática, o sistema é representado levando em consideração um determinado momento. Neste caso, o tempo não desempenha papel relevante no modelo (LAW, 2007).
- **Dinâmicos**. A representação de um sistema à medida que o mesmo evolui no decorrer do tempo é a característica essencial dos modelos de simulação dinâmica (LAW, 2007). Portanto, o tempo é um elemento fundamental em um modelo de simulação dinâmica.
- **Determinísticos**. Um modelo de simulação é classificado como determinista por não conter elementos de probabilidade. Assim, o conjunto de dados de entrada e as relações especificadas no modelo irão gerar dados de saída deterministas (LAW, 2007).
- **Estocásticos**. A essência dos modelos de simulação estocásticos está nos dados de entrada aleatórios. Por consequência, os dados de saída também são aleatórios (LAW, 2007). É normal, nesse tipo de modelo, a presença de componentes probabilísticos.

A partir dessa classificação, os modelos de simulação podem ser desenvolvidos utilizando as seguintes abordagens de simulação:

- **Simulação de Monte Carlo**. Também conhecida como simulação estática, a Simulação de Monte Carlo faz uso de geradores de números aleatórios e de distribuições de probabilidade acumulativas do sistema de interesse. Uma roleta, uma tabela de dígitos aleatórios, uma sub-rotina de computador ou qualquer outro método em que é possível obter números aleatórios distribuídos uniformemente pode ser utilizado como gerador de números aleatórios. Quanto à distribuição de probabilidade, ela pode se originar de dados empíricos de registros anteriores, de uma experiência recente ou de uma distribuição teórica já conhecida. Sendo particularmente útil na resolução de problemas matemáticos complexos, nesse tipo de simulação o elemento tempo não é relevante. Logo, o sistema simulado através da Simulação de Monte

Carlo é representado em um dado instante do tempo (SHANNON, 1975; CHWIF; MEDINA, 2015).

- **Simulação Contínua.** A Simulação Contínua é aplicada quando há a necessidade de modelar um sistema que muda continuamente as suas variáveis de estado ao longo do tempo. Ou seja, a Simulação Contínua é apropriada quando o sistema de interesse possui um fluxo contínuo de informações ou de componentes. É comum, nesse tipo de simulação, o uso de equações diferenciais para calcular as alterações das variáveis de estados (SHANNON, 1975; LAW, 2007; CHWIF; MEDINA, 2015).
- **Simulação de Sistemas Dinâmicos.** Uma das principais características da Simulação de Sistemas Dinâmicos é o foco nas relações de causa e efeito entre os elementos do sistema a ser simulado. Assim, sendo extremamente útil para identificar as variáveis de um sistema e suas relações causais, a Simulação de Sistemas Dinâmicos também é útil para compreender de modo global o comportamento de um sistema. Outras características importantes desse tipo de simulação são a retroalimentação e o uso de uma abordagem *top-down* (de cima para baixo). É importante afirmar que, nos modelos de Simulação de Sistemas Dinâmicos, o elemento tempo é um parâmetro relevante quando o comportamento do sistema é considerado. Além disso, os modelos de Simulação de Sistemas Dinâmicos são deterministas e não conseguem capturar a variabilidade individual dos elementos do sistema (MACAL; NORTH, 2005; VIANA *et alia*, 2014; CHWIF; MEDINA, 2015).
- **Simulação a Eventos Discretos.** Por meio de eventos, um determinado sistema sofre mudanças de estado em momentos discretos do tempo. O sistema que possui essas características pode ser modelado através da Simulação a Eventos Discretos. Nesse tipo de simulação também se considera as alterações no estado do sistema ao longo do tempo. Um modelo de simulação a eventos discretos é geralmente orientado através do tempo com base em amostras aleatórias de distribuições de probabilidade. Dessa maneira, esse tipo de simulação é normalmente de natureza estocástica (LAW, 1988; CHWIF; MEDINA, 2015).
- **Simulação Baseada em Agentes.** Na Simulação Baseada em Agentes, a construção de um modelo baseado em agentes ocorre a partir da modelagem dos agentes do sistema que possuem características autônomas. Além dessas características autônomas, os agentes têm capacidades interativas, ou seja, eles podem interagir entre si e com o ambiente – mundo virtual de caráter discreto ou contínuo. Através do uso da

Simulação Baseada em Agentes é possível modelar de modo explícito a complexidade que advém das ações individuais (SIEBERS *et alia*, 2010; CHWIF; MEDINA, 2015).

Nesta seção, foram apresentadas as definições sobre os termos simulação e modelo. Além disso, classificações sobre cada um dos termos também foram mostradas. Essas definições e classificações são relevantes para efeito de esclarecimento. Ademais, vale lembrar que nessa dissertação haverá a combinação de duas abordagens de simulação, sendo elas: Simulação a Eventos Discretos e a Simulação Baseada em Agentes. O principal motivo dessa combinação está na tentativa de representar de maneira mais adequada o elemento humano em um sistema de manufatura. Desse modo, nas próximas seções serão abordados com maior detalhe a Simulação a Eventos Discretos e a Simulação Baseada em Agentes, o fator humano e a sua representação por meio da simulação, e o uso da simulação no contexto de manufatura.

### **3.2. Simulação a Eventos Discretos**

Possuindo a capacidade de imitar o comportamento dinâmico de um sistema real, a Simulação a Eventos Discretos sempre esteve, historicamente, muito próxima da Pesquisa Operacional. Há mais de 40 anos que a Simulação a Eventos Discretos vem sendo o principal pilar da comunidade científica que desenvolve trabalhos envolvendo a simulação dentro da Pesquisa Operacional (INGALLS, 2008; SIEBERS *et alia*, 2010).

Além dessa ligação com a Pesquisa Operacional, a Simulação a Eventos Discretos encontra-se bem próxima da Ciência da Computação sob a ótica do desenvolvimento de softwares e algoritmos (BRAILSFORD, 2014). Nos últimos anos, apesar de ser uma ferramenta computacionalmente cara, o uso da Simulação a Eventos Discretos aumentou devido a dois fatores: o aumento do poder computacional e o aumento de memória computacional (NEGAHBAN; SMITH, 2014). Hoje, softwares sofisticados de Simulação a Eventos Discretos podem proporcionar ao usuário meios interativos de gerar análises de dados de saída do modelo (FAKHIMI *et alia*, 2014). Além disso, existem *softwares* que permitem a criação de modelos de simulação no formato tridimensional.

Com Simulação a Eventos Discretos, é possível lidar com incertezas estocásticas e ter um entendimento acerca do processo que está presente no sistema (MACAL; NORTH, 2005). Assim, de acordo com Siebers *et alia* (2010), é adequado utilizar a Simulação a Eventos Discretos em problemas que envolvem simulações de filas ou redes de filas complexas. Nesses casos, os processos podem ser bem definidos e as incertezas desses processos podem ser representadas por meio de distribuições estocásticas.

Portanto, possuindo a habilidade de imitar a dinâmica de sistemas reais, a Simulação a Eventos Discretos é uma ferramenta que permite modelar sistemas que possuem filas e atividades. Uma das características mais acentuadas desses sistemas é a mudança de estado em momentos discretos do tempo (INGALLS, 2008; KASAIE; KELTON, 2015).

Segundo Law (2007), a Simulação a Eventos Discretos preocupa-se em modelar sistemas que sofrem alterações com o passar do tempo. Essas alterações ocorrem instantaneamente em pontos distintos no tempo em virtude das variáveis de estado do sistema. São nesses pontos distintos no tempo que eventos surgem. Nesse contexto, um evento pode ser definido como um acontecimento instantâneo capaz de mudar o estado do sistema. Conceitualmente, a Simulação a Eventos Discretos pode ser realizada através de cálculos manuais; todavia, por conta do volume de dados característicos dos sistemas reais que precisam ser manipulados e armazenados, é comum que esse tipo de simulação seja realizado por meio de ferramentas computacionais.

Aplica-se a Simulação a Eventos Discretos em diferentes situações no contexto organizacional. Conforme Siebers *et alia* (2010), existe muitas aplicações para a Simulação a Eventos Discretos em organizações das áreas de manufatura e de serviços. Chwif e Medina (2015) também afirmam que é ampla a aplicação da Simulação a Eventos Discretos nessas duas áreas. Ademais, os mesmos autores acrescentam que é possível aplicar esse tipo de simulação considerando as seguintes áreas e situações: aeroportos e portos; bancos; cadeias logísticas; células automatizadas; centrais de atendimento; escritórios; estoques; hospitais; linhas de montagem; parques de diversões; programação da produção; restaurantes; sistemas de movimentação e armazenagem de materiais; supermercados.

Normalmente, um modelo de Simulação a Eventos Discretos é conduzido através do tempo por meio do uso de amostras aleatórias de distribuições de probabilidade. A modelagem do sistema real ocorre de modo correto quando suas variáveis aleatórias são representadas, no modelo de Simulação a Eventos Discretos, por distribuições de probabilidade adequadas (LAW, 1988).

Chwif e Medina (2015) explicam que é esperado que um modelo de Simulação a Eventos Discretos seja o mais próximo possível da realidade. Também espera-se que esse modelo tenha a capacidade de demonstrar os fenômenos aleatórios que fazem parte do sistema real. Esses fenômenos aleatórios são retratados no modelo com base em modelos probabilísticos (distribuições de probabilidade). Esses modelos probabilísticos são obtidos através da modelagem de dados de entrada. Logo, a modelagem de dados de entrada é efetuada com o

intuito de se obter modelos probabilísticos que possibilitam a realização de inferências sobre as propriedades de um determinado fenômeno aleatório presente no sistema real.

Todo modelo de simulação possui suas próprias características, as quais são expressadas através de elementos fundamentais que constituem o modelo de simulação. Tais elementos se diferem dependendo do tipo de simulação utilizada. Segundo Ingalls (2008), no caso dos modelos de Simulação a Eventos Discretos, os elementos fundamentais são: entidades; atividades e eventos; recursos; variáveis globais; calendário; variáveis de estado do sistema; gerador de números aleatórios; coletores estatísticos.

A Simulação a Eventos Discretos é uma das ferramentas que oferece suporte aos tomadores de decisões. Por meio dessa ferramenta, torna-se possível estudar e analisar sistemas complexos (BANKS *et alia*, 2005; PEREIRA, 2014). É cada vez maior o tamanho e a complexidade dos sistemas que podem ser modelados por meio da Simulação a Eventos Discretos (CICIRELLI *et alia*, 2011). Na maioria das vezes, o elemento humano é um dos componentes importantes desses sistemas complexos. Nesse ponto, é importante ressaltar que na literatura existem trabalhos abordando o elemento humano sob a ótica da Simulação a Eventos Discretos. Um desses trabalhos é o de Brailsford e Schmidt (2003), que contém um modelo de Simulação a Eventos Discretos voltado para triagem de retinopatia diabética. No ramo de manufatura, outro trabalho a ser citado é o de Vilela (2015), que trata da variação do ritmo de trabalho humano por meio de uma detalhada modelagem dos dados de entrada.

Com o surgimento da Simulação Baseada em Agentes, a inserção do elemento humano em um projeto de simulação ganhou nova perspectiva. Além disso, a Simulação Baseada em Agentes também trouxe a possibilidade de integração com a Simulação a Eventos Discretos. O assunto envolvendo a combinação da Simulação a Eventos Discretos com a Simulação Baseada em Agentes será tratado com mais detalhes na seção 3.4. Antes, faz-se necessária a apresentação de conceitos que abrangem a Simulação Baseada em Agentes.

### **3.3. Simulação Baseada em Agentes**

A Simulação Baseada em Agentes é uma técnica relativamente nova. Sua popularidade vem crescendo, assim como seu número de aplicações em diversas áreas. Além disso, a Simulação Baseada em Agentes é uma abordagem flexível e poderosa para modelar os comportamentos dinâmicos e detalhados de sistemas complexos, como é o caso do comportamento humano. Há diversos relatos de sucesso da aplicação da Simulação Baseada em Agentes no contexto industrial (MORTAZAVI *et alia*, 2015). Através da Tabela 3.1, Macal (2016) apresenta uma

amostragem das principais publicações sobre a Simulação Baseada em Agentes e suas respectivas áreas de estudos.

Tabela 3.1 - Amostragem de publicações sobre a Simulação Baseada em Agentes

<b>DISCIPLINAS</b>	<b>PUBLICAÇÕES</b>
Cadeias de Suprimento	Chen <i>et alia</i> (2013); Swaminathan <i>et alia</i> (1998).
Manufatura distribuída / inteligente	Leitão (2009); Monostori <i>et alia</i> (2006); Shen e Norrie (1999).
Filas	Sankaranarayanan (2011).
Economia	Hamill e Gilbert (2016); Farmer e Foley (2009); Tesfatsion e Judd (2006).
Finança	Bookstaber (2012); LeBaron (2005).
P&D (produtos farmacêuticos)	Hunt <i>et alia</i> (2013).
Marketing	Rand e Rust (2011).
Turismo	Nicholls <i>et alia</i> (2016).
Planejamento e política ambiental	Zellner (2008).
Uso da terra	Parker <i>et alia</i> (2003).
Arquitetura urbana	An (2012).
Transporte	Bernhardt (2007).
Geografia, análise geoespacial	Heppenstall <i>et alia</i> (2012); Crooks e Heppenstall (2012); Crooks <i>et alia</i> (2008).
Ciência cognitiva	Bedau (2003).
Psicologia	Smith e Conrey (2007).
Arqueologia	Cegielski e Rogers (2016); Wurzer <i>et alia</i> (2015); Lake (2014).
<i>Healthcare</i>	Maglio <i>et alia</i> (2014); Luke e Stamatakis (2012).
Epidemiologia / doenças contagiosas	Auchincloss e Diez Roux (2008); Epstein (2009).

Fonte: Macal (2016)

Avanços na área de Simulação Baseada em Agentes sugerem impactos de longo alcance quanto à forma com que as empresas utilizam os computadores como ferramentas de auxílio à tomada de decisão, e quanto à maneira com que os modelos de Simulação Baseada em Agentes são usados pelos pesquisadores para atingir descobertas na área científica. Portanto, fica visível o elevado interesse em desenvolver modelos através da Simulação Baseada em Agentes que tenham aplicação em diversos problemas (MACAL; NORTH, 2013).

Cientistas da área de computação, de economia, de biologia e de sociologia foram os que conduziram o desenvolvimento e a utilização da Simulação Baseada em Agentes, cada qual de acordo com suas próprias metas e objetivos específicos (SIEBERS *et alia*, 2010). A ciência da complexidade, a ciência de sistemas, a ciência da computação, a ciência de gestão, as ciências sociais em geral, a área de sistemas dinâmicos e a área de modelagem e simulação

são os campos científicos que sustentam os fundamentos teóricos, a visão de mundo conceitual, a filosofia e as técnicas de modelagem da Simulação Baseada em Agentes (MACAL; NORTH, 2005; MACAL; NORTH, 2009). Logo, é possível afirmar que a Simulação Baseada em Agentes é uma área que é influenciada por diferentes campos científicos.

De modo geral, Macal *et alia* (2013) afirmam que a Simulação Baseada em Agentes é composta por quatro elementos fundamentais. Esses quatro elementos podem ser expressos por meio da equação 3.1.

$$\mathbf{SBA} = \{A, I, E, T\} \quad (3.1)$$

A sigla **SBA** significa Simulação Baseada em Agentes. Entre as chaves, a letra **A** representa um conjunto de agentes. A letra **I** simboliza o espaço de interação; é nesse espaço que ocorre a interação entre os agentes. A letra **E** equivale ao ambiente independente dos agentes; nesse ambiente, métodos de atualização do estado do ambiente são efetuados, além disso, os agentes recebem informações específicas do ambiente. Por fim, a letra **T** reflete o mecanismo de avanço temporal, ou seja, o processo de avanço do tempo na simulação (MACAL *et alia*, 2013).

Devido a uma série de motivos, é improvável a aceitação universal de uma única definição sobre o que é a Simulação Baseada em Agentes. É nesse cenário que, com base nas aplicações da Simulação Baseada em Agentes encontradas na literatura, Macal (2016) oferece quatro definições alternativas para a Simulação Baseada em Agentes em ordem crescente de complexidade com base nas propriedades dos agentes. Essas quatro definições são:

- **Definição 1 – Simulação Baseada em Agentes Individual:** Na Simulação Baseada em Agentes *Individual*, os agentes possuem diversas características e são representados no modelo de maneira individual.
- **Definição 2 – Simulação Baseada em Agentes Autônoma:** Na Simulação Baseada em Agentes *Autônoma*, os agentes agem autonomamente com base em seus comportamentos internos. Possuindo a capacidade de detectar condições que acontecem em qualquer momento dentro do modelo, os agentes se comportam de maneira reativa.
- **Definição 3 – Simulação Baseada em Agentes Interativa:** Na Simulação Baseada em Agentes *Interativa*, os agentes possuem autonomia e interagem uns com os outros. Os agentes também interagem com o ambiente onde estão inseridos.

- **Definição 4 – Simulação Baseada em Agentes Adaptativa:** Na Simulação Baseada em Agentes *Adaptativa*, os agentes autônomos e interativos mudam seus comportamentos no decorrer da simulação com base na capacidade que eles têm de aprender em situações novas. No caso de uma população de agentes, ela possui a capacidade de se ajustar de modo a incluir outros agentes que se adaptam à situação.

Com base nessas definições, Macal (2016) ainda apresenta uma tabela contendo as principais características que distinguem as quatro definições sobre a Simulação Baseada em Agentes.

Essa tabela é retratada pela Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Definições para SBA com base nas propriedades do agente

Definições	Individualidade	Comportamentos	Interações	Adaptabilidade
SBA Individual	Agentes heterogêneos individuais	Prescrito, roteirizado	Limitado	Nenhum
SBA Autônoma	Agentes heterogêneos individuais	Autônomo, dinâmico	Limitado	Nenhum
SBA Interativa	Agentes heterogêneos individuais	Autônomo, dinâmico	Entre outros agentes e o ambiente	Nenhum
SBA Adaptativa	Agentes heterogêneos individuais	Autônomo, dinâmico	Entre outros agentes e o ambiente	Agentes mudam seus comportamentos durante a simulação

Fonte: Macal (2016)

As definições supracitadas sobre Simulação Baseada em Agentes são úteis, pois auxiliam na compreensão e na definição dos limites que um determinado modelo de Simulação Baseada em Agentes possui. A individualidade, a autonomia, a interatividade e a adaptabilidade são termos chaves que orientam o entendimento sobre como os agentes são tratados em um modelo de Simulação Baseada em Agentes. Apesar dessas definições não serem matematicamente precisas, elas ajudam a distinguir a Simulação Baseada em Agentes de outros tipos de modelagens e abordagens analíticas (MACAL, 2016).

A perspectiva do agente é a característica mais relevante e distintiva da Simulação Baseada em Agentes, sendo considerada em qualquer sistema composto por agentes. Esse fato é discrepante com a ênfase dada em modelos de Simulação a Eventos Discretos. A ênfase dos modelos de Simulação a Eventos Discretos incide sobre processos ou atividades (MACAL, 2016). Por outro lado, um modelo de Simulação Baseada em Agentes é construído a partir da modelagem do agente.

Não há um consenso geral no meio acadêmico sobre a definição precisa do termo *agente*. Apesar dessa não concordância, existem pontos em comum entre as definições (MACAL; NORTH, 2005). De acordo com Mortazavi *et alia* (2015), agentes são elementos autônomos que se auto-organizam por regras específicas de tomada de decisões. Para Brailsford (2014), agentes são indivíduos presentes na Simulação Baseada em Agentes. Esses indivíduos são autônomos, agem de modo independente no modelo, podem se lembrar de forma perfeita ou imperfeita sobre o que ocorreu no passado, podem ser capazes de aprender com o passado e de adaptar suas reações e comportamentos em um cenário futuro. Ademais, os agentes também são capazes de se comunicarem uns com os outros e com o próprio ambiente.

O conceito de agente sofreu modificações e isso pode ser notado quando se compara as definições citadas anteriormente com a definição 1 de Macal (2016). Nas definições de Brailsford (2014) e Mortazavi *et alia* (2015) o agente possui comportamento autônomo. Contudo, Macal (2016) afirma que o comportamento do agente também pode ser prescrito e roteirizado. Logo, o agente não necessariamente possui autonomia dentro do modelo.

Visando uma modelagem mais prática, Macal e North (2014) afirmam que os agentes possuem as seguintes propriedades e características:

- **Autonomia.** A autonomia é uma característica própria de um agente. O comportamento de um agente consiste em um processo em que as informações são captadas do ambiente, e das ações e decisões do agente. Geralmente, partindo de uma série limitada de situações que surgem e que são de interesse do modelo, um agente atua de maneira independente em seu ambiente e em suas interações com outros agentes.
- **Modularidade.** Os agentes seguem o princípio da modularidade. Um agente é um elemento discreto e identificável com a capacidade de efetuar decisões. Ele possui um conjunto de atributos e comportamentos. A condição de modularidade exige que um agente possua um limite. É por meio desse limite que se torna possível discernir se algo no estado do modelo faz parte ou não de um agente, ou se isso é uma particularidade compartilhada entre os agentes do modelo.
- **Sociabilidade.** Um dos aspectos de um agente é a sociabilidade. Assim, os agentes interagem uns com os outros. Há algumas regras comuns de interação que englobam questões como a disputa por espaço, a prevenção de colisões, o reconhecimento do agente, a troca de informações, a influência, e outros mecanismos específicos.

- **Condicionabilidade.** Um agente possui um estado e esse estado sofre variações ao longo do tempo. Um conjunto ou subconjunto das características e dos comportamentos do agente reflete o estado desse agente. O estado de um agente representa a sua condição que, por sua vez, é definida por variáveis essenciais que se encontram associadas ao estado atual desse agente. Os estados de todos os agentes e o estado do ambiente compõem o estado de um modelo de Simulação Baseada em Agentes. É importante acrescentar que estão condicionados no estado de um agente seus comportamentos. Portanto, quanto mais requintado é o conjunto de comportamentos de um agente, mais rico é o conjunto de possíveis estados desse agente.

De modo a exemplificar as principais características que um agente pode possuir, Macal *et alia* (2013) apresentam, por meio de uma imagem, os principais elementos que fazem parte de um agente. Essa imagem é representada pela Figura 3.2.



Figura 3.2 - Elementos de um agente  
 Fonte: Macal *et alia* (2013)

Matematicamente, Macal *et alia* (2013) ainda afirmam que um agente pode ser retratado através de cinco elementos essenciais como mostra a equação 3.2.

$$\mathbf{a} = \{\mathbf{B}, \mathbf{S}, \mathbf{D}, \mathbf{N}, \mathbf{M}\} \quad \mathbf{a} \in \mathbf{A} \quad (3.2)$$

A letra **B** representa um conjunto de comportamentos que o agente possui; sobre esses comportamentos, eles equivalem, por exemplo, às ações de decidir, comunicar, movimentar e aprender. A letra **S** é o conjunto de características estáticas do agente; variáveis demográficas como nome, data de nascimento, sexo podem ser características estáticas. Por outro lado, a letra **D** reflete o conjunto de características dinâmicas do agente que são atualizados durante a simulação; a memória e as interações do agente são exemplos de características dinâmicas. **N** simboliza os arredores (a vizinhança) do agente; esses arredores demarcam os espaços de interação do agente. Por fim, a letra **M** corresponde ao conjunto de mecanismos existentes que servem para atualizar o estado do agente enquanto a simulação é executada (MACAL *et alia*, 2013).

Muitas vezes, os agentes possuem propriedades adicionais que podem ser consideradas ou não no modelo. Metas explícitas podem estar presentes em um agente, orientando o seu comportamento no modelo. Um agente tem a capacidade de aprender. Ele também pode ter a capacidade de se adaptar com base em suas experiências. Em nível individual, essa aprendizagem e adaptação são modeladas através do comportamento do agente. Isso exige que o agente tenha uma memória como uma característica a ser dinamicamente atualizada. Em nível de população, a adaptação pode ser modelada através de um conjunto de mudanças que resultam dos comportamentos de cada agente (MACAL; NORTH, 2014).

Fica claro, portanto, que são essenciais, em modelos de Simulação Baseada em Agentes, a modelagem do agente e de seus comportamentos, a modelagem dos comportamentos que afetam as próprias ações do agente, e a modelagem dos comportamentos que interferem no ambiente onde os mesmos se encontram. Essas modelagens serão efetuadas nessa pesquisa.

Por fim, um modelo de Simulação Baseada em Agentes pode abranger todos os elementos lógicos que fazem parte, normalmente, de um modelo de Simulação a Eventos Discretos (MACAL, 2016). Nesse ponto, a combinação da Simulação Baseada em Agentes com a Simulação a Eventos Discretos é denominada Simulação Híbrida. Esse tópico será abordado a seguir.

### **3.4. A simulação híbrida**

O ser humano é um ser complexo. Tal complexidade se manifesta por meio de suas decisões, de seus comportamentos e de suas ações. Há uma certa dificuldade na identificação dos fatores que interferem nas escolhas humanas. Contudo, essa dificuldade não impede o uso de teorias acerca dos possíveis fatores que influenciam as ações do elemento humano dentro de

um determinado ambiente. É evidente a presença humana em diversos sistemas, inclusive nos sistemas de manufatura. Entretanto, dependendo dos processos, essa presença pode ocorrer de maneira mais acentuada ou não.

Nos sistemas de manufatura, o elemento humano desempenha papel relevante. Conforme Digiesi *et alia* (2009), o trabalho humano é um elemento essencial nos sistemas modernos de manufatura e, por isso, ele deve ser expresso de maneira fidedigna no processo de modelagem de tais sistemas.

Bruzzone *et alia* (2007) reconhecem que o comportamento humano é um tema central da modelagem e simulação e ele é ainda um tradicional desafio para a própria área de simulação e sua aplicação nas áreas de negócios. De acordo com Kasaie e Kelton (2015), identificar e conceitualizar a estrutura dos comportamentos e interações humanas é um problema comum na modelagem de sistemas complexos envolvendo o elemento humano.

Segundo Brailsford *et alia* (2012), a ausência de similaridade entre os resultados dos sofisticados e complexos modelos de simulação e os resultados dos sistemas reais também é problema comum. Conforme os mesmos autores, essa ausência de similaridade ocorre porque os modelos de simulação não consideram o comportamento humano.

Elkosantini (2015) destaca que há ainda outro problema envolvendo o elemento humano e a área de simulação. Esse problema está relacionado ao uso frequente de dados determinísticos para representar o comportamento humano nos modelos computacionais. Esse fato explica a margem de erro existente entre os resultados da simulação e a realidade.

Existem três limitações envolvendo a modelagem do fator humano e a Simulação a Eventos Discretos. A primeira delas refere-se às funções e aos movimentos genéricos que as entidades realizam no ambiente virtual. A segunda limitação consiste na capacidade que a entidade possui para tomar decisões; neste caso, muitos pontos de decisão precisam ser modelados pelo analista de modo que esses pontos estejam bem próximos um do outro. A terceira limitação envolve a determinação dos pontos de decisão do fator humano; desse modo, as entidades do modelo não são autônomas. Por meio de uma programação inteligente e das funções provenientes da própria Simulação a Eventos Discretos, algumas dessas limitações podem ser superadas. Todavia, esse fato não refuta o argumento de que a Simulação a Eventos Discretos não é a melhor ferramenta para modelar o comportamento humano de modo mais detalhado (BAINES; KAY, 2002; DUBIEL; TSIMHONI, 2005).

É comum que, nos modelos de Simulação a Eventos Discretos, o elemento humano seja representado como um simples recurso (BAINES *et alia*, 2004). Nesse sentido, é relevante que se amplie a capacidade de modelagem do fator humano de modo que seja possível incluir seus atributos e as relações entre eles, seu ambiente de trabalho e, posteriormente, seu desempenho perante as rotinas produtivas (BAINES; KAY, 2002). Um dos caminhos para se ampliar a capacidade da modelagem do fator humano é através da simulação híbrida.

No âmbito da simulação híbrida, mais de duas abordagens de simulação podem ser combinadas. Desse modo, a simulação híbrida consiste na combinação de duas ou mais abordagens distintas de simulação com o objetivo de modelar e simular aspectos importantes do sistema real, que não seriam possíveis de serem retratados por meio de uma única abordagem de simulação.

Nessa pesquisa, a Simulação a Eventos Discretos será combinada com a Simulação Baseada em Agentes. Porém, antes de abordar conceitualmente essa combinação, é importante salientar que existem distinções entre as duas abordagens. Siebers *et alia* (2010) apontam essas distinções através da Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Características dos modelos de SED e de SBA

<b><i>Modelos de Simulação a Eventos Discretos</i></b>	<b><i>Modelos de Simulação Baseada em Agentes</i></b>
Orientado ao processo (abordagem de modelagem <i>top-down</i> ); foco na modelagem do sistema em detalhe, não na modelagem das entidades	Com base no indivíduo (abordagem de modelagem <i>bottom-up</i> ); foca na modelagem das entidades e das interações entre elas
Controle por meio de processos (controle centralizado)	Cada agente possui seu próprio controle de processo (controle descentralizado)
Entidades passivas; a inteligência, como a tomada de decisão, é modelada como parte do sistema	Entidades ativas; a inteligência é representada individualmente dentro de cada entidade
As filas são um elementos-chaves	Não apresenta nenhum conceito de filas
O fluxo de entidades ocorre através de um sistema; o comportamento macro é modelado	Não há nenhum conceito de fluxos; o comportamento macro não é modelado, pois ele emerge das microdecisões dos agentes individuais
As distribuições de entrada são muitas vezes baseadas na coleta e medição de dados	As distribuições de entrada são muitas vezes baseadas em teorias ou dados subjetivos

Fonte: Siebers *et alia* (2010)

Sob a perspectiva da modelagem *top-down*, os processos de um sistema são os principais elementos a serem considerados na construção de um modelo computacional. Assim, o sistema é modelado com uma visão macro. De acordo com Kasaie e Kelton (2015), essa

abordagem *top-down* oferece pouca flexibilidade para incorporar microdinâmica e níveis individuais de comportamento.

Em contraste com a abordagem *top-down* (de cima para baixo) adotada pela Simulação a Eventos Discretos, a Simulação Baseada em Agentes fornece uma diferente abordagem de modelagem para a construção de sistemas. Essa abordagem recebe o nome de *bottom-up* (de baixo para cima) (MACAL; NORTH, 2005; MORTAZAVI *et alia*, 2015).

Na modelagem *bottom-up*, a construção do modelo acontece com base nas ações praticadas pelos elementos que fazem parte do sistema. Desse modo, o modelo é construído partindo do ponto de vista micro. No contexto organizacional, Bonabeau (2002) afirma que a Simulação Baseada em Agentes encara a organização considerando as ações que as pessoas realizam dentro dela.

A combinação das abordagens *top-down* e *bottom-up* abre espaço para novos tipos de modelos de Simulação Baseada em Agentes (FIORETTI, 2012). De acordo com Siebers *et alia* (2010), a combinação dessas duas abordagens ocorre de modo que os processos existentes em um sistema real são representados por meio da construção de um modelo de Simulação a Eventos Discretos; na sequência, os agentes presentes nesse sistema real são adicionados no modelo através de técnicas oriundas da Simulação Baseada em Agentes. Nessa situação, os agentes são programados com base em regras simples de comportamento. Eles também podem possuir o seu próprio conjunto de metas e controle. Assim, esses agentes podem tomar decisões autônomas durante a simulação.

Concluindo, a combinação Simulação a Eventos Discretos com a Simulação Baseada em Agentes possibilita que o pesquisador simule características do sistema que não seriam possíveis de serem simuladas através do uso isolado dessas duas técnicas (DUBIEL; TSIMHONI, 2005).

## 4. METODOLOGIA DE PESQUISA

A Pesquisa Operacional é uma das áreas de estudo da Engenharia da Produção. Situada dentro da Pesquisa Operacional, a Modelagem, Simulação e Otimização possui um campo de estudo baseado na construção de modelos que têm por finalidade representar sistemas reais. Esses modelos são de caráter quantitativo e procuram absorver as principais características presentes no sistema real (BERTRAND; FRANSOO, 2002; CHWIF; MEDINA, 2015). Nesse sentido, essa pesquisa fará uso de modelos quantitativos para representar um sistema de manufatura real e gerar análises acerca da representação do elemento humano levando em consideração a meta de trabalho.

Sobre a pesquisa dentro da área de gestão de produção e operações, ela abrange a construção de modelos capazes de explicar minimamente parte do comportamento de processos reais e de facilitar a compreensão de questões relacionadas a tomada de decisão envolvendo esses processos (MORABITO NETO; PUREZA, 2012). Portanto, essa pesquisa é de natureza aplicada, pois um sistema de manufatura real e seus componentes serão representados através do uso combinado da Simulação Baseada em Agentes com a Simulação a Eventos Discretos.

Sob o ponto de vista dos objetivos, esta pesquisa é de caráter descritivo. De acordo com Prodanov e Freitas (2013), nas pesquisas descritivas o pesquisador não interfere nos fenômenos do mundo físico e humano. Em outras palavras, o pesquisador observa, registra, analisa, classifica e interpreta os fatos sem interferir nos mesmos.

Logo, a presente dissertação segue uma abordagem de pesquisa quantitativa. Dois modelos computacionais serão criados com o objetivo de representar de maneira adequada as principais características de uma linha de produção do ramo de manufatura. Além disso, as saídas desses modelos computacionais serão coletadas e comparadas com os dados do sistema real a fim de compreender a representação do fator humano em modelos de simulação híbrida.

Sendo uma abstração da realidade, modelos quantitativos são criados através do método de Modelagem e Simulação. Isso permite ao pesquisador a manipulação das variáveis utilizando ou não ferramentas computacionais (MARTINS, 2012). De acordo com Bertrand e Fransoo (2002), os modelos quantitativos são regidos por um conjunto de variáveis que se modificam no decorrer de uma esfera específica.

Há dois tipos específicos de pesquisa baseada em modelos quantitativos na área de Modelagem e Simulação. O primeiro tipo recebe o nome de pesquisa axiomática quantitativa.

O pesquisador que trabalha com esse tipo de pesquisa atenta-se em obter soluções que auxiliam no esclarecimento do problema descrito no modelo. Além disso, métodos matemáticos, estatísticos e computacionais são usados de modo intenso no contexto da pesquisa axiomática quantitativa. O segundo tipo de pesquisa é denominado pesquisa empírica quantitativa. Nesse tipo de pesquisa, o pesquisador preocupa-se em garantir a adesão do modelo elaborado com as observações e ações na realidade. Vale acrescentar que, na pesquisa empírica quantitativa, os modelos são criados para se adequarem às relações causais do problema real (BERTRAND; FRANSOO, 2002; MORABITO NETO; PUREZA, 2012).

É importante dizer que os dois tipos de pesquisa supracitados ainda são classificados em duas categorias: descritiva e normativa. Assim, temos a pesquisa axiomática descritiva, pesquisa axiomática normativa, pesquisa empírica descritiva e pesquisa empírica normativa. Na pesquisa axiomática descritiva, o foco do pesquisador está na análise do modelo quantitativo. Na pesquisa axiomática normativa, o pesquisador concentra-se em desenvolver um modelo de solução do processo. Na pesquisa empírica descritiva, o pesquisador foca no desenvolvimento de um modelo que tenha a capacidade de descrever adequadamente as relações causais existentes na realidade, levando a uma melhor compreensão dos processos reais. Na pesquisa empírica normativa há a preocupação em elaborar políticas, estratégias e ações para melhorar a atual situação. Além disso, nesse tipo de pesquisa o pesquisador cria modelos que determinam a tomada de decisão para um certo tipo de problema (BERTRAND; FRANSOO, 2002; MORABITO NETO; PUREZA, 2012).

Neste momento, faz-se necessária a definição de qual tipo específico de pesquisa baseada em modelos quantitativos essa dissertação irá adotar. Com base em métodos matemáticos, estatísticos e computacionais, a descrição do comportamento do sistema modelado será feita buscando compreender a relevância em representar o elemento humano por meio de um modelo computacional híbrido. Conseqüentemente, dentre os tipos específicos de pesquisa baseada em modelos quantitativos, a presente pesquisa caracteriza-se como pesquisa empírica descritiva.

A próxima seção irá trazer alguns tipos de modelos utilizados na área de simulação. Esses modelos são, na verdade, métodos que auxiliam na construção de modelos conceituais e computacionais. Serão enfatizados dois métodos. Um deles está voltado para a Simulação a Eventos Discretos e o outro encontra-se voltado para a Simulação Baseada em Agentes.

## 4.1. Modelos de Simulação

Antes de iniciar o processo de criação de um modelo de simulação, faz-se necessário a escolha do paradigma (modelo) de simulação a ser aplicado. Existem na literatura diversos modelos ou técnicas de simulação que podem ser adotadas para auxiliar na construção de modelos conceituais e computacionais. Muitos dessas técnicas encontram-se voltadas para projetos de modelagem e simulação de maneira geral. Neste caso, pode-se citar como exemplo Balci (2012) e Sargent (2013).

Para projetos em larga escala de modelagem e simulação, Balci (2012) propõe um ciclo de vida para a modelagem e simulação. Esse ciclo é descrito através de uma estrutura composta por doze processos organizados de maneira lógica, que garantem a qualidade da modelagem e simulação. Quanto à técnica proposta por Sargent (2013), ela se baseia em três fases principais: a identificação do sistema ou situação-problema; modelo conceitual; e modelo computacional. As transições entre essas três fases ocorrem por meio de atividades como: análise e modelagem; programação computacional e implementação; experimentação; validação dos dados de entrada; validação do modelo conceitual; verificação do modelo computacional; e validação operacional.

Há ainda na literatura outras técnicas que abrangem de maneira mais específica a construção de modelos de Simulação a Eventos Discretos. Neste contexto é possível citar os trabalhos desenvolvidos por Law (2009) e Montevechi *et alia* (2010).

No trabalho proposto por Law (2009), o mesmo sugere uma abordagem composta por sete etapas direcionadas para a realização de um estudo de simulação bem-sucedido. As duas primeiras etapas são (1) formular o problema e (2) coletar informações/dados e construir hipóteses. A terceira etapa faz a seguinte pergunta: (3) as hipóteses são válidas? Se sim, o fluxo continua. Se a resposta for não, é preciso retornar às duas primeiras etapas. A quarta etapa é (4) programar o modelo. A quinta etapa é a pergunta: (5) o modelo programado é válido? Se sim, o fluxo continua. Se não, é necessário voltar à primeira etapa. A sexta e a sétima etapas são (6) realizar a concepção, a organização e a análise de experimentos e (7) documentar e apresentar os resultados.

Já a abordagem proposta por Montevechi *et alia* (2010) encontra-se dividida em três grandes fases que são (1) Concepção, (2) Implementação e (3) Análise. Essas fases podem ser contempladas com maior detalhe através da Figura 4.1.

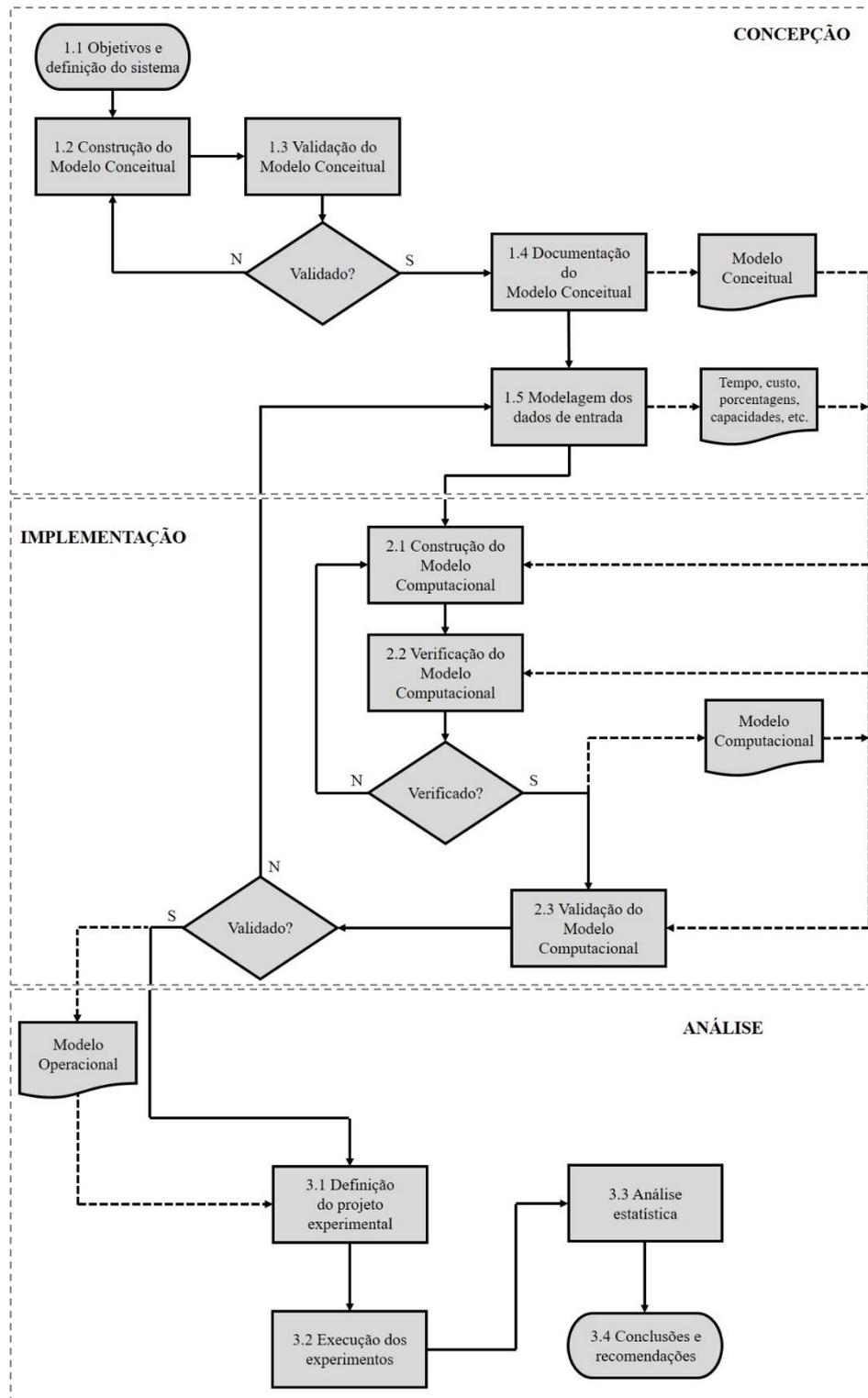


Figura 4.1 - Sequência de passos para um projeto de simulação  
 Fonte: Montevechi *et alia* (2010)

Na fase (1) Concepção, o pesquisador é orientado a seguir cinco passos. O primeiro passo consiste em definir o sistema e os objetivos. Em seguida, constrói-se o Modelo Conceitual, o qual precisa ser validado. Se validado, o Modelo Conceitual é documentado. O quinto e último passo da fase (1) Concepção baseia-se na modelagem dos dados de entrada, ou seja,

dados inerentes ao sistema como tempo de processamento, custos, capacidades e outros.

Na fase (2) Implementação existem três passos. O primeiro passo baseia-se na construção do Modelo Computacional. Em seguida, esse Modelo Computacional é verificado. Em outras palavras, o Modelo Computacional será comparado ao Modelo Conceitual validado com o objetivo de verificar se todas as características presentes no Modelo Conceitual foram transferidas ao Modelo Computacional. Depois desse processo, dar-se-á início ao último passo da fase (2) Implementação, o qual recebe o nome de validação do Modelo Computacional. Após validado, o Modelo Computacional recebe o nome de Modelo Operacional. Neste ponto, é importante dizer que existem diferentes técnicas de se efetuar a validação de um Modelo Computacional, que serão citadas na seção 5.

A fase (3) Análise é composta por quatro passos. O primeiro passo consiste na definição do projeto experimental com base no Modelo Operacional. Após definir o projeto experimental, os experimentos são executados. Na sequência, a análise estatística é efetuada tendo como referência os experimentos executados. Por fim, conclusões e recomendações para trabalhos futuros são realizadas.

A sequência de passos sugerida por Montevechi *et alia* (2010) será aplicada nessa dissertação, porém com adaptações na fase (1) Concepção. A Figura 4.2 mostra essas adaptações.

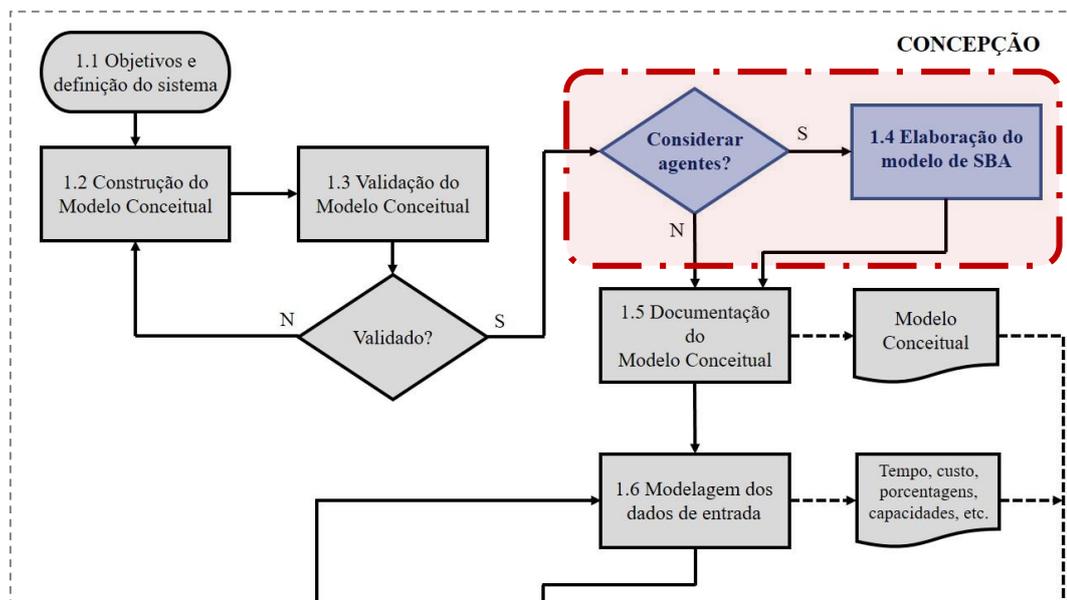


Figura 4.2 - Modelagem proposta para construção de modelos híbridos de simulação  
Fonte: Adaptado de Montevechi *et alia* (2010)

Com essa adaptação, atinge-se o objetivo específico que propõe uma modelagem conceitual que auxilie a construção de modelos híbridos de simulação. Tal adaptação é bem relevante para que seja possível integrar a abordagem de Simulação a Eventos Discretos com a

abordagem de Simulação Baseada em Agentes.

Com o modelo Montevechi *et alia* (2010) adaptado, o pesquisador irá decidir se existe a necessidade em incluir agentes em seu modelo conceitual. Se a resposta for negativa, o pesquisador continua a seguir o fluxo sugerido pelo método. Se a resposta for positiva, o pesquisador deve elaborar um modelo conceitual do agente utilizando um método de modelagem voltado para a Simulação Baseada em Agentes. Após essa etapa, o pesquisador documenta esse modelo conceitual do agente e segue o fluxo sugerido por Montevechi *et alia* (2010). No caso dessa dissertação, houve a necessidade de incluir a abordagem de Simulação Baseada em Agentes. Assim, um modelo conceitual do agente será elaborado.

Na literatura existem dois métodos consolidados na área de Simulação Baseada em Agentes para a elaboração do modelo conceitual de agentes. O primeiro método recebe o nome de AGENT UML (*Unifed Modeling Language*), introduzido por Bauer *et alia* (2001) com o intuito de alcançar mais aceitação do uso de agentes dentro do meio industrial com base na linguagem orientada a objetos. Além disso, esse método auxilia o ambiente de desenvolvimento considerando todo o ciclo de vida do sistema. O segundo método recebe o nome de Protocolo ODD (*Overview, Design concepts, and Details*), criado por Grimm *et alia* (2006) e revisto por Grimm *et alia* (2010).

O Protocolo ODD é essencialmente uma ferramenta para facilitar a escrita e a leitura de modelos de Simulação Baseada em Agentes (GRIMM *et alia*, 2010). Essa ferramenta encontra-se dividida em três grandes blocos como mostra a Figura 4.3.

<b><i>Overview</i></b>	<b>1. Propósito</b>
	<b>2. Entidades, variáveis de estado e escalas</b>
	<b>3. Visão geral do processo e programação</b>
<b><i>Design concepts</i></b>	<b>4. Conceitos de <i>design</i></b>
<b><i>Details</i></b>	<b>5. Inicialização</b>
	<b>6. Dados de entrada</b>
	<b>7. Submodelos</b>

Figura 4.3 - Os sete elementos do Protocolo ODD  
Fonte: Grimm *et alia* (2010)

O primeiro bloco recebe o nome de *Overview* e é composto por três elementos. O primeiro elemento é o (1) Propósito, o qual deve conter a razão que motiva a construção do modelo

(GRIMM *et alia*, 2006). O segundo elemento (2) Entidades, variáveis de estado e escalas cumpre a função de estabelecer quais são as entidades do modelo, quais são as variáveis de estado ou atributos relacionados a essas entidades e qual é a escala espacial e temporal usadas no modelo. O terceiro e último elemento do bloco *Overview* é a (3) Visão geral do processo e programação. Nesse elemento, define-se de modo descritivo quais são as ações de cada entidade dentro do modelo e em que ordem essas ações são executadas. Também é definido o momento em que as variáveis de estado são atualizadas. Além dessas duas questões, existe o item tempo. O pesquisador deve informar se o modelo roda em momentos discretos ou contínuos no tempo (GRIMM *et alia*, 2010).

O segundo bloco é o *Design concepts*. Esse bloco contém o quarto elemento do Protocolo ODD (4) Conceitos de *design*, que cumpre a função de padronizar o modo de pensar sobre as características essenciais pertencentes ao modelo de Simulação Baseada em Agentes que não podem ser descritas satisfatoriamente por meio de equações ou esquemas conceituais. O elemento Conceitos de *design* se desdobra em onze itens. É importante dizer que não existe a necessidade nem de seguir sequencialmente os onze itens nem de abordá-los. Isso porque cada modelo de Simulação Baseada em Agentes serve a um propósito, contendo, portanto, suas próprias características. Contudo, mesmo ciente desses fatos, o pesquisador precisa refletir sobre os onze itens presentes no quarto elemento do Protocolo ODD para construir o seu modelo (RAILSBACK; GRIMM, 2012).

Neste momento, faz-se necessário explicar conceitualmente o significado de cada um dos onze itens (GRIMM *et alia*, 2010):

- **Princípios básicos:** neste item, aborda-se como e quais conceitos gerais, teorias, hipóteses ou tipo de modelagem serão aplicados no desenvolvimento do modelo.
- **Emergência:** este item descreve quais resultados esperados podem emergir das características adaptativas ou comportamentais dos agentes diante de suas mudanças individuais e das mudanças que acontecem no ambiente virtual.
- **Adaptação:** neste item descrições são feitas sobre as características adaptativas que o indivíduo possui, a reação do indivíduo perante as mudanças que ocorrem no ambiente e com ele mesmo, as decisões tomadas pelo indivíduo com base nessas mudanças, e a modelagem dos comportamentos do indivíduo. Vale acrescentar que aqui dever-se expressar se as características adaptativas do agente procuram explicitamente aumentar alguma medida de sucesso do indivíduo perante determinado objetivo, ou se

as características adaptativas orientam o agente a reproduzir padrões de comportamento observado no sistema real.

- **Objetivos:** se as características adaptativas do agente atuam de modo explícito para aumentar alguma medida de sucesso do indivíduo perante determinado objetivo, esse objetivo precisa ser descrito e sua mensuração mostrada. Além disso, deve-se tratar neste item os critérios de tomada de decisões utilizados pelo agente e o momento em que são tomadas.
- **Aprendizagem:** a aprendizagem pode alterar as características adaptativas dos agentes. Se isso ocorre no modelo, este item deve explicar como esse fato ocorre.
- **Previsão:** neste item, apresenta-se como os agentes efetuam decisões futuras com base em suas características adaptativas ou em seus processos de aprendizagem.
- **Sensoriamento:** aqui explica-se quais variáveis de estados presentes no modelo que o agente sente e considera na tomada de suas decisões.
- **Interação:** os tipos de interações entre os agentes são abordados neste item. Aqui, mostra-se como essas interações ocorrem e como elas afetam os agentes.
- **Estocasticidade:** este item expõe e explica os processos estocásticos existentes no modelo.
- **Coletividades:** neste item o pesquisador informa se os agentes pertencem a um grupo ou se eles formam grupos. Também deve-se comunicar se esses grupos afetam ou são afetados pelos agentes.
- **Observação:** este item indica quais dados vão ser coletados do modelo construído para o fim de análise, teste e compreensão. Além disso, determina-se como e quando esses dados provenientes do modelo vão ser coletados.

O terceiro e último bloco é o *Details*. Ele é composto pelos elementos (5) Inicialização, (6) Dados de entrada e (7) Submodelos. A (5) Inicialização descreve as condições iniciais do modelo e especifica o estado das variáveis e das entidades no início da simulação. No elemento (6) Dados de entrada, deve-se declarar se dados externos ou modelos externos precisam ser utilizados como dados de entrada para o modelo. O elemento (7) Submodelos possui a descrição mais detalhada de cada processo (submodelo) que envolve as ações de cada entidade. Tais ações foram descritas no elemento (3) Visão geral do processo e programação. Ademais, deve-se deixar claro as equações, as regras lógicas e os algoritmos que pertencem a

esses submodelos (RAILSBACK; GRIMM, 2012).

Por meio do Protocolo ODD, é possível descrever de modo mais compreensível e completo o modelo de Simulação Baseada em Agentes. Vale mencionar que essa ferramenta favorece a replicabilidade do modelo, o que contribui para a diminuição de críticas voltadas para a não replicação dos modelos de Simulação Baseada em Agentes (GRIMM *et alia*, 2010). Por tais motivos, o Protocolo ODD será adotado de modo a auxiliar na construção do modelo de Simulação Baseada em Agentes nesta dissertação.

Concluindo, o método de pesquisa aplicado nesta dissertação é o método de Modelagem e Simulação. Dentro desse contexto metodológico, a presente pesquisa pode ser classificada como pesquisa axiomática quantitativa na categoria descritiva. Por fim, serão aplicados dois modelos voltados para a área de simulação: o primeiro modelo é a sequência de passos adaptada proposta por Montevechi *et alia* (2010) e o modelo do Protocolo ODD aprimorado por Grimm *et alia* (2010). A aplicação desses modelos será abordada no próximo capítulo.

## 5. APLICAÇÃO DO MÉTODO

Nesta seção, a modelagem proposta para a construção de modelos híbridos de simulação será colocada em prática. Partindo de uma perspectiva macro, primeiro será abordada a fase de *Concepção*. O resultado dessa fase consiste em um modelo conceitual validado. Após a fase de *Concepção*, a fase de *Implementação* será tratada. Aqui, o modelo computacional é desenvolvido, verificado e validado. A última fase será a *Análise*. Nessa fase, análises são produzidas a partir do modelo computacional validado.

### 5.1. Concepção

A fase de concepção engloba os seguintes passos: *Objetivo e definição do sistema*, *Construção do Modelo Conceitual*, *Validação do Modelo Conceitual*, *Elaboração do modelo de SBA* (Simulação Baseada em Agentes), *Documentação do Modelo Conceitual* e *Modelagem dos dados de entrada*.

#### 5.1.1. Objetivo e definição do sistema

No início desta dissertação, o objetivo geral foi definido com o propósito de orientar o desenvolvimento desta pesquisa. Vale lembrar que o objetivo geral consiste em analisar a representação do fator humano presente em uma linha de manufatura utilizando a Simulação Baseada em Agentes combinada com a Simulação a Eventos Discretos. Nesse sentido, uma linha de produção de placas de circuito impresso de uma organização de médio porte foi escolhida para a realização da análise. A escolha desse sistema de manufatura está intrinsecamente relacionada com o elevado grau de trabalho manual efetuado pelos operadores. Quanto à composição desse sistema de manufatura, ele é formado por dez postos de trabalho e por quatorze trabalhadores.

Para analisar a representação do elemento humano no contexto da simulação, dois modelos de simulação serão construídos. O primeiro será um modelo de Simulação a Eventos Discretos, em que o elemento humano será representado como um recurso. O segundo consiste num modelo de simulação híbrida, construído a partir da combinação de duas técnicas de simulação: a Simulação a Eventos Discretos e a Simulação Baseada em Agentes. A ideia do modelo híbrido baseia-se na representação de cada elemento humano através do seu ritmo de trabalho utilizando a abordagem do agente. É importante destacar que o ritmo de trabalho de

cada operador varia conforme o Sistema Westinghouse para Avaliação do Ritmo citado por Barnes (1977). Ademais, esse ritmo será influenciado pela meta diária de produção.

A análise da representação do elemento humano irá ocorrer com base na comparação entre a variável *Total Produzido* e os *Dados Reais*. Sobre a variável *Total Produzido*, ela se encontra presente nos dois modelos de simulação e ela representa a produção total da linha durante uma semana de trabalho (cinco dias úteis). Quanto aos *Dados Reais*, eles representam os resultados reais do sistema de manufatura em estudo considerando uma semana de trabalho. Ainda sobre os *Dados Reais*, foram fornecidos pela organização o total de trinta dados, cada dado representando uma semana de trabalho. Assim sendo, para comparar a variável *Total Produzido* com os *Dados Reais*, trinta replicações serão efetuadas.

### 5.1.2. Construção do Modelo Conceitual

A construção do modelo conceitual utilizado nessa pesquisa foi feita com base no modelo conceitual desenvolvido por Vilela (2015). Portanto, a linha de manufatura de placas de circuito impresso encontra-se representado pela Figura 5.1.

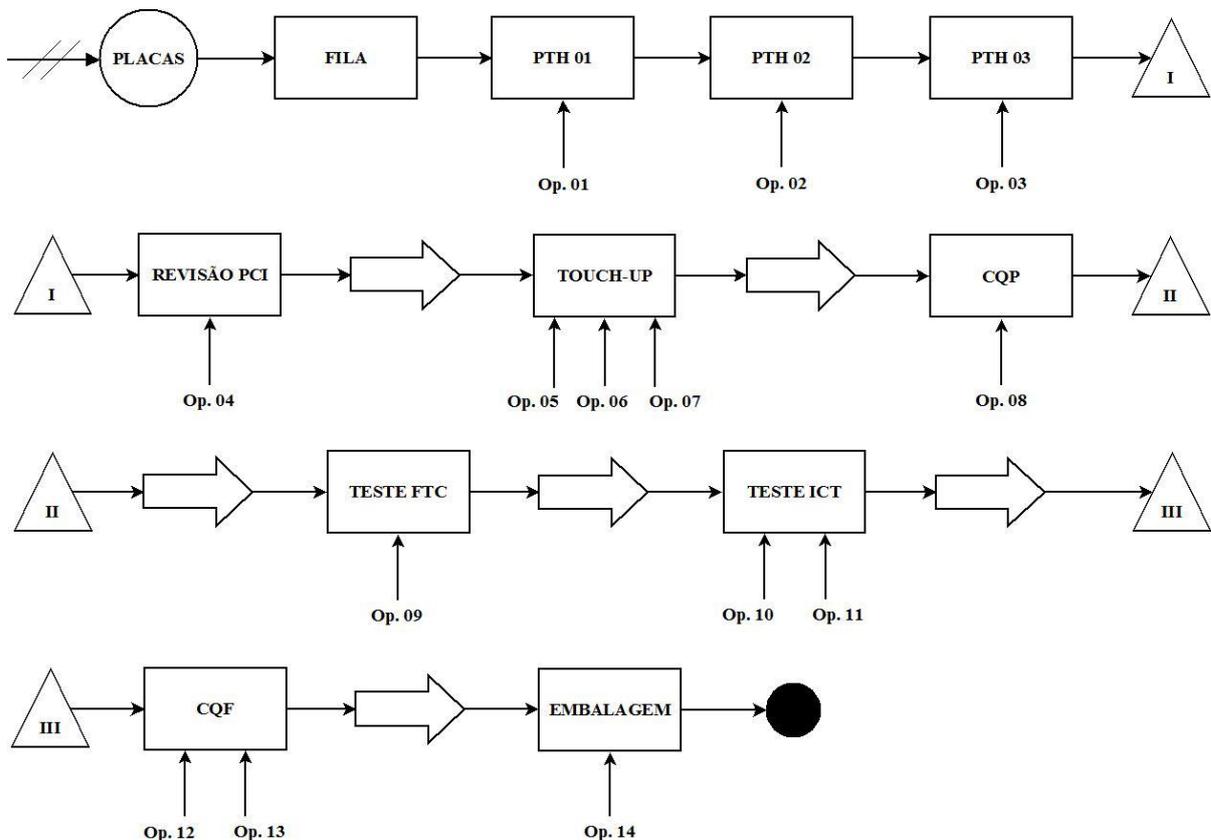


Figura 5.1 - Modelo conceitual da linha de manufatura de placas de circuito impresso  
Fonte: Adaptado de Vilela (2015)

Esse modelo conceitual fez uso da técnica de modelagem conceitual denominada IDEF-SIM (*Integrated Definition Methods – Simulation*), desenvolvida por Leal (2008). Tal técnica de modelagem também é abordada em Leal *et alia* (2008). Assim, permitindo a elaboração de modelos conceituais com informações relevantes para a construção do modelo computacional, a técnica IDEF-SIM integra elementos lógicos pertencentes às técnicas de modelagem IDEF0, IDEF3 e fluxograma (LEAL *et alia*, 2008; MONTEVECHI *et alia*, 2010). Leal (2008) argumenta que a técnica IDEF-SIM auxilia na redução de tempo durante a fase de modelagem computacional. Portanto, embora exista na literatura variadas técnicas de modelagem, a técnica IDEF-SIM foi adotada por conta de sua praticidade com relação à fase de implementação.

Logo, de acordo com o modelo conceitual, a linha de manufatura em estudo possui uma entidade que representa as placas de circuito impresso. Além disso, a linha possui onze funções sendo que a primeira é uma fila e as outras dez são os dez postos de trabalho e seus respectivos nomes. A linha também possui seis movimentações e quatorze recursos que representam os operadores. A Figura 5.1 mostra o modelo conceitual construído através do IDEF-SIM.

Antes de passar pelo primeiro posto de trabalho, as placas entram na função FILA. O limite dessa função é elevado, pois observou-se que no sistema real sempre há placas disponíveis para serem processadas. A segunda, terceira e quarta função são, respectivamente, os processos PTH 01, PTH 02 e PTH 03. Cada um desses processos possui um operador. Cada um desses operadores insere componentes eletrônicos em cada placa.

A quinta função recebe o nome REVISÃO PCI. Um operador atua nesse processo com o objetivo de verificar os componentes que foram inseridos na placa nos processos anteriores. Após essa verificação, a placa é movimentada para o processo TOUCH-UP. O processo TOUCH-UP é um processo crítico e, por esse motivo, ele é executado por três operadores que trabalham inserindo componentes com auxílio de ferramentas de solda. Na sequência, a placa é movimentada para o processo CQP. Nesse processo, um operador efetua o controle de qualidade para verificar se, até aquele momento, todos componentes eletrônicos foram inseridos de modo adequado, se todas as soldas foram feitas e se não há elementos na placa que possam impedir o fluxo da linha. Após o processo CQP, a placa é movimentada para a oitava função.

A oitava função é denominada TESTE FTC. Nesse processo, um teste funcional é executado por um operador para verificar se a placa está desempenhando as suas funções conforme as

especificações técnicas. Esse teste simula o ambiente operacional do produto. Depois desse processo, a placa é movimentada para a função TESTE ICT. Executado por dois operadores, o processo TESTE ICT testa se o circuito da placa está em conformidade com as especificações. Além disso, essa etapa verifica se todos os processos anteriores foram executados corretamente. Após essa etapa, a placa é movimentada para a décima função.

A CQF é a décima função. O processo CQF também é executado por dois operadores. Aqui, os operadores efetuam o controle de qualidade final da placa de circuito impresso. Na sequência, a placa é encaminhada para o último processo da linha, a EMBALAGEM, o qual é executado por um operador.

Seguindo a abordagem proposta por Montevechi *et alia* (2010), a próxima etapa da fase de concepção consiste na validação do modelo conceitual.

### 5.1.3. Validação do Modelo Conceitual

A etapa de validação do modelo conceitual, segundo Sargent (2013), é aquela em que se determina se as teorias e hipóteses inerentes ao modelo encontram-se corretas e, ademais, se o modelo conceitual e toda a sua estrutura lógica estão representados adequadamente para atingir o objetivo proposto pelo modelo.

Conforme Sargent (2013), existem três métodos principais para a validação do modelo conceitual:

- **Validação face-a-face:** nessa técnica, o modelo conceitual é apresentado para pessoas que detêm um nível de conhecimento sobre o sistema que foi modelado. Essas pessoas têm o papel de determinar se o modelo conceitual e/ou o seu comportamento é coerente com a realidade.
- **Passo a passo estruturado:** essa técnica de validação exige que modelo conceitual seja apresentado formalmente para um grupo de pares. Esse grupo irá efetuar análises detalhadas de cada parte do modelo para determinar se o mesmo está correto.
- **Acompanhamento:** essa técnica de validação funciona com base no acompanhamento da entidade e seu comportamento ao longo do modelo conceitual com o objetivo de verificar se a lógica está correta e se o nível de acuracidade é adequado.

O modelo conceitual da linha de manufatura de placas de circuito impresso foi validado por Vilela (2015) por meio da técnica de validação face-a-face. Assim, Vilela (2015) apresentou o

modelo conceitual para os gestores da linha de produção, os quais afirmaram que o modelo conceitual representa de maneira adequada a linha de produção em estudo.

O próximo passo consiste na *Elaboração do modelo de SBA (Simulação Baseada em Agentes)*, modelo conceitual que servirá de base para a construção do modelo computacional de SBA. Vale lembrar que esse passo foi incluído ao modelo proposto por Montevechi *et alia* (2010) para auxiliar o desenvolvimento de modelos híbridos de simulação.

#### **5.1.4. Elaboração do modelo de SBA**

Após a validação do modelo conceitual, é decidido se o modelo conceitual irá contemplar a modelagem baseada em agentes. No caso desta pesquisa, a resposta é positiva por conta da necessidade de representar de modo mais detalhado o elemento humano através do seu ritmo de trabalho. Portanto, como definido anteriormente, o modelo Protocolo ODD foi escolhido para modelar o agente trabalhador presente no modelo conceitual da linha de manufatura de placas de circuito impresso. Dessa maneira, segue a modelagem efetuada do agente trabalhador:

##### **OVERVIEW**

- **Propósito:** o propósito do modelo consiste em representar o agente trabalhador presente em um modelo híbrido através do seu ritmo de trabalho, levando em consideração a sua meta diária de produção.
- **Entidades, variáveis de estado, e escalas:** no modelo, o agente é o trabalhador. No total são quatorze trabalhadores. Esses trabalhadores possuem características semelhantes com relação aos seus estados, porém cada um deles possui um ritmo de trabalho diferente no decorrer da simulação de acordo com a taxa de eficiência individual. As variáveis de cada agente trabalhador são o ritmo, a produção de peças por hora, a meta de produção por hora e a taxa de eficiência. Existem ainda dois conjuntos de parâmetros. Baseado no Sistema Westinghouse (BARNES, 1977), o primeiro conjunto de parâmetros é composto por: esforço positivo, esforço nulo, esforço negativo, consistência positiva, consistência nula e consistência negativa. Esses parâmetros estão relacionados com a variável ritmo. O segundo conjunto de parâmetros são: a meta diária, as horas trabalhadas, as horas totais de trabalho e a quantidade de peças produzidas. Esse segundo conjunto de parâmetros estão conectados com as variáveis: produção de peças por hora, meta de produção por hora e taxa de eficiência. Por fim, a escala utilizada é de uma semana de trabalho.

- **Visão geral do processo e programação:** o agente trabalhador é representado por meio de um diagrama de estado, como mostra a Figura 5.2.

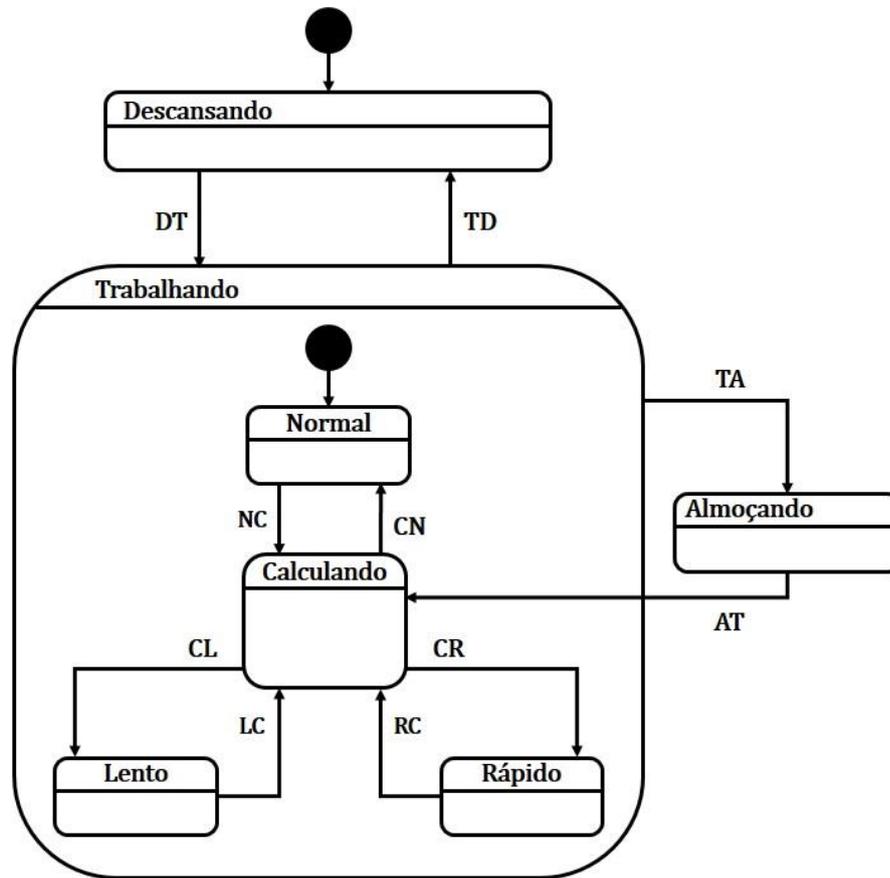


Figura 5.2 - Diagrama de estado de cada agente trabalhador  
Fonte: Elaborado pelo próprio autor

O primeiro estado recebe o nome “Descansando” e representa as horas de descanso do trabalhador, que são quinze horas. O segundo estado é o “Almoçando”, e representa uma hora diária de almoço do agente trabalhador. O terceiro estado recebe o nome “Trabalhando” e o agente trabalhador permanece nesse estado durante as oito horas diárias de trabalho. Dentro do estado “Trabalhando” existem mais quatro estados. Três deles retratam o ritmo do agente trabalhador. A cada uma hora de trabalho, o agente trabalhador calcula quanto foi produzido durante aquela hora e verifica se essa produção está abaixo ou acima da meta horária estabelecida. Se a produção estiver abaixo da meta horária estabelecida, o agente trabalhador aumentará o seu ritmo na próxima hora de trabalho. Se a produção estiver acima da meta horária estabelecida, o agente trabalhador diminuirá o seu ritmo na próxima hora de trabalho. É importante salientar que o ritmo a ser adotado por cada agente trabalhador não é determinístico, pois o valor do ritmo é determinado de modo estocástico com base no Sistema

Westinghouse (BARNES, 1977). O detalhamento de cada estado e transição será abordado na terceira parte do Protocolo ODD.

### ***DESIGN CONCEPTS***

- ***Conceitos de design***: o desenvolvimento do modelo baseia-se na representação do trabalhador através de seu ritmo de trabalho. Como princípio básico, a avaliação do ritmo de trabalho é a principal teoria que guia a construção do modelo do agente. Dentro dessa teoria, encontra-se o seguinte método de avaliação do ritmo de trabalho: Sistema Westinghouse para Avaliação do Ritmo (BARNES, 1977). Esse método possui quatro fatores: Habilidade, Esforço, Condições e Consistência. Dentre esses fatores, dois foram escolhidos porque são fatores que o indivíduo pode controlar: Esforço e Consistência. Considerando a escala proposta pelo método Sistema Westinghouse, esses dois fatores dividem-se em: esforço positivo, esforço nulo, esforço negativo, consistência positiva, consistência nula e consistência negativa. Seus valores influenciam positiva e negativamente o ritmo de trabalho do agente trabalhador. É importante ressaltar que os valores desses fatores são determinados de maneira estocástica.

Com base em informações dadas pela organização sobre a linha em estudo, a meta de produção diária consiste em 322 peças. Conceitualmente, meta significa o nível de desempenho que se pretende atingir (LOCKE; LATHAM, 2013). No modelo, conforme a meta estabelecida, o agente trabalhador decide sobre o aumento ou a diminuição do seu próprio ritmo de trabalho. Essa decisão é tomada de hora em hora em função da quantidade produzida e da quantidade que deveria ser produzida.

Os conceitos de emergência e adaptação não são aplicados no modelo. Não há aprendizagem ou previsão por parte do agente trabalhador. Também não há interações entre os agentes. Por fim, apesar de pertencerem ao mesmo processo, os agentes trabalhadores são modelados individualmente. Desse modo, o conceito de coletividades também não é abordado.

Cada agente trabalhador encontra-se vinculado a um dos dez processos do modelo a eventos discretos. Cada um desses processos é representado por uma distribuição de probabilidade. Logo, cada distribuição de probabilidade será afetada pelos resultados do ritmo de trabalho de cada agente trabalhador durante a simulação.

## DETAILS

- **Inicialização:** a simulação inicia-se marcando o tempo de 7 horas e 50 minutos. Nesse instante, o agente trabalhador encontra-se no estado “Descansando”. Às 8 horas, o agente trabalhador passa para o estado “Trabalhando”. Com relação aos parâmetros, oito dos dez parâmetros iniciam-se com o valor zero. Os outros dois parâmetros são: a meta diária e as horas totais. A meta diária inicia-se com o valor de 322 peças. Já as horas totais iniciam-se com o valor de 8 horas. Esses parâmetros são estáticos; portanto, eles não mudam durante a simulação. Quanto às quatro variáveis, três iniciam com o valor zero, com exceção da variável meta de produção por hora que representa a razão entre os parâmetros meta diária e horas totais.
- **Dados de entrada:** esse modelo não utiliza dados externos ou modelos externos como dados de entrada.
- **Submodelos:** de modo detalhado, cada estado do agente trabalhador será explorado considerando as suas transições.

Descansando – este é o primeiro estado do agente trabalhador. Ele é composto por uma transição de início e duas transições. A primeira transição recebe o nome **DT** (de “Descansando” para “Trabalhando”). Nessa transição, o agente leva em consideração o calendário de horário de trabalho, os valores dos parâmetros e o cálculo do ritmo de trabalho. A segunda transição, chamada **TD** (de “Trabalhando” para “Descansando”), também segue o calendário de horário de trabalho. A transição **TD** calcula o que foi produzido por hora e a taxa de eficiência. O cálculo do que foi produzido por hora é a razão do total produzido no modelo a evento discreto e as horas totais de trabalho. O cálculo da taxa de eficiência é a razão entre o que foi produzido por hora e a meta por hora.

Trabalhando – este estado possui três transições. A primeira e a segunda transição são, respectivamente, a **DT** e **TD** mencionadas no estado “Descansando”. A terceira transição ocorre entre o estado “Trabalhando” e o estado “Almoçando”. Assim, essa transição recebe o nome **TA**. A transição **TA** segue o calendário de horário de almoço. Ademais, ela estabelece os valores dos parâmetros esforço positivo, esforço nulo, esforço negativo, consistência positiva, consistência nula e consistência negativa. Dessa forma, os valores desses parâmetros são recalculados no estado “Calculando”.

Almoçando – esse estado possui duas transições. A primeira é a **TA**, já citada. A segunda é a **AT** (de “Almoçando” para “Trabalhando”), que acessa diretamente o

estado “Calculando”. A transição **AT** segue o calendário de horário de almoço e calcula o que foi produzido por hora, a meta por hora e a taxa de eficiência. A meta por hora é a razão entre a meta diária e as horas totais de trabalho.

*Calculando* – este estado do agente trabalhador desempenha a função de verificar qual é a taxa de eficiência atual. Se a taxa de eficiência for igual a 1, o ritmo de trabalho será normal. Logo a transição **CN** (de “Calculando” para “Normal”) é acionada. Se a taxa de eficiência for maior que 1, isso significa que o agente trabalhador produziu além da meta estabelecida por hora. Dessa maneira, a transição **CL** (de “Calculando” para “Lento”) é acionada para calcular o valor do ritmo lento considerando os parâmetros esforço negativo e consistência negativa. Se a taxa de eficiência for menor que 1, isso significa que o agente trabalhador produziu abaixo da meta estabelecida por hora. Dessa maneira, a transição **CR** (de “Calculando” para “Rápido”) é acionada. Nesse instante, o valor do ritmo rápido é calculado conforme os parâmetros esforço positivo e consistência positiva.

*Normal* – o agente trabalhador permanece neste estado durante 1 hora se a taxa de eficiência for equivalente a 1. Após essa hora, a transição **NC** (de “Normal” para “Calculando”) é acionada para verificar as horas trabalhadas e calcular a produção durante aquela hora e a taxa de eficiência.

*Lento* – o agente trabalhador permanece nesse estado durante 1 hora se a taxa de eficiência for maior que 1. Após essa hora, a transição **LC** (de “Lento” para “Calculando”) é acionada com o intuito de verificar as horas trabalhadas, e calcular a produção durante aquela hora e a taxa de eficiência.

*Rápido* – o agente trabalhador permanece neste estado durante 1 hora se a taxa de eficiência for menor que 1. Após essa hora, a transição **RC** (de “Rápido” para “Calculando”) é acionada com o objetivo de verificar as horas trabalhadas, e calcular a produção durante aquela hora e a taxa de eficiência.

### **5.1.5. Documentação do Modelo Conceitual**

Sendo uma etapa formal, a documentação do modelo conceitual da linha de manufatura de placas de circuito impresso foi efetuada juntamente com a modelagem do agente trabalhador. Essa documentação, posteriormente, irá auxiliar na construção, verificação e validação do modelo computacional.

### 5.1.6. Modelagem dos dados de entrada

A modelagem dos dados de entrada é a última etapa da fase de concepção, precedendo a fase de implementação. Aqui, os dados pertencentes ao sistema em estudo são capturados e tratados. Sendo uma das etapas mais relevantes em um estudo de simulação, a modelagem dos dados de entrada delinea o comportamento do sistema real.

De maneira abrangente, pode-se afirmar que fenômenos aleatórios conduzem grande parte dos sistemas reais. Todo modelo de simulação deve ter a capacidade de representar esses fenômenos aleatórios presentes no sistema real. Nesse sentido, o ato de modelar dados consiste em obter modelos probabilísticos que proporcionam a possibilidade de efetuar inferências sobre as características essenciais de um determinado fenômeno aleatório. Desse modo, o processo de modelagem dos dados resume-se em três estágios: coleta de dados, tratamento dos dados e inferência (CHWIF; MEDINA, 2015).

No primeiro estágio, dados sobre a linha de manufatura de placas de circuito impresso foram coletados. Observou-se que cada operador da linha trabalha durante 4 horas no período matutino e 4 horas no período vespertino. Assim, os trabalhadores executam as suas tarefas durante 8 horas diárias. Verificou-se também que os operadores da linha trabalham de segunda à sexta-feira. Portanto, cada operador trabalha 40 horas semanais (VILELA, 2015).

Dando sequência ao estágio de coleta de dados, definiu-se que o fenômeno aleatório a ser coletado seria o tempo de execução de cada um dos dez processos da linha de manufatura de placas de circuito impresso. Dessa maneira, deu-se início à etapa de cronoanálise para coletar os tempos de cada processo. Nessa etapa, cronômetros e filmadoras foram utilizados como recursos para a coleta dos tempos de cada um dos dez processos (VILELA, 2015). Para cada processo ou posto de trabalho, 100 tomadas de tempos foram selecionadas. No total, somam-se 1.000 dados coletados.

Após a coleta de dados, o segundo estágio do processo de modelagem dos dados é iniciado. Nesse ponto, as amostras foram analisadas graficamente através do *box-plot* para identificar a presença de *outliers*. Uma vez identificados, os *outliers* foram retirados das amostras para evitar que os mesmos interferissem nos resultados do estudo. Em seguida, fazendo uso da Estatística Descritiva, os componentes estatísticos referentes ao tempo de execução de cada processo da linha foram gerados. Os resultados se encontram na Tabela 5.1 e Tabela 5.2 que mostram, respectivamente, as medidas de posição e de dispersão dos tempos dos processos. Vale mencionar que os valores encontram-se representados em segundos.

Tabela 5.1 - Medidas de posição dos tempos de processamento

POSTOS DE TRABALHO	MEDIDAS DE POSIÇÃO				
	<i>Média</i>	<i>Mediana</i>	<i>Moda</i>	<i>Mínimo</i>	<i>Máximo</i>
PTH01	66,49	65	72	41	96
PTH02	60,61	60	62	41	81
PTH03	50,71	51	51	35	67
REVISÃO PCI	85,68	85	82	76	98
TOUCH-UP	207,41	200	192	138	289
CQP	76,85	76	79	51	106
TESTE FCT	38,90	40	40	30	46
TESTE ICT	165,09	159	142	122	225
CQF	92,63	93	93	78	109
EMBALAGEM	17,55	18	18	16	19

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Tabela 5.2 - Medidas de dispersão dos tempos de processamento

POSTOS DE TRABALHO	MEDIDAS DE DISPERSÃO				
	<i>Amplitude</i>	<i>Desvio-padrão</i>	<i>Variância da amostra</i>	<i>Coefficiente de Variação</i>	<i>Coefficiente de Assimetria</i>
PTH01	55	10,25	105,10	15,42%	+0,31
PTH02	40	8,27	68,35	13,64%	+0,11
PTH03	32	5,70	32,43	11,23%	+0,05
REVISÃO PCI	22	4,76	22,65	5,55%	+0,20
TOUCH-UP	151	35,13	1234,10	16,94%	+0,32
CQP	55	12,29	151,15	16,00%	+0,23
TESTE FCT	16	3,57	12,77	9,19%	-0,68
TESTE ICT	103	21,26	451,98	12,88%	+0,46
CQF	31	7,09	50,20	7,65%	+0,02
EMBALAGEM	3	0,93	0,86	5,30%	-0,03

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Partindo do ponto de vista macro, é possível visualizar e efetuar algumas afirmações sobre o comportamento dos tempos de cada processo da linha de manufatura. Por exemplo, os processos TOUCH-UP e TESTE ICT demandam mais tempo na linha. Observa-se que os tempos desses processos possuem elevadas variâncias. Por outro lado, o processo EMBALAGEM é executado de maneira mais rápida. Nota-se que a variância do processo EMBALAGEM é baixa. Além dessas observações pontuais, a Tabela 5.2 mostra que os coeficientes de assimetria estão próximos de zero. Esse fato indica que os tempos dos processos estão inclinados a serem representados por meio de distribuições normais de probabilidade. Todavia, essa última observação precisa ser confirmada com o auxílio de um software de ajuste de dados.

No terceiro estágio do processo de modelagem dos dados, o software Minitab® foi utilizado para efetuar o ajuste dos 1.000 dados de entrada selecionados. A partir desse ajuste, foram

identificadas as distribuições de probabilidades dos tempos de processamento dos dez postos de trabalho. A Tabela 5.3 mostra os processos e suas distribuições de probabilidade.

Tabela 5.3 - Distribuições de probabilidade dos tempos de cada processo

POSTOS DE TRABALHO	DISTRIBUIÇÕES DE PROBABILIDADE
PTH01	Normal (70,14; 11,18)
PTH02	Normal (61,33; 8,29)
PTH03	Normal (50,97; 5,18)
REVISÃO PCI	Normal (86,02; 4,41)
TOUCH-UP	Normal (215,16; 31,05)
CQP	Normal (77,20; 11,79)
TESTE FCT	Normal (39,66; 2,68)
TESTE ICT	Normal (178,54; 15,07)
CQF	Normal (93,95; 7,77)
EMBALAGEM	Triangular (16; 17; 19)

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Uma vez identificadas as distribuições de probabilidade que representam os tempos de processamento dos postos de trabalho, o terceiro estágio do processo de modelagem dos dados se encontra finalizado.

Em suma, na fase de concepção, o objetivo do estudo foi estabelecido, o modelo conceitual foi construído e validado, a modelagem dos agentes presentes no sistema foi efetuada e a modelagem dos dados de entrada foi concluída. Dessa maneira, seguindo o método proposto por Montevechi *et alia* (2010), a próxima etapa do estudo será a fase de implementação.

## 5.2. Implementação

A fase de implementação é composta pelos passos: *Construção do Modelo Computacional*, *Verificação do Modelo Computacional* e *Validação do Modelo Computacional*. A construção do modelo computacional é o primeiro passo. No caso desta pesquisa, dois modelos computacionais serão construídos. Após a construção desses modelos vem o segundo passo, a verificação. Na verificação, os modelos computacionais serão verificados com base no modelo conceitual validado. Na sequência, vem o terceiro e último passo, que consiste na validação dos modelos computacionais construídos e verificados. Cada um desses passos será abordado com maior detalhe nas próximas seções.

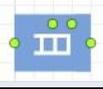
### 5.2.1. Construção do Modelo Computacional

Em diversos estudos de simulação, o modelo computacional é desenvolvido com o auxílio de um software disponível no mercado para aplicação de simulação computacional. Nesse

sentido, o software escolhido para desenvolver os modelos computacionais dessa dissertação foi o AnyLogic®. O software AnyLogic® foi escolhido, pois ele é um dos poucos softwares que permite a integração das técnicas de Simulação a Eventos Discretos e de Simulação Baseada em Agentes. É importante mencionar que o software AnyLogic® utiliza linguagem de programação JAVA.

Como dito anteriormente, serão construídos dois modelos. O primeiro modelo segue os preceitos da Simulação a Eventos Discretos. Portanto, esse modelo receberá o nome de MSED (Modelo de Simulação a Eventos Discretos). O segundo modelo é um modelo híbrido que combina as técnicas de Simulação a Eventos Discretos e de Simulação Baseada em Agentes. Dessa forma, esse modelo híbrido será nomeado de MSH (Modelo de Simulação Híbrida). Esses modelos computacionais foram desenvolvidos utilizando diferentes elementos oferecidos pelo software AnyLogic®. Os elementos usados, tanto no modelo MSED quanto no MSH, estão presentes na Tabela 5.4.

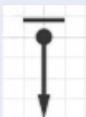
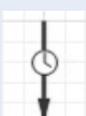
Tabela 5.4 - Elementos do Anylogic® usados nos modelos MSED e MSH

ILUSTRAÇÃO	NOME	FUNÇÃO
	<i>Resource Type</i> (Tipo de Recurso)	Cria entidades dentro do modelo.
	<i>Source</i> (Entrada)	Inicia o modelo e gera entidades.
	<i>Queue</i> (Fila)	Armazena entidades que não podem ser processadas no processo posterior.
	<i>Service</i> (Processo)	Captura, protela e libera entidades.
	<i>Delay</i> (Protelação)	Protela entidades.
	<i>Sink</i> (Saída)	Finaliza o modelo e absorve as entidades processadas.
	<i>Resource Pool</i> (Conjunto de recursos)	Define as unidades de recurso que possuem a capacidade de capturar e de liberar entidades dentro dos elementos <i>Seize</i> , <i>Release</i> , <i>Assembler</i> e <i>Service</i> .
	<i>Schedule</i> (Cronograma)	Define o cronograma a ser seguido dentro dos elementos <i>Resource Pool</i> , <i>Source</i> e <i>PedSource</i> .
	<i>Variable</i> (Variável)	Armazena resultados do modelo computacional e modela, no decorrer do tempo, unidades de dados ou características do objeto.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Além dos elementos supracitados, existem outros elementos que foram utilizados apenas no modelo MSH. Esses elementos fazem referência à técnica de Simulação Baseada em Agentes. A Tabela 5.5 mostra os elementos usados no modelo MSH.

Tabela 5.5 - Elementos do Anylogic® usados no modelo MSH

ILUSTRAÇÃO	NOME	FUNÇÃO
	<i>Agent</i> (Agente)	Tem a capacidade de representar diversos componentes presentes em sistemas reais através de atributos e comportamentos.
	<i>Parameter</i> (Parâmetro)	Descreve o objeto modelado representando as características do mesmo.
	<i>Table Function</i> (Função de Tabela)	Define relações complexas não lineares que não podem ser descritas através de funções padrão.
	<i>Entry Point</i> (Ponto de Entrada)	Indica o estado inicial de um diagrama de estado.
	<i>Initial State Pointer</i> (Indicador de Estado Inicial)	Inicia o estado que se encontra dentro de outro estado.
	<i>State</i> (Estado)	Representa o estado atual do agente. O elemento Estado é acionado por meio de transições.
	<i>Transition</i> (Transição)	Realiza a transição de um estado para outro conforme a lógica estabelecida. Os seguintes tipos de evento que acionam a transição são: <i>Timeout</i> , <i>Rate</i> , <i>Condition</i> , <i>Message</i> , e <i>Agent arrival</i> .

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Com base no modelo conceitual validado, o modelo computacional MSED começou a ser construído. O primeiro passo da construção do modelo MSED foi a criação da entidade **Placa**. Em seguida, a linha começou a ser construída. Sequencialmente, foram adicionados os elementos: (1) *Source*, (1) *Queue*, (10) *Service*, (6) *Delay*, (1) *Sink*, (14) *Resource Pool*, (2) *Schedule* e (1) *Variable*. Todos esses elementos estão na Figura 5.3.

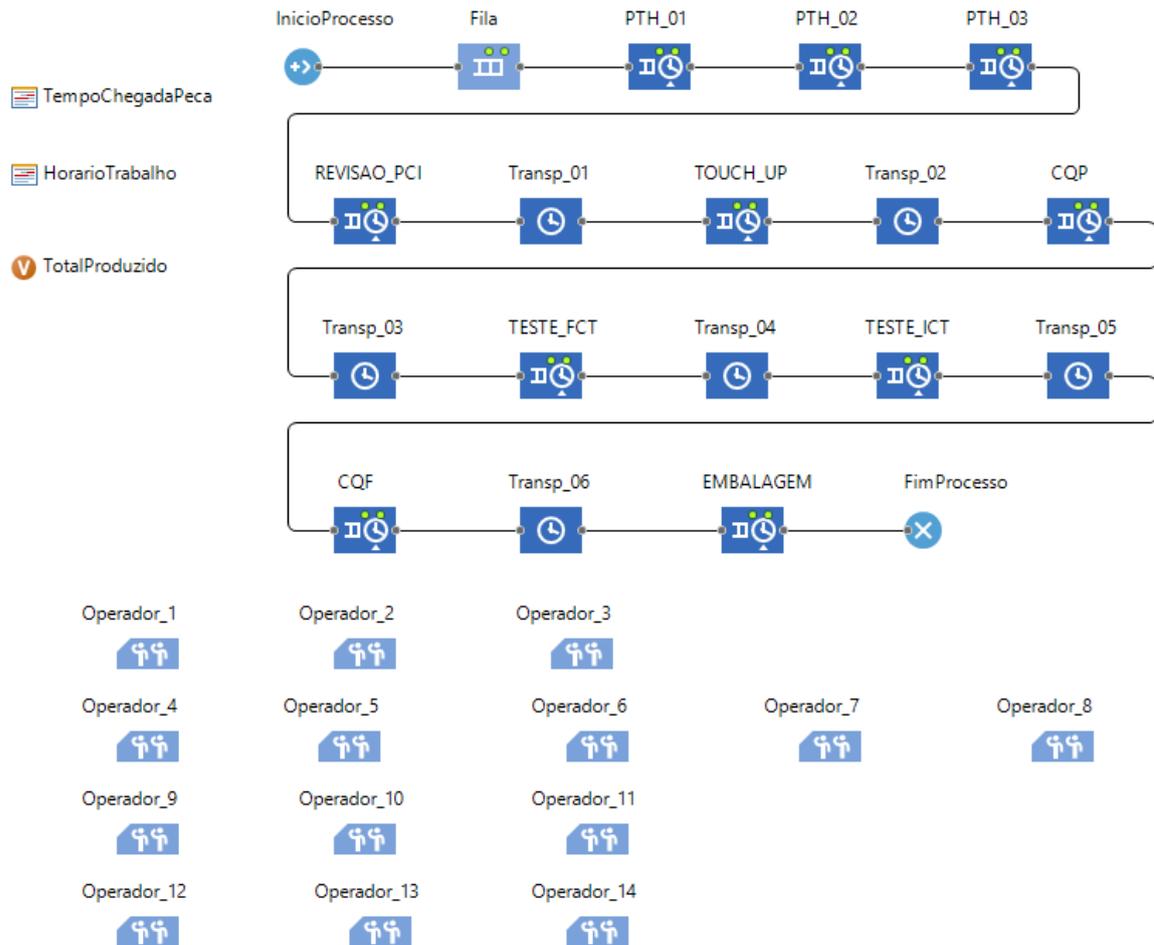


Figura 5.3 - Modelo computacional MSED da linha de manufatura  
 Fonte: Elaborado pelo próprio autor

A entidade **Placa** foi associada ao elemento “InicioProcesso”. Assim, do elemento “InicioProcesso” a entidade placa vai para o elemento “Fila”. Foi estabelecido no elemento “Fila” a disciplina FIFO (*First In, First Out*) e o limite máximo. Obedecendo o cronograma “HorarioTrabalho”, os trabalhadores ocupam os seus respectivos postos de trabalho. Dessa forma, as placas começam a ser processadas de acordo com as distribuições de probabilidades inerentes à cada posto de trabalho. Por fim, a variável “TotalProduzido” contabiliza a quantidade de placas produzidas durante a simulação. Assim, o modelo MSED foi criado.

Os procedimentos citados acima foram aplicados da mesma forma para construir o modelo MSH. Dessa maneira, após acrescentar a variável “TotalProduzido”, foi iniciada a construção do agente. Primeiramente, quatorze agentes foram adicionados no sistema de maneira individual. Após o acréscimo dos agentes, os mesmos foram relacionados com os conjuntos de recursos. Logo, a parte inferior do modelo computacional é mudada visualmente como é mostrado na Figura 5.4.



Figura 5.4 - Relação entre os conjuntos de recursos e os agentes  
Fonte: Elaborado pelo próprio autor

O próximo passo da construção do modelo MSH consiste na elaboração dos parâmetros, das variáveis e do diagrama de estado de cada agente do sistema, de acordo com o modelo Protocolo ODD desenvolvido anteriormente. Dessa forma, começando pelos parâmetros, foram criados 10 parâmetros. Os quatro primeiros são: “Meta\_Diaria”, “Horas\_Trabalhadas”, “Hrs\_Totais” e “Produzido”. O parâmetro “Meta\_Diaria” possui o valor de 322. Esse valor indica a quantidade de placas a ser produzida durante o dia. O parâmetro “Horas\_Trabalhadas” conta as horas que o operador já trabalhou. O parâmetro “Hrs\_Totais” contém o valor 8 que significa oito horas de trabalho. O parâmetro “Produzido” contabiliza quantas placas foram produzidas até um dado momento.

Os outros seis parâmetros são: “Esforco\_Positivo”, “Esforco\_Nulo”, “Esforco\_Negativo”, “Consistencia\_Positiva”, “Consistencia\_Nula” e “Consistencia\_Negativa”. Esses seis parâmetros estão conectados, respectivamente, com as funções de tabela: “Tabela\_Esforco\_Positivo”, “Tabela\_Esforco\_Nulo”, “Tabela\_Esforco\_Negativo”, “Tabela\_Consistencia\_Positiva”, “Tabela\_Consistencia\_Nula” e “Tabela\_Consistencia\_Negativa”. Os valores contidos nessas funções de tabela são os mesmos valores que se encontram nos itens Esforço e Consistência da tabela de estimativas de desempenho do Sistema Westinghouse (BARNES, 1977).

Sobre as variáveis, quatro foram criadas. A primeira variável é a “Produzido\_Por\_Hora”. Essa variável indica a quantidade de placas que foram produzidas na última hora de trabalho. A “Meta\_Por\_Hora” é a segunda variável. Ela indica quanto o operador deveria ter produzido durante a última hora de trabalho. A terceira variável é a “Taxa\_Eficiencia”. O resultado dessa variável está relacionado com a razão entre o que foi produzido na última hora e o que

deveria ser produzido. A quarta recebe o nome “Ritmo”. Essa variável mostra o valor que indica o ritmo de trabalho do operador em um determinado momento.

É importante dizer que, com base na equação (2.1), os valores gerados pela variável “Ritmo” dá origem a equação 5.1, onde  $\mathbf{R}$  reflete o valor do ritmo de trabalho, o número 1 consiste em uma constante e a expressão  $\sum \mathbf{F}$  representa o somatório dos valores dos parâmetros que retratam os fatores esforço e consistência.

$$\mathbf{R} = \mathbf{1} + \left( \sum \mathbf{F} \right) \quad (5.1)$$

Todos os parâmetros, as variáveis e as funções de tabela dos agentes podem ser apreciados por meio da Figura 5.5.



Figura 5.5 - Parâmetros, variáveis e funções de tabela dos agentes  
Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Após a etapa de criação dos parâmetros e das variáveis, o diagrama de estado do agente foi elaborado conforme a Figura 5.2. Assim, o primeiro passo foi acrescentar um “Ponto de Entrada”. Em seguida, foram adicionados os estados: “Descansando”, “Trabalhando” e “Almoçando”. Com o intuito de retratar o ritmo de trabalho do operador, mais quatro estados foram adicionados dentro do estado “Trabalhando”: “Normal”, “Lento”, “Rápido” e “Calculando”.

Dando sequência à construção do diagrama de estado, o passo seguinte baseia-se em conectar os sete estados do agente por meio de transições. Desse modo, 10 transições foram criadas, 7

do tipo *Timeout* e 3 do tipo *Condition*. O diagrama de estado dos quatorze agentes pode ser conferido através da Figura 5.6.

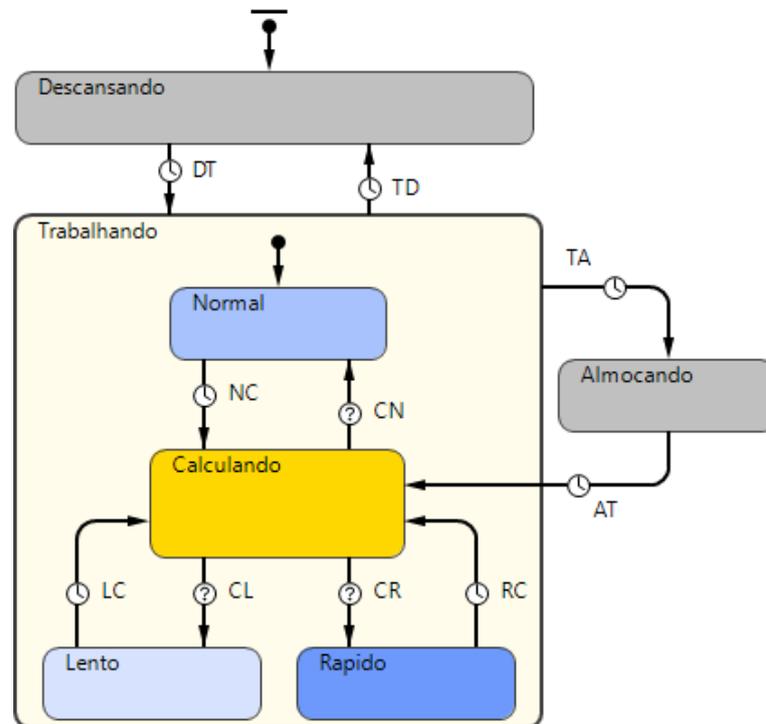


Figura 5.6 - Diagrama de estado dos agentes  
Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Com base na lógica das transições que ligam os sete estados do agente trabalhador, a Figura 5.7 mostra como cada agente vai se comportar dentro do modelo híbrido.

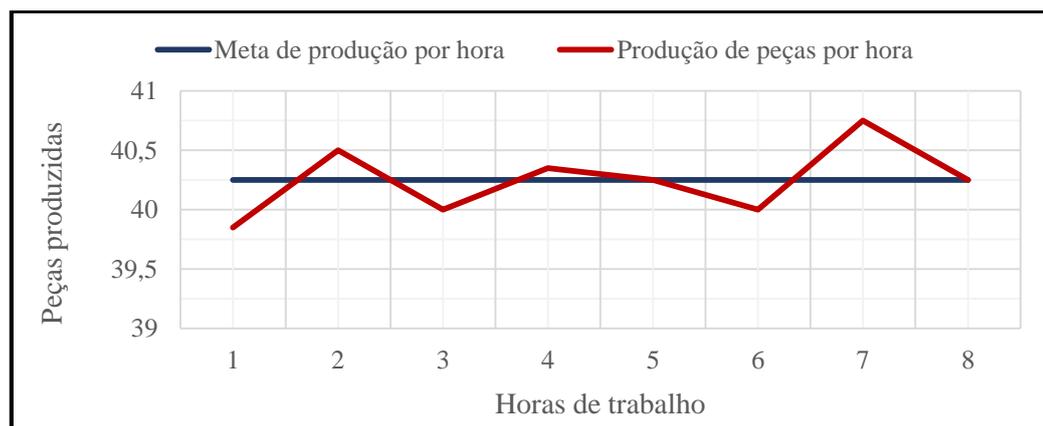


Figura 5.7 - Comportamento de cada agente dentro do modelo híbrido  
Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Portanto, a meta de produção por hora é estabelecida no modelo híbrido. Essa meta é constante durante toda a simulação. Após uma hora de trabalho, o agente trabalhador verifica quanto foi produzido. Se a produção de peças foi abaixo da meta estabelecida, na próxima hora o agente trabalhador aumenta o seu ritmo de trabalho. Se a produção de peças foi acima

da meta estabelecida, o agente trabalhador diminui o seu ritmo de trabalho na próxima hora. Assim, cada agente trabalhador do modelo possuirá um ritmo de trabalho. O valor desse ritmo irá interferir na distribuição de probabilidade, que representa o tempo de processamento do posto de trabalho no qual o agente trabalhador se encontra, por meio da divisão da mesma.

Uma vez com os dois modelos construídos, o segundo passo da fase de implementação é a verificação dos modelos computacionais. Esse tema será abordado na próxima seção.

### 5.2.2. Verificação do Modelo Computacional

A verificação do modelo computacional é um processo que consiste em assegurar que a implementação e a programação computacional foram aplicadas corretamente tendo como base o modelo conceitual. Segundo Sargent (2013), há duas técnicas de verificação, sendo elas: o passo a passo estruturado e a *trace*. No passo a passo estruturado, a entidade em estudo é formalmente apresentada para um grupo de pares. Esse grupo irá analisar se a entidade está corretamente apresentada. Na técnica *trace*, o comportamento de uma determinada entidade do modelo é seguido com o objetivo de verificar se a lógica e a precisão do modelo estão corretas.

Além dessas duas técnicas, Chwif e Medina (2015) citam seis maneiras diferentes de se fazer o processo de verificação. São elas: (1) implementação modular; (2) valores constantes versus cálculos manuais; (3) utilização do *debugger*, *trace* ou depurador; (4) simulação manual; (5) animação gráfica; (6) revisão em grupo.

Com base nesses conceitos, o processo de verificação foi efetuado em duas etapas. Na primeira etapa, cada modelo computacional foi verificado metodicamente comparando a lógica e os elementos dos mesmos com a lógica e os elementos do modelo conceitual validado. Após essa comparação, a segunda etapa foi executada utilizando o *debugger build model* que o software Anylogic® oferece.

Durante esse processo de verificação, erros foram localizados, compreendidos e corrigidos. A maior parte desses erros estava relacionada com o uso errado da linguagem de programação JAVA. Como dito anteriormente, essa linguagem é o cerne do software Anylogic®. Após a correção dos erros de programação, o processo de verificação foi efetuado novamente nos dois modelos de simulação com o intuito de identificar a existência de outros erros. O processo de verificação foi finalizado no momento em que erros estruturais e lógicos não foram mais identificados nos modelos computacionais.

### 5.2.3. Validação do Modelo Computacional

Verificados, os modelos MSED e MSH estavam prontos para o terceiro passo da fase de implementação, a validação do modelo computacional. De acordo com Law (2005), validação é o processo que se baseia em determinar se o modelo computacional, desenvolvido para atingir objetivos específicos, possui a capacidade de representar de modo preciso o sistema real.

Chwif e Medina (2015) destacam a existência de três níveis de validação. O primeiro nível é o qualitativo. Nesse nível, indicadores de desempenho do sistema real são levantados somente em termos qualitativos e comparados com o comportamento do modelo computacional. O segundo nível é o quantitativo informal. Nesse segundo nível de validação, os resultados do modelo computacional são comparados com os dados reais pontuais (pequenas amostras do sistema real) para validar alguns parâmetros do modelo. O terceiro e último nível de validação é o quantitativo formal. No nível quantitativo formal, técnicas estatísticas de validação que possuem respaldo na literatura científica são aplicadas com o objetivo de ratificar se os resultados dos modelos computacionais são análogos aos resultados gerados pelo sistema real.

Sargent (2013) apresenta uma tabela com a classificação das técnicas de validação que podem ser aplicadas em modelos computacionais conforme a abordagem de decisão e o aspecto do sistema em estudo. Essa classificação pode ser vista por meio da Tabela 5.6.

Tabela 5.6 - Classificação das técnicas de validação

<b>ABORDAGEM DE DECISÃO</b>	<b>SISTEMA OBSERVÁVEL</b>	<b>SISTEMA NÃO OBSERVÁVEL</b>
<i>Abordagem subjetiva</i>	Comparação usando exibições gráficas	Explorar o comportamento do modelo
	Explorar o comportamento do modelo	Comparação com outros modelos
<i>Abordagem objetiva</i>	Comparação por meio de testes e procedimentos estatísticos	Comparação com outros modelos usando testes estatísticos

Fonte: Sargent (2013)

A partir dos conceitos apresentados sobre validação, torna-se possível determinar qual o nível e qual a abordagem de decisão de validação que serão aplicados para validar os dois modelos computacionais apresentados nas seções anteriores. O nível quantitativo formal, terceiro nível de validação, foi o escolhido. No âmbito desse nível, a abordagem de decisão definida foi a abordagem objetiva. Dentro dessa abordagem, a técnica de validação adotada foi a comparação dos resultados de saída dos modelos com os dados reais, fazendo uso de testes e procedimentos estatísticos.

No total, a organização forneceu 30 dados. Cada um desses dados representa a produção de uma semana de trabalho. Assim, os modelos MSED e MSH foram projetados para gerar 30 réplicas cada um. Desse modo, os resultados obtidos dos modelos MSED e MSH através da variável “TotalProduzido” foram comparados com os dados reais fornecidos pela a organização.

Através do software Minitab®, os procedimentos estatísticos usados para validar os modelos foram executados obedecendo uma sequência. Esses procedimentos estatísticos foram: o Teste de Normalidade, o Teste de *Outlier* ou Teste de Grubbs, o Teste de Hipótese *2-Sample Variance* e o Teste de Hipótese *2-Sample t*.

O Teste de Normalidade foi executado tanto para a amostra de dados reais quanto para as amostras dos dados gerados pelos modelos MSED e MSH. O objetivo do Teste de Normalidade é o de verificar se os dados dessas amostras estão normalmente distribuídos. Esses testes foram feitos com base na estatística Anderson-Darling, considerando um intervalo de confiança de 95%. As hipóteses dos testes de normalidade foram:

- H0: os dados seguem uma distribuição normal;
- H1: dados não seguem uma distribuição normal.

Os resultados dos testes de normalidade são apresentados pelas Figuras 5.8, 5.9 e 5.10.

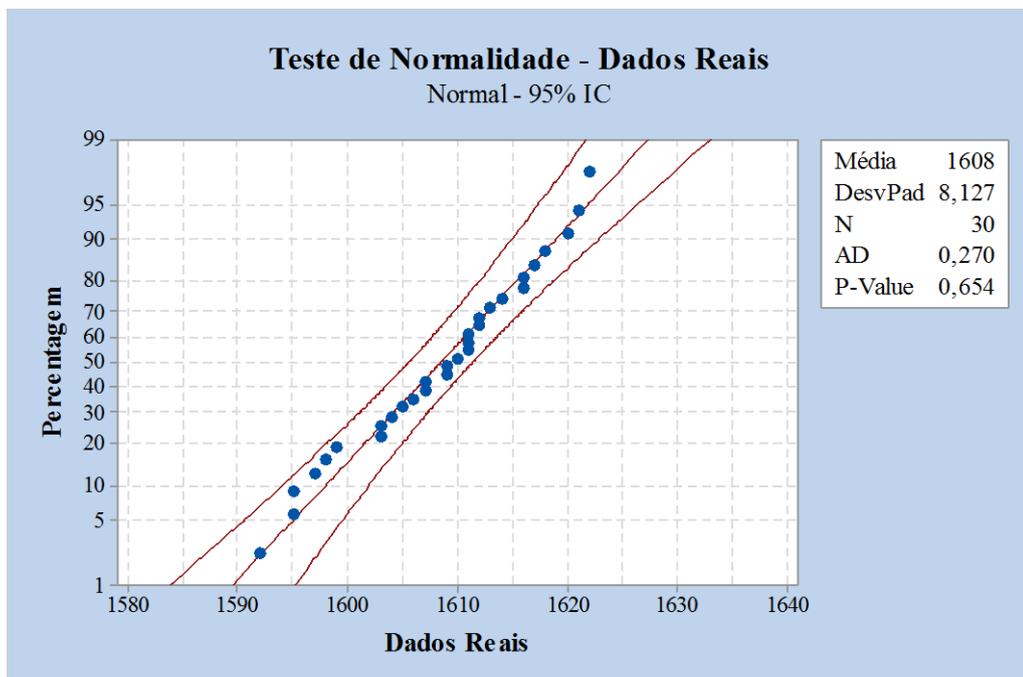


Figura 5.8 - Teste de Normalidade da amostra dos Dados Reais  
Fonte: Elaborado pelo próprio autor

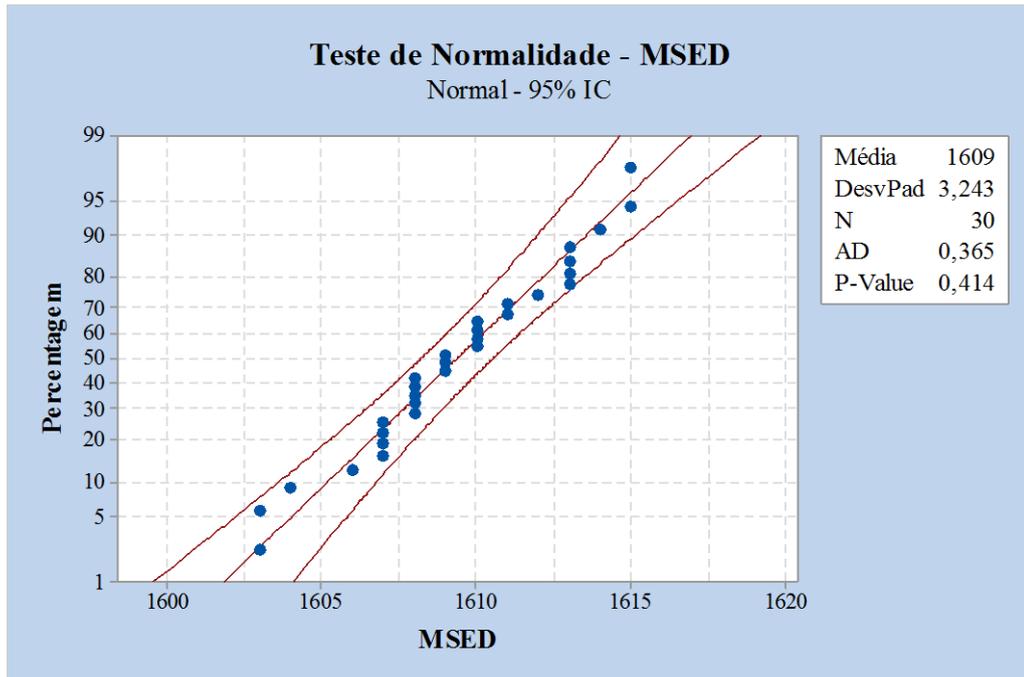


Figura 5.9 - Teste de Normalidade da amostra dos dados do modelo MSED  
Fonte: Elaborado pelo próprio autor

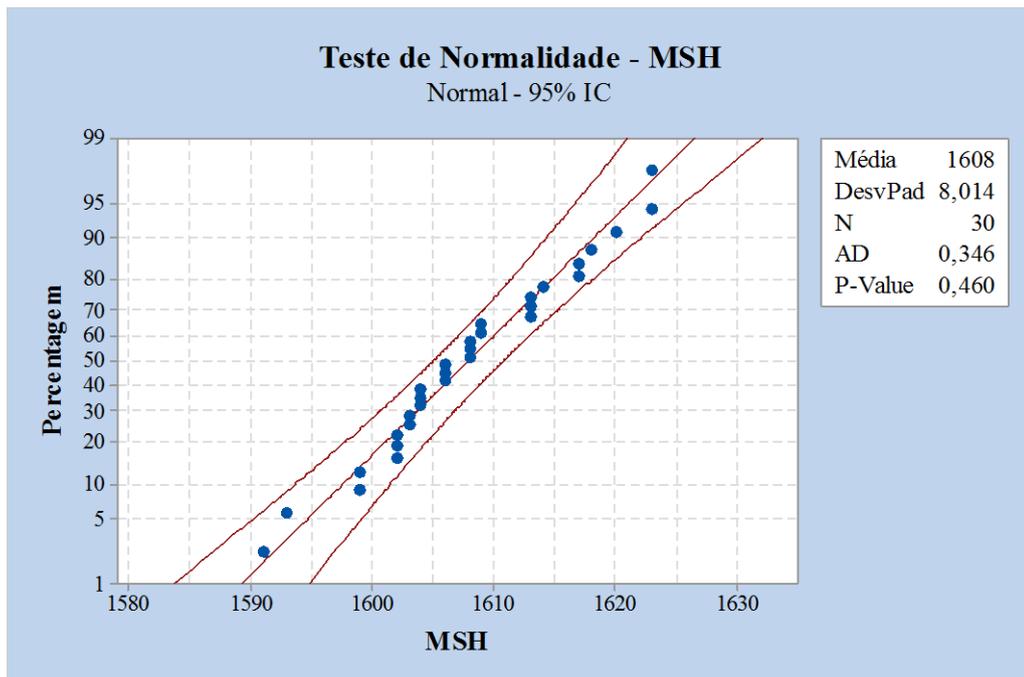


Figura 5.10 - Teste de Normalidade da amostra dos dados do modelo MSH  
Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Os testes de normalidade de todas as amostras apresentaram *p-values* maior que 0,05. Isso significa que não existem evidências para se rejeitar a hipótese nula ( $H_0$ ). Portanto, os dados seguem uma distribuição normal.

Para identificar a existência de valores extremos nas amostras, o Teste de Grubbs foi aplicado nas três amostras. As hipóteses consideradas nesses testes foram:

- H0: os menores ou maiores valores da amostra não são *outliers*;
- H1: os menores ou maiores valores da amostra são *outliers*.

As figuras 5.11, 5.12 e 5.13 mostram os resultados dos testes.

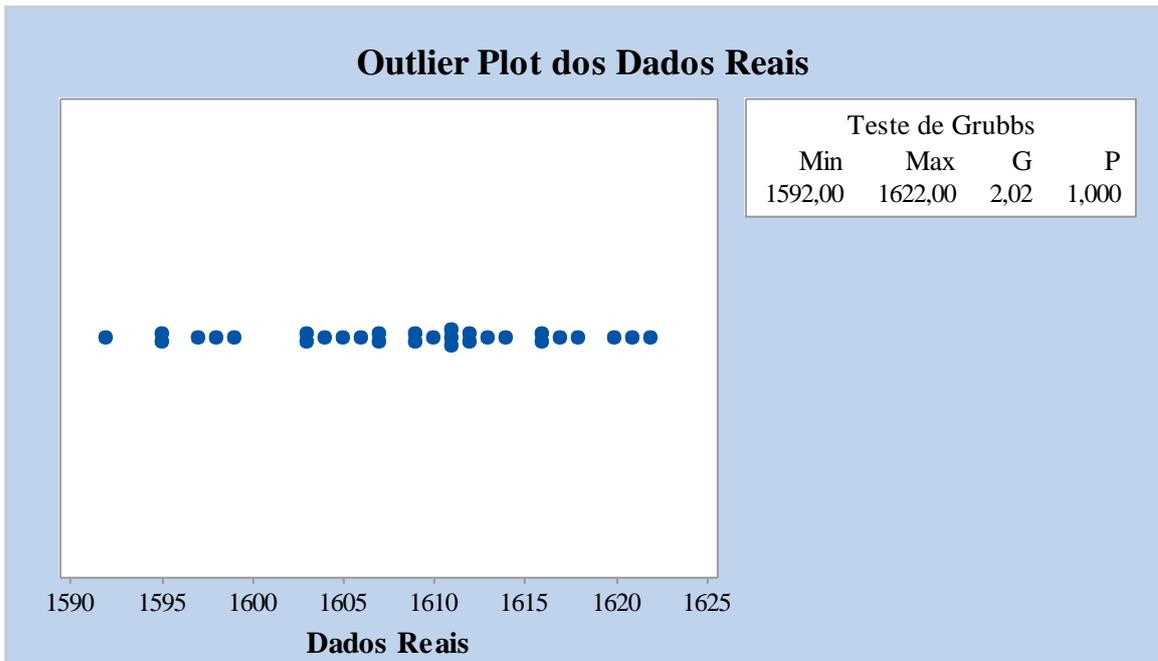


Figura 5.11 - Teste de Grubbs da amostra da amostra dos Dados Reais  
Fonte: Elaborado pelo próprio autor

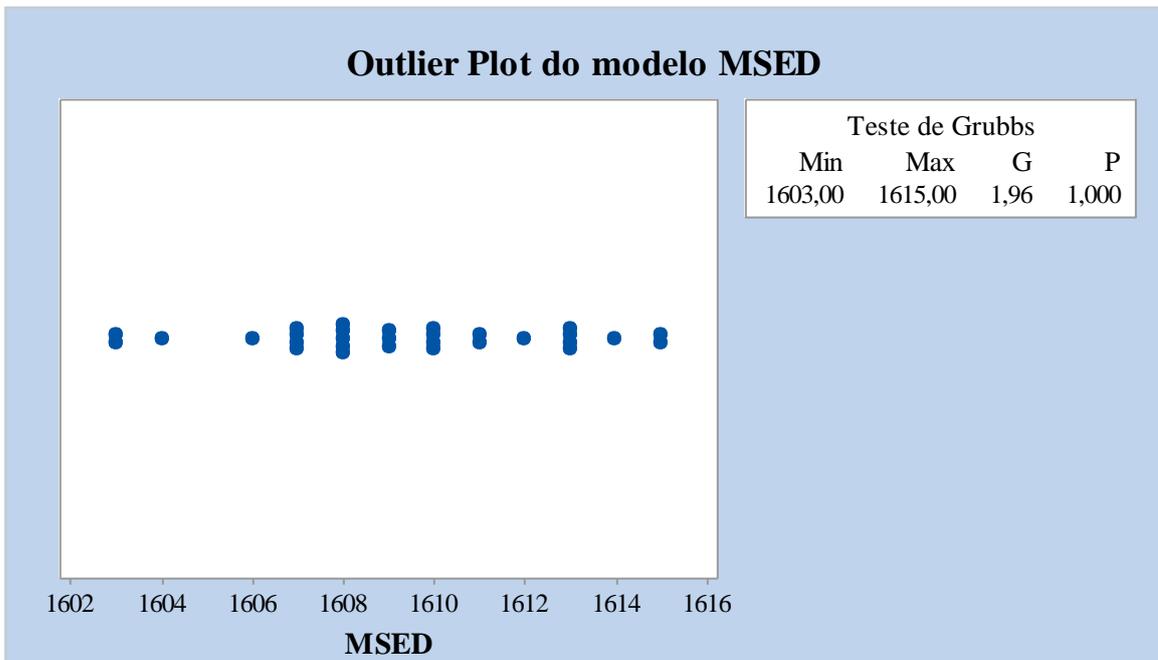


Figura 5.12 - Teste de Grubbs da amostra dos dados do modelo MSED  
Fonte: Elaborado pelo próprio autor

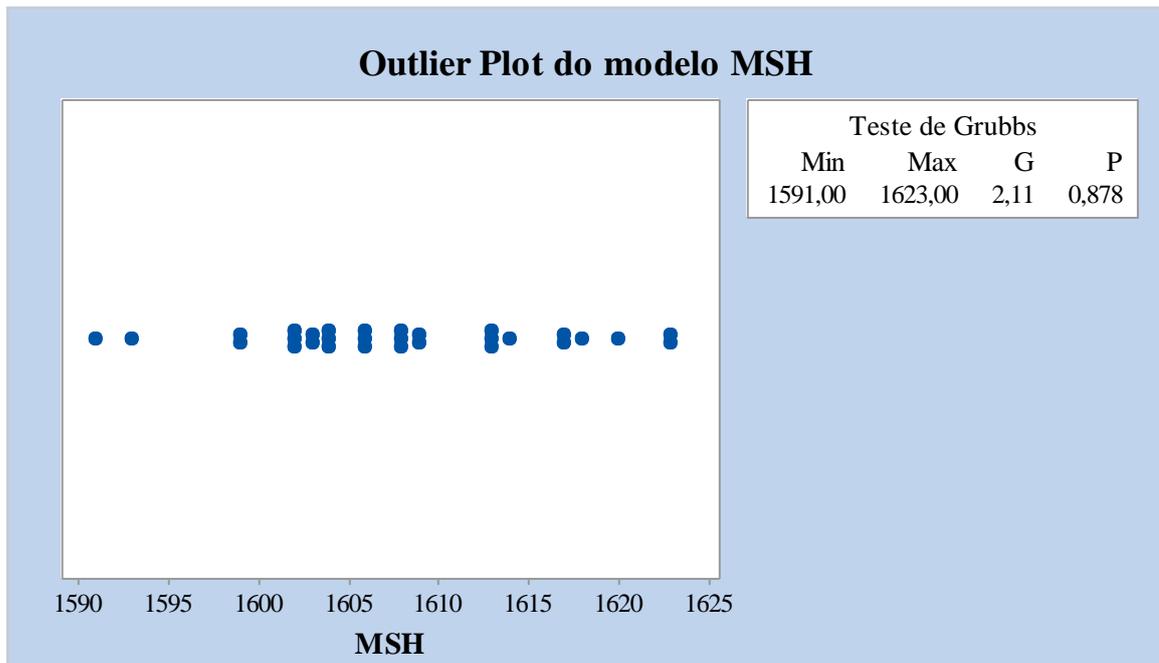


Figura 5.13 - Teste de Grubbs da amostra dos dados do modelo MSH  
Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Com base nos testes de Grubbs, os valores de *p-value* foram superiores à 0,05. Dessa forma, conclui-se que os menores ou maiores valores de todas as amostras não são *outliers*. Assim sendo, não se rejeita a hipótese nula ( $H_0$ ).

Após a execução dos testes de Grubbs, aplicou-se o Teste de Hipótese *2-Sample Variance*, teste estatístico usado para determinar se as variâncias de duas amostras independentes são diferentes. Vale mencionar que o teste *2-Sample Variance* foi aplicado duas vezes. A primeira aplicação ocorreu considerando a amostra dos Dados Reais e a amostra dos dados gerados pelo modelo MSED. A segunda aplicação considerou a amostra dos Dados Reais e a amostra dos dados gerados pelo modelo MSH. As hipóteses realizadas foram:

- $H_0$ : a variância da amostra dos Dados Reais não é diferente da variância da amostra dos dados do modelo MSED;
- $H_1$ : a variância da amostra dos Dados Reais é diferente da variância da amostra dos dados do modelo MSED;
- $H_0$ : a variância da amostra dos Dados Reais não é diferente da variância da amostra dos dados do modelo MSH;
- $H_1$ : a variância da amostra dos Dados Reais é diferente da variância da amostra dos dados do modelo MSH.

Após comparar a variância da amostra dos dados do modelo MSED com a variância da amostra dos Dados Reais, obteve-se um *p-value* igual a 0,00. Isso significa que a variância da amostra dos Dados Reais é diferente da variância da amostra dos dados do modelo MSED. Logo, a hipótese nula é rejeitada. Por outro lado, a comparação entre a variância da amostra dos Dados Reais e a variância da amostra dos dados do modelo MSH indica que tais variâncias não são estatisticamente diferentes, pois o valor de *p-value* foi equivalente a 0,941. Esse resultado demonstra que a amostra dos dados do modelo MSH se aproxima da amostra dos Dados Reais. Logo, a hipótese nula do segundo teste *2-Sample Variance* não pode ser rejeitada.

Dando continuidade aos procedimentos estatísticos, o próximo teste efetuado foi o Teste de Hipótese *2-Sample t*. Esse teste de hipótese determina se as médias de duas amostras independentes são diferentes. Dois testes *2-Sample t* foram executados. O primeiro teste comparou a média dos dados reais com a média dos dados do modelo MSED. Desse modo, as hipóteses consideradas foram:

- H0: a média da amostra dos Dados Reais não é diferente da média da amostra dos dados do modelo MSED;
- H1: a média da amostra dos Dados Reais é diferente da média da amostra dos dados do modelo MSED.

O resultado do primeiro teste *2-Sample t* foi *p-value* igual a 0,563. Com esse resultado, a hipótese nula (H0) não é rejeitada. Portanto, a média da amostra dos Dados Reais não é diferente da média da amostra dos dados do modelo MSED.

O segundo teste *2-Sample t* foi executado, porém, utilizando dessa vez a amostra dos Dados Reais e a amostra dos dados do modelo MSH. Dessa maneira, foram consideradas as hipóteses:

- H0: a média da amostra dos Dados Reais não é diferente da média da amostra dos dados do modelo MSH;
- H1: a média da amostra dos Dados Reais é diferente da média da amostra dos dados do modelo MSH.

O resultado produzido pelo segundo teste foi *p-value* equivalente a 0,799. Conclui-se, portanto, que não há nenhuma evidência para se rejeitar a hipótese nula (H0). Assim, a média da amostra dos Dados Reais não é significativamente diferente da média da amostra dos dados do modelo MSH.

Desse modo, com base nos dados obtidos, os modelos MSED e MSH foram validados através da média. A relação entre as médias das amostras pode ser conferida através da Figura 5.14.

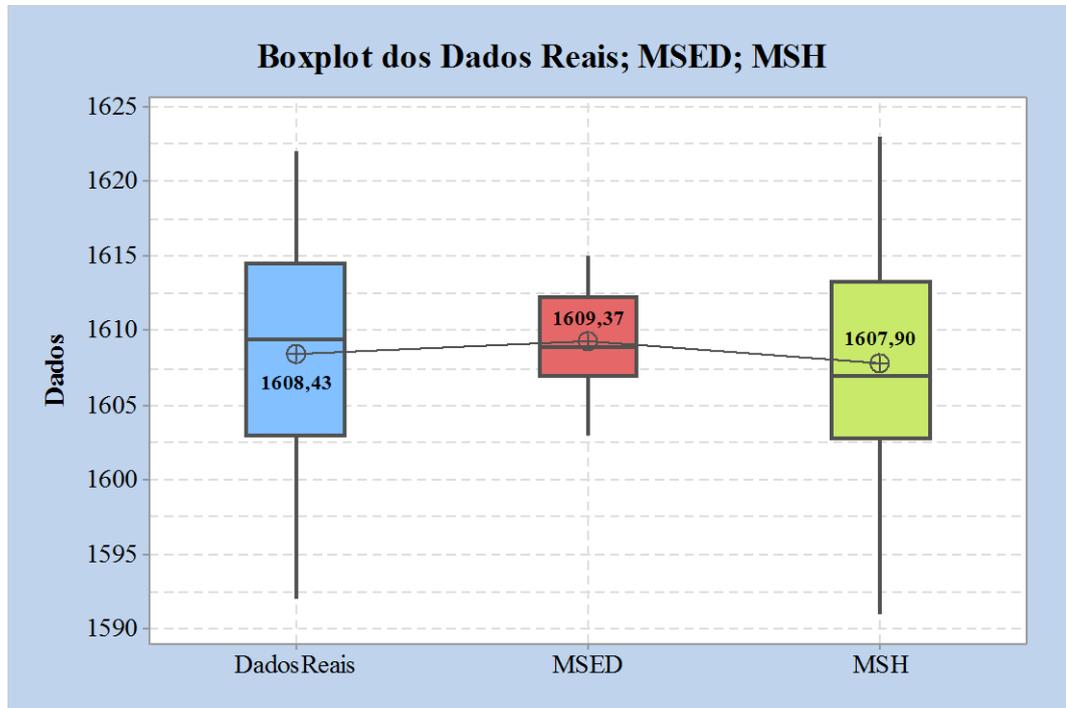


Figura 5.14 - Relação entre as médias das amostras  
Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Através da Figura 5.14 pode-se observar que a média das amostras dos dados do modelo MSED e MSH possuem valores próximo à média dos Dados Reais. Todavia, nota-se que a variabilidade dos dados produzidos pelo modelo MSH está mais próxima da variabilidade dos dados reais. Portanto, os dados produzidos pelo modelo MSED possuem uma variabilidade menor quando comparada com as amostras dos dados do modelo MSH e dos Dados Reais.

Concluindo, seguindo uma abordagem de decisão objetiva, testes e procedimentos estatísticos foram executados sobre as amostras que representam os dados reais e os resultados dos modelos MSED e MSH com objetivo de validar esses modelos computacionais. Esse objetivo foi alcançado e evidenciado por meio da Figura 5.14.

### 5.3. Análise

Com as fases de concepção e de implementação finalizadas, inicia-se a fase de análise. Nessa fase será feita a *Definição do projeto experimental*, a *Execução dos experimentos* e a *Análise estatística*. Esses três passos da fase de análise serão abordados nas próximas seções.

### 5.3.1. Definição do projeto experimental

No contexto da simulação, o estágio de definição do projeto experimental é o momento em que se define os experimentos que serão executados com o modelo computacional validado. Nesse sentido, Chwif e Medina (2015) afirmam que o projeto experimental é um método que auxilia no planejamento racional dos experimentos a serem executados. Ademais, esse método permite avaliar a forma como as variáveis de entrada influenciam nos resultados dos experimentos.

Nesta pesquisa, visando atingir o objetivo de avaliar o uso do modelo híbrido para a tomada de decisão em relação às metas de produção, um experimento será efetuado. Esse experimento consiste em alterar os valores do parâmetro “Meta\_Diaria” do modelo MSH. No total, serão sete cenários.

O modelo híbrido validado utilizou o valor de 322 placas para o parâmetro “Meta\_Diaria”. Tendo como referência esse valor original, o parâmetro “Meta\_Diaria” sofrerá alterações na seguinte ordem: - 10,0%; - 5,0%; - 2,5%; 0,0%; + 2,5%; + 5,0%; 10%. A escolha desses valores percentuais foi feita com a intenção de verificar a sensibilidade dos agentes do modelo quando se altera a meta de produção em pequenas proporções. A Tabela 5.7 mostra essas alterações de maneira resumida.

Tabela 5.7 - Valores a serem considerados para o experimento da meta

<b>VALORES PERCENTUAIS</b>						
<b>- 10,0%</b>	<b>- 5,0%</b>	<b>- 2,5%</b>	<b>0,0%</b>	<b>+ 2,5%</b>	<b>+ 5,0%</b>	<b>+ 10,0%</b>
<b>METAS DIÁRIAS</b>						
<b>290</b>	<b>306</b>	<b>314</b>	<b>322</b>	<b>330</b>	<b>338</b>	<b>354</b>
<b>METAS SEMANAIS</b>						
<b>1450</b>	<b>1530</b>	<b>1570</b>	<b>1610</b>	<b>1650</b>	<b>1690</b>	<b>1770</b>

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

### 5.3.2. Execução dos experimentos

Cada um dos cenários foi executado, considerando os valores das metas diárias que estão na Tabela 5.7. Portanto, nos cenários 01, 02, 03, 04, 05, 06 e 07 o valor do parâmetro “Meta\_Diaria” foi, respectivamente, 290, 306, 314, 322, 330, 338 e 354.

Houve 30 replicações para cada cenário. Englobando os 7 cenários, foram efetuadas no total 210 replicações. O resultado de cada replicação representa a produção de uma semana de trabalho. Cada semana é composta por 5 dias de trabalho. O resultado de cada dia de trabalho foi coletado durante as 30 replicações. Dessa forma, cada cenário possui 150 dados que retratam a produção diária. No ANEXO A encontram-se as tabelas que contêm os resultados produzidos pelo modelo MSH nos 7 cenários propostos. É importante ressaltar que os valores que atingiram ou superaram as metas planejadas estão em destaque nessas tabelas.

Tendo como referência os valores da Tabela 5.7 e as informações presentes nas tabelas do ANEXO A, é possível verificar em quais dias e semanas que a meta planejada foi atingida. Isso é mostrado na Tabela 5.8.

Tabela 5.8 - Resultados do experimento

CENÁRIOS	TEMPO	Meta alcançada	Meta não alcançada	Total de Dados
- 10,0%	DIA	135	15	150
	SEMANA	30	0	30
- 5,0%	DIA	108	42	150
	SEMANA	26	4	30
- 2,5%	DIA	93	57	150
	SEMANA	19	11	30
0,0%	DIA	85	65	150
	SEMANA	18	12	30
+ 2,5%	DIA	74	76	150
	SEMANA	8	22	30
+ 5,0%	DIA	41	109	150
	SEMANA	0	30	30
+ 10,0%	DIA	0	150	150
	SEMANA	0	30	30

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Concluindo, nesta seção de execução do experimento foi posto em prática os 7 cenários planejados na seção 5.3.1. Os resultados obtidos foram colocados de modo resumido na Tabela 5.8. O conteúdo dessa tabela servirá de matéria-prima para as análises estatísticas que serão abordadas na próxima seção.

### 5.3.3. Análise estatística

Com base nas informações da Tabela 5.8, dois gráficos de colunas percentualmente empilhadas foram criados com o objetivo de comparar o percentual de valores que alcançaram a meta e o percentual de valores que não atingiram a meta. Foram considerados tanto os dados diários quanto os dados semanais. A Figura 5.15 mostra os resultados das metas diárias nos

sete cenários propostos. Já na Figura 5.16 estão os resultados das metas semanais dos sete cenários.

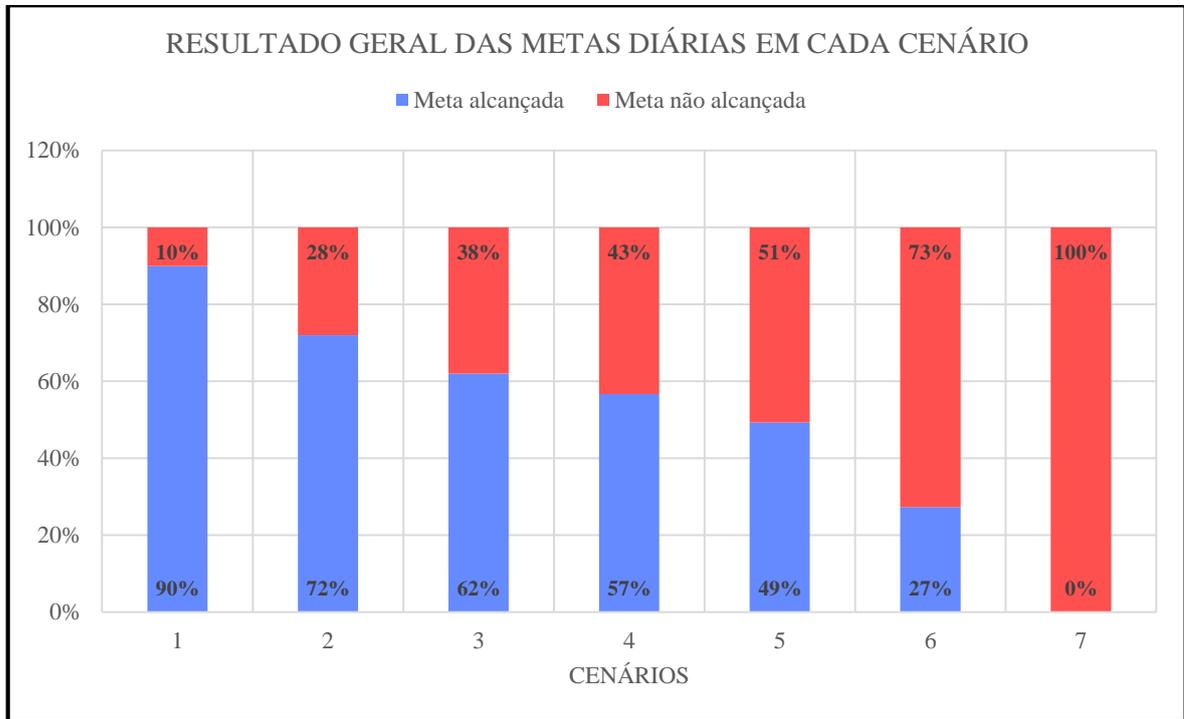


Figura 5.15 - Gráfico relacionando as metas diárias dos sete cenários  
Fonte: Elaborado pelo próprio autor

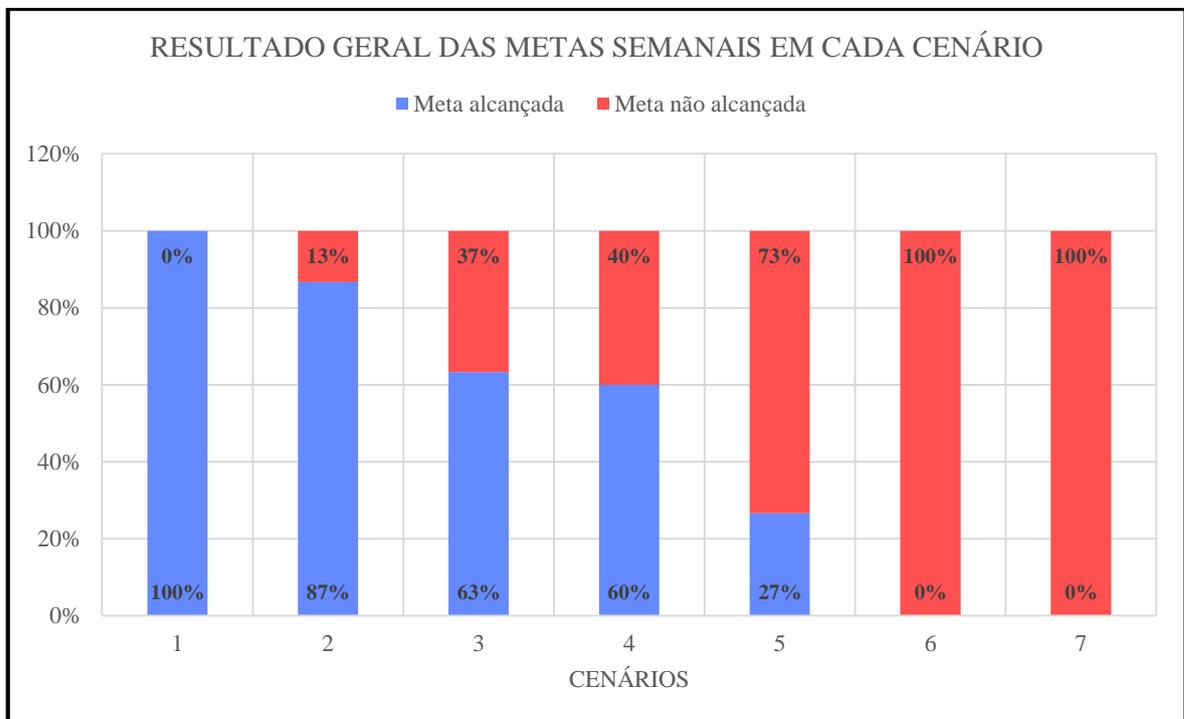


Figura 5.16 - Gráfico relacionando as metas semanais dos sete cenários  
Fonte: Elaborado pelo próprio autor

No Cenário 1, a Figura 5.15 mostra que 90% dos dados gerados pelo modelo MSH alcançaram ou ultrapassaram a meta diária determinada. Por outro lado, 10% dos dados ficaram abaixo da meta estabelecida. No contexto semanal, a meta proposta foi totalmente atingida como pode ser visto pela Figura 5.16.

No segundo cenário, com a diminuição de 5% da meta original, percebe-se que 72% das metas diárias foram alcançadas ou superadas. Com relação ao contexto semanal, 87% dos dados gerados pelo modelo MSH atingiram ou superaram a meta de 1.530 peças.

Quanto ao Cenário 03, o mesmo indica que a maior parte da produção diária alcançou a meta de 314 peças. Esse resultado é similar ao resultado no contexto semanal. Assim, com a diminuição de 2,5% da meta original, os trabalhadores conseguiram atingir ou superar a meta estabelecida na ordem de 63%.

O Cenário 04 é o cenário da meta original de 322 peças. Em outras palavras, essa é a meta que foi usada no momento da validação do modelo MSH. De acordo com o gráfico da Figura 5.15, a meta diária de 322 foi atingida ou ultrapassada na proporção de 57%. Desse modo, há um risco considerável de não atingir a meta estabelecida no âmbito diário. Com relação à meta semanal, a situação é similar, pois os trabalhadores conseguiram alcançar ou superar a meta determinada em 60% dos resultados.

Ao aumentar a meta original na ordem de 2,5%, nota-se que, no contexto diário, a meta de 330 peças é alcançada ou superada em 49% dos casos. Logo, no quinto cenário, existe a chance de não alcançar a meta diária em 51% dos casos. No contexto semanal, a situação se agrava porque não foi atingida ou superada a meta semanal de 1.650 peças em 73% das situações.

No Cenário 6, percebe-se que os trabalhadores alcançaram ou superaram a meta diária de 338 peças em apenas 27% dos casos. No que se refere a meta semanal, o cenário também não é favorável. Isso porque a meta de 1.690 peças por semana não foi atingida em nenhuma das circunstâncias.

No último cenário, a meta original sofreu um aumento de 10%. Dessa forma, a meta diária e a meta semanal passaram a ser, respectivamente, iguais a 354 e a 1770 peças. Nesses dois contextos, as metas estabelecidas não foram alcançadas.

Em suma, sobre os cenários de aumento da meta original, nota-se que os resultados não foram positivos. Por exemplo, a meta diária é alcançada ou ultrapassada com percentuais baixos nos cenários 05 e 06. No sétimo cenário, a meta diária não é alcançada. Logo, conclui-se que as

metas diárias determinadas nos cenários de aumento não são alcançadas na maior parte dos casos. Essa mesma conclusão pode ser aplicada para os resultados relacionados às metas semanais, pois o mesmo comportamento é percebido.

Sobre os cenários de diminuição, percebe-se que as metas diárias estabelecidas foram atingidas ou ultrapassadas na maior parte dos casos. No primeiro cenário, grande parte dos dados gerados pelo modelo MSH alcançaram ou superaram a meta de produção diária de 290 peças. A mesma situação de alcance ou superação da meta diária é vista nos cenários 01, 02 e 03. No que se refere às metas semanais, no primeiro cenário a meta de 1.450 peças foi totalmente alcançada ou superada. Já no segundo e no terceiro cenário, a maior parte dos resultados alcançou ou ultrapassou a meta de produção semanal.

De modo geral, conclui-se que, com o aumento progressivo da meta diária, os agentes do modelo MSH não conseguem alcançar as metas estabelecidas de maneira satisfatória. Percebe-se que, assim como os elementos humanos, os agentes possuem limitações. Desse modo, os mesmos não conseguem dobrar os seus ritmos de trabalho dentro da linha de manufatura.

#### **5.4. Considerações finais**

Neste capítulo, abordou-se as três fases do projeto de simulação. Na fase de concepção, o objetivo e o sistema foram definidos. Em seguida, a construção do modelo conceitual com o auxílio da técnica de modelagem IDEF-SIM e a validação desse modelo foram efetuadas. Na sequência, foram realizadas a elaboração do modelo de simulação baseada em agentes com base no Protocolo ODD e a documentação do modelo conceitual. Por fim, finalizando a fase de concepção, a modelagem dos dados de entrada foi feita.

As informações contidas na fase de concepção foram utilizadas na fase de implementação para construir os modelos computacionais MSED e MSH. Após a construção dos modelos computacionais, os processos de verificação e validação foram executados. Ambos os modelos foram validados através de procedimentos estatísticos.

Com os modelos validados, deu-se início à fase de análise. Aqui, o parâmetro “Meta\_Diaria” do modelo híbrido sofreu alterações com o intuito de avaliar o uso do modelo híbrido para a tomada de decisão em relação às metas de produção. Os resultados dessas alterações foram colhidos e analisados.

## 6. CONCLUSÕES

### 6.1. Conclusões e contribuições da pesquisa

A presente pesquisa de mestrado tratou de conceitos que se referem aos sistemas de manufatura, ao estudo do trabalho e à simulação. Para explorar esses conceitos, foi escolhida uma linha de montagem de placas de circuito impresso de uma organização do ramo de manufatura. O elevado grau de trabalho manual e a ocorrência de alterações em momentos distintos do tempo são características inerentes desse sistema de manufatura escolhido. Nesse contexto, foi possível combinar os conceitos que abrangem o estudo de tempos, a Simulação a Eventos Discretos e a Simulação Baseada em Agentes.

Na área de simulação, a modelagem do comportamento humano continua sendo um desafio por conta da elevada complexidade de se identificar e conceitualizar as estruturas comportamentais humanas. Ademais, existem diversos fatores que podem interferir na maneira como o ser humano atua dentro do seu ambiente de trabalho. Na tentativa de encarar esse desafio de modelar o fator humano, esta pesquisa combinou duas técnicas distintas de simulação e retratou o comportamento humano baseando-se em dois fatores que interferem no ritmo de trabalho humano.

Apesar da dificuldade em detectar e descrever as estruturas lógicas que regem o comportamento humano, a modelagem dos quatorze operadores inseridos na linha de manufatura em estudo aconteceu tendo como referência o Sistema Westinghouse para avaliação do ritmo de trabalho. Com base nesse conceito de avaliação de ritmo, a ideia de modelar o comportamento humano ganhou sustentação. Essa ideia gira em torno da alteração do ritmo de trabalho de cada trabalhador, considerando os valores dos fatores esforço e consistência de trabalho. O fator meta de trabalho foi adicionado ao processo de modelagem com a intenção de emular situações em que cada elemento humano pudesse modificar o seu ritmo de trabalho em função da meta estabelecida e da produção realizada durante uma quantidade de tempo determinada.

Para efetuar a modelagem do sistema de manufatura e dos componentes humanos inerentes a esse sistema, foi necessário adaptar duas técnicas distintas de modelagem para auxiliar na construção do modelo híbrido. Após essa adaptação, a abordagem proposta por Montevechi *et alia* (2010) foi essencial para conduzir o projeto de simulação planejado. Seguindo essa abordagem, a linha de manufatura foi modelada utilizando conceitos que se originam da

Simulação a Eventos Discretos. Por outro lado, a modelagem do elemento humano se deu com base nas premissas que derivam da Simulação Baseada em Agentes. Vale destacar que, durante o processo de modelagem, a técnica IDEF-SIM (LEAL, 2008) foi tão relevante quanto o método Protocolo ODD (GRIMM *et alia*, 2006).

Durante a construção do modelo computacional híbrido, percebeu-se que não seria possível construir o mesmo modelo utilizando apenas uma das duas técnicas de simulação. Em outras palavras, seria laborioso retratar o comportamento humano de quatorze operadores que decidem aumentar ou diminuir os seus ritmos de trabalho em função de uma meta estabelecida usando somente a Simulação a Eventos Discretos. Assim, os conceitos e técnicas da Simulação Baseada em Agentes foram essenciais para modelar o fator humano. Por outro lado, seria igualmente laborioso representar uma linha composta por dez processos sem a presença de conceitos e técnicas provenientes da Simulação a Eventos Discretos. Portanto, conclui-se que a combinação da Simulação a Eventos Discretos com a Simulação Baseada em Agentes concede ao pesquisador a oportunidade de modelar e simular um sistema real levando em consideração uma quantidade maior de informações desse mesmo sistema. Essa ideia vai ao encontro das afirmações feitas por Dubiel e Tsimhoni (2005).

Sobre a abordagem de Simulação Baseada em Agentes, Macal (2016) oferece quatro definições em ordem crescente de complexidade com base nas propriedades dos agentes. No modelo híbrido utilizado nesta dissertação, os quatorze agentes foram desenvolvidos de modo a agir autonomamente dentro do modelo conforme seus comportamentos internos. Cabe destacar que o diagrama de estado foi fundamental para descrever e retratar os comportamentos internos de cada agente. Os agentes do modelo contêm características reativas. Isso significa que esses agentes possuem a capacidade de perceber se estão produzindo dentro da meta estabelecida ou não. Logo, dependendo da situação, os agentes reagem aumentando ou diminuindo o ritmo de trabalho. Portanto, a definição que abrange o segundo nível de complexidade da Simulação Baseada em Agentes foi colocada em prática nessa pesquisa.

Baseando-se na característica reativa introduzida nos agentes do modelo híbrido, um experimento envolvendo a meta diária foi planejado. Nesse experimento, que altera as metas diárias, foi possível testar a reação dos agentes dentro do modelo híbrido em sete cenários diferentes. Os resultados coletados do experimento demonstram que os agentes são sensíveis às mudanças efetuada na meta de trabalho. Esse fato é demonstrado de maneira clara pelas

figuras 5.15 e 5.16. Assim sendo, conclui-se que o modelo híbrido pode ser usado para auxiliar a tomada de decisão com relação às metas de produção.

Com o intuito de trazer contribuições para a análise da representação do fator humano, dois modelos de simulação foram construídos. O primeiro recebeu o nome de MSED. Esse modelo retrata a linha de manufatura, sem considerar o fator humano, através da Simulação a Eventos Discretos. O nome dado ao segundo foi MSH. O modelo MSH é o modelo híbrido. Com a aplicação do processo de validação para os dois modelos computacionais, ficou claro que o modelo híbrido está mais próximo da realidade, por conta das características humanas adicionadas. Outra razão que sustenta esse argumento está na comparação estatística realizada entre a variância da amostra dos Dados Reais e a variância da amostra dos dados do modelo MSH. Essa comparação indicou que as variâncias entre as amostras não são estatisticamente diferentes. Isso se deve ao fato de que o valor de *p-value* do Teste de Hipótese *2-Sample Variance* foi superior ao menor nível de significância adotado.

Não obstante a conclusão efetuada no último parágrafo, é importante salientar que outros testes e experimentos estatísticos devem ser realizados sobre diferentes modelos de simulação para reforçar a tese de que um modelo híbrido representa melhor a realidade do que um modelo que utiliza apenas uma técnica de simulação.

Concluindo, essa pesquisa traz contribuições relevantes para a área de simulação e de sistemas de produção, porque os principais elementos do sistema de manufatura em estudo foram capturados, modelados e simulados. Além disso, houve a representação do elemento humano através da simulação híbrida. Portanto, esta pesquisa mostrou que é possível superar o desafio de retratar o fator humano no contexto fabril utilizando a simulação híbrida como ferramenta. Por fim, esta dissertação também traz contribuições para a área de tomada de decisão, pois foi capaz de fornecer um modelo híbrido e validado que pode ser aplicado no contexto de manufatura de forma a auxiliar a tomada de decisão com relação a meta de produção.

## **6.2. Sugestões para trabalhos futuros**

Para trabalhos futuros, os pesquisadores podem explorar o uso da simulação híbrida em outros segmentos da área de manufatura como, por exemplo, sistemas de movimentação, sistemas de armazenagem, células automatizadas, programação da produção, análise de estoques e análise de *kanban*. A simulação híbrida também pode ser aplicada em outros setores da economia, como o setor primário, que abrange as atividades de agricultura, pecuária, mineração,

extrativismo vegetal, pesca e caça; e o setor terciário, que envolve atividades na área de saúde, comércio, educação, turismo, serviços bancários e administrativos, telecomunicações, serviços de limpeza, serviços de informática e outros.

Outra sugestão para trabalhos futuros seria o aprofundamento sobre questões que envolvem o comportamento humano no ambiente fabril. Nesse caso, trabalhos poderiam ser desenvolvidos focando nos principais fatores que podem influenciar o desempenho do trabalho humano. Uma vez identificado os principais fatores, o pesquisador pode, por exemplo, considerar um ou mais desses fatores durante o processo de modelagem e simulação de um sistema real.

Uma outra ideia seria comparar um modelo puro com um modelo híbrido para analisar qual deles representa melhor a realidade. Para fazer esse tipo de análise, o pesquisador deverá efetuar diversos testes e procedimentos estatísticos para rejeitar ou não a hipótese de que um modelo híbrido pode representar melhor um sistema real.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALTAMURO, V. M. Methods Engineering. In: AVALLONE, E. A.; BAUMEISTER III, T. (Ed). **Marks' Standard Handbook for Mechanical Engineers**. 10. ed. New York: McGraw-Hill, 1996. Cap.17.4, pp.25-32.
- AN, L. Modeling human decisions in coupled human and natural systems: Review of agent-based models. **Ecological Modelling**, v.229, pp.25-36, 2012.
- AUCHINCLOSS, A. H.; ROUX, A. V. D. A New Tool for Epidemiology: The Usefulness of Dynamic-Agent Models in Understanding Place Effects on Health. **American Journal of Epidemiology**, v.168, n.1, pp.1-8, 2008.
- 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, pp. 2321-2334, 2002.
- BAINES, T.; MASON, S.; SIEBERS, P. O.; LADBROOK, J. Humans: the missing link in manufacturing simulation? **Simulation Modelling Practice and Theory**, v.12, pp.515-526, 2004.
- BAINES, T. S.; ASCH, R.; HADFIELD, L.; MASON, J. P.; FLETCHER, S.; KAY, J. M. Towards a theoretical framework for human performance modeling within manufacturing systems design. **Simulation Modelling Practice and Theory**, n.13, pp.486-504, 2005.
- BALCI, O. A life cycle for modeling and simulation. **Simulation: Transactions of the Society for Modeling and Simulation International**, v.88, n.7, pp.870-883, 2012.
- BANKS, J.; CARSON II, J. S.; NELSON, B. L.; NICOL, D. M. **Discrete-event Simulation**. 4. ed. New Jersey: Prentice-Hall, 2005.
- BARNES, R. M. **Estudos de movimentos e de tempos: projetos e medidas do trabalho**. 6. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1977.
- BAUER, B.; MÜLLER, J. P.; ODELL, J. AGENT UML: A Formalism for Specifying Multiagent Software Systems. **International Journal of Software Engineering and Knowledge Engineering**, v.11, n.3, pp.207-230, 2001.
- BEDAU, M. A. Artificial life: organization, adaptation and complexity from the bottom up. **TRENDS in Cognitive Sciences**, v.7, n.11, pp.505-512, 2003.
- BERNHARDT, K. L. S. Agent-Based Modeling in Transportation. In: Transportation Research Circular E-C113: **Artificial Intelligence in Transportation**, pp.72-80, 2007.
- BERTRAND, J. W.; FRANSOO, J. C. Modelling and Simulation: operations management research methodologies using quantitative modeling. **International Journal of Operations & Production Management**, v.22, n.2, pp.241-264, 2002.
- BHATTACHERJEE, A. **Social Science Research: principles, methods, and practices**. 2. ed. Tampa: CreateSpace Independent Publishing Platform, 2012.
- BLACK, J. T. **O projeto da fábrica com futuro**. Porto Alegre: Bookman, 1998.
- BONABEAU, E. Agent-based modeling: methods and techniques for simulating human systems. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v.99, suppl.3, pp.7280-7287, 2002.

- BOOKSTABER, R. **Using Agent-Based Models for Analyzing Threats to Financial Stability** (2012). Disponível em: <<https://financialresearch.gov/working-papers/>>. Acesso em: ago. 2016.
- BRAILSFORD, S.; SCHMIDT, B. Towards incorporating human behaviour in models of health care systems: An approach using discrete event simulation. **European Journal of Operational Research**, v.150, pp.19-31, 2003.
- BRAILSFORD, S. C.; HARPER, P. R.; SYKES, J. Incorporating human behaviour in simulation models of screening for breast cancer. **European Journal of Operational Research**, v.219, pp.491-507, 2012.
- BRAILSFORD, S. C. Modeling Human Behavior - an (id)entity crisis? In: Winter Simulation Conference, **Proceedings...** Savannah, GA, USA, 2014.
- BRUZZONE, A. G.; BRIANO, E.; BOCCA, E.; MASSEI, M. Evaluation of the impact of different human factor models on industrial and business processes. **Simulation Modelling Practice and Theory**, v.15, pp.199-218, 2007.
- CEGIELSKI, W. H.; ROGERS, J. D. Rethinking the role of Agent-Based Modeling in archaeology. **Journal of Anthropological Archaeology**, v.41, pp.283-298, 2016.
- CHEN, X.; ONG, Y.; TAN, P.; ZHANG, N.; LI, Z. Agent-Based Modeling and Simulation for Supply Chain Risk Management – A Survey of the State-of-the-Art. In: IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, **Proceedings...** Manchester, United Kingdom, 2013.
- CHWIF, L.; MEDINA, A. C. **Modelagem e Simulação de eventos discretos: teoria & aplicações**. 4. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 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, pp.685-703, 2011.
- CROOKS, A.; CASTLE, C.; BATTY, M. Key challenges in agent-based modelling for geo-spatial simulation. **Computers, Environment and Urban Systems**, v.32, pp.417-430, 2008.
- CROOKS, A. T.; HEPPENSTALL, A. J. Introduction to Agent-Based Modelling. In: HEPPENSTALL, A. J.; CROOKS, A. T.; SEE, L. M.; BATTY, M (Ed). **Agent-Based Models of Geographical Systems**. Dordrecht: Springer, 2012. Cap.5, pp.85-105.
- DIGIESI, S.; KOCK, A. A. A.; MUMMOLO, G.; ROODA, J. E. The effect of dynamic worker behavior on flow line performance. **International Journal of Production Economics**, v.120, pp.368-377, 2009.
- DUBIEL, B.; TSIMHONI, O. Integrating Agent Based Modeling into a Discrete Event Simulation. In: Winter Simulation Conference, **Proceedings...** Orlando, FL, USA, 2005.
- EFTHYMIU, K.; PAGOROPOULOS, A.; PAPAKOSTAS, N.; MOURTZIS, D.; CHRYSOLOURIS, G. Manufacturing systems complexity: An assessment of manufacturing performance indicators unpredictability. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, v.7, pp.324-334, 2014.
- ELKOSANTINI, S. Toward a new generic behavior model for human centered system simulation. **Simulation Modelling Practice and Theory**, v.52, pp.108-122, 2015.
- EPSTEIN, J. M. Modelling to contain pandemics. **Nature**, v.460, pp.687, 2009.

- FAKHIMI, M.; ANAGNOSTOU, A.; STERGIIOULAS, L.; TAYLOR, S. J. E. A Hybrid Agent-Based and Discrete Event Simulation Approach for Sustainable Strategic Planning and Simulation Analytics. In: Winter Simulation Conference, **Proceedings...** Savannah, GA, USA, 2014.
- FARMER, J. D.; FOLEY, D. The economy needs agent-based modeling. **Nature**, v.460, pp.685-686, 2009.
- FIGUEIREDO, C. **Novo Dicionário da Língua Portuguesa** (1913). Project Gutenberg Ebook, 2010. Disponível em: <<http://www.gutenberg.org/files/31552/31552-pdf.pdf>>. Acesso em: mar. 2016.
- FIORETTI, G. Agent-Based Simulation Models in Organization Science. **Organizational Research Methods**, v.16, n.2, pp.227-242, 2012.
- FOWLER, J. W.; ROSE, O. Grand Challenges in Modeling and Simulation of Complex Manufacturing Systems. **Simulation**, v.80, pp.469-476, 2004.
- GIANNASI, F.; LOVETT, P.; GODWIN, A. N. Enhancing confidence in discrete event simulations. **Computers in Industry**, v.44, pp.141-157, 2001.
- GOLDSMAN, D.; NANCE, R. E.; WILSON, J. R. A brief history of simulation revisited. In: Winter Simulation Conference, **Proceedings...** Baltimore, MD, USA, 2010.
- GRIMM, V.; BERGER, U.; BASTIANSEN, F.; ELIASSEN, S.; GINOT, V.; GISKE, J.; GOSS-CUSTARD, J.; GRAND, T.; HEINZ, S. K.; HUSE, G.; HUTH, A.; JEPSEN, J. U.; JØRGENSEN, C.; MOOIJ, W. M.; MÜLLER, B.; PE'ER, G.; PIOUS, C.; RAILSBACK, S. F.; ROBBINS, A. M.; ROBBINS, M. M.; ROSSMANITH, E.; RÜGER, N.; STRAND, E.; SOUISSI, M.; STILLMAN, R. A.; VABØ, R.; VISSER, U.; DEANGELIS, D. L. A standard protocol for describing individual-based and agent-based models. **Ecological Modelling**, v.198, pp.115-126, 2006.
- GRIMM, V.; BERGER, U.; DEANGELIS, D. L.; POLHILL, J. G.; GISKE, J.; RAILSBACK, S. F. The ODD protocol: A review and first update. **Ecological Modelling**, v.221, pp.2760-2768, 2010.
- GROOVER, M. P. **Automation, Production Systems, and Computer-Integrated Manufacturing**. 3. ed. Upper Saddle River: Prentice-Hall, 2008.
- HAMILL, L.; GILBERT, N. **Agent-Based Modelling in Economics**. 1. ed. New York: John Wiley & Sons, 2016.
- HARRISON, J. R.; LIN, Z.; CARROLL, G. R.; CARLEY, K. M. Simulation modeling in organizational and management research. **Academy of Management Review**, v.32, n.4, pp.1229-1245, 2007.
- HEPPENSTALL, A. J.; CROOKS, A. T.; SEE, L. M.; BATTY, M. **Agent-Based Models of Geographical Systems**. Dordrecht: Springer, 2012.
- HUNT, C. A.; KENNEDY, R. C.; KIM, S. H. J.; ROPELLA, G. E. P. Agent-based modeling: A systematic assessment of use cases and requirements for enhancing pharmaceutical research and development productivity. **WIREs Systems Biology and Medicine**, v.5, n.4, pp.461-480, 2013.
- INGALLS, R. G. Introduction to simulation. In: Winter Simulation Conference, **Proceedings...** Miami, FL, USA, 2008.
- INTERNATIONAL LABOUR OFFICE. **Introduction to Work Study**. 2. ed. Geneva: ILO, 1969.

- KASAIE, P.; KELTON, W. D. Guidelines for Design and Analysis in Agent-Based Simulation Studies. In: Winter Simulation Conference, **Proceedings...** Huntington Beach, CA, USA, 2015.
- KRAJEWSKI, L.; RITZMAN, L.; MALHOTRA, M. **Administração de Produção e Operações**. 8. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009.
- LAKE, M. W. Trends in Archaeological Simulation. **Journal of Archaeological Method and Theory**, v.21, n.2, pp.258-287, 2014.
- LAW, A. M. Simulation of manufacturing systems. In: Winter Simulation Conference, **Proceedings...** San Diego, CA, USA, 1988.
- LAW, A. M.; KELTON, W. D. **Simulation Modelling and Analysis**. 2. ed. New York: McGraw-Hill, 1991.
- LAW, A. M. How to build valid and credible simulation models. In: Winter Simulation Conference, **Proceedings...** Orlando, FL, USA, 2005.
- LAW, A. M. **Simulation Modeling & Analysis**. 4. ed. New York: McGraw-Hill, 2007.
- LAW, A. M. How to build valid and credible simulation models. In: Winter Simulation Conference, **Proceedings...** Austin, TX, USA, 2009.
- LEAL, F.; ALMEIDA, D. A.; MONTEVECHI, J. A. B. Uma proposta de técnica de modelagem conceitual para a simulação através de elementos do IDEF. In: XL Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, **Anais...** João Pessoa, PB, BR, 2008.
- LEAL, F. **Análise do efeito interativo de falhas em processos de manufatura através de projeto de experimentos simulados**. 2008. 237 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, SP, 2008.
- LEBARON, B. **Agent-based Computational Finance** (2005). Disponível em: <<http://www.datascienceassn.org/sites/default/files/Agent-based%20Computational%20Finance.pdf>>. Acesso em: jul. 2016.
- LEITÃO, P. Agent-based distributed manufacturing control: A state-of-the-art survey. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, v.22, pp.979-991, 2009.
- LITTLE, J. D. C. Models and Managers: The concept of a decision calculus. **Management Science**, v.16, n.8, pp.B-466-B-485, 1970.
- LOCKE, E. A.; LATHAM, G. P. Goal Setting Theory, 1990. In: LOCKE, E. A.; LATHAM, G. P. (Ed). **New Developments in Goal Setting and Task Performance**. 1. ed. New York: Routledge part of the Taylor and Francis Group, 2013. Cap.1, pp.3-15.
- LUKE, D. A.; STAMATAKIS, K. A. Systems Science Methods in Public Health: Dynamics, Networks, and Agents. **Annual Review of Public Health**, v.33, pp.357-376, 2012.
- MACAL, C. M.; NORTH, M. J. Tutorial on Agent-Based Modeling and Simulation. In: Winter Simulation Conference, **Proceedings...** Orlando, FL, USA, 2005.
- MACAL, C. M.; NORTH, M. J. Agent-Based Modeling and Simulation. In: Winter Simulation Conference, **Proceedings...** Austin, TX, USA, 2009.
- MACAL, C. M.; NORTH, M. J.; SAMUELSON, D. A. Elements of Agent-Based Simulation. In: GASS, S. I.; FU, M. C. (Ed). **Encyclopedia of Operations Research and Management Science**. 3. ed. New York: Springer, 2013. Cap. Agent-Based Simulation, pp.8-16.

- MACAL, C. M.; NORTH, M. J. Introductory Tutorial: Agent-Based Modeling and Simulation. In: Winter Simulation Conference, **Proceedings...** Washington, D. C., USA, 2013.
- MACAL, C.; NORTH, M. Introductory Tutorial: Agent-Based Modeling and Simulation. In: Winter Simulation Conference, **Proceedings...** Savannah, GA, USA, 2014.
- MACAL, C. M. Everything you need to know about agent-based modelling and simulation. **Journal of Simulation**, v.10, n.02, pp.144-156, 2016.
- MAGLIO, P. P.; SEPULVEDA, M. J.; MABRY, P. L. Mainstreaming Modeling and Simulation to Accelerate Public Health Innovation. **American Journal of Public Health**, v.104, n.7, pp.1181-1186, 2014.
- MARTINS, R. A. Abordagens Quantitativa e Qualitativa. In: MIGUEL, P. A. C. (Org). **Metodologia de Pesquisa em Engenharia de Produção e Gestão de Operações**. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012. Cap.3, pp.47-63.
- MONOSTORI, L.; VÁNCZA, J.; KUMARA, S. R. T. Agent-Based Systems for Manufacturing. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v.55, n.2, pp. 697-720.
- MONTEVECHI, J. A. B.; LEAL, F.; PINHO, A. F.; COSTA, R. F. S.; OLIVEIRA, M. L. M.; SILVA, A. L. F. Conceptual modeling in simulation projects by mean adapted IDEF: an application in a Brazilian tech company. In: Winter Simulation Conference, **Proceedings...** Baltimore, MD, USA, 2010.
- MORABITO NETO, R.; PUREZA, V. Abordagens Quantitativa e Qualitativa. In: MIGUEL, P. A. C. (Org). **Metodologia de Pesquisa em Engenharia de Produção e Gestão de Operações**. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012. Cap.8, pp.169-198.
- MOREIRA, D. A. **Administração da Produção e Operações**. 2. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2008.
- MORTAZAVI, A.; KHAMSEH, A. A.; AZIMI, P. Designing of an intelligent self-adaptive model for supply chain ordering management system. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, v.37, pp.207-220, 2015.
- MUNDEL, M. E. Motion and Time Study. In: IRESON, W. G.; GRANT, E. L. (Ed). **Handbook of Industrial Engineering and Management**. 1. ed. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1955. Cap.5, pp.283-391.
- NANCE, R. E.; SARGENT, R. G. Perspectives on the evolution of simulation. **Operations Research**, v.50, n.1, pp.161-172, 2002.
- NEGAHBAN, A.; SMITH, J. S. Simulation for manufacturing system design and operation: literature review and analysis. **Journal of Manufacturing Systems**, v.33, pp.241-261, 2014.
- NICHOLLS, S.; AMELUNG, B.; STUDENT, J. Agent-Based Modeling: A Powerful Tool for Tourism Researchers. **Journal of Travel Research**, pp.1-13, 2016.
- OLIVEIRA, D. P. R. **Sistemas de informações gerenciais: estratégicas, táticas, operacionais**. 12. ed. São Paulo: Atlas, 2008.
- PARKER, D. C.; MANSON, S. M.; JANSSEN, M. A.; HOFFMANN, M. J.; DEADMAN, P. Multi-Agent Systems for the Simulation of Land-Use and Land-Cover Change: A Review. **Annals of the Association of American Geographers**, v.93, n.2, pp.314-337, 2003.

- PEREIRA, T. F. **Gestão do conhecimento em projetos de simulação a eventos discretos**. 2014. 125 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG, 2014.
- POLI, C. **Design for Manufacturing: a structured approach**. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2001.
- PRODANOV, C. C.; FREITAS, E. C. **Metodologia do trabalho científico: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico**. 2 ed. Novo Hamburgo: Feevale, 2013.
- RAILSBACK, S. F.; GRIMM, V. **Agent-Based and Individual-Based Modeling: A Practical Introduction**. New Jersey: Princeton University Press, 2012.
- RAND, W.; RUST, R. T. Agent-based modeling in marketing: Guidelines for rigor. **International Journal of Research in Marketing**, v.28, pp.181-193, 2011.
- RAUNAK, M.; OLSEN, M. Quantifying Validation of Discrete Event Simulation Models. In: Winter Simulation Conference, **Proceedings...** Savannah, GA, USA, 2014.
- ROBINSON, S. Conceptual modeling for simulation. In: Winter Simulation Conference, **Proceedings...** Washington, DC, USA, 2013.
- SANKARANARAYANAN, K. **Study on Behavioral Patterns in Queuing: Agent Based Modeling and Experimental Approach**. 2011. 117 p. Thesis (Doctor of Philosophy) - Università della Svizzera Italiana, Lugano, 2011.
- SARGENT, R. G. Verification and validation of simulation models. **Journal of Simulation**, v.7, n.1, pp.12-24, 2013.
- SARGENT, R. G. Verifying and Validating Simulation Models. In: Winter Simulation Conference, **Proceedings...** Savannah, GA, USA, 2014.
- SCALLAN, P. **Process Planning: The Design/Manufacture Interface**. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2003.
- SCHÖNEMANN, M.; HERRMANN, C.; GRESCHKE, P.; THIEDE, S. Simulation of matrix-structure manufacturing systems. **Journal of Manufacturing Systems**, v.37, pp.104-112, 2015.
- SHANNON, R. E. **Systems Simulation: the art and science**. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1975.
- SHANNON, R. E. Simulation: an overview. In: Winter Simulation Conference, **Proceedings...** Arlington, VA, USA, 1983.
- SHEN, W.; NORRIE, D. H. Agent-Based Systems for Intelligent Manufacturing: A State-of-the-Art Survey. **Knowledge and Information Systems**, v.1, n.2, pp.129-156, 1999.
- SIEBERS, P. O.; MACAL, C. M.; GARNETT, J.; BUXTON, D.; PIDD, M. Discrete-event simulation is dead, long live agent-based simulation! **Journal of Simulation**, v.4, n.3, pp.204-210, 2010.
- SLACK, N.; CHAMBERS, S.; JOHNSTON, R. **Administração da Produção**. 3. ed. São Paulo: Atlas, 2009.
- SLACK, N.; CHAMBERS, S.; JOHNSTON, R. **Operations Management**. 6. ed. Harlow: Pearson, 2010.

- SMITH, E. R.; CONREY, F. R. Agent-Based Modeling: A New Approach for Theory Building in Social Psychology. **Personality and Social Psychology Review**, v.11, n.1, pp.87-104, 2007.
- STURROCK, D. T. Tutorial: Tips for Successful Practice of Simulation. In: Winter Simulation Conference, **Proceedings...** Savannah, GA, USA, 2014.
- SWAMINATHAN, J. M.; SMITH, S. F.; SADEH, N. M. Modeling Supply Chain Dynamics: A Multiagent Approach. **Decision Sciences**, v.29, n.3, pp.607-632, 1998.
- TESFATSION, L.; JUDD, K. L. **Handbook of Computational Economics, Volume II: Agent-Based Computational Economics**. Amsterdam: Elsevier/North-Holland, 2006.
- VIANA, J.; BRAILSFORD, S. C.; HARINDRA, V.; HARPER, P. R. Combining discrete-event simulation and system dynamics in a healthcare setting: A composite model for Chlamydia infection. **European Journal of Operational Research**, v.237, pp.196-206, 2014.
- VILELA, F. F. **Modelagem do ritmo do trabalho humano em um projeto de simulação através da criação de cenários com múltiplas distribuições**. 2015. 83 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG, 2015.
- WALLIMAN, N. **Research Methods: the basics**. New York: Routledge, 2011.
- WURZER, G.; KOWARIK, K.; RESCHREITER, H. **Agent-Based Modeling and Simulation in Archaeology**. New York: Springer, 2015.
- YODER, D. Manpower Management and Employment Relations. In: IRESON, W. G.; GRANT, E. L. (Ed). **Handbook of Industrial Engineering and Management**. 1. ed. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1955. Cap.4, pp.173-281.
- ZELLNER, M. L. Embracing Complexity and Uncertainty: The Potential of Agent-Based Modeling for Environmental Planning and Policy. **Planning Theory & Practice**, v.9, n.4, pp.437-457, 2008.

## ANEXO A - Resultados produzidos pelo modelo MSH

CENÁRIO 1 – DIMINUIÇÃO DA META EM 10,0 %						
REPLICAÇÕES	SEGUNDA	TERÇA	QUARTA	QUINTA	SEXTA	TOTAL
1	288	293	294	296	292	1463
2	293	295	295	288	290	1461
3	291	290	296	298	294	1469
4	290	301	297	295	296	1479
5	294	293	295	296	295	1473
6	297	296	294	289	293	1469
7	297	297	292	294	291	1471
8	291	289	292	294	294	1460
9	296	294	289	297	295	1471
10	300	297	295	291	297	1480
11	290	298	294	299	298	1479
12	293	292	294	290	293	1462
13	287	292	297	293	297	1466
14	288	296	291	295	291	1461
15	294	290	297	291	297	1469
16	297	294	290	294	296	1471
17	293	294	296	291	294	1468
18	295	291	294	296	291	1467
19	292	291	290	292	295	1460
20	296	292	294	298	294	1474
21	292	290	300	295	292	1469
22	289	293	292	294	291	1459
23	289	298	292	294	296	1469
24	290	297	289	291	292	1459
25	293	293	291	295	299	1471
26	291	296	296	289	290	1462
27	296	296	288	292	289	1461
28	291	287	291	296	293	1458
29	293	292	293	298	292	1468
30	295	288	295	295	294	1467

<b>CENÁRIO 2 – DIMINUIÇÃO DA META EM 5,0 %</b>						
<b>REPLICAÇÕES</b>	<b>SEGUNDA</b>	<b>TERÇA</b>	<b>QUARTA</b>	<b>QUINTA</b>	<b>SEXTA</b>	<b>TOTAL</b>
1	306	310	313	307	308	1544
2	304	302	305	308	306	1525
3	308	304	307	310	304	1533
4	308	305	306	305	305	1529
5	306	308	307	311	303	1535
6	308	309	311	308	304	1540
7	308	303	309	306	305	1531
8	302	310	305	307	306	1530
9	309	307	308	313	309	1546
10	309	311	307	304	308	1539
11	306	311	307	308	308	1540
12	303	306	306	310	310	1535
13	307	310	307	304	303	1531
14	303	311	307	309	308	1538
15	305	306	304	308	314	1537
16	310	309	311	309	306	1545
17	309	308	312	310	310	1549
18	303	310	310	310	309	1542
19	313	310	301	304	305	1533
20	304	303	313	307	305	1532
21	305	311	306	304	311	1537
22	312	303	308	304	305	1532
23	306	311	301	308	310	1536
24	305	308	304	307	307	1531
25	309	307	311	310	306	1543
26	308	305	306	303	307	1529
27	312	302	310	309	306	1539
28	310	307	310	309	310	1546
29	306	308	305	311	311	1541
30	306	304	306	306	304	1526

<b>CENÁRIO 3 – DIMINUIÇÃO DA META EM 2,5 %</b>						
<b>REPLICAÇÕES</b>	<b>SEGUNDA</b>	<b>TERÇA</b>	<b>QUARTA</b>	<b>QUINTA</b>	<b>SEXTA</b>	<b>TOTAL</b>
1	310	319	317	310	311	1567
2	317	312	312	316	317	1574
3	315	312	313	315	314	1569
4	320	311	315	314	312	1572
5	314	315	309	313	320	1571
6	317	315	308	314	313	1567
7	318	318	311	315	315	1577
8	308	312	315	312	316	1563
9	317	317	319	317	312	1582
10	312	311	317	312	313	1565
11	318	315	313	317	311	1574
12	314	316	317	313	311	1571
13	311	319	316	314	316	1576
14	312	313	317	316	315	1573
15	312	314	313	318	318	1575
16	315	312	314	318	315	1574
17	315	318	309	314	320	1576
18	316	315	312	312	317	1572
19	314	314	312	310	313	1563
20	314	317	318	310	315	1574
21	312	315	320	315	312	1574
22	311	321	316	316	316	1580
23	312	318	318	317	317	1582
24	314	310	311	314	317	1566
25	311	314	314	318	312	1569
26	315	309	315	311	311	1561
27	315	318	316	312	319	1580
28	313	316	316	312	312	1569
29	315	317	316	318	317	1583
30	319	310	314	311	308	1562

<b>CENÁRIO 4 – VALOR DA META ORIGINAL</b>						
<b>REPLICAÇÕES</b>	<b>SEGUNDA</b>	<b>TERÇA</b>	<b>QUARTA</b>	<b>QUINTA</b>	<b>SEXTA</b>	<b>TOTAL</b>
1	323	323	325	321	322	1614
2	324	317	314	318	322	1595
3	320	324	320	326	320	1610
4	318	322	322	321	324	1607
5	328	325	322	327	319	1621
6	320	317	323	320	319	1599
7	326	320	319	322	325	1612
8	323	324	325	322	323	1617
9	325	319	319	320	319	1602
10	323	326	322	319	320	1610
11	321	323	324	326	325	1619
12	327	317	319	324	320	1607
13	328	322	323	327	325	1625
14	320	323	325	322	324	1614
15	321	326	324	327	321	1619
16	325	324	321	320	317	1607
17	322	325	319	318	319	1603
18	321	325	327	324	326	1623
19	326	328	324	323	321	1622
20	324	323	324	324	324	1619
21	316	327	321	321	325	1610
22	327	327	323	318	319	1614
23	326	315	323	321	320	1605
24	320	325	325	323	324	1617
25	321	317	325	321	316	1600
26	325	324	319	321	323	1612
27	319	319	320	319	321	1598
28	322	318	320	318	325	1603
29	324	323	324	321	319	1611
30	315	320	325	320	326	1606

<b>CENÁRIO 5 – AUMENTO DA META EM 2,5 %</b>						
<b>REPLICAÇÕES</b>	<b>SEGUNDA</b>	<b>TERÇA</b>	<b>QUARTA</b>	<b>QUINTA</b>	<b>SEXTA</b>	<b>TOTAL</b>
1	330	332	329	328	326	1645
2	333	322	331	331	330	1647
3	327	325	330	324	328	1634
4	330	331	328	327	333	1649
5	324	333	332	330	333	1652
6	330	329	330	330	333	1652
7	328	330	328	326	329	1641
8	328	331	331	328	327	1645
9	330	334	330	325	332	1651
10	324	331	324	330	333	1642
11	330	325	326	333	333	1647
12	332	332	331	327	332	1654
13	327	328	333	333	333	1654
14	328	330	333	322	329	1642
15	332	327	332	323	331	1645
16	329	333	324	332	326	1644
17	324	333	326	329	330	1642
18	329	324	332	329	331	1645
19	329	333	325	324	331	1642
20	329	332	330	331	329	1651
21	323	328	325	328	331	1635
22	326	324	333	330	325	1638
23	330	323	324	324	334	1635
24	329	331	331	327	323	1641
25	331	329	328	328	326	1642
26	325	328	331	332	331	1647
27	333	325	332	332	322	1644
28	328	326	327	331	329	1641
29	334	334	334	328	328	1658
30	329	329	335	327	330	1650

<b>CENÁRIO 6 – AUMENTO DA META EM 5,0 %</b>						
<b>REPLICAÇÕES</b>	<b>SEGUNDA</b>	<b>TERÇA</b>	<b>QUARTA</b>	<b>QUINTA</b>	<b>SEXTA</b>	<b>TOTAL</b>
1	333	333	336	336	336	1674
2	332	338	336	338	332	1676
3	336	332	339	336	340	1683
4	333	335	339	336	333	1676
5	334	337	335	339	336	1681
6	332	330	338	336	335	1671
7	337	341	331	339	333	1681
8	334	335	332	332	339	1672
9	331	334	336	336	338	1675
10	334	337	334	329	342	1676
11	337	331	333	339	337	1677
12	333	336	343	335	338	1685
13	337	332	331	334	338	1672
14	332	338	335	337	337	1679
15	332	333	339	331	335	1670
16	341	339	330	333	340	1683
17	340	331	331	333	336	1671
18	333	334	336	333	341	1677
19	340	331	329	334	333	1667
20	336	338	339	336	339	1688
21	340	339	332	333	341	1685
22	336	335	336	333	337	1677
23	334	335	341	341	336	1687
24	332	331	338	335	330	1666
25	331	330	338	335	329	1663
26	334	340	340	337	333	1684
27	336	337	341	333	333	1680
28	337	337	332	339	338	1683
29	339	332	335	338	332	1676
30	335	330	334	334	332	1665

<b>CENÁRIO 7 – AUMENTO DA META EM 10,0 %</b>						
<b>REPLICAÇÕES</b>	<b>SEGUNDA</b>	<b>TERÇA</b>	<b>QUARTA</b>	<b>QUINTA</b>	<b>SEXTA</b>	<b>TOTAL</b>
1	345	339	342	337	343	1706
2	345	340	345	342	342	1714
3	342	337	351	345	346	1721
4	346	343	342	341	340	1712
5	348	348	345	344	342	1727
6	338	341	338	339	345	1701
7	340	345	342	336	345	1708
8	342	340	336	347	348	1713
9	344	342	338	339	340	1703
10	347	344	341	341	339	1712
11	344	340	332	341	341	1698
12	345	341	345	343	347	1721
13	344	340	345	341	345	1715
14	342	344	344	342	341	1713
15	339	346	346	340	341	1712
16	341	346	337	343	344	1711
17	336	346	345	341	345	1713
18	344	346	333	341	345	1709
19	341	343	339	336	349	1708
20	346	347	345	340	344	1722
21	353	342	339	339	346	1719
22	342	346	344	341	346	1719
23	339	339	336	340	347	1701
24	339	346	342	340	344	1711
25	339	343	336	345	342	1705
26	340	340	346	340	339	1705
27	345	343	342	337	342	1709
28	341	342	343	337	345	1708
29	347	342	345	344	341	1719
30	341	338	343	339	344	1705