



**SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA**



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

**MODELO DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL PARA BALANCEAMENTO  
DE LINHAS DE PRODUÇÃO DAS EMPRESAS CERÂMICAS DE SÃO  
MIGUEL DO GUAMÁ: UM ESTUDO DE CASO.**

**DENILSON COSTA DA SILVA**

**Belém - Pará**

**2013**

**DENILSON COSTA DA SILVA**

**MODELO DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL PARA BALANCEAMENTO  
DE LINHAS DE PRODUÇÃO DAS EMPRESAS CERÂMICAS DE SÃO  
MIGUEL DO GUAMÁ: UM ESTUDO DE CASO.**

Dissertação submetida a banca examinadora e aprovada pelo colegiado do Curso de Mestrado em Engenharia Civil do Instituto de Tecnologia da Universidade Federal do Pará, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na Área Estruturas e Construção Civil.

Orientação: Prof. DSc. Jorge de Araújo Ichihara.

**Belém - Pará**

**2013**

---

SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL



---

**MODELO DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL PARA  
BALANCEAMENTO DE LINHAS DE PRODUÇÃO DAS EMPRESAS  
CERÂMICAS DE SÃO MIGUEL DO GUAMÁ: UM ESTUDO DE CASO.**

AUTOR:

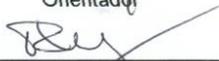
**DENILSON COSTA DA SILVA**

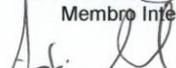
DISSERTAÇÃO SUBMETIDA A BANCA EXAMINADORA  
APROVADA PELO COLEGIADO DO CURSO DE  
MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL DO INSTITUTO  
DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ,  
COMO REQUISITO PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE  
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL NA ÁREA DE  
ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL.

APROVADA EM: 16 / 10 / 2013

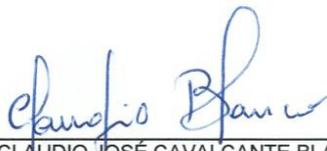
BANCA EXAMINADORA:

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. JORGE DE ARAUJO ICHIHARA  
Orientador

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. RENATO MARTINS DAS NEVES  
Membro Interno

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. ANDRÉ CRISTIANO SILVA MELO  
Membro Externo

Visto:

  
\_\_\_\_\_  
Prof. CLAUDIO JOSÉ CAVALCANTE BLANCO, Ph.D  
Coordenador do PPGEC / ITEC / UFPA

---

**Dedico este trabalho a minha valiosa Família:**

*“A minha Mãe **Julia Maria**, pelo imenso amor, pelos valores transmitidos, pela compreensão constante, por todo apoio, confiança e dedicação. Independente do grau que eu atingir, serás sempre minha Professora.”*

*“Ao meu Pai **José Apolônio**, por ajudar a fortalecer cada vez mais os laços de amizade pai-filho. Apesar da pouca convivência, sempre fostes um torcedor com relação aos meus projetos de vida.”*

*“Ao meu Irmão, **Denys Silva**, por ser um grande e fiel amigo, pelas incontáveis ajudas, por compartilhar os bons momentos de risadas e também por ser uma base forte nos momentos de angústia.”*

*Amo vocês!*

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por ser meu guia, por me fornecer força de vontade, por ser minha luz nos momentos de angústias e incertezas e por toda proteção.

Ao prof. Jorge de Araújo Ichihara, por sua orientação segura e comprometida, pelos conselhos, pela cobrança devida e por permitir a minha entrada no universo da modelagem e simulação de sistemas.

A CAPES pela bolsa concedida e ao CNPq pelos recursos necessários para viabilização deste projeto.

Aos professores do PPGEC, Renato Martins, Adalberto Lima e André Cruz pelo auxílio na minha formação de Mestre.

Ao Sr. Raimundo Barbosa por abrir as portas de sua empresa e permitir a realização do estudo de campo.

Ao Rafael Oliveira e Luiza Lima por todo apoio durante o estudo de campo.

Ao Prof. Claudio Serra e ao Eng. Guilherme Coelho pela importante ajuda na modelagem computacional.

Ao Prof. Leony Negrão pela avaliação do modelo conceitual.

Ao T.I. do Instituto de Tecnologia, Darcy Maia por todo suporte técnico necessário e também pela amizade.

Aos colegas do Mestrado Vitor Martins, Celso Nagata, Alex Lobo, Alex Garcia, George Colares e Beto Macedo pelo bom convívio e troca de experiências.

Ao amigo Lucas Athaide, pela amizade e parceria nos trabalhos de equipe.

Aos amigos do IEFEP, Amanda Batista e Wagner Rossi pela amizade e pelos importantes debates.

Aos inestimáveis amigos Fábio Moraes, Elisabeth Ferreira, Rogério Nogueira e Michelle Azulay, pela forte amizade e apoio mesmo com a distância.

E aos amigos(as): Bárbara, Renatta, Dimitri, Bruna, Rodrigo, Igor, Raphael, Juliana, Caio, Camila e Eliane, pela amizade e pelos bons momentos compartilhados.

E um agradecimento especial, a namorada e futura esposa Larissa Magalhães pela amizade, dedicação, compreensão, pelas cobranças devidas e, sobretudo pelo amor.

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>VIII</b>
<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>IX</b>
<b>RESUMO .....</b>	<b>XI</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>XII</b>
<b>CAPÍTULO 01 - INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
1.1 - Tema e Definição da Problemática .....	13
1.2 - Importância do Tema .....	16
1.3 - Objetivo Geral .....	21
1.3.1 - Objetivos Específicos .....	21
1.4 - Delimitação da Dissertação .....	22
1.5 - Estrutura da Dissertação .....	22
<b>CAPÍTULO 02 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>23</b>
2.1 - Sistemas de Eventos Discretos .....	23
2.1.1 - Concepção Histórica da Teoria Geral dos Sistemas .....	23
2.1.2 - Conceitos de Sistemas .....	25
2.1.3 - Outros Conceitos Importantes de Sistemas .....	27
2.1.4 - Classificação dos Sistemas .....	29
2.1.5 - Conceituação de Sistemas de Eventos Discretos .....	31
2.2 - Sistemas de Produção .....	32
2.2.1 - Elementos de um Sistema de Produção .....	35
2.2.2 - Classificação dos Sistemas de Produção .....	38
2.2.3 - Sistemas de Manufatura .....	40
2.3 - Balanceamento de Linhas de Produção .....	43
2.3.1 - Métodos de Solução do Problema de Balanceamento de Linha .....	47
2.3.1.1 - Métodos Heurísticos .....	48
2.3.1.2 - Métodos de Simulação e de Apoio à Decisão .....	49
2.4 - Modelagem e Simulação Computacional .....	49
2.4.1 - Simulação a Eventos Discretos .....	53
2.4.1.1 - Elementos Utilizados em Simulação a Eventos Discretos .....	56
2.4.2 - Justificativas da Modelagem e Simulação .....	57
2.4.3 - Metodologias de Modelagem e Simulação .....	59
2.4.4 - Mapeamento (Modelagem) de Processos .....	62
2.4.4.1 - Modelo Conceitual .....	66
2.4.5 - Verificação e Validação de Modelos de Simulação .....	71
2.4.6 - Questões Estatísticas na Simulação .....	76
2.4.6.1 - Distribuição Normal .....	76
2.4.6.2 - Distribuição Exponencial .....	77
2.4.6.3 - Distribuição Gama .....	79
2.4.6.4 - Distribuição de Erlang .....	80
2.4.6.5 - Distribuição de Weibull .....	81

2.4.6.6 - Distribuição Binomial .....	82
2.4.6.7 - Distribuição de Poisson .....	83
2.4.6.8 - Testes de Aderência .....	83
2.4.6.8.1 - Teste Qui-quadrado ( $X^2$ ) .....	84
2.4.6.8.2 - Teste Kolmogorov-Smirnov (K-S) .....	85
2.5 - O <i>Software Promodel</i> .....	86
<b>CAPÍTULO 03 - METODOLOGIA .....</b>	<b>89</b>
3.1 - Pesquisa e Método Científico .....	89
3.2 - Classificação da Pesquisa .....	90
3.3 - Campo de Observação da Pesquisa .....	92
3.3.1 - Ótica Geográfica .....	92
3.3.2 - Ótica Empresarial .....	94
3.4 - Definição da Metodologia de Modelagem e Simulação .....	94
<b>CAPÍTULO 04 - ESTUDO DE CASO .....</b>	<b>97</b>
4.1 - A Empresa .....	97
4.1.1 - Tecnologia de fabricação .....	97
4.1.2 - Descrição do Processo Produtivo .....	99
4.1.3 - O Produto .....	101
4.2 - Aplicação da Modelagem e Simulação .....	104
4.2.1 - Concepção .....	104
4.2.1.1 - Definição do Sistema e Seus Objetivos .....	104
4.2.1.2 - Coleta dos Dados de Entrada do Modelo .....	107
4.2.1.3 - Tratamento dos Dados de Entrada do Modelo .....	108
4.2.1.4 - Desenvolvimento do Modelo Conceitual .....	111
4.2.2 - Implementação .....	114
4.2.2.1 - Desenvolvimento do Modelo Computacional .....	114
4.2.2.2 - Verificação e Validação do Modelo Computacional .....	118
4.2.3 - Análise .....	119
4.2.3.1 - Projeto Experimental .....	119
4.2.3.2 - Experimentos, Resultados e Discussões .....	124
4.2.3.2.1 - Cenário Base .....	124
4.2.3.2.2 - Cenário 01 .....	127
4.2.3.2.3 - Cenário 02 .....	129
4.2.3.2.4 - Cenário 03 .....	131
<b>CAPÍTULO 05 - CONCLUSÕES .....</b>	<b>134</b>
5.1 - Conclusões .....	134
5.2 - Sugestões para Trabalhos Futuros .....	137
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>138</b>
<b>APÊNDICE A - DADOS COLETADOS E CÁLCULO DOS <i>OUTLIERS</i> .....</b>	<b>148</b>
<b>APÊNDICE B - TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS DADOS DE ENTRADA ...</b>	<b>152</b>
<b>APÊNDICE C - RELATÓRIO NÚMÉRICO DO ESTADO DOS RECURSOS .....</b>	<b>156</b>

**LISTA DE FIGURAS**

Figura 2.1 - Classificação dos sistemas..	29
Figura 2.2 - Rede de processos e operações	32
Figura 2.3 - Sistema de produção industrial.	35
Figura 2.4 – Estrutura gerencial de um sistema de produção	36
Figura 2.5 - Gestão da produção de um sistema	37
Figura 2.6 - Sistema de manufatura	41
Figura 2.7 - Classificação das linhas de produção	44
Figura 2.8 - Transformação da realidade em modelo	51
Figura 2.9 - Relações entre evento, processo e atividade	55
Figura 2.10 - Configurações básicas do fluxograma de processo	65
Figura 2.11 - Exemplo de mapofluxograma.	66
Figura 2.12 - Distribuição Normal	77
Figura 2.13 - Distribuição Exponencial	78
Figura 2.14 - Distribuição Gama	79
Figura 2.15 - Distribuição Erlang.	80
Figura 2.16 - Distribuição Weibull.	81
Figura 2.17 - Distribuição Binomial.	82
Figura 2.18 - Distribuição de Poison	83
Figura 3.1 - Classificação da pesquisa	90
Figura 3.2 - Localização do município de São Miguel do Guamá	92
Figura 3.3 - Metodologia de modelagem e simulação	95
Figura 4.1 - Planta da Empresa em estudo	99
Figura 4.2 - Fluxograma do processo produtivo	101

Figura 4.3 - Relatório de produção diária .....	102
Figura 4.4 - Interface do módulo <i>Stat:Fit</i> . .....	108
Figura 4.5 - Gráfico <i>Box-Plot</i> . .....	109
Figura 4.6 - Diagrama de dispersão . .....	110
Figura 4.7 - Histograma . .....	111
Figura 4.8 - Modelo conceitual . .....	112
Figura 4.9 - Interface do <i>software Promodel</i> . .....	115
Figura 4.10 - Configuração dos locais . .....	115
Figura 4.11 - Configuração das entidades . .....	115
Figura 4.12 - Configuração dos recursos . .....	116
Figura 4.13 - Configuração das redes de caminho . .....	116
Figura 4.14 - Configuração das variáveis . .....	117
Figura 4.15 - Configuração dos processos . .....	117
Figura 4.16 - Modelo computacional.....	118
Figura 4.17 - Período de aquecimento . .....	121
Figura 4.18 - Estado dos recursos do modelo. ....	126
Figura 4.19 - Relatório de utilização dos recursos do cenário1 . .....	128
Figura 4.20 - Relatório de utilização dos recursos do cenário2 . .....	130
Figura 4.21 - Relatório de utilização dos recursos do cenário3 . .....	131

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Relação entre sistema, modelo e simulação..	53
Tabela 2.2 - Simbologia para fluxo de processos	64
Tabela 2.3 - Simbologia do IDEF-SIM.	68
Tabela 2.4 - Dados brutos	86
Tabela 2.5 - Distribuição de frequências	86
Tabela 4.1 - Relatório de produção mensal	102
Tabela 4.2 - Formação dos lotes	103
Tabela 4.3 - Variáveis de entrada e de saída	107
Tabela 4.4 - Distribuições de probabilidade obtidas.	111
Tabela 4.5 - Resultados do teste de análise de sensibilidade	119
Tabela 4.6 - Tempo de processo.	120
Tabela 4.7 - Amostra piloto com 10 replicações.	121
Tabela 4.8 - Amostra piloto com 15 replicações.	123
Tabela 4.9 - Variáveis de saídas do modelo base.	124
Tabela 4.10 - Taxa de produção do modelo base	125
Tabela 4.11 - Variáveis de saídas do cenário 01.	127
Tabela 4.12 - Taxa de produção do cenário 01.	128
Tabela 4.13 - Variáveis de saídas do cenário 02	129
Tabela 4.14 - Taxa de produção do cenário 02	130
Tabela 4.15 - Variáveis de saídas do cenário 03.	131
Tabela 4.16 - Taxa de produção do cenário 03	132
Tabela 4.17 - Resumo dos indicadores.	133

## RESUMO

SILVA, Denilson Costa da. **Modelo de Simulação Computacional para Balanceamento de Linhas de Produção das Empresas Cerâmicas de São Miguel do Guamá: Um Estudo de Caso.** Dissertação de Mestrado, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará, Belém, 2013.

O presente trabalho vem apresentar um modelo de simulação computacional com propósito de resolver o problema do balanceamento de linhas de produção de uma fábrica de cerâmica vermelha, pertencente ao polo oleiro-cerâmico de São Miguel do Guamá. Neste sentido, inicialmente é realizada uma pesquisa bibliográfica acerca dos sistemas de eventos discretos, dos métodos de solução para balanceamento de linhas e dos conceitos envolvendo a modelagem e simulação. A metodologia aborda o estudo de caso, sendo este conduzido pelo método proposto por Chwif (1999) no qual abrange 03 (três) macros etapas na condução de um projeto de simulação, sejam a etapa de concepção, implementação e etapa de análise. Com o modelo computacional desenvolvido com base nas características atuais da linha de produção, pode-se descrever o estado atual do processo, identificar a operação gargalo bem como encaminhar propostas de melhorias a partir da construção de 03 cenários. Onde o terceiro cenário apresentou os melhores resultados e, portanto, sendo este o modelo representativo ao balanceamento. Ao final, entende-se como principais contribuições deste trabalho o fato de trazer para dentro da universidade a experiência da aplicação prática da simulação, envolvendo uma indústria de cerâmica vermelha de São Miguel do Guamá e oferecer a indústria desta região uma ferramenta potencial para melhoria de seus processos produtivos.

**Palavras-chave:** *Cerâmica vermelha; Balanceamento de linhas de produção; Simulação computacional; São Miguel do Guamá.*

## ABSTRACT

SILVA, Denilson Costa da. **Computer Simulation Model for Balancing Production Lines of Ceramic Companies of Sao Miguel of Guama: A Case Study.** Dissertation, Institute of Technology, Graduate Program in Civil Engineering, Federal University of Para, Belem, 2013.

This work is to present a computer simulation model for the purpose of solving the problem of balancing production lines of a factory belonging to the polo red ceramic potter-ceramic São Miguel of Guama. In this sense, it is initially performed a literature search on the discrete event systems, the methods of solution for line balancing and concepts involving the modeling and simulation. The methodology addresses the case study, which is conducted by the method proposed by Chwif (1999) in which covers three (03) macros stages in conducting a simulation project, whether the stage of design, implementation and analysis stage. With the computational model developed based on the current characteristics of the production line, one can describe the current state of the process, identify the problem operation as well as forward proposals for improvements from the construction of 03 scenarios. Where the third scenario presented the best results and, therefore, being the representative model of the balancing. At the end, it is understood as the main contributions of this work even bringing into the university experience of the practical application of simulation involving a ceramic industry of São Miguel of Guama and offer the industry of this region a potential tool for improving their processes productive.

**Keywords:** *Red ceramic; Balancing production lines; Computational simulation; Sao Miguel of Guama.*

## **CAPÍTULO 01 – INTRODUÇÃO**

Neste capítulo é apresentada a pesquisa a partir da temática e definição do problema a ser estudado. Em seguida, evidencia-se a importância do tema, os objetivos a serem alcançados, a delimitação, bem como sua estruturação.

### **1.1 Tema e Definição da Problemática**

O sistema capitalista vem-se moldando ao longo do tempo, sofrendo profundas transformações conjunturais e definindo novos paradigmas produtivos. Onde antes havia o confronto entre capital e trabalho, hoje desponta a administração participativa, a necessidade de envolvimento da mão-de-obra na inovação de novas técnicas produtivas. Onde antes havia a pressão por altas barreiras alfandegárias, limitando a concorrência e, conseqüentemente, administrando os preços em função das margens de lucro desejadas, hoje há a necessidade de se atingir o maior número de mercados, tanto na busca de insumos como na colocação de seu produto (TUBINO, 2006).

Segundo Lim e Zhang (2003), o mercado mundial vem se tornando mais dinâmico, requerendo dos sistemas produtivos respostas rápidas e flexibilidade para mudanças de cenários. E para Saad (2003), essas mudanças, muitas vezes, levam alguns meses até serem implementadas, mas o cliente não está disposto a esperar e a concorrência poderá obter vantagem competitiva.

Na opinião de Tubino (2006), as empresas de bens e serviços que não adaptarem seus sistemas produtivos para a melhoria contínua da produtividade não terão espaço nesse processo de globalização. O que obriga as empresas a constante evolução nos sistemas de produção.

Para Lachtermacher (2002), o desenvolvimento de um novo sistema produtivo ou a melhoria de um já existente passa frequentemente por tomadas de decisões<sup>1</sup> em diversos níveis da organização e geralmente são afetadas pelo tempo disponível para a tomada de decisão, pela importância da decisão, pelo ambiente, pelos riscos certezas/incertezas, pelos agentes decisores e pelos conflitos de interesses.

Não são raras as situações em que decisões sobre distribuição e utilização de recursos são tomadas por supervisores, líderes, coordenadores de produção e

---

<sup>1</sup> Tomada de decisão ou processo decisório é, segundo Simon (1974), um processo de análise e escolha entre alternativas disponíveis de cursos de ações que o indivíduo deverá seguir.

engenheiros de manufatura, com base apenas em suas experiências. Considerando que, nestas condições, a decisão tomada não é garantia de melhor resultado na alocação dos recursos, os decisores, cada vez mais, vem recorrendo à prática da modelagem e simulação, de forma a permitir processos decisórios mediante fatos, dados e informações.

A modelagem e a simulação têm sido, cada vez mais, aceitas e empregadas como técnicas que permitem aos analistas dos mais diversos seguimentos (administradores, engenheiros, técnicos em informática, etc.) analisarem e encaminharem soluções, com a profundidade desejada, aos problemas com os quais lidam diariamente. Georges (2005) declara quanto a flexibilidade de aplicação da simulação computacional em processos decisórios, destacando a capacidade de encontrar soluções ótimas em ambientes industriais.

No tocante a Engenharia Industrial, Freitas Filho (2008) afirma que a técnica da simulação computacional vêm sendo amplamente empregada em sistemas de produção (manufatura e montagem; movimentação de peças e matérias-primas; alocação de mão-de-obra; áreas de armazenagem; *layout* etc.) na tentativa de designar as situações nas quais se tenta compreender as características de um sistema. Brighenti (2006), por sua vez, acrescenta que a simulação computacional permite estudar o comportamento e o relacionamento entre diversos componentes de um sistema, considerando o fluxo de informações ou de elementos físicos dentro dele. Neste sentido, a simulação é uma ferramenta capaz de fornecer resultados para análises mais elaboradas a respeito da dinâmica do sistema, permitindo, desta maneira uma interpretação mais profunda e abrangente do sistema estudado, sem contudo, substituir o trabalho de interpretação humana.

Em termos de simulação computacional, trata-se de uma técnica potencial na análise de sistemas complexos, já que o computador fica encarregado de monitorar todas as variáveis, alterar os estados e comportamentos conforme programado e gerar estatísticas de todo experimento.

Quanto mais complexo for um problema, maiores serão as dificuldades de gerentes e analistas em processos de tomada de decisão, exigindo uma maior base de informações para auxiliá-los. Banks (2000) declara que a simulação é utilizada especialmente para sistemas mais complexos, onde métodos algébricos, teorias de probabilidade e cálculo diferencial não são suficientes para solucionar problemas matematicamente. O'kane *et al.* (2000) afirmam que a simulação é uma das técnicas

mais utilizadas para análise de problemas complexos em ambiente de manufatura. Banks (2000) enumera algumas destas razões:

- O aumento da produtividade e qualidade na indústria é um resultado direto da automação. Com os sistemas de automação cada vez mais complexos, estes só podem ser analisados pela simulação;
- Os custos de equipamentos e instalações são enormes;
- Os custos dos computadores estão cada vez mais baixos e as velocidades de processamento maiores;
- Melhorias nos *softwares* de simulação reduziram o tempo de desenvolvimento de modelos;
- A disponibilidade de animação resultou em maior compreensão e utilização pelos gestores de manufatura.

A simulação de sistemas vem sendo utilizada para fins de racionalização industrial<sup>2</sup>, sendo uma delas por meio do balanceamento de linhas de produção. Segundo Mezzena (2000), dos métodos existentes, a simulação é umas das práticas mais utilizadas para resolução de problemas de balanceamento de produção. Toledo Jr. (2004) reforça que tal resolução é atingida seja pela minimização dos custos de produção, ou com o tempo de ciclo, seja pela maximização da taxa de produção através da eliminação de tempos ociosos nas estações de trabalho.

De forma consensual, Ferreira *et al.* (2002), Toledo Jr. (2004) e Slack *et al.* (2009) afirmam que o balanceamento da produção é de fundamental importância para a empresa não perder eficiência, produtividade, oportunidades de vendas ou, em resumo, não perder dinheiro.

Por outro lado, a indústria oleiro-cerâmica, pertencente à cadeia de suprimentos da indústria da construção civil, detém em seu método e tecnologia de produção características em maior parte, mecânicas, com algumas automatizações, constituindo um importante entrave na busca por melhorias produtivas. Para Betini (2007), essas características dificultam a introdução de processos produtivos competitivos, em termos de preço e qualidade.

---

<sup>2</sup> Racionalização industrial, conforme Duarte (2003) é o conjunto de conceitos e ferramentas voltadas para a análise, não somente do trabalho, mas do sistema produtivo como um todo. Duarte (2003) cita ainda a definição apresentada pela *American Institute of Industrial Engineers* "Compete à Racionalização Industrial o projeto, a melhoria e a implantação de sistemas integrados envolvendo homens, materiais e equipamentos; especificar, prever e avaliar os resultados obtidos desses sistemas, recorrendo a conhecimentos especializados da matemática, física, ciências sociais, conjuntamente com os princípios e métodos de análise e projeto de Engenharia".

Saad (2003) declara que a principal característica atual da manufatura é a dinâmica de mudança de itens que afetam diretamente o desempenho do sistema de produção, tais como: a mudança do *mix* de produção; adequação rápida do *layout*, para atender a um determinado *mix* de produção; introdução/alteração dos processos como uma ferramenta, causando desbalanceamento da linha; etc. Neste contexto, as empresas oleiro-cerâmicas têm apresentado dificuldades em seguir esta dinâmica, seja pela utilização de práticas rudimentares, seja pela não utilização de técnicas que permitam melhor entendimento e análise de seu processo produtivo. (SEBRAE, 2005).

No que tange a este trabalho, busca-se apresentar uma modelagem robusta do sistema de produção de uma fábrica de cerâmica vermelha, pertencente ao Arranjo Produtivo Local do município de São Miguel do Guamá, Nordeste do Pará, com o objetivo de balanceamento de produção, mediante simulação computacional.

Neste sentido, o trabalho de pesquisa pode ser apresentado mediante os seguintes questionamentos:

- Como criar um modelo da linha de produção de tijolos, voltado para simulação computacional, capaz de apoiar a tomada de decisão de uma empresa de cerâmica vermelha de São Miguel do Guamá?
- Como obter o balanceamento da linha de produção de uma empresa de cerâmica vermelha a partir da simulação computacional?
- Como apresentar um estudo de caso de maneira a demonstrar a pesquisa?

## 1.2 Importância do Tema

Conforme o Anuário Brasileiro de Cerâmica Vermelha do Ministério de Minas e Energia – MME<sup>3</sup> (2009), o macrossetor cerâmico<sup>4</sup> no Brasil tem uma grande importância econômica, com uma participação no Produto Interno Bruto - PIB nacional da ordem de 1,0%, além de apresentar características de capilaridade no cenário da economia, com a participação de micro, pequenas, médias e grandes empresas, estando presente em praticamente todos os estados, tanto no interior como nas regiões metropolitanas. O setor de cerâmica vermelha, por sua vez,

---

<sup>3</sup> Para maiores informações acesse: <http://www.mme.gov.br>

<sup>4</sup> Macrossetor Cerâmico: envolve cerâmica vermelha, cerâmica branca, cerâmica de revestimento, isolantes térmicos, refratários, especiais (fritas e corantes), abrasivos, vidro, cimento e cal.

responde por cerca de 0,4% do PIB do País. O que demonstra sua importância para a economia nacional.

Segundo a Associação Nacional da Indústria Cerâmica - ANICER<sup>5</sup> (2012), no Brasil, existem aproximadamente cerca de 6.903 cerâmicas e olarias, sendo que 63% fabricam tijolos e blocos, 36% telhas e 1% tubos. As fábricas de tijolos e blocos são responsáveis por produzir cerca de 4 bilhões de peças/mês, consumindo aproximadamente 7.800.000 toneladas/mês de argila. Já as fábricas produtoras de telhas são responsáveis por produzir mais de 1 bilhão de peças/mês, com um consumo de 2.500 toneladas/mês de argila e, as fábricas de tubos produzem em média cerca de 325,5 km peças/mês. A distribuição da mão de obra ocupada é formada por 293 mil empregos diretos, aproximadamente 900 mil empregos indiretos e um faturamento anual de R\$ 18 bilhões (4,8% do faturamento da indústria de construção civil).

O Estado do Pará é destaque nesse segmento, possuindo o maior arranjo produtivo local<sup>6</sup> cerâmico industrial do Norte do País, localizado no município de São Miguel do Guamá. Com 52 indústrias ceramistas, segundo o Sindicato dos Trabalhadores da Indústria de São Miguel do Guamá (SINTIMIG, 2013), o Arranjo Produtivo Local (APL) apresenta o volume de 27 milhões de peças mensais entre blocos de vedação, blocos estruturais, bloco de laje e telhas. Emprega em média 42 funcionários por empresa, se tornando a maior economia do município (SEBRAE, 2004).

O SEBRAE (2008), com base em um estudo de mercado em âmbito nacional, afirma que esse setor sofre com a falta de planejamento e de controle de processos produtivos, possuindo fortes características artesanais em seus processos produtivos. Essa realidade é comprovada no estudo de Mafra (1999), onde foram identificados os seguintes problemas: falta de planejamento; desperdício de matéria-prima, energia e combustível; desconhecimento de normalização do produto final; inexistência de controle de qualidade e; processo tecnológico arcaico.

---

<sup>5</sup> Para maiores informações acesse: <http://www.anicer.com.br>

<sup>6</sup> Para Lastres *et al.* (2002), arranjos produtivos locais são aglomerações territoriais de agentes econômicos, políticos e sociais, com foco em um conjunto específico de atividades econômicas e que apresentam vínculos e interdependência. Geralmente, envolvem a participação e a interação de empresas – que podem ser desde produtoras de bens e serviços finais até fornecedoras de insumos e equipamentos, prestadoras de consultoria e serviços, comercializadoras, clientes, entre outros - e suas variadas formas de representação e associação. Incluem, também, diversas outras instituições públicas e privadas voltadas para: a formação e capacitação de recursos humanos, como escolas técnicas e universidades; pesquisa, desenvolvimento e engenharia; política, promoção e financiamento.

Na opinião de empresários, esse setor ainda possui problemas sérios e básicos de otimização do processo produtivo, constituindo um importante entrave para as empresas desse arranjo.

Segundo Betini (2007), a escala de produção das fábricas oleiro-cerâmicas do município de São Miguel do Guamá não supre por completo o mercado interno, necessitando assim suprir com produtos cerâmicos das regiões Nordeste e Centro-Oeste do país. Ainda para a mesma, uma das principais causas, é o escasso processo de modernização destas fábricas, dificultando a introdução de processos e produtos competitivos, em termos de preço e qualidade, diante dos produtos oriundos dos estados do Nordeste e Centro-Oeste.

Institucionalmente, o Arranjo Produtivo Local de São Miguel do Guamá vem sendo campo de estudos relevantes, com vista ao seu desenvolvimento. Tem-se como exemplos, os estudos técnicos realizados pelo SEBRAE/PARÁ nos anos de 2004, 2005 e 2006. Outros exemplos importantes, são os estudos implementados pela Universidade Federal do Pará, por meio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, onde originaram as dissertações de mestrado de Betini (2007), Mendes (2008) e Negrão (2009). Além disso, tem-se o projeto de pesquisa 031, intitulado – *Modelagem e Simulação do Balanceamento do Processo Produtivo das Olarias do Arranjo Produtivo Local de Cerâmica Vermelha de São Miguel do Guamá* – projeto este, gerenciado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq e sob a coordenação do Professor Jorge de Araújo Ichihara, e dentre os produtos que pretende-se gerar com esse projeto, tem-se esta dissertação de mestrado.

Com o crescimento da oferta frente à demanda crescente do Estado do Pará, é necessária a preparação desses APLs, de forma a aprimorar, a baixo custo, seu processo produtivo frente à sua demanda. Dessa forma, o balanceamento do processo produtivo emerge como uma importante técnica para esse fim.

É interessante que toda empresa possa nivelar sua produção de acordo com sua demanda, aproveitando seus recursos sob menor custo e tempo. E Toledo Jr. (2004) ressalta que o balanceamento de linhas de produção é uma técnica adequada para essa finalidade.

Uma linha de produção balanceada, frequentemente significa melhor utilização de recursos produtivos e, conseqüentemente, custos de produção menores, pois o tamanho da linha, o investimento em equipamentos, o fluxo de

materiais, o número de trabalhadores, entre outros, com certeza, serão melhores dimensionados. Todas estas melhorias representam a eficiência da linha, principalmente em termos de capacidade de produção e custo unitário do produto.

Toledo Jr. (2004) declara que o balanceamento de linhas de produção proporciona o máximo de produtividade e eficiência através da busca de eliminação de gargalos e esperas em estações de trabalho. Esse resultado é obtido através do nivelamento da linha de produção com relação a tempos, distribuindo a mesma carga de trabalho às pessoas ou os recursos em um fluxo de processo.

De acordo com Mezzena (2000), ao longo dos últimos 50 anos, foram propostas numerosas metodologias para resolver o problema de balanceamento de linhas de produção. Os principais métodos pertencem a um dos seguintes grupos de métodos: exatos (programação matemática); heurísticos, como o peso posicional; meta-heurísticos e método de simulação. Sendo este último, um dos mais usados, pois dentre uma das formas propostas para balancear linhas de produção mediante o método de simulação, consiste em uma forma prática de alocar as tarefas aos operadores por meio de observação visual. Algumas tarefas do trabalhador que está aparentemente mais sobrecarregado são transferidas para o que está aparentemente mais ocioso até que se encontre um equilíbrio nos tempos de operações dos trabalhadores.

Ao observar a enumeração das etapas tradicionais, pode se perceber que o balanceamento de uma linha de produção é algo que demanda tempo. Por isso, para que não seja inviável a prática do balanceamento, é necessário que haja meios de torná-la mais rápida. Sendo assim, essa pesquisa recorre à prática da simulação.

Segundo Harrell *et. al.* (2000), a simulação tem se mostrado uma técnica com grande potencial de apoio a tomada de decisão. Opinião esta também referendada pelos autores: Lim e Zhang (2003); Saad (2003); Law e Kelton (2000) e; Banks (2000).

Para Freitas Filho (2008), a técnica da simulação e seus conceitos básicos são, em geral, compreensíveis e justificáveis, tanto para usuários quanto para gerentes que tomam a decisão de aplicá-la no seu dia a dia, pelos seguintes fatores:

- Um estudo simulado admite aos analistas considerarem níveis de detalhes jamais imaginados, permitindo que diferenças de comportamento, às vezes sutis, venham a ser notadas;

- A possibilidade do emprego de animações, permitindo que se visualize o comportamento dos sistemas durante as simulações;
- Um estudo simulado pode economizar tempo e recursos financeiros no desenvolvimento de projetos ou na alteração do *mix* de produção, trazendo ganhos de produtividade e qualidade. Os custos de tais análises são, em geral, insignificantes se comparados aos seus benefícios;
- A percepção de que o comportamento do modelo simulado é muito semelhante ao do sistema real.

Banks *et al.* (2005) discorrem que um grande benefício ocasionado pela simulação é o seu uso em testes de alternativas de mudanças sem, contudo, alterar o sistema real. Segundo Prado (1999), esse fator torna-se interessante devido a não interferência com o sistema real, ou seja, elimina a possibilidade de alteração do sistema existente, uma vez que, sem ter uma certeza quanto ao sucesso dessa alteração, a simulação elimina um alto risco de prejuízo.

Em outras palavras, quando os custos, os riscos ou a logística de manipulação do sistema real é proibitiva, torna-se interessante criar um modelo de simulação, no sentido de obter importantes resultados a baixo custo. Os principais ganhos com a simulação são obtidos com a identificação e eliminação de problemas e ineficiências, chegando até a verificação da inviabilidade do projeto, antes da implantação (KELLNER *et al.*, 1998).

Adicionalmente, o uso da simulação para desenvolvimento de projetos de melhoria possibilita uma experimentação a baixo custo. Segundo Glenney e Gerald (1985), os custos estimados com o uso da simulação em um projeto situam-se entre 1 a 3% do custo total. Pidd (1998) acrescenta que a simulação apresenta grande economia no uso de recurso e mão de obra, e isto se torna evidente quando ocorre algo de errado na experimentação direta. Tornando-se, portanto, algo oportuno tanto para pesquisadores quanto para o empresariado das fábricas em estudo, uma vez que não necessita de grandes investimentos (a aquisição de equipamentos; contratação e treinamento de mão de obra etc.) para obtenção de resultados expressivos, tornando-o financeiramente justificável.

Pode também ser utilizada para simular novos sistemas, antes de suas implementações, configurando também sua adequação para análise de sistemas de

produção em fase de projetos, opinião também referendada por WELGAMA e MILLS, 1995; LAW e KELTON, 2000.

E por se tratar de um trabalho pioneiro neste APL, faz-se necessário utilizar um ferramental que permita conhecer o comportamento do sistema produtivo. Pegden *et al.* (1995) declaram que um estudo de simulação pode fornecer informações relevantes para o entendimento do sistema, diferentemente, de informações adquiridas somente por operadores do sistema. Pegden *et al.* (1995) acrescentam ainda que a simulação permite ampliar o conhecimento decorrente da interação de suas variáveis, podendo desta forma, oferecer indícios significativos para análises do sistema produtivo.

Com o exposto, acredita-se que o Balanceamento de linhas de produção das fábricas oleiro-cerâmicas de São Miguel do Guamá mediante simulação possa obter informações expressivas e análises rapidamente, oferecendo uma base de apoio à decisão gerencial deste setor.

### **1.3 Objetivo Geral**

O presente trabalho tem por objetivo propor uma alternativa de balanceamento de linha de produção de uma empresa típica do arranjo oleiro-cerâmico de São Miguel do Guamá a partir da utilização da modelagem e simulação computacional.

#### **1.3.1 Objetivos Específicos**

Além do objetivo principal do trabalho, podem-se levantar outros itens relevantes ao modelo, como:

- Revisar a literatura com a finalidade de aprofundar os conhecimentos sobre os métodos de solução do balanceamento pela seara da simulação computacional;
- Caracterizar a linha de produção, levando em consideração os conceitos de eventos discretos e buscando definir o sistema a ser modelado;
- Desenvolver um modelo conceitual da linha capaz de auxiliar o processo de modelagem computacional;
- Construir um modelo computacional mediante estudo de um caso real, comum à indústria local, passível de replicação.

#### **1.4 Delimitação da Dissertação**

O presente trabalho se restringe ao estudo das etapas caracterizadas como discretas da linha de produção da Fábrica Oleiro-Cerâmica: extrusão; enforna e desenforna. Não faz parte do escopo a etapa de preparação da massa cerâmica.

A linha de produção estudada abrange somente a produção de tijolos de vedação, não envolvendo assim outros produtos cerâmicos, tais como: telhas; tijolo estrutural etc.

Esta pesquisa utilizará os seguintes indicadores, objetivando alcançar o balanceamento da linha: taxa de produção e; taxa de utilização dos recursos.

Para a viabilização da modelagem computacional bem como da simulação, esta pesquisa utilizará o programa computacional de simulação *Promodel*.

#### **1.5 Estrutura da Dissertação**

O presente trabalho está estruturado em cinco capítulos.

Inicialmente, no Capítulo 1, são abordados os aspectos relacionados ao tema e definição da problemática, a importância do tema, o objetivo geral e os objetivos específicos, a estruturação da dissertação bem como sua delimitação.

O Capítulo 2 contém a fundamentação teórica, que apresenta o embasamento teórico, permitindo compreender os aspectos e elementos necessários para validação da pesquisa.

O Capítulo 3 refere-se à metodologia da pesquisa, na qual são abordados conceitos relativos ao método científico, bem como a definição das etapas de trabalho.

No Capítulo 4 é apresentado o estudo de caso. Neste capítulo é apresentada a empresa estudada e, em seguida, tem-se a aplicação da modelagem e simulação computacional que envolve desde a definição do sistema até a análise dos resultados obtidos.

No Capítulo 5 são apresentadas as conclusões do trabalho e as sugestões para trabalhos futuros.

## **CAPÍTULO 2 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

Marconi e Lakatos (2008) afirmam que toda pesquisa deve basear-se em uma teoria, que serve como ponto de partida para a investigação bem sucedida de um problema. Com base nisso, este capítulo apresenta a base teórica de sustentação desta pesquisa incluindo os preceitos necessários para o entendimento do modelo de simulação proposto.

### **2.1 Sistemas de Eventos Discretos**

A intenção de conceituar os Sistemas de Eventos Discretos reside no fato que esse tipo de sistema esta voltado a estudar problemas relativos à Engenharia de Produção, tais como: problemas operacionais, de manuseio de materiais, de serviços, tomada de decisão, etc. Porém, antes de conceituarmos os Sistemas em Eventos Discretos, faz-se necessário entendermos o que é sistema. Dessa forma, recorre-se a citação da Teoria Geral dos Sistemas.

#### **2.1.1 Concepção Histórica da Teoria Geral dos Sistemas**

De acordo com Georges (2005), as primeiras ideias sobre o que, posteriormente seria conhecido por Teoria Geral dos Sistemas, surgiram no Século XIX, com o filósofo e sociólogo Herbert Spencer. Ele usa o princípio da continuidade (formulado em 1862 no primeiro livro volume de *A System of Synthetic Philosophy*, intitulado *First Principles*, para argumentar que todo fenômeno poderia ser explicado como uma continuidade do processo de evolução. Segundo este princípio, os organismos homogêneos são instáveis; o organismo desenvolve-se do simples para o mais complexo e com formas heterogêneas e; e que esta evolução é uma regra do progresso.

Em 1864, Herbert Spencer apresenta o livro *Principles of Biology*, que é outra contribuição para a formulação da Teoria Geral dos Sistemas. Nesta obra, são mostradas evidências da sua teoria da evolução na gradual especialização dos organismos biológicos em busca da individualização e autossuficiência, além do mais, afirma sobre a necessidade de se entender indivíduos em termos do todo do quais estes fazem parte, e que as partes são mutuamente dependente uma das outras. Portanto as contribuições de Spencer para a Teoria Geral dos Sistemas estão na observação do crescimento de organismos biológicos e sociais e nas considerações de que ambos tornam-se mais complexos e apresentam uma

crescente interdependência mútua de suas partes, assim como ambos, também durante o crescimento, apresentam uma crescente integração acompanhada por uma crescente heterogeneidade de suas partes (GEORGES, 2005).

No século XX, nos primeiros anos da década de 30, Claude Lévi-Strauss, filósofo e antropólogo francês e seguidor dos princípios estruturalistas, contribuiu para a formação da teoria sistêmica afirmando que “uma estrutura oferece um caráter de sistemas, consistindo em elementos combinados de tal forma que qualquer modificação num deles implica uma modificação em todos os outros” (GEORGES, 2005).

Porém, o biólogo austríaco Ludwig Von Bertalanffy quem sugeriu generalizar esse pensamento para se referir a qualquer tipo de todo não simplesmente os sistemas biológicos. Em meados de 1940 publicou a obra intitulada – O organismo considerado como um sistema físico—onde generalizou o pensamento organísmico (a teoria sistêmica do organismo, como ele chamou) em pensamento relativo aos sistemas em geral. Em 1954 ajudou a fundar a sociedade para a pesquisa em sistemas, inicialmente sociedade para o avanço da teoria geral de sistemas. E em 1968, estendeu seus estudos a outros organismos não biológicos e também constatou a existência dos mesmos elementos comuns aos percebidos anteriormente nos organismos biológicos, postulando então de forma definitiva a Teoria Geral dos Sistemas, assim como a disseminação de todos os termos utilizados BERTALANFFY (2010).

Segundo Bertalanffy (2010), esta teoria contém três aspectos principais que, embora não sejam separáveis quanto ao conteúdo, são distintos quanto à intenção. O primeiro destes aspectos é a ciência dos sistemas a que corresponde quer ao estudo científico e à teoria dos sistemas nas diferentes ciências, quer a uma teoria geral dos sistemas, enquanto conjunto de princípios aplicáveis a todos os sistemas. Outro aspecto faz referência a tecnologia dos sistemas, na qual aborda os problemas que surgem na tecnologia e na sociedade moderna. Por último, tem-se a filosofia dos sistemas que diz respeito à reorientação do pensamento e da visão do mundo resultante da introdução do conceito de sistema como novo paradigma científico.

De acordo com Beja (2009), muito embora a noção de Teoria Geral dos Sistemas tenha surgido particularmente associada à obra de Bertalanffy, a definição e compreensão de sistema encontram-se também associados ao trabalho de

diferentes autores ligados ao *Massachusetts Institute of Technology* (MIT), tais como: Norbert Wiener sendo responsável pelo surgimento da cibernética com a publicação do livro *Cybernetics* em 1948; Warren McCulloch que desenvolveu estudos importantes na área da inteligência artificial, da biônica e da robótica; Jay Forrester que em 1971, lançou seus *Princípios de Sistemas*, consolidando a utilização do computador em trabalho com sistemas na área de gerenciamento; assim como ao Grupo de Palo Alto e ao *Mental Research Institute*, nomeadamente, Gregory Bateson, Don Jackson, Jay Haley e Paul Watzlawick nos quais desenvolveram estudos dentro da perspectiva sistêmica, aplicando-os ao estudo da comunicação e interação humana.

Motta<sup>7</sup> *apud* Antunes Júnior (1998) cita um marco histórico que diz respeito ao desenvolvimento de uma visão das organizações a partir da ótica dos sistemas. Os estudiosos do Instituto de Relações Humanas de Tavistock na Inglaterra identificaram dois subsistemas básicos em dada organização: o subsistema técnico e o subsistema social. Segundo o modelo de Tavistock, para uma determinada organização desempenhar seu trabalho de forma eficiente torna-se necessário levar em consideração tanto o subsistema social, conseqüentemente, a sua relação com o ambiente, quanto o subsistema técnico. O subsistema técnico seria responsável pela eficiência potencial da organização, enquanto o subsistema social seria responsável pela transformação da eficiência potencial, construída no âmbito do subsistema técnico, em uma eficiência. O trabalho do Instituto de Tavistock parte do pressuposto de que as organizações se constituem em um sistema aberto.

### **2.1.2 Conceitos de Sistemas**

O termo sistema, de acordo com Chwif (1999), é utilizado numa grande variedade de modos, sendo difícil produzir uma definição suficientemente abrangente para cobrir vários usos e, ao mesmo tempo, concisa o suficiente para ter um propósito útil.

---

<sup>7</sup> MOTTA, F. C. P. Teoria Geral da Administração. Biblioteca Pioneira de Administração e Negócios. São Paulo, 1973

Segundo Bertalanffy (2010):

“Um sistema pode ser definido como um complexo de elementos em interação. A interação significa que os elementos  $p$  estão em relações  $R$ , de modo que o comportamento de  $p$  em  $R$  é diferente de seu comportamento  $R'$ . Se os comportamentos em  $R$  e  $R'$  não são diferentes não há interação, e os elementos se comportam independentemente com respeito às relações  $R$  e  $R'$ ” (BERTALANFFY, 2010).

Para Forrester (1990), os sistemas podem ser compreendidos como um grupo de partes que operam conjuntamente para atingir um propósito comum. Senge (2008) define sistema como um todo percebido, a partir do qual os diversos elementos constituintes do sistema mantem-se junto na medida em que estes elementos afetam continuamente uns aos outros ao longo da dimensão temporal, atuando para o alcance de um propósito comum. Na óptica de Bellinger (1996), o sistema consiste de uma entidade que caracteriza a sua existência a partir de interação mútua entre as partes que constituem o mesmo. Sendo que nesta definição o eixo de interesse do estudo das partes que constituem o sistema é deslocado para então estudar as diferentes e dinâmicas interações das partes envolvidas.

Cassandras (1993) apresentam três definições com vista aos sistemas de eventos discretos:

"Agregação ou montagem de coisas, combinadas pelo homem ou pela natureza de modo a formar um todo unificado".

"Grupo de itens interdependentes ou interagindo regularmente formando um todo unificado".

"Combinação de componentes que agem em conjunto para desempenhar uma função que se torna impossível na ausência de qualquer das partes".

Muller-Merbach (1994), a abordagem dos sistemas foca-se na relação entre o todo, de certa unidade em análise, e seu relacionamento com as partes constituintes tendo como pressuposto central alcançar um determinado objetivo comum. Tal abordagem postula que todas as coisas consistem de partes, estas partes por sua vez são entendidas como subsistemas. Subsistemas estes, que ao mesmo tempo consistem de partes menores, sendo subsistemas (partes) de um sistema maior. O que leva a conclusão que os sistemas podem ser desdobrados em subsistemas e supersistemas. Os subsistemas podem ser definidos como as diferentes partes que

constituem um dado sistema em análise. E os supersistemas, como um conjunto de sistemas. Nesta lógica, todas as partes são consideradas como sistemas, os quais podem ser compreendidas como subsistemas de um sistema maior (supersistema) (MULLER-MERBACH,1994).

Um ponto de análise dos sistemas consiste em caracterizá-los em abertos ou fechados. Motta *apud* Antunes Júnior (2008), os sistemas abertos tem como característica a comunicação com o ambiente externo que o circundam. Parte do pressuposto que os sistemas externos são diferenciados e que tal diferenciação repercute diretamente no sistema estudado. Por outro lado, os sistemas fechados são isolados do ambiente externo que os circundam.

Segundo Forrester (1990), outra característica faz referência ao fato das saídas terem ou não influência sobre as entradas do sistema. No caso das saídas não terem influência sobre as entradas do sistema, afirma-se que as ações do passado não irão influenciar nas ações futuras do sistema. No caso das saídas terem influências nas entradas do sistema, trata-se de um sistema com *feedback*. Entende-se por *feedback*, a informação necessária que o sistema precisa para corrigir sua saída em função das entradas. Forrester (1990) ainda introduz a definição de *feedback* positivo e negativo. O sistema é dito com *feedback* positivo quando as ações de crescimento positivo do passado influenciam no sentido de um maior crescimento futuro do sistema. Por outro lado, quando as respostas do mesmo se direcionam a responder as falhas do sistema no sentido do alcance do objetivo traçado, tem-se então o sistema com *feedback* negativo.

### **2.1.3 Outros Conceitos Importantes de Sistemas**

Nesta seção serão apresentados alguns conceitos de forma a facilitar o entendimento do conceito de sistemas voltado para eventos discretos. Dada à relevância desses conceitos, Georges (2005), os denomina de conceitos primitivos. São eles:

**O Processo de Entrada-saída:** o sistema é alimentado por entradas que são processadas gerando saídas. No caso da representação de um sistema real por um modelo com propósito de tomada de decisão, as entradas deste modelo são essencialmente dados. Georges (2005) acrescenta que em processo de modelagem, as entradas constituem algo mais complexo, exigindo como entradas não só dados, mais também informações, materiais, recursos humanos, etc. Em resumo tem-se a

definição: entradas e saídas são um conjunto de variáveis mensuráveis em um intervalo de tempo (CASSANDRAS, 1993).

**O Conceito de Estado e Espaço de Estado:** Cassandras (1993) cita que o estado de um sistema remete ao comportamento apresentado por este em um determinado instante. Mas salienta que sob uma análise mais rigorosa, esta definição não é suficiente para definir um sistema, pois a informação do comportamento em um instante não auxilia a determinação de seus estados futuros e, portanto, pouco auxilia a tomada de decisão. Cassandras (1993) ainda exemplifica esse fato com apresentação de um sistema mecânico massa-mola, no qual o conhecimento da posição da mola (que é o valor da variável de saída em um dado instante) não é suficiente para definir toda a trajetória da massa, pois é também necessário conhecer a condição inicial deste sistema, já que sem a condição inicial não é possível dizer se a mola irá se contrair ou expandir no instante seguinte, dispondo apenas da informação da sua posição em um dado instante.

Cassandras (1993) define estado de uma forma mais pragmática: “o estado de um sistema em um instante  $t_0$  é a informação requerida em  $t_0$  tal que a variável de saída  $y(t)$ , para todo  $t \geq t_0$ , é unicamente determinado a partir da informação de  $u(t)$ ,  $t \geq t_0$ ”.

Este conceito de estado leva diretamente a outro conceito, o de espaço de estado. Segundo Banks<sup>8</sup> *apud* Georges (2005), espaço de estado é a coleção de variáveis que contém toda a informação necessária para descrever o sistema em qualquer tempo.

**O Conceito de Evento:** são acontecimentos, ocorrências, programados ou não, os quais, quando ocorrem, provocam uma mudança de estado em um sistema. Toda mudança de estado é provocada pela ocorrência de um evento. Em outras palavras, sempre que ocorre um evento, pelo menos uma variável de estado se altera (HARRELL *et al.*, 2000).

**O Conceito de Controle:** os controles ditam como, quando e onde as atividades são realizadas. Eles impõem à ordem no sistema. No mais alto nível, os controles consistem de programação, planos e políticas. No mais baixo nível, os controles fornecem as informações e a lógica de decisão de como o sistema deve

---

<sup>8</sup> BANKS, J. Introduction to Simulation. Proceedings Winter Simulation, 2000.

operar. Exemplos: planos de produção, programação da produção, priorização de tarefas, programas de controle e folhas de instruções (HARRELL *et al.*, 2000).

#### 2.1.4 Classificação dos Sistemas

Segundo Georges (2005), não há uma classificação universal das diferentes classes de sistemas. Tem-se a classificação de Cassandras (1993) como uma que melhor representa estes tipos de classificação. A Figura 2.1 ilustra essa classificação.

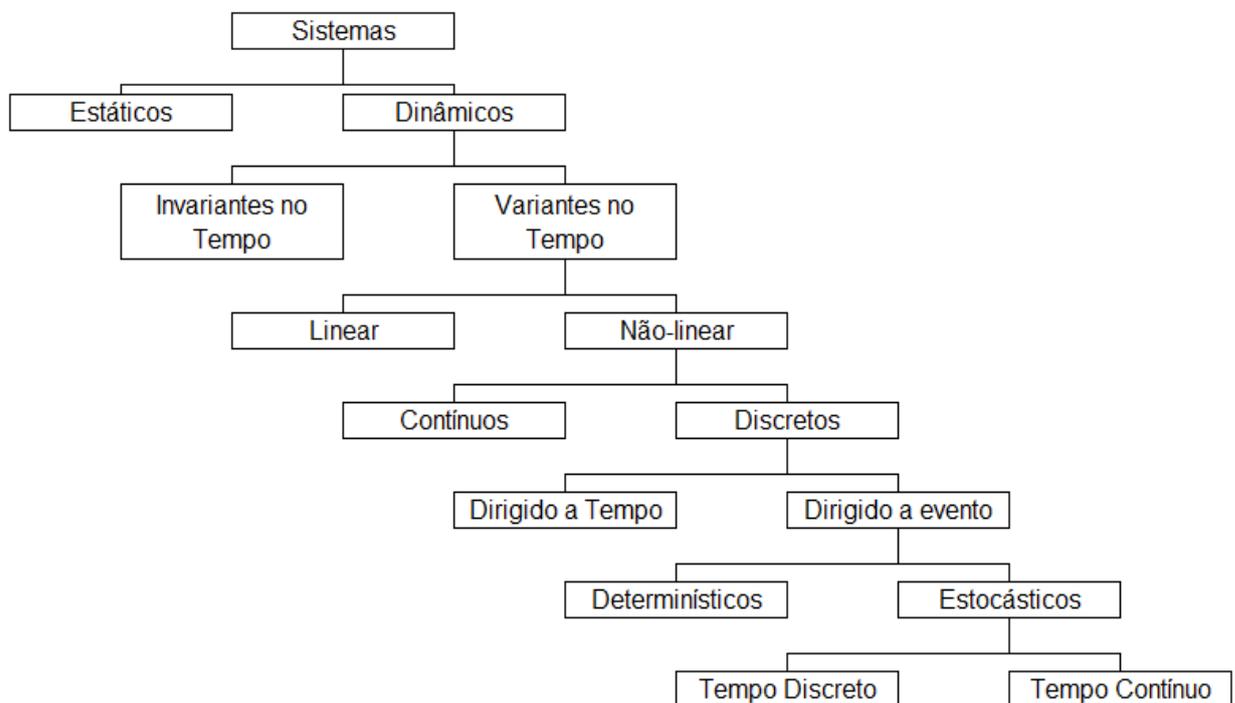


Figura 2.1–Classificação dos sistemas (Fonte: Cassandras, 1993).

**Sistema Estático versus Sistema Dinâmico:** estes sistemas são definidos a partir da percepção das variáveis de entradas e das variáveis de saída. Um sistema estático possui como variável de saída valores que independem, a partir de um tempo  $t$ , dos valores das variáveis de entrada antes de  $t$ . Isto significa que basta saber o valor da variável de entrada no instante  $t$  para se determinar os valores das variáveis de saída para todos os instantes futuros posteriores a  $t$ . No entanto, um sistema dinâmico não possui esta propriedade, o valor das variáveis de saída depende dos valores passados das variáveis de entrada (CASSANDRAS, 1993).

Georges (2005) acrescenta que o maior interesse da simulação reside nos sistemas dinâmicos, pois é a classe mais comum de fenômenos ocorrentes nas

ciências naturais e nas organizações industriais e empresariais. Portanto, esse embasamento teórico dará ênfase aos sistemas dinâmicos.

**Variantes no Tempo versus Invariantes no Tempo:** de acordo com Cassandras (1993), os sistemas dinâmicos podem se apresentar em duas classes: variantes no tempo e invariantes no tempo. Os sistemas dinâmicos invariantes no tempo apresentam o mesmo comportamento ao longo do tempo independente de quando ocorreu o momento inicial, isto é, independente do tempo em que o sistema iniciou sua evolução, a variável de saída apresentará o mesmo padrão. Porém, sistemas dinâmicos variantes no tempo tem sua variável de saída dependente do tempo inicial que o sistema passa a evoluir.

**Sistema Linear versus Sistema Não-linear:** Cassandras (1993) define um sistema linear e não-linear a partir da natureza das variáveis de entrada e saída. A relação entre variáveis de entrada e saída é dada pelas equações de estado, equações estas que determinam o espaço de estado. Um sistema é dito linear se o sistema for estimulado por um determinado dado de entrada ( $D1$ ) e, desse estímulo gerar um determinado resultado ( $R1$ ), estimulando-se novamente o sistema com  $D2$  produzindo um resultado  $R2$ , e por fim, estimulando-se o sistema com  $(D1+D2)$  o sistema devera apresentar como resultado  $(R1+R2)$ . É esta característica final que define um sistema linear. Por outro lado, em um sistema não-linear, o estímulo  $(D1+D2)$  irá produzir um resultado diferente de  $(R1+R2)$ .

**Estado Contínuo versus Estado Discreto:** para Cassandras (1993), os sistemas de estado contínuo são assim denominados porque o seu espaço de estado varia continuamente, sendo definido sobre o conjunto dos números reais. Enquanto os sistemas de estado discreto em decorrência do espaço de estado não variar continuamente, mas sim discretamente, sendo definido sobre o conjunto dos números ou naturais, ou até mesmo sobre um conjunto de estados discretos não numéricos. Sendo a dinâmica de comportamento do estado discreto, simples de visualizar. Isto ocorre porque o mecanismo de transição dos estados é normalmente baseado em uma lógica de afirmação: “se alguma coisa em específico acontecer e se o estado atual for  $x$ , então o próximo estado será  $x$ ”. No entanto, a formalização das equações de estado discreto é consideravelmente mais complexa que as equações de estado contínuo.

**Orientados no Tempo versus Orientados em Evento:** diferenciam essas duas classes de sistema em eventos discretos segundo o modo que a transição é

procedida. Nos sistemas discretos orientados ao tempo, o evento que define a transição do estado do sistema é dada pelo relógio. Diferentemente, dos sistemas orientados em evento onde a definição da transição do estado do sistema é um evento qualquer previamente definido (CASSANDRAS, 1993).

**Determinístico versus Estocástico:** se um determinado sistema dinâmico apresentar ao menos uma variável de saída como sendo uma variável aleatória, então define-se este como sistema estocástico, também pode ser chamado de sistema aleatório ou probabilístico. Mas por outro lado, nos sistemas probabilísticos as formulações não faz uso de variáveis aleatórias (probabilísticas), isto é, para utilização de um conjunto de valores das variáveis de entrada conhecidos, obtém-se uma única saída para cada um (CASSANDRAS, 1993).

**Tempo Discreto versus Tempo Contínuo:** segundo Cassandras (1993), os sistemas de tempo discreto são sistemas em que uma ou mais variáveis de entrada, variáveis de estado e variáveis de saída são definidas somente em pontos discretos do tempo. Porém, nos sistemas contínuos essas variáveis (entrada, estado, saída) são todas definidas para todos os possíveis valores do tempo.

### 2.1.5 Conceituação de Sistemas de Eventos Discretos

Conforme Cassandras (1993): “um sistema em evento discreto é um sistema que possui estados discretos, orientados a eventos, isto é, a evolução dos estados depende completamente da ocorrência de eventos discretos ao longo do tempo”.

Este sistema recebe a denominação de Soares (1992) de sistemas de mudanças discretas onde os instantes discretos das mudanças podem ser estabelecidos de forma determinística ou aleatória (estocástica), dependendo da natureza das entradas do modelo.

Georges (2005) acrescenta que o sistema em evento discreto dispõe de duas propriedades básicas: o espaço de estado que é um conjunto discreto e; o mecanismo de transição que é orientado a evento.

Georges (2005) cita ainda a diferenciação entre dois tipos de sistemas em eventos discretos, os temporais e não temporais. Os sistemas de eventos temporais são caracterizados pelas variáveis de entrada que são especificadas como uma sequência de eventos definidas em um tempo específico. Este tipo de sistema é mais comumente encontrado em ambientes industriais e empresariais, pois muitos eventos tem hora marcada para acontecer. Segue como exemplo: o início do dia de

trabalho e o término do dia de trabalho, horário de almoço, paradas programadas para manutenção em máquinas, etc. Os sistemas discretos não temporais, por sua vez, são caracterizados pelas variáveis de entrada que são especificadas como uma sequência de eventos sem qualquer informação sobre o tempo em que esses eventos ocorrem, ou seja, não há dependência do tempo para a ocorrência de um evento.

## 2.2 Sistemas de Produção

De início é importante compreender alguns conceitos. Shingo (1996) define produção como sendo uma rede de processos e operações, onde processos são efetivados através de uma série de operações. A definição do autor também se encontra ilustrada na Figura 2.2.

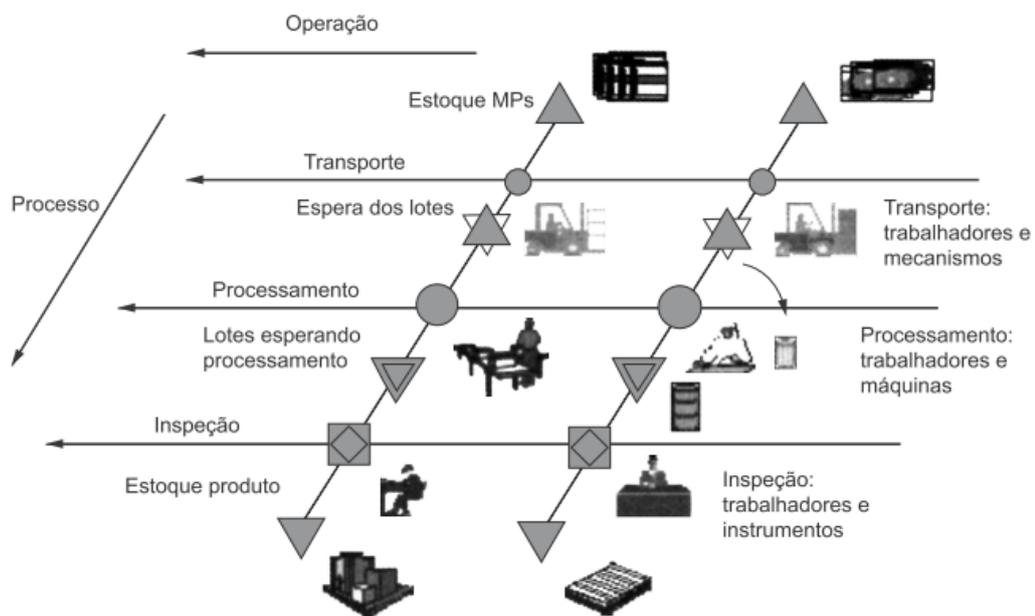


Figura 2.2 – Rede de processos e operações (Fonte: Shingo, 1996).

Ainda de acordo com SHINGO (1996), a função produção pode ser compreendida a partir do entendimento da relação entre processos e operações. Tendo como suporte os eixos cartesianos ( $x$ ,  $y$ ), Shingo (1996) divide o trabalho nos dois eixos. No eixo das ordenadas ( $y$ ), é representado o fluxo proporcionado pelas mudanças que ocorrem em um recurso em transformação, ou seja, o fluxo do objeto de produção (material, serviços ou mesmo ideias) no tempo e no espaço, criando uma rede de processos. Enquanto que no eixo das abscissas ( $x$ ), é projetado o fluxo

das atividades que são obtidas a partir dos recursos de transformação (máquinas, equipamentos, pessoas), ou seja, o fluxo do sujeito do trabalho no tempo e no espaço. Para o autor, esse fluxo cria uma rede de operações. Portanto, para o mesmo autor. A função produção pode ser entendida como uma rede de processos que fluem ao longo do eixo y e de operações que fluem ao longo do eixo x.

Shingo (1996),

“Um processo é visualizado como o fluxo de materiais no tempo e no espaço; é a transformação da matéria-prima em componentes semiacabado e daí o produto acabado. Por seu turno, as operações podem ser visualizadas como o trabalho realizado para efetivar esta transformação – a interação do fluxo de equipamento e operadores no tempo e no espaço.” (SHINGO, 1996).

Slack *et al.* (2009), complementam a ideia do modelo de transformação quando afirmam que qualquer operação produz bens ou serviços, ou os dois, e faz isso por um processo de transformação. Sendo este modelo oriundo da combinação de processos (compostos por atividades de processamento, transporte, armazenamento e inspeção), utilizando materiais, informações e energia (entradas) em um grupo complexo de elementos (equipamentos e pessoal) (MEREDITH e SHAFER<sup>9</sup> APUD SCHRAMM, 2009).

De forma resumida, a produção envolve um conjunto de recursos de entradas (*inputs*) usado para transformar algo ou para ser transformado em saídas (*outputs*) de bens ou serviços.

Conceituando sistemas de produção, segundo Slack *et al.* (2009), são centros de produção que processam o material bruto e/ou subconjuntos transformando-os em produto acabado, sendo então o departamento de produção responsável pelo gerenciamento de mão de obra e instalações que determinarão a capacidade produtiva de cada centro que irá executar as rotinas para produzir o produto. Os mesmos ainda acrescentam que os produtos acabados deixam o sistema produtivo para atender a demanda de clientes, que podem ser um consumidor direto, um varejista, um atacadista ou cliente interno parte de um outro processo de manufatura. Além disso, é função do departamento de distribuição e vendas o gerenciamento das quantidades e armazenamento destes produtos para satisfazer as necessidades de atendimento do cliente.

---

<sup>9</sup>MEREDITH, J. R.; SHAFER, S. M. Administração da Produção para MBAs. Porto Alegre: Bookman, 2002.

Na opinião de Krajewski e Ritzman (2004), consistem de entradas, processos, saídas e de fluxos de informação que fazem conexão com os clientes e com o ambiente externo. As entradas do sistema de produção incluem recursos humanos (operários e gerentes), capital (equipamentos e instalações), materiais e serviços comprados, terreno e energia.

Rosa (2002) diz que um sistema de produção é definido por conter um processo específico de funcionamento a partir de determinados insumos (*inputs*) de forma a atender determinados resultados (*outputs*), sendo necessária a organização prévia para atender esses resultados. Porém, a organização prévia não é garantia que os resultados sejam atingidos conforme planejado. Desta forma, a mesma salienta a necessidade de monitoramento dos processos de forma a garantir a eficácia do sistema de produção. Tal monitoramento propiciaria constante retroalimentação (*feedback*) de tal forma a orientar as correções de eventuais desvios no funcionamento do sistema.

Meredith e Shafer *apud* Schramm (2009) apresentam uma descrição mais ampliada dos sistemas de produção, que explicita seus elementos constituintes e a forma como estes se relacionam. Segundo esses autores, um sistema de produção pode ser definido em termos do ambiente no qual este se insere, de seus insumos, de um sistema de transformação, de seus produtos e dos mecanismos utilizados para o monitoramento e controle do sistema de produção.

Nesse modelo o ambiente é constituído por elementos ou aspectos externos ao sistema de produção que não podem ser controlados, mas devem ser considerados devido à sua influência sobre este. Tendo em vista a natureza dinâmica do ambiente, torna-se necessário monitorar o sistema de produção e realizar ações corretivas se o sistema não estiver atingindo o seu objetivo. Assim, são necessárias ações direcionadas aos insumos ou ao sistema de transformação ou a ambos, a partir da coleta e análise de dados relacionados ao ambiente, ao sistema de transformação e às suas saídas (MEREDITH E SHAFER *APUD* SCHRAMM, 2009).

A representação do sistema de produção proposta por Meredith e Shafer *apud* Schramm (2009) é apresentada na Figura 2.3.

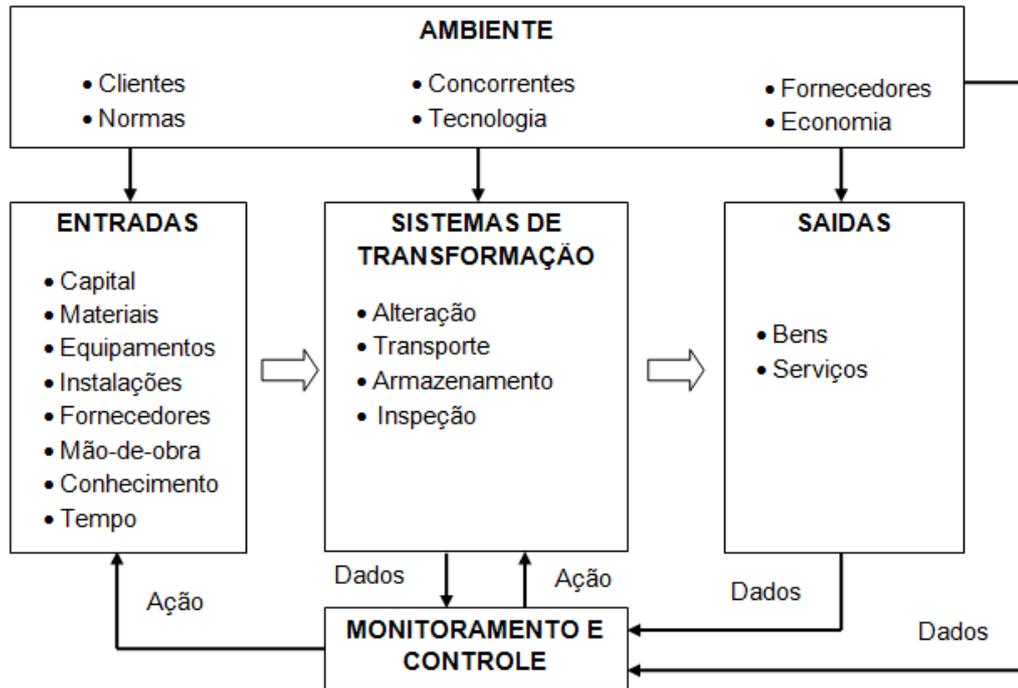


Figura 2.3 - Sistema de produção industrial (Fonte: Meredith e Shafer *apud* Schramm, 2009).

Em síntese, tem-se a definição de Pasa (2004), sobre o que seria o sistema de produção:

“Um sistema de produção consiste no arranjo de elementos que funcionam dinamicamente, interagindo entre si e em conexão com o meio externo, visando produzir, a partir de entradas (materiais, informações, pessoas), as saídas desejadas (produtos fabricados, serviços, pessoas satisfeitas). Há recursos materiais, pessoas e informações, localizadas num ambiente. O que lhes confere dinâmica é a ação de gerenciamento, que planeja, coordena, monitora (via indicadores) e controla o fluxo produtivo e o fluxo de informações. O fluxo produtivo e o fluxo de informações são entrelaçados, e de sua perfeita sincronia e fidedignidade depende o resultado produtivo. A organização é maior do que sistema de produção. Enquanto a primeira tem uma complexidade maior, envolvendo a identidade organizacional, todas as ações de infraestrutura, e interagindo diretamente com o meio externo, o segundo é responsável pela fabricação propriamente dita, e subsiste dentro da primeira, realimentando-a. Para delimitar melhor o sistema de produção, considera-se que este abrange diretamente os seguintes departamentos ou funções tradicionais: manufatura ou operação e planejamento e controle da produção” (PASA, 2004, p.45).

### 2.2.1 Elementos de um Sistema de Produção

No sentido de destacar os elementos dos sistemas de produção, Riggs<sup>10</sup> *apud* Pasa (2004), lista algumas das áreas adequadas para uma avaliação sistêmica:

<sup>10</sup> RIGGS, J. L. Production Systems: planning, analysis and control. New York: John Wiley, 1970.

localização da planta; *layout* das plantas e das áreas de trabalho; programação e alocação de recursos; seleção, manutenção e substituição de equipamentos; políticas de inventários; projeto e controle de processos; métodos de trabalho e; controle de quantidades e qualidades.

Diante de todas essas áreas de avaliação sistêmica, Riggs *apud* Pasa (2004), destaca o papel gerencial conforme a Figura 2.4.

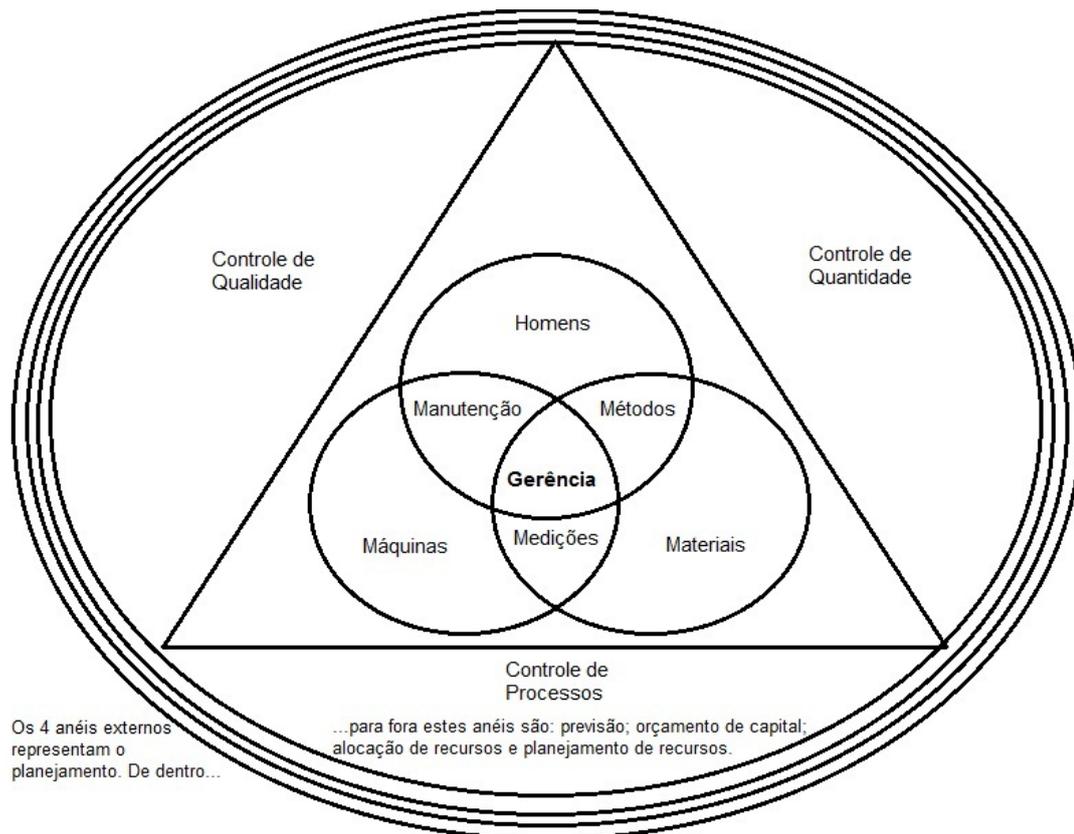


Figura 2.4 -Estrutura gerencial de um sistema de produção (Fonte: Riggs *apud* Pasa, 2004).

Os anéis extremos representam a parte de planejamento. A sequencia destes anéis consiste, de dentro para fora, da previsão de futuras vendas, do orçamento de capital para identificar as ações mais econômicas, da alocação de recursos ao plano de ação preferido, e da realização dos passos do planejamento de recursos. A parte de análise se concentra sobre os três recursos representados pelos círculos mais internos – homens, máquinas e materiais. As porções dos circuitos que se sobrepõem representam a coordenação necessária para integrar efetivamente os recursos. No centro, onde todos os círculos se sobrepõem, está o coração da função de gerenciamento. O triângulo que envolve os três círculos de recursos representa a

seção de 'controle', onde cada lado do triângulo denota uma área de controle, a saber: quantidade; qualidade e; processo (RIGGS APUD PASA, 2004).

Krajewski e Ritzman (2004) destacam a gestão da produção como integrantes dos sistemas. Os mesmos argumentam que a produção se refere à administração e ao controle dos processos que transformam entradas em produtos acabados e serviços. Esta função é essencial para os sistemas de produção em organizações. Fato este evidenciado na Figura 2.5:

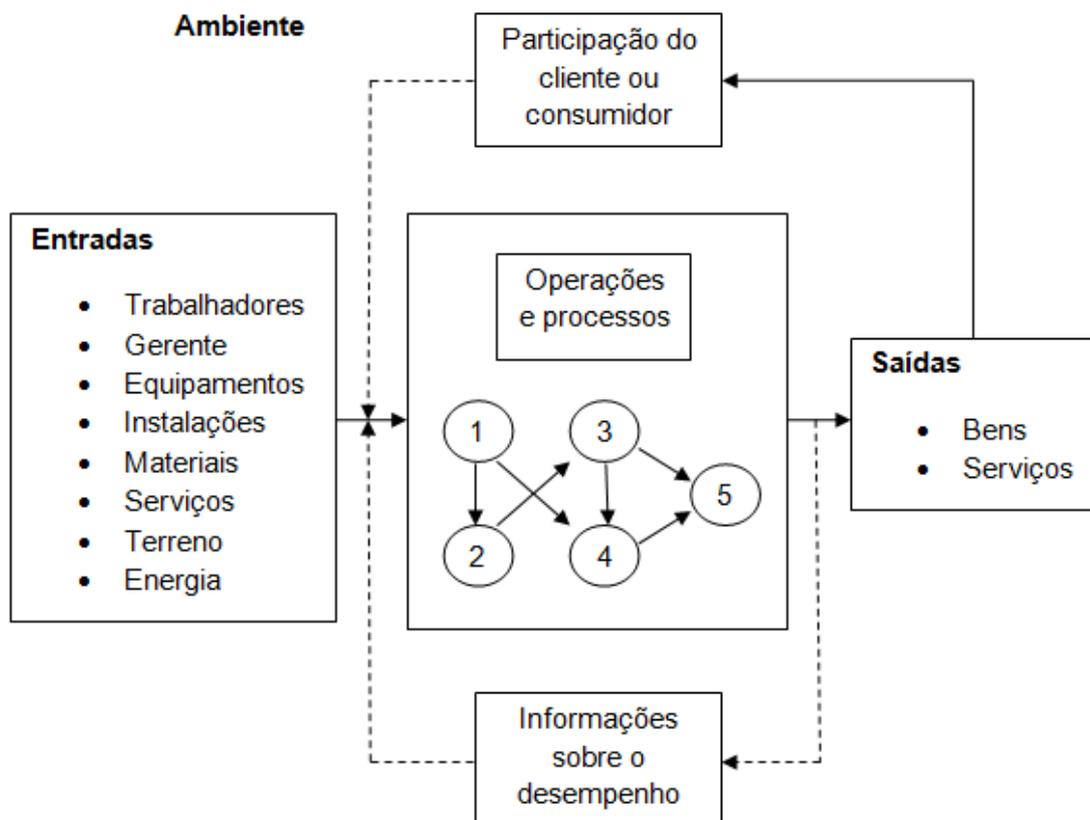


Figura 2.5 - Gestão da produção de um sistema (Fonte: Krajewski e Ritzman, 2004).

Na Figura 2.5, os círculos numerados representam as operações através das quais os produtos, serviços ou clientes passam e onde os processos são usados. As linhas tracejadas representam dois tipos especiais de entradas: a participação dos consumidores ou clientes e a informação sobre o desempenho, coletadas de fontes externas e internas. A participação dos clientes ocorre quando eles não somente recebem as saídas, mas, também, têm uma participação ativa nos processos em si, tal como no caso em que os estudantes participam no processo de discussão em classe. As informações sobre o desempenho incluem relatórios internos sobre o

serviço prestado aos clientes ou sobre a gestão dos estoques e incluem informações externas sobre pesquisa de mercado, relatórios governamentais, ou chamadas telefônicas de clientes. Um gerente de produção precisa de todos os tipos de informação para gerenciar um sistema de produção (KRAJEWSKI E RITZMAN, 2004).

Krajewski e Ritzman(2004) analisam ainda que entradas e saídas variam entre as diferentes empresas. Entretanto, as funções fundamentais dos processos se mantêm verdadeiras para todos os sistemas de produção.

### **2.2.2 Classificação dos Sistemas de Produção**

Moreira (2011) classifica os sistemas de produção em função do fluxo do produto, onde apresenta duas classificações, à primeira denominada de classificação tradicional, onde aborda o tipo de fluxo e à segunda de classificação cruzada de Schroeder que acrescenta outra dimensão, por tipo de atendimento ao cliente (fabricação para estoque e por encomenda).

Ainda de acordo com Moreira (2011), a classificação tradicional é em função do fluxo do produto e agrupa os sistemas de produção em três categorias seguintes: sistemas de produção contínua ou de fluxo em linha; sistemas de produção intermitente ou fluxo intermitente e; sistemas de produção de grandes projetos sem repetição.

Os sistemas de produção contínua (fluxo em linha) apresentam sequencia linear de fluxo e trabalham com produtos padronizados, além de apresentar uma alta eficiência e acentuada inflexibilidade. Dentro desse modelo de produção, tem-se o tipo de produção em massa, que é para linhas de montagem em larga escala de poucos produtos com grau de diferenciação relativamente pequeno. E o tipo de produção contínua propriamente dita, onde este tipo de produção tende a ter um alto grau de automatização e a produzir produtos altamente padronizados. Neste modelo se enquadram as chamadas indústrias de processo (MOREIRA, 2011).

Por outro lado, têm-se os sistemas de produção intermitente (fluxo intermitente). Nesse caso, a produção é feita em lotes, ou seja, ao término da fabricação de um produto outros produtos tomam seu lugar nas máquinas, de maneira que o primeiro produto só voltará a ser fabricado depois de algum tempo. Também pode ser uma produção por encomenda, onde o cliente apresenta seu próprio projeto do produto, devendo ser seguidas essas especificações na

fabricação. Em relação a produção contínua, a produção intermitente ganha em flexibilidade e, perde em volume de produção (MOREIRA, 2011).

Moreira (2011) cita ainda a classificação de sistemas de produção para grandes projetos, diferenciando bastante do modo de produção contínuo e do intermitente. Neste modelo, o produto é único, não há rigorosamente um fluxo do produto, existe uma sequência predeterminada de atividades que deve ser seguida, com pouca ou nenhuma repetitividade. Os exemplos desse modelo incluem a produção de navios, aviões, grandes estruturas entre outros.

A Classificação Cruzada de Schroeder considera duas dimensões. De um lado, a dimensão tipo de fluxo de produto de maneira semelhante à classificação tradicional. Essa dimensão geralmente é suficiente para os sistemas industriais, porém incompleta se aplicada aos serviços. O que leva a outra dimensão, a do tipo de atendimento ao consumidor, onde existe o tipo de sistema orientado para o estoque e o tipo orientado para encomenda (MOREIRA, 2011).

Nos sistemas orientados para estoque, o produto é fabricado e estocado antes da demanda efetiva do consumidor. Este tipo de sistema oferece atendimento rápido e a baixo custo, mas a flexibilidade de escolha do consumidor é reduzida. Diferentemente dos sistemas orientados para a encomenda, onde as operações são ligadas a um cliente em particular, discutindo-se preço e prazo de entrega (MOREIRA, 2011).

Slack *et al.* (2009) apresentam uma classificação denominada matriz produto-processo ou matriz volume-variedade com base em Hayes e Wheelwright (1979)<sup>11</sup>. Essa classificação baseia-se na constatação de que existe uma elevada correlação entre volume de produção e as características dos processos produtivos relacionados à variedade de saída. Ainda segundo Slack *et al.* (2009), a relação volume-variedade do produto influencia tanto na determinação dos objetivos de desempenho do sistema de produção e em suas atividades de projeto, como na abordagem utilizada para gerenciá-lo. Desta forma, cada tipo de sistema de produção implica uma forma diferente de organizar e gerenciar seus processos, de acordo com diferentes características de volume e variedade de produto.

---

<sup>11</sup>HAYES, R.; WHEELWRIGHT, S. Linking Manufacturing Process and Product Life Cycles. Harvard Business Review, v. 57, p. 133-140, 1979.

### 2.2.3 Sistemas de Manufatura

Black<sup>12</sup> *apud* Pasa (2004) distingue sistema de produção de sistema de manufatura. Os processos de manufatura são combinados para formarem seu próprio sistema, no qual recebem entradas e fabrica produtos para os consumidores. O mesmo afirma ainda que, o sistema produtivo inclui o sistema de manufatura e supre-o de suas necessidades. Portanto o sistema produtivo diz respeito a toda a empresa e inclui os sistemas fabris.

Sistema de manufatura é o conjunto de atividades e operações necessárias para a produção de produtos envolvendo os seguintes elementos: insumos, o processo de transformação e os produtos fabricados (MOREIRA, 2011).

De acordo com Palomino (2001), um sistema de manufatura, pode ser considerado como um sistema composto de vários subsistemas (processos produtivos) como transportadores, robôs, células de produção, máquinas operatrizes, etc, no qual cada subsistema realiza uma determinada operação produtiva, a qual pode ser uma transformação física (ex. usinagem, corte, estampagem) ou um deslocamento físico (carregamento, ou descarregamento de peças). Uma característica básica destes subsistemas é que por eles fluem diversos itens como peças, materiais, recursos, etc, que passam sequencialmente pelos subsistemas, onde transformações apropriadas são realizadas até obter o produto final requerido.

Antunes Júnior (1998) afirma que tanto os sistemas de manufatura quanto os sistemas de produção encontram-se inseridos dentro de uma ótica de sistemas abertos. Portanto, relacionam-se com o ambiente externo (de uma forma geral políticas governamentais, inserção política e cultural etc.) e com os clientes externos constituídos de elementos de entrada (materiais, energia, informação, etc.) e de saída (bens de consumo, valores, serviço ao cliente etc.). Dentro desta lógica, os sistemas são abertos e dinâmicos, ou seja, tanto o ambiente influencia o sistema quanto o sistema influencia o ambiente.

Assim o processo produtivo como um todo (sistema) é caracterizado pelo inter-relacionamento complexo de suas atividades e condições. Baseado na natureza discreta do inter-relacionamento entre atividades e condições, estes sistemas de manufatura podem ser definidos como sistemas de eventos discretos,

---

<sup>12</sup> BLACK, J. T. O Projeto da Fabrica com o Futuro. Porto Alegre: Bookman, 1998

com base em HO<sup>13</sup> APUD PALOMINO (2001), ou sistemas de produção discreta, com base em SILVA<sup>14</sup> APUD PALOMINO (2001).

Na Figura 2.6, Black *apud* Oliveira (2007) representa a definição de um sistema de manufatura (ou sistema de produção discreta).

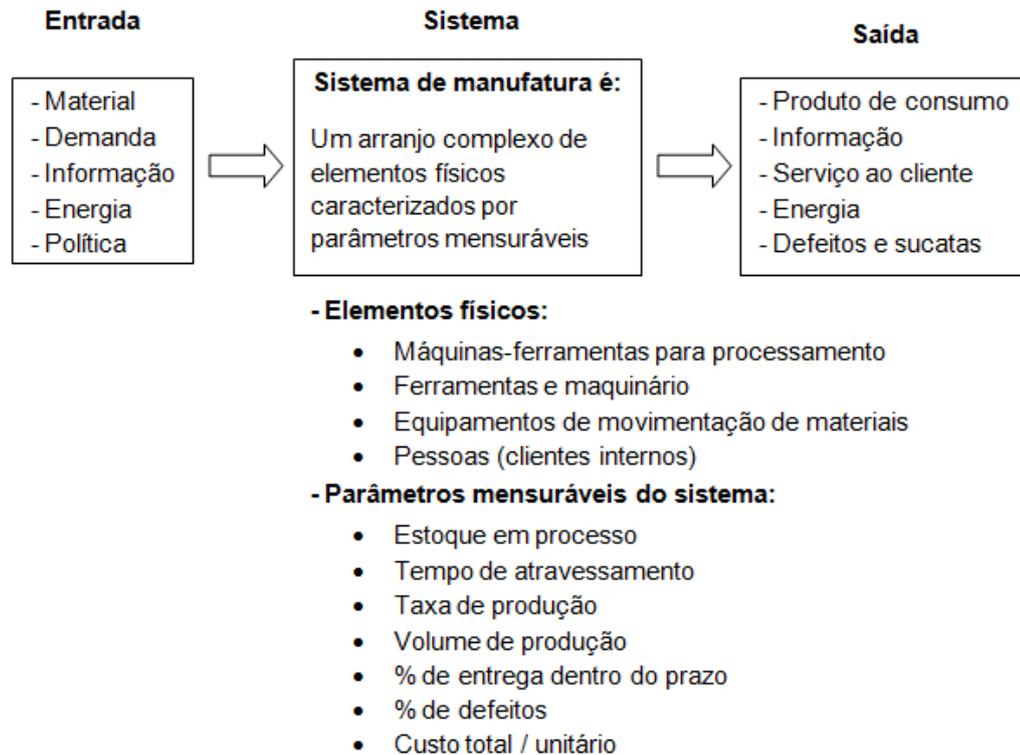


Figura 2.6 - Sistema de manufatura (Fonte: Black *apud* Oliveira, 2007).

Dicesare *et al*<sup>15</sup> *apud* Palomino (2001) fazem algumas considerações a cerca do sistema de manufatura como sendo um sistema de produção discreta:

- Sistema Físico, que é o conjunto de recursos que opera sobre a matéria prima e/ou sobre o trabalho em processo, como máquinas, células, sistemas de transporte, trabalhadores, dispositivos de armazenagem, estações de carga/descarga, estações de controle de qualidade, etc;

<sup>13</sup>HO, Y., C. Scanning the Issue: Dynamics of Discrete Event Systems. Proceedings of the IEEE, vol. 77, n. 1, pp. 3-6, jan. (1989).

<sup>14</sup>SILVA, Manuel and VALETTE, Robert, Petri Nets and Flexible Manufacturing, Lecture Notes in Computer Science, pp. 374-417, (1989).

<sup>15</sup>DICESARE, F.; HARHALAKIS, G.; PROTH, J. M.; VERNADAT, F. Pactice of Petris Nets in Manufacturing.chapman and hall, London, 1993.

- *Layout* de manufatura, que representa a forma como os recursos físicos são distribuídos no chão da fábrica e a conexão de um com o outro;
- Sistema de Gerenciamento, conhecido também como sistema de controle ou sistema de tomada de decisão.

Palomino (2001) descreve uma classificação comumente difundida na organização de um sistema de manufatura baseada em sistemas do tipo *flow-shop*, *job-shop* e as células de manufatura.

Um sistema produtivo do tipo *flow-shop* (fabricação em lotes) denominada linha de manufatura flexível, é projetado para tratar um volume de produção muito grande de uma única família de produtos, os quais diferem levemente um do outro. O grau de flexibilidade neste tipo de sistema é dado a partir da configuração das máquinas ferramentas que compõem a linha. Por outro lado, o tipo de sistema *job-shop* (fabricação por produto) apresenta uma grande flexibilidade, mas o volume de produção é pequeno e a variedade grande de produtos. Em virtude da grande complexidade de gerenciamento do fluxo de materiais e informações (já que para cada produto uma nova ordem de produção tem que ser feita) que este sistema apresenta, seu índice de produtividade é muito baixo se comparado com uma linha de produção do tipo *flow-shop* (PALOMINO, 2001).

As células de manufatura encontram-se numa situação intermediária entre os dois sistemas citados anteriormente, já que as mesmas permitem o agrupamento das peças em famílias de peças, segundo suas características de projeto. As células representam uma solução, no sentido de obter-se um sistema com bom índice de produtividade, associado com um maior grau de flexibilidade, se comparado com sistemas do tipo *flow-shop*. As células de manufatura podem ser definidas como sendo uma configuração de estações de trabalho e de um sistema de manuseio e transporte de materiais, sendo a mesma controlada por um computador para manufaturar eficientemente mais de um tipo de produto em pequenas e médias quantidades. As estações de trabalho são por ex. máquinas de comando numérico, robôs industriais, dispositivos especiais para operações de montagem, etc, ou combinações destes equipamentos (PALOMINO, 2001).

### 2.3 Balanceamento de Linhas de Produção

Para Davis, Aquilano e Chase (2001), uma linha de produção é constituída de um conjunto de postos de trabalho (estação de trabalho), locados de forma sequencial e interligados por algum meio de transporte, usualmente uma esteira transportadora. Tipicamente os postos encontram-se dispostos para que os produtos transitem ao longo da linha, sendo neles executadas as operações necessárias, em cada posto. Ao conjunto de operações executadas no produto na sequência correta de execução, dá-se o nome de gama operatória. Moreira (2011) acrescenta que a linha, representa o caso clássico do fluxo de operações em um sistema contínuo. Onde o produto (ou parte dele) é dividido em certo número de operações (ou tarefas) que devem ser distribuídas em postos de trabalho. Sendo o posto de trabalho, o espaço ocupado por uma ou mais pessoas neste fluxo de operações.

Em uma indústria, por exemplo, testar o funcionamento do produto é um posto de trabalho e o setor de embalagem do produto é outro. Se o teste de funcionamento anda mais rápido que o de embalagem do produto, ou seja, se gasta menos tempo unitário, pode-se compor uma estação de trabalho formada por vários postos de embalagem, visando equilibrar o sistema e fazer as duas estações terem tempos iguais ou aproximadamente iguais.

Scholl (1999) classifica as linhas de produção em três categorias baseados na consideração dos tipos de produtos a serem manufaturados: em situações em que há a produção em massa de um único modelo de produto, tem-se o tipo de linha de produção de modelo (produto) único (SALB – *Single model Assembly Line*); a linha de produção mista (MMAL – *Mixed Model Assembly Line*) é no caso em que há vários modelos de um produto básico são manufaturados na mesma linha de produção, sem a necessidade de *setup* das máquinas (ou com tempo de *setup* muito pequeno) entre modelos. Isto acontece quando há grande similaridade entre os modelos e o produto básico.e; quando existem diferenças significativas nos processos produtivos dos vários modelos, estes são produzidos por lotes para minimizar a ineficiência do tempo *setup* entre os modelos. Isto é, quando um lote completo é finalizado, é realizado o *setup* da linha e então se inicia a produção de um lote de outro modelo. Surge aqui o problema de dimensionamento destes lotes, procurando-se um lote de produção mínimo que compense o tempo de *setup*, maximizando as quantidades produzidas, estamos na presença de uma linha de

produção múltipla (MUAL – *Multi-model Assembly Line*). A Figura 2.7 ilustra a classificação mencionada.

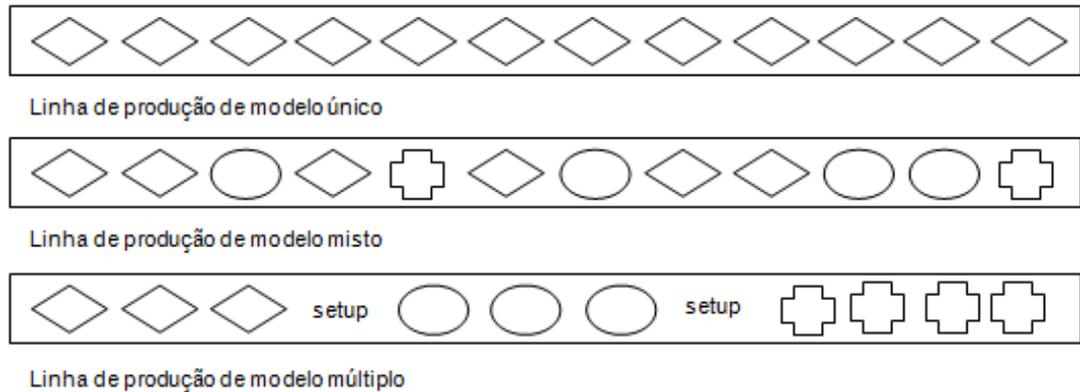


Figura 2.7 - Classificação das linhas de produção (Fonte: Scholl,1999).

Uma vez abordado sobre o que é uma linha de produção, introduz-se o conceito de balanceamento de linhas de produção. De acordo com Betts e Mahmoud (1989), o balanceamento de linha se refere à alocação de tarefas em estações de trabalho em uma linha produtiva tal que as restrições tecnológicas não sejam violadas e o trabalho útil executado.

Para McMullen e Frazier (1998), balanceamento de linha é o processo de organizar as tarefas necessárias para produzir um produto em subgrupos e atribuir a cada subgrupo a sua própria célula de trabalho.

Krajewski e Ritzman (2004) definem balanceamento de linha como a atribuição de trabalho a estações de uma linha de modo a obter o índice de produção desejado com o menor número de estações de trabalho. O balanceamento de linha deve ocorrer no início de instalação da linha ou quando necessário alterar seu índice de produção horário (rebalanceamento) ou quando se altera o produto ou processo, tendo como meta obter estações de trabalho com cargas de trabalho bem balanceadas. Moreira (2011) por sua vez, afirma que o trabalho deve ser dividido igualmente entre os postos de forma a atingir uma dada taxa de produção.

Na opinião de McMullen e Frazier (1998), as abordagens de balanceamento de linha têm explorado comumente dois objetivos. Sendo um objetivo, minimizar a quantidade de trabalho exigido na linha, dado um tempo de ciclo especificado. E outro objetivo é o de minimizar o tempo de ciclo, dado um determinado número de trabalhadores.

Boysen, Fliedner e Scholl (2007) citam alguns objetivos do balanceamento de linhas. Os mesmos relatam que a otimização de um balanceamento de linha de produção deve ser efetuada segundo um objetivo, segundo o qual as soluções devem ser avaliadas. Existem, porém casos em que a otimização é multiobjetivo, e então pode ser escolhido mais do que um objetivo do seguinte conjunto:

- Atividades com nível de unidade: desempenhadas a cada vez que uma unidade do produto é produzida;
- Minimização do número de postos de trabalho tendo em conta um determinado objetivo de produção, planeada para determinado horizonte temporal;
- Minimização do tempo de ciclo para um número de postos fixos, ou seja, maximizar a taxa de produção para um dado número de postos de trabalho;
- Maximização da taxa de utilização da linha de forma a que as restrições associadas à taxa de produção e/ou número de postos sejam respeitadas;
- Minimização dos custos para um *output* alvo de produção;
- Maximização do lucro, sendo o lucro a diferença entre as receitas e os custos;
- Além dos objetivos acima mencionados, os tempos dos postos de trabalho devem por vezes ser suavizados: ou quando se trata de produção do tipo modelos mistos, em que as variações causadas pela produção de diferentes modelos devem ser suavizadas ou quando os tempos dos postos são balanceados segundo todos os postos da linha (balanceamento vertical).

Um das principais características de uma linha de produção referem-se aos tempos de execução das tarefas. Quando a variação existente entre os tempos de execução de uma determinada tarefa é relativamente pequena, como em casos onde as tarefas são simples de serem realizadas ou há uma alta automação das estações de trabalho, os tempos de execução das tarefas são considerados determinísticos. Por outro lado, variações consideráveis nos tempos, as quais são atribuídas à instabilidade dos trabalhadores em relação à taxa de trabalho e a motivação, assim como a falta de sensibilidade para processos complexos, requer a

consideração de tempos estocásticos para a execução das mesmas. Além dos tempos de execução das tarefas, outras características podem ser atribuídas a uma linha de produção (BECKER E SCHOLL, 2003).

Boysen, Flidner e Scholl (2007) destacam a paralelização como ponto característico de uma linha de produção. Trata-se de paralelização quando se considera mais de uma linha a ser balanceada, ou o número de linhas a ser instalada faz parte do problema de decisão, ou quando é considerado o uso de postos paralelos (assim como a sua capacidade é duplicada, as operações a si associadas podem ser desempenhadas alternadamente). É considerada também paralelização quando uma tarefa é assinada a mais do que um posto, adicionalmente às tarefas que lhe estão associadas (cada posto executa as operações paralelas, alternadamente), ou quando diversas operações são executadas na mesma peça de trabalho, simultaneamente, sem que existam perturbações entre elas. Existe a possibilidade de não se considerar qualquer tipo de paralelização.

Outra característica, de acordo com Groover (2000), diz respeito ao sistema de transporte, este normalmente utilizado para mover o produto ao longo da linha, ao passo que essa se transforma em produto acabado. Do ponto de vista de Merengo, Nava e Pozzetti (1999), os sistemas de transporte utilizados nas linhas de produção podem ser separados em três categorias: transporte contínuo, onde a velocidade da linha é constante; transporte sincronizado, onde o dispositivo transportador movimenta-se em intervalos de tempo pré-determinados e; transporte não sincronizado, neste caso o dispositivo transportador se move de acordo com a velocidade do trabalhador para realizar determinada tarefa.

Em função da movimentação de peças de trabalho, têm-se as linhas do tipo *paced* (tempo regulado), em que um tempo de ciclo limita o tempo de operação do posto. Nesse caso, ou o conteúdo médio de trabalho de cada posto por ciclo em relação ao total de peças de trabalho está limitado pelo tempo de ciclo ou o tempo de ciclo é respeitado segundo uma determinada probabilidade ou proporção. Pode ainda existir o caso em que todos os postos e modelos devem respeitar um tempo de ciclo global ou em que são considerados tempos de ciclo locais, variando estes entrepostos de trabalho e modelo. Pode-se também considerar a existência de linhas *unpaced* (tempo não regulado) que não se encontram restritas a um tempo de ciclo. Em vez de isso, o trabalho avança quando as operações anteriores são

concluídas, ou num movimento não sincronizado de peças de trabalho (assim que um posto termina uma operação, a peça de trabalho é movida para o próximo posto ou para um *buffer*), ou num movimento sincronizado de peças de trabalho em que o mesmo se faz de forma coordenada entre os postos (as peças de trabalho só passam para o posto seguinte quando todas as operações são concluídas em cada um dos postos) (BOYSEN, FLIEDNER E SCHOLL, 2007).

### **2.3.1 Métodos de Solução do Problema de Balanceamento de Linha**

Ao analisar esta classificação do problema de balanceamento de linhas de produção bem como suas características, pode-se constatar que o problema em estudo é de produção de modelo misto (produção do lote de um de produto, *setup* e produção do lote de outro produto), em linha *unpaced* (tempo de ciclo não regulado), com estações não paralelas e com restrições de associação cujos objetivos são maximizar tanto a taxa de produção para um dado número de postos de trabalho fixos, quanto a taxa de utilização da linha de forma a que as restrições associadas à taxa de produção e/ou número de postos sejam respeitadas.

Conforme Becker e Scholl (2006), no problema de balanceamento de linhas de modelos mistos, o tempo de ciclo deixa de existir e passa a ser considerada a média dos tempos de operação em função de uma taxa de produção desejada. Merengo, Nava e Pozzetti (1999) sugerem então que os tempos dos postos sejam suavizados para cada posto. A esta suavização dá-se o nome de balanceamento horizontal.

O número de métodos heurísticos apresentados na literatura para a resolução do problema de balanceamento de linhas de modelo misto é reduzido, em comparação com o número de trabalhos publicados para a resolução do mesmo problema em linhas de modelo simples e de modelo múltiplo.

Smiderle, Vito e Fries (1997) afirmam que muito dos algoritmos desenvolvidos para resolução de problemas de balanceamento de linhas são baseados em métodos heurísticos. Isso ocorre devido à ineficiência dos métodos exatos do ponto de vista computacional, pois o elevado tempo de processamento dificulta a obtenção da solução ótima. Porém, muitos dos métodos heurísticos existentes possibilitam encontrar soluções próximas da ótima em tempos de processamento relativamente baixos. Com estas informações serão citadas alguns métodos de solução heurística de balanceamento de linhas.

### 2.3.1.1 Métodos Heurísticos

McMullen e Frazier (1997) propõem uma heurística que considera tempos de duração das tarefas estocásticos e com a possibilidade de utilizar estações de trabalho paralelas. A operacionalização do algoritmo consiste em transformar, primeiramente, o problema de modelo misto em um problema de modelo-simples, combinando os diagramas de precedências dos diferentes modelos num único diagrama e considerando os tempos médios de processamento de cada tarefa. Este algoritmo tem como objetivo, minimizar o número de estações de trabalho dado um determinado tempo de ciclo para linhas com altas taxas de produção.

Vilarinho e Simaria (2002) propõem um modelo para balanceamento de linhas de produção de modelo misto, o qual admite postos paralelos e restrições de zoneamento. Este algoritmo permite minimizar o número de postos de trabalho para um dado tempo de ciclo e, simultaneamente, equilibrar as cargas de trabalho dos modelos entre as diversas estações e, dentro de cada estação para os vários modelos. Prevê a aplicação de uma heurística à qual se dá o nome de RPW (*Rank Positional Weight*). A partir desta heurística é obtida a solução inicial e, em seguida são determinadas as soluções vizinhas através de troca e transferência até se obter a solução final.

Gerhard, Fogliatto e Cortimiglia (2007) propõem uma metodologia para o balanceamento de linhas de produção de modelo misto em ambientes de customização em massa. A metodologia é uma heurística com vários passos. Em primeiro lugar é usado o método do diagrama equivalente proposto por Thomopoulos (1970), sendo posteriormente aplicado o algoritmo de Vilarinho e Simaria (2002) para efetuar o balanceamento. Este algoritmo apresentou bons resultados, tendo aumentado a produtividade da linha em que foi implementada em 31%. Este algoritmo, embora eficiente não prevê as restrições de associação nem o fato da linha ser do tipo *unpaced*.

Fonseca (2011) propôs um sistema integrado de balanceamento de linhas de produção de modelo misto destinado à indústria de calçados a partir do desenvolvimento de duas heurísticas complementares e um simulador. Foram também desenvolvidos modelos matemáticos de otimização de forma a balizar e avaliar os resultados obtidos. Com sua implementação, obtiveram resultados satisfatórios, uma vez que o sistema propiciou a distribuição das operações pelos

operadores, garantindo que todos os operadores trabalhassem nas mesmas proporções.

### **2.3.1.2 Métodos de simulação e de apoio à decisão**

Driscoll e Abdel-Shafi (1985) apresentam um sistema de apoio à decisão que realiza o balanceamento de linhas de modelo simples e modelo misto, utilizando a heurística do peso posicional e considerando a variabilidade dos tempos de processamento. Através de um modelo de simulação, o sistema avalia o impacto, nas soluções de balanceamento encontradas, da variação de alguns fatores como: a velocidade da linha; a possibilidade de os operadores se deslocarem para estações adjacentes e; o *mix* de produção.

Roy e Allchurch (1996) desenvolvem um sistema de apoio à decisão, aplicado a um caso da indústria automobilística, que incorpora o conhecimento utilizado pelo agente de decisão no balanceamento das linhas de montagem. O procedimento de balanceamento consiste em dividir as tarefas em várias categorias, segundo a sua importância para a estrutura do balanceamento e considerando restrições de zona de incompatibilidade, simular as tarefas em grupos ao longo da linha, e melhorar o balanceamento da linha ao nível da utilização dos operadores, através de trocas e transferências de tarefas.

McMullen e Frazier (1998) apresentaram uma metodologia que faz uso da simulação para analisar algumas medidas de desempenho da linha, tais como: o nível médio de existências em curso de fabrica; o tempo médio de fluxo; o número de unidades produzidas; o custo médio unitário da mão-de-obra; a utilização do sistema e; os tempos de ciclo obtidos. Os problemas analisados contemplam o balanceamento de linhas de modelo-simples e de modelo-misto, com tempos de processamento estocásticos e com a possibilidade de formação de postos paralelos tal como é descrita em McMullen e Frazier (1997). São testadas 23 heurísticas para a obtenção das soluções de balanceamento e, através dos resultados da simulação, é possível identificar aquelas que melhor se adéquam ao sistema em questão.

## **2.4 Modelagem e Simulação Computacional**

A modelagem tem como princípio básico o uso de representações simbólicas para uma melhor compreensão das interações entre as várias partes de um sistema. E a simulação é um processo de experimentação com um modelo detalhado de um

sistema real para determinar como o sistema responderá a mudanças em sua estrutura, ambiente ou condições de contorno (HARREL *et al.*, 2002).

A modelagem e simulação é o processo de criar e experimentar um sistema físico através de um modelo matemático computadorizado. Um sistema pode ser definido como um conjunto de componentes ou processos que se interagem e que recebem entradas e oferecem resultados para algum propósito (CHUNG, 2004).

De acordo com Schriber<sup>16</sup> *apud* Freitas Filho (2008), simulação implica na modelagem de um processo ou sistema, de tal forma que o modelo imite as respostas do sistema real numa sucessão de eventos que ocorrem ao longo do tempo.

Schriber *apud* Freitas Filho (2008) ainda, não especifica que o modelo deva ser computacional. O motivo é que, na época, ainda era comum a utilização de modelos analógicos e físicos para se estudar e analisar o comportamento de sistemas. Hoje, simulação é quase sinônimo de simulação computacional digital, na qual um modelo computacional é executado. Shannon<sup>17</sup> *apud* Freitas Filho (2008) definiu esse tipo de modelo, como um programa de computador cujas variáveis apresentam o mesmo comportamento dinâmico e estocástico do sistema real que representa.

Pegden *et al.*(1995) em sua definição, abrangem todo o processo de simulação: “simulação é o processo de projetar um modelo computacional de um sistema real e conduzir experimentos com este modelo com o propósito de entender seu comportamento e/ou avaliar as estratégias de operação”. Essa linguagem também é compartilhada pelos autores Law e Kelton (2000), Harrell *et al.* (2000) e Banks *et al.*(2005).

Como se observa, Pegden *et al.*(1995) entendem simulação como um processo mais amplo, compreendendo não somente a construção do modelo, mas também, todo o método experimental que se segue, buscando: descrever o comportamento do sistema; construir teorias e hipóteses considerando as observações efetuadas e; usar o modelo para prever o comportamento futuro, isto é,

---

<sup>16</sup>SCHRIBER, T. J. Simulation Using GPSS, Wiley, NY, 1974.

<sup>17</sup>SHANNON, R.E. Systems Simulation: The Art and Science, Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1975.

os efeitos produzidos por alterações no sistema ou nos métodos empregados em sua operação.

Para Banks (2000), a simulação envolve a criação de uma história artificial da realidade e com base nela são realizadas observações e inferências nas características de operação do sistema real representado. A conceituação da transformação da realidade em modelo e novamente dos resultados em realidade é esquematizada na Figura 2.8.

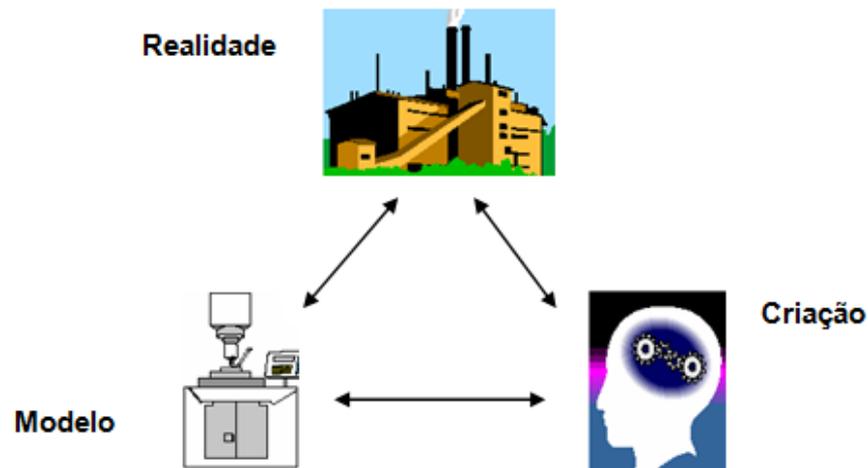


Figura 2.8 - Transformação da realidade em modelo (Fonte: Banks, 2000).

De acordo com Pidd (1998), um modelo pode ser definido como uma representação externa e explícita de parte da realidade vista pela pessoa que deseja usar aquele modelo para entender, mudar, gerenciar e controlar parte daquela realidade. Banks (2000) salienta que, apesar de um modelo ser uma representação simplificada de um sistema em estudo, deve conter detalhamento suficiente para que possa ser utilizado como uma representação válida.

Sakaruda e Miyake (2009) recomendam que em processo de modelagem deve inicialmente buscar uma clara compreensão da estrutura e dinâmica do sistema real a ser simulado e somente então avançar para a derivação dos procedimentos experimentais que possibilitarão analisar seu comportamento.

Pereira (2000), por sua vez, relata que quando os modelos de simulação representam o sistema sem levar em conta sua variabilidade com o tempo, ou seja, é uma representação do sistema congelado num determinado momento, é dito **estático**. O modelo é **dinâmico**, quando representa o sistema a qualquer tempo, a

exemplo dos modelos que representam uma linha de produção durante um turno de oito horas.

Os modelos de simulação também podem ser determinísticos ou estocásticos. Os modelos são **determinísticos** quando as variáveis que dão entrada que representam o sistema assumem valores exatos, assim, os resultados desse tipo de simulação serão sempre os mesmos independentemente do número de replicações que se fizer para o modelo. O modelo **estocástico** permite que se dê entrada com uma coleção de variáveis que podem assumir diversos valores dentro de uma distribuição de probabilidades, distribuição esta que pode ser definida pelo modelador. Os resultados gerados pelos modelos estocásticos são diferentes a cada replicação, em razão da natureza aleatória das variáveis que dão entrada no modelo (PEREIRA, 2000).

Segundo Seila (1995), um sistema é um conjunto de componentes ou entidades interativas. Esses sistemas podem ser discretos ou contínuos, ou uma combinação de ambos. Os sistemas **discretos** são aqueles em que as variáveis envolvidas assumem valores finitos ou infinitos numeráveis (por exemplo, peças que chegam a uma máquina) e os sistemas **contínuos** são aqueles em que as variáveis mudam continuamente no tempo (por exemplo, quilômetros rodados pelos caminhões na simulação de um sistema logístico). Neste caso, as linguagens de simulação devem estar em condições de resolver sistemas de equações diferenciais. Nas simulações de eventos discretos os programas são dotados de um relógio, que é inicializado com o evento ao qual está vinculado e avança até que o próximo evento esteja programada (PEREIRA, 2000).

Vale ressaltar o fato que poucos sistemas, na prática, são totalmente discretos ou totalmente contínuos, sendo comum durante a modelagem considerar o modo predominante de ocorrência dos eventos no sistema (LAW E KELTON, 2000).

Quanto à simulação, Pereira (2000) classifica de simulação **terminante** e **não terminante**. Simulação terminante é aquela em que se está interessado em estudar o comportamento do sistema num dado intervalo de tempo de simulação. Quando se está interessado em estudar o sistema a partir do momento em que o mesmo atingir um estado estável, a simulação é dita não terminante.

Segue a Tabela 2.1, que resume a relação entre sistema, modelo e simulação.

Tabela 2.1 - Relação entre sistema, modelo e simulação (Fonte: Pereira, 2000).

<b>SISTEMA</b>	<b>MODELO</b>		<b>SIMULAÇÃO</b>
<b>Discreto:</b> variáveis envolvidas assumem valores finitos ou infinitos numeráveis.	<b>Determinístico:</b> variáveis assumem valores determinados.	<b>Estático:</b> estuda o sistema sem levar em conta sua variabilidade com o tempo.	<b>Terminante:</b> há interesse em se estudar o sistema num dado intervalo de tempo.
<b>Contínuo:</b> variáveis mudam constantemente com o tempo.	<b>Estocástico:</b> variáveis assumem valores diversos segundo uma determinada distribuição de probabilidades.	<b>Dinâmico:</b> representa o sistema a qualquer tempo.	<b>Não Terminante:</b> há interesse em estudar o sistema a partir de um determinado estado estável, podendo o estudo prolongar-se indefinidamente.

#### 2.4.1 Simulação a Eventos Discretos

Nance (1993) divide a simulação computacional em 03 partes principais: simulação de Monte Carlo, a simulação contínua e a simulação a eventos discretos. A simulação de Monte Carlo utiliza modelos de incerteza onde a representação do tempo é desnecessária. O Método de Monte Carlo envolve amostragem experimental, sendo utilizado para geração de números aleatórios, em modelos de simulação. Por outro lado, a simulação contínua usa modelos envolvendo equações, frequentemente de modelos físicos, apresentando descontinuidades, uma vez que não requerem representação explícita de estado.

A simulação de eventos discretos utiliza um modelo lógico / matemático de um sistema físico que retrata as mudanças de estado em pontos precisos do tempo simulado. Tanto a natureza da alteração de estado quanto o momento em que a mudança ocorre possui descrição precisa. Clientes à espera de serviço, a gestão de inventário de peças ou de combate militar são domínios típicos de simulação de eventos discretos (NANCE, 1993).

Esse tipo de simulação de abrange o estudo de modelos de simulação cujas variáveis mudam de estado instantaneamente em pontos específicos de tempo. Em outras palavras, na simulação discreta as variáveis de estado mudam de forma não continua no tempo, ou seja, sofrem mudanças bruscas.

Em processos de criação de modelos discretos, Soares (2009) afirma:

“Os objetos em um sistema discreto são chamados de entidades. Existem vários tipos de entidade e cada um tem vários tipos de características ou **atributos**. Embora possam estar envolvidas em diferentes tipos de atividades, pode ser conveniente agruparmos as entidades baseados em um atributo comum. Grupos de entidades são chamados arquivos ou conjuntos” (SOARES, 1992).

Quanto aos objetivos do modelo em simulação discreta, Soares (2009) discorre:

“O objetivo de um modelo para simulação discreta é reproduzir as atividades das entidades engajadas e, a partir daí, conhecer algo sobre o comportamento e desempenho do sistema. Isto é conseguido quando definimos os estados do sistema e construímos atividades que o movem de um estado a outro. O estado de um sistema é definido em termos de valores numéricos dados aos atributos das entidades. Um sistema está em determinado estado, quando todas as suas entidades estão em estado consonantes com o domínio dos valores dos atributos que definem aquele estado” (SOARES, 1992).

Segundo Soares (1992), em simulação discreta, o estado do sistema muda somente nos tempos de evento. Isto em decorrência do estado do sistema permanecer constante entre tempos de eventos. O mesmo afirma ainda a descrição completa do estado do sistema pode ser obtida mediante avanço do tempo simulado.

O mesmo autor ainda cita as três formas de formulação de um modelo para simulação discreta: pela definição das mudanças nos estados que podem ocorrer em cada tempo de evento; pela descrição das atividades nas quais as entidades do sistema se envolvem; pela descrição do processo através do qual as entidades do sistema fluem.

Quanto às relações entre evento, processo e atividade. O mesmo conclui que um evento acontece em um ponto isolado no tempo, onde decisões devem ser tomadas de forma a iniciar ou terminar uma atividade. E que um processo é uma sequência ordenada de eventos e pode envolver várias atividades (SOARES, 1992).

A Figura 2.9 ilustra as relações entre os conceitos de atividade, evento e processo.

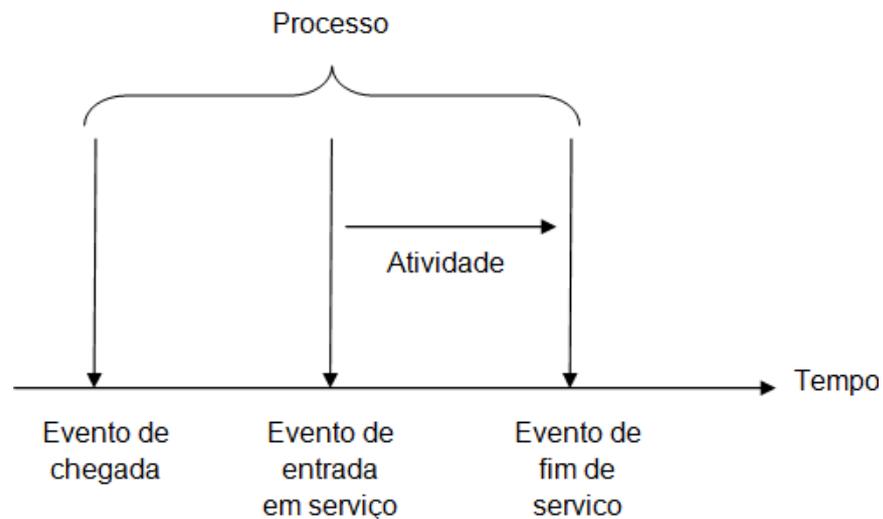


Figura 2.9 - Relações entre evento, processo e atividade (Fonte: Soares, 1992).

Na simulação orientada a evento, um sistema é modelado pela definição das mudanças que ocorrem no tempo de evento. Cabendo ao modelador a tarefa de determinar os eventos que podem causar a mudança no estado do sistema e então desenvolver a lógica associada com cada tipo de evento. A simulação do sistema é produzida pela lógica associada a cada evento, em uma sequência ordenada no tempo (SOARES, 1992).

Por outro lado, o tipo de simulação orientada ao exame de atividade, o modelador descreve as atividades nas quais as entidades do sistema estão engajadas e prescreve as condições que causam o início e o fim de uma atividade. Os eventos que iniciam ou terminam uma atividade não são escalonados pelo modelador, mas iniciadas a partir das condições especificadas para atividade. À medida que o tempo simulado avança as condições para o início ou fim de uma atividade são examinadas. No sentido de assegurar que cada atividade seja levada em consideração, é necessário examinar todo o conjunto de atividades a cada avanço do tempo (SOARES, 1992).

Muitas estruturas de modelos para simulação incluem sequências de eventos as quais ocorrem em padrões definidos. A lógica associada com tal sequência de eventos pode ser generalizada e definida por uma única afirmação. Uma linguagem para simulação pode então traduzir tal afirmação na sequência de eventos associada. Uma linguagem orientada a processo emprega tais afirmações para

modelar o fluxo das entidades no sistema. Tais afirmações definem uma sequência de eventos que é automaticamente executada pela linguagem de simulação (SOARES, 1992).

Em resumo, a simulação orientada a processo combina a simulação orientada a evento com as simulações orientado ao exame de atividades. Onde a simplicidade da simulação orientada por processo reside no fato de a lógica dos eventos associada as informações estar contida na linguagem de simulação.

#### 2.4.1.1 Elementos Utilizados em Simulação a Eventos Discretos

Harrell *et al.* (2000) em sua pesquisa listaram os elementos de um sistema para fins de simulação, sendo o seguinte:

**Variáveis de estado:** são as variáveis cujos valores determinam o estado de um sistema. Constituem o conjunto de informações necessárias à compreensão do que está ocorrendo no sistema (ou no modelo representando esse sistema) num determinado instante no tempo, com relação aos objetos em estudo.

**Entidades:** representa um objeto que necessita de uma clara e explícita definição. São itens processados através do sistema tais como produtos, clientes e documentos.

**Atividades:** em simulação diz-se que atividades correspondem às tarefas realizadas no sistema que estão direta ou indiretamente envolvidas no processamento das entidades.

**Recursos:** um recurso é considerado uma entidade estática que fornece serviços às entidades dinâmicas. São os meios pelos quais as atividades são realizadas. Eles fornecem as instalações de apoio, equipamentos e pessoal para a condução das atividades.

**Atributos:** características únicas de cada entidade que possibilitam sua identificação no sistema analisado.

**Filas:** locais de armazenagem da simulação, onde as entidades esperam para serem processadas no sistema. As filas surgem pela espera de entidades por recursos disponíveis ou mesmo pela competição por recursos por parte das entidades. Depois de dar entrada na fila a entidade é retirada seguindo algum tipo de critério, por exemplo, FIFO (*first in first out*), LIFO (*last in first out*), HVF (*high value first*), LVF (*lower value first*) ou um critério aleatório.

**Variáveis globais:** variáveis disponíveis para todo o modelo por todo o tempo.

**Gerador de números aleatórios:** presente em todo pacote de simulação. O gerador de número aleatório (gerador de número pseudo-aleatório) consiste em uma rotina que gera um número aleatório entre 0 e 1 usado para amostragem de distribuições aleatórias.

**Calendário:** corresponde a uma lista de eventos que são programados para ocorrer no futuro.

**Estado do sistema:** inclui entidades, valores de todos seus atributos, seus relacionamentos e quaisquer outras variáveis do sistema que possam ser definidas.

**Coletores de estatísticas:** responsáveis pela coleta de estatísticas em certos estados ou de valor de variáveis globais ou algumas estatísticas de desempenho baseadas em atributos de entidades.

E por fim, têm-se os conceitos de eventos e controle que embora já foram citados anteriormente, é relevante citar suas adequações ao conceito de simulação.

#### 2.4.2 Justificativa da Modelagem e Simulação

O desenvolvimento de sistemas dinâmicos complexos tem levado a necessidade de se avaliar antecipadamente o seu comportamento em face de mudanças e, no caso de sistemas em desenvolvimento, o seu funcionamento. Contudo, esses sistemas são complexos demais para serem modelados de forma analítica e a obtenção de soluções torna-se inviáveis seja por causa do custo seja por causa da complexidade matemática.

A simulação permite modelar também a interdependência e a aleatoriedade dos sistemas. Segundo Harrell *et al.* (2000): “a simulação fornece um meio para validar se as melhores decisões estão sendo tomadas e evita as caras técnicas de tentativa e erro que são demoradas e de natureza interrompedoras”.

O principal apelo ao uso dessa ferramenta, é que tais questões podem ser respondidas sem que os sistemas sob investigação sofram qualquer perturbação, uma vez que os estudos são realizados no computador. A simulação computacional permite que tais estudos sejam realizados sobre sistemas que ainda não existem, levando ao desenvolvimento de projetos eficientes antes que qualquer mudança física tenha sido iniciada (FREITAS FILHO, 2008).

Freitas Filho (2008) afirma ainda que, tanto o desenvolvimento quanto a experimentação dos modelos simulados objetivam o encaminhamento de uma solução a um dado problema. As razões mais comuns para experimentar-se com modelos simulados são as seguintes:

- O sistema real ainda não existe: nesse caso a simulação poderá ser usada para planejar o futuro sistema;
- Experimentar com sistema real é dispendioso: o modelo poderá indicar, com muito menos custo, quais os benefícios de se investir em um novo equipamento, por exemplo;
- Experimentar com o sistema real não é apropriado: um caso típico é o planejamento para atender a um determinado *mix* de produção. Não se pode, por exemplo, modificar o arranjo físico do *layout* de fábrica só para testar esse novo plano.

Pidd (1998) apresenta algumas vantagens da simulação em contraste a experimentação direta:

- Custo: a simulação apresenta grande economia no uso de recurso e de mão-de-obra, e isto se torna mais evidente quando ocorre algo de errado com a experimentação direta;
- Tempo: embora a elaboração de um modelo computacional demande tempo, uma vez feita, é possível simular semanas, meses e até anos em pouco tempo no computador;
- Replicação: no mundo real é muito difícil assegurar as mesmas condições para replicar uma experimentação direta, o que não ocorre com a simulação, que é precisamente replicável;
- Segurança: somente através da simulação é possível observar o comportamento do sistema em condições extremas de funcionamento sem pôr em risco a vida de pessoas, a segurança pública e a do próprio negócio;
- Legalidade: somente a simulação pode resolver questões que não podem ser experimentadas devido a proibição legal, como diminuição de carga horária ou o uso de equipamentos ou combustíveis não permitidos.

### 2.4.3 Metodologias de Modelagem e Simulação

Durante a fase de revisão bibliográfica, foram identificadas cinco metodologias possíveis de serem aplicadas neste trabalho, sendo compostas de diversas e distintas fases ou etapas. Estas fases constituintes de um projeto de simulação apresentadas pelos autores pesquisados, tem em comum a identificação do problema, construção de um modelo, teste de validação do modelo, a obtenção da solução e a implementação da solução obtida.

Law e Kelton (2000) mostraram uma sequência típica para o estudo da simulação com uma sequência lógica do fluxo de trabalho e o inter-relacionamento entre as fases, onde a etapa anterior precisa estar pronta para passar a execução da posterior. A metodologia é composta por 10 etapas:

- Formulação do problema e o plano de estudo;
- Definição do modelo e coleta de dados;
- Validação dos dados;
- Construção do modelo computacional e verificação;
- Teste da programação;
- Validação da programação;
- Teste do modelo;
- Teste com os dados reais;
- Análise dos dados de saída;
- Implementação dos resultados e documentação.

Lobão e Porto (1997) apresentaram uma proposta intitulada *Roteiro para Sistematização de Estudos de Simulação*, constituída de uma sequência de 10 etapas destinadas à condução de um projeto de simulação. São elas:

- Definição do problema e dos objetivos;
- Elaboração de um esboço do modelo;
- Aquisição de dados;
- Verificação da consistência dos dados;
- Construção de um modelo;
- Verificação da consistência do modelo;
- Projeto de experimentos;
- Execução dos experimentos;
- Verificação dos resultados;

- Interpretação dos resultados e documentação do processo.

Banks (2000) propõe uma metodologia mais detalhada e composta por 12 etapas com vista ao sucesso de um projeto de simulação. As etapas estão descritas a seguir:

- Formulação do problema;
- Definição dos objetivos e planejamento do projeto;
- Construção do modelo;
- Coleta de dados;
- Programação do modelo;
- Verificação;
- Validação;
- Projeto de Experimento;
- Rodar o modelo e análise;
- Mais rodadas do modelo;
- Documentação do modelo e relatórios;
- Implantação.

A proposta de Harrell *et al.* (2002), está estruturada em 12 etapas. Os mesmos alertam que a etapa de construção da estrutura do modelo no computador é somente uma das etapas do projeto de simulação e que o projeto de simulação não pode ser bem conduzido sem um apropriado delineamento. Na fixação do problema os autores recomendam que o modelo deve ser dimensionado de maneira tal, que contenha somente as partes do sistema fundamentais para que se chegar às respostas pretendidas, desta forma, se evitaria os elevados custos de modelagem e se obteria maior velocidade de resposta. Na etapa de implementação os autores alertam que se o usuário esteve permanentemente envolvido no estudo de simulação, e se manteve permanentemente informado, haverá muito maior probabilidade de que a solução seja efetivada. Segue a descrição das etapas:

- Formulação do problema;
- Estabelecimento dos objetivos;
- Formulação e planejamento do modelo;
- Coleta de dados;
- Desenvolvimento do modelo
- Verificação;

- Validação;
- Experimentação;
- Análise dos resultados;
- Mais rodadas de experimentações;
- Documentação e apresentação;
- Implementação.

Chwif (1999), em sua tese de doutorado intitulada - *Redução de modelos de simulação de eventos discretos na sua concepção: uma abordagem causal* - propôs uma metodologia simplificada para realização de um projeto de simulação. Essa metodologia é estruturada em três macros etapas:

- **Concepção:** nesta etapa tem-se o entendimento e definição do sistema a ser simulado. A partir disso, são coletados os dados de entrada, posteriormente, o tratamento dos mesmos. Dando sequencia, faz-se uma abstração do modelo para então resultar num modelo conceitual;
- **Implementação:** tendo como base o modelo conceitual é desenvolvido, é desenvolvido o Modelo Computacional utilizando um *software* de simulação comercial. O modelo computacional deve então ser comparado frente ao modelo conceitual para sua avaliação, ou seja, se o modelo está condizente com o sistema real. Durante este procedimento são feitas as validações (relativo ao modelo) e as verificações (relativo ao comportamento do modelo no computador);
- **Análise** – uma vez finalizado o modelo computacional, parte-se para a realização dos experimentos. Temos então o Modelo Experimental. A partir desse momento, são realizadas várias “rodadas” no simulador e analisados os resultados. Caso seja necessário, fazem-se alguns ajustes no modelo computacional e reinicia as “rodadas”. Após as análises dos resultados, conclusões e recomendações sobre o sistema poderão ser registradas.

#### 2.4.4 Mapeamento (modelagem) de Processos

Para Shingo (1996), um processo pode ser visualizado como o fluxo de materiais no tempo e no espaço dentro de um mecanismo de transformação de matéria-prima em componentes semiacabados e destes em produto acabado.

Segundo Krajewski e Ritzman (2004), um processo é uma atividade ou grupo de atividades que tomam uma ou mais entradas e agregam valor a estas, provendo uma saída ao consumidor. O tipo de processo pode variar. Por exemplo, em uma fábrica um processo poderia ser uma transformação química ou física de uma matéria-prima tornando-se um produto. Em uma empresa de transporte aéreo, poderia ser o transporte dos passageiros e de sua bagagem de uma localidade para outra.

Na opinião de Vilela (2000), processo é uma ordenação específica das atividades de trabalho no tempo e no espaço, com um começo e um fim identificados, assim como as entradas e saídas. Segundo o mesmo, os processos seguem uma hierarquia: iniciando pelo macroprocesso; depois o processo; subprocessos; atividades e; finalizando na tarefa.

Macroprocesso: processo que envolve mais de uma função na estrutura organizacional, e a sua operação tem um impacto significativo no modo como a organização funciona;

Processo: conjunto de atividades sequenciais (conectadas), relacionadas e lógicas que tomam uma entrada do fornecedor, acrescentam valor e entregam uma saída para um cliente;

Subprocessos: uma parte inter-relacionada de forma lógica com outro subprocesso, realizando um objetivo específico em apoio ao macroprocesso e contribui para o objetivo deste;

Atividades: são elementos do processo ou subprocesso. Geralmente são desempenhadas por uma unidade (pessoa ou departamento) para produzir um determinado resultado. Estas atividades podem ser classificadas como:

- Atividades com nível de unidade: desempenhadas a cada vez que uma unidade do produto é produzida;
- Atividades com nível de lote: atividades desempenhadas cada vez que um lote de produtos é fabricado. O *setup* de uma máquina é exemplo de uma atividade com nível de lote;

- Atividades com nível de produtos: atividades desempenhadas para cada linha de produtos. Um exemplo seriam as atividades da área de projeto e marketing dos produtos.

**Tarefa:** Constitui o micro enfoque do processo, podendo ser um único elemento ou um subconjunto de uma atividade.

Mapeamento de processos é a descrição de processos em termos de como atividades relacionam-se umas com as outras dentro de um processo (SLACK *et al.*, 2009).

O mapeamento de processo constitui em uma ferramenta gerencial, analítica, que possibilita melhoria nos processos existentes ou implanta uma nova estrutura voltada para os processos (VILELLA, 2000).

Oliveira (2003) analisa o mapeamento de processo como um ferramental gerencial e que tem a função de documentar, analisar e desenvolver um plano de melhoria nos processos existentes ou possibilitar a implantação de uma nova estrutura voltada para os processos. Analisa ainda o mapeamento do processo como uma representação gráfica, o qual mostra como os recursos de entrada são processados e transformados em saídas, destacando-se a relação e a conexão entre cada atividade.

Pavani Júnior e Scucuglia (2011) tratam o mapeamento de processos como sinônimo da modelagem de processos e afirma que a tarefa de modelar/mapear trata-se do trabalho de representar graficamente (por meio de mapas, fluxos ou diagramas) a sequência de atividades que compõem um processo a ponto de ser compreensível a quem de direito (as partes interessadas), que podem ser desde o alto escalão da companhia até a equipe de programação de sistemas, passando pelos envolvidos no processo e pelos próprios analistas.

Slack *et al.* (2009) afirmam haver muitas técnicas que podem ser usadas para documentar processos e que todas elas, entretanto, têm duas características: mostram o fluxo de materiais ou pessoas ou informações por meio de operações produtivas e identificam diferentes atividades que ocorrem durante o processo.

Pavani Júnior e Scucuglia (2011) citam algumas técnicas utilizadas na documentação de processos: fluxogramas; *business process management notation* - BPMN; raiais; *business process execution language* – BPEL; *event process chain* – EPC; *unified modeling languages* – UML; *integrated definition methods*- IDEF-0; *line of visibility engineering method* – enhanced – LOVEM-E; *suppliers-inputs-process-*

*outputs-consumers* – SIPOC; *systems dynamics*; *value stream mapping* e, cadeia de valor.

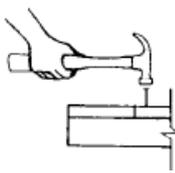
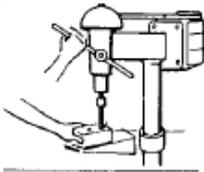
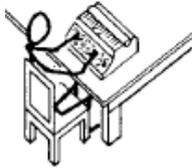
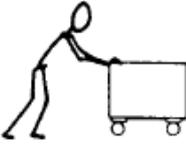
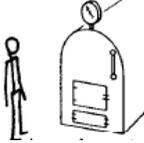
Krajewski e Ritzman (2004) limitam apenas em três técnicas eficazes para documentar um processo: fluxograma de processo, mapas de processo e simulação.

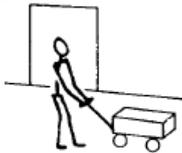
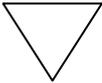
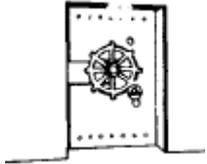
O fluxograma do processo é uma técnica para registrar o processo de uma maneira compacta e de fácil visualização e entendimento. Usualmente o fluxograma inicia-se com a entrada da matéria-prima na fábrica ou célula e segue o caminho da fabricação do produto, passando pelas operações de transformação, transporte e inspeção até a sua saída como produto acabado (BARNES, 1986).

Este tipo de técnica documenta o fluxo e as diversas atividades usando símbolos diferentes para identificar os diferentes tipos de atividades, permitindo detalhar mais o projeto e sua avaliação (SLACK *et al.*, 2009).

A Tabela 2.2 contém a simbologia proposta por Barnes (1986) e mostra também alguns exemplos das atividades relativas.

Tabela 2.2 – Simbologia para fluxo de processos. (Fonte: Barnes, 1986)

SIMBOLOGIA	EXEMPLOS		
<p>Operação</p>  <p>Um círculo maior indica uma operação como</p> 	 <p>Pregar</p>	 <p>Furar</p>	 <p>Datilografar</p>
<p>Transporte</p>  <p>Uma seta indica um transporte como</p> 	 <p>Mover material com carrinho de mão</p>	 <p>Mover material com guindaste ou elevador</p>	 <p>Mover material carregando (mensageiro)</p>
<p>Inspeção</p>  <p>Um quadrado indica uma inspeção como</p> 	 <p>Examinar um material quanto à qualidade ou quantidade</p>	 <p>Ler manômetro do vapor da caldeira</p>	 <p>Examinar um folheto para obter informações</p>

<p>Espera</p>  <p>Uma letra D indica uma espera como</p> 	 <p>Material no carrinho ou no chão, ao lado da bancada aguardando processamento</p>	 <p>Operador aguardando elevador</p>	 <p>Papéis aguardando arquivamento</p>
<p>Armazenamento</p>  <p>Um triângulo indica um armazenamento como</p> 	 <p>Armazenamento a granel de matéria-prima</p>	 <p>Produto acabado no armazém</p>	 <p>Documentos e registros guardados no cofre</p>

Tem-se a combinação de símbolos, segundo Rosa (2002), essa combinação é permitida quando as atividades são executadas no mesmo local ou simultaneamente como atividade única. A Figura 2.10 ilustra a combinação de símbolos.

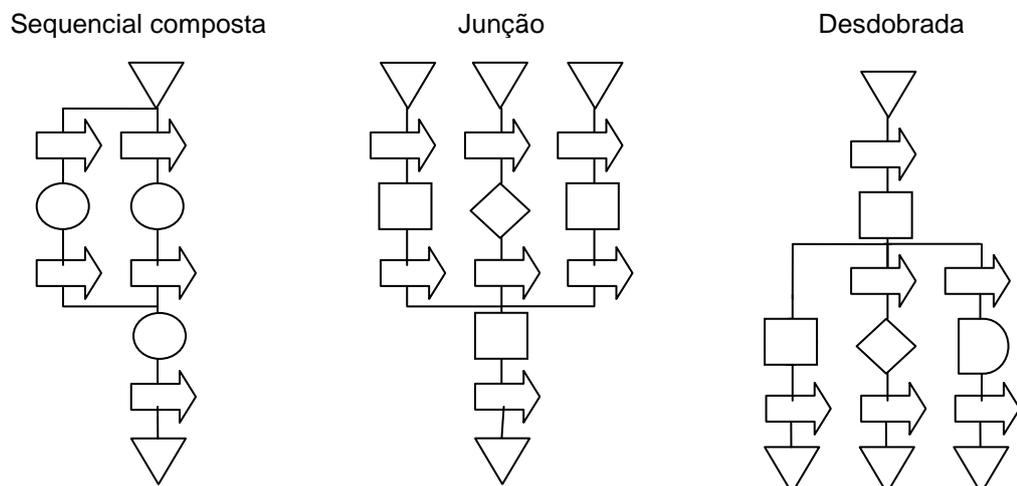


Figura 2.10– Configurações básicas do fluxograma de processo (Fonte: Rosa, 2002).

De acordo com Barnes (1986), o mapofluxograma é o fluxograma desenhado sobre a planta de uma edificação ou o *layout* para visualizar-se melhor o processo. Para Rosa (2002), o mapofluxograma complementa o fluxograma do processo, sendo a transposição do fluxograma sobre a planta em escala da fábrica ou oficina onde se realizará o processo. Conforme Leal (2003), a grande vantagem do mapofluxograma é a possibilidade de visualizar o processo atrelado ao *layout* da área. Este fator favorece, sobretudo aos transportes, que podem ter suas rotas

definidas no mapofluxograma. A Figura 2.11 apresenta um exemplo de mapofluxograma.

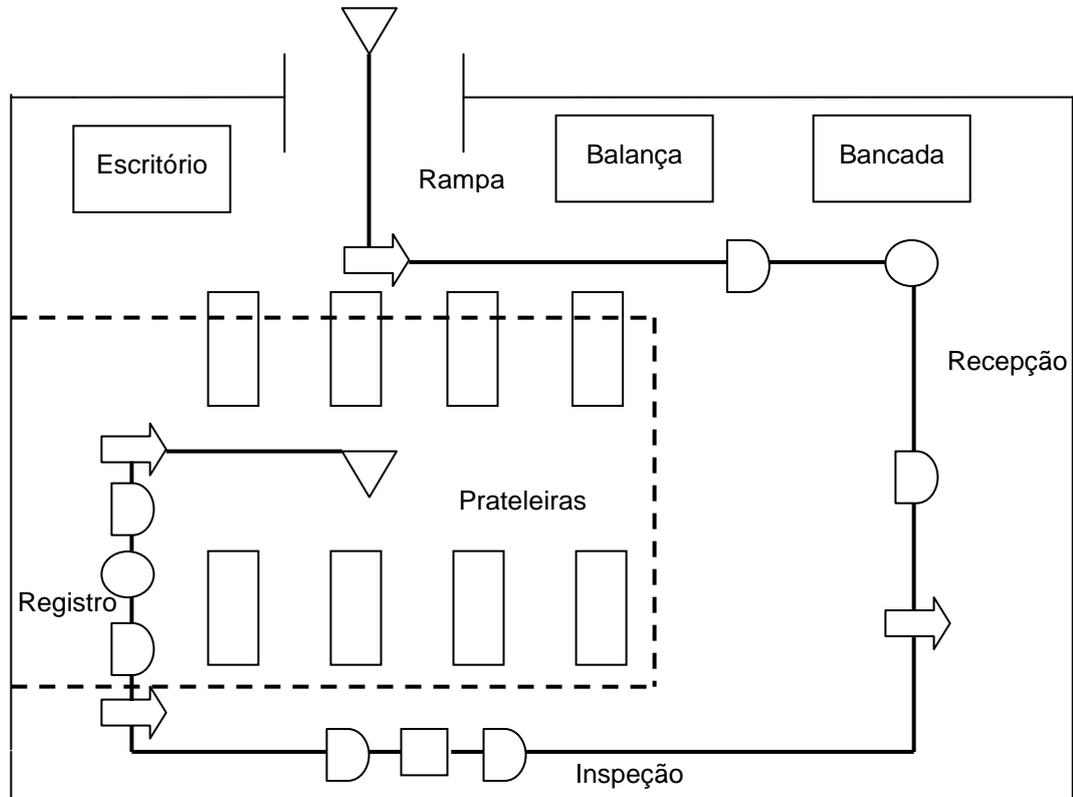


Figura 2.11 - Exemplo de mapofluxograma (Fonte: Rosa, 2002).

#### 2.4.4.1 Modelo Conceitual

Chwif e Medina (2010) chamam o modelo conceitual de modelo abstrato (o modelo que a pessoa tem em mente). Tal abstração significa identificar o que realmente é importante no sistema e transportar para o modelo. Os mesmos afirmam ainda que o modelo abstrato está fortemente ligado aos objetivos da simulação. Após elaboração do modelo abstrato na mente do modelador, este deve colocar o modelo no papel através de uma técnica adequada de representação de modelos de simulação conceitual. Para Brooks e Robinson (2001), o modelo conceitual é uma descrição do modelo que se deseja construir, independente do *software* de simulação. Um modelo conceitual pode orientar a etapa de coleta de dados, de forma a definir os pontos de coleta, além de agilizar o processo de elaboração do modelo computacional.

Sargent (2008) explica a diferença entre modelo conceitual e modelo computacional. Segundo o autor, modelo conceitual é a representação matemática,

lógica ou verbal de um problema, enquanto que modelo computacional é a implementação deste modelo conceitual no computador. O modelo conceitual é desenvolvido através de fases de análises e modelagem, já o modelo computacional através das fases de programação computacional e implementação.

Autores como Law (1991) e Chwif e Medina (2010) afirmam que a criação do modelo conceitual corresponde à fase da simulação a eventos discretos, sendo este, um dos aspectos mais importantes de um estudo de simulação. Porém, Wang e Brooks (2007) ressaltam que de todas as atividades envolvidas em um projeto de simulação, a modelagem conceitual é provavelmente a que recebe a menor atenção e, conseqüentemente, a menos compreendida. A natureza do modelo conceitual é bem diferente das etapas de verificação, validação e análise dos resultados, que possuem fortes elementos matemáticos e estatísticos. Para Robinson (2008) esta falta de atenção está relacionada ao fato de que modelagem conceitual é mais uma arte do que uma ciência, e assim é difícil definir métodos e procedimentos. Montevechi *et al.* (2010) acreditam que uma provável causa desta falta de atenção oferecida à modelagem conceitual é o uso de técnicas de modelagem conceitual que não ofereçam vantagens suficientes para a modelagem computacional, desmotivando assim cuidados especiais com o modelo conceitual.

É comum em estudos envolvendo modelagem e simulação o uso de técnicas de mapeamento de processos para descrever o modelo conceitual. Porém percebe-se em projetos de simulação publicados, que muitas vezes os benefícios do modelo conceitual são pouco explorados, principalmente porque estas técnicas de mapeamento não foram concebidas focando a lógica da simulação.

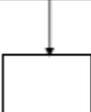
Oliveira (2010) comenta que a principal característica do IDEF-SIM é a identidade da sua lógica de aplicação com a lógica utilizada em simulação a eventos discretos. Esta característica tem como objetivo criar um modelo conceitual do processo a ser simulado que contenha elementos requeridos na fase de modelagem computacional.

Neste sentido, buscando um melhor aproveitamento do modelo conceitual faz-se uma revisão a respeito da técnica proposta por Leal, Almeida e Montevechi (2008) denominada IDEF-SIM (*Integrated Definition Methods - Simulation*). Este nome se deve ao fato da técnica ser uma adaptação das técnicas de modelagem

IDEF0<sup>18</sup>, IDEF3<sup>19</sup> e o fluxograma, permitindo a elaboração de modelos conceituais com informações úteis ao modelo computacional. A técnica proposta é particularmente útil em projetos de simulação, porém, também sendo adaptável em projetos de melhoria em geral (LEAL *et al.*, 2009).

A Tabela 2.3 apresenta os elementos e a simbologia utilizada.

Tabela 2.3 – Simbologia do IDEF-SIM. (Fonte: Leal *et al.*, 2009)

Elementos	Simbologia	Técnica de origem
Entidade		IDEF3 (modo descrição das transições)
Funções		IDEF0
Fluxo da entidade		IDEF0 e IDEF3
Recursos		IDEF0
Controles		IDEF0
Regras para fluxos paralelos e/ou alternativos	 &  Regra E	IDEF3
	 X  Regra OU	
	 O  Regra E/OU	
Movimentação		Fluxograma
Informação explicativa		IDEF0 e IDEF3
Fluxo de entrada no sistema modelado		
Ponto final do sistema		
Conexão com outra figura		

<sup>18</sup>O IDEF0 é baseado no SADT (*Structured Analysis and Design Technique*). Na sua forma original, inclui a definição de uma linguagem de modelagem gráfica (sintaxe e semântica) e uma descrição para uma metodologia de desenvolvimento de modelos. O IDEF0 pode ser utilizado para analisar as funções do sistema e registrar os mecanismos (meios) pelos quais as funções são executadas. Segundo Ryan e Heavey (2006), a técnica permite a captura e representação com elementos gráficos, tanto para a transição de estados em um sistema de eventos discretos, como para a representação das atividades associadas com cada estado de transição.

<sup>19</sup>O IDEF3, caracteriza-se pelo fato dos eventos ou atividades serem descritos na verdadeira ordem na qual estes ocorrem, levando em consideração as precedências temporais. Segundo Mayer *et al.* (1995), o IDEF3 registra o aspecto temporal através de lógicas representadas nas chamadas junções. O IDEF3 ainda apresenta-se em dois modos: descrição do fluxo do processo e descrição das transições de estado dos objetos, como mostra o trabalho de Mayer *et al.* (1995). Segundo os autores, no modo descrição do fluxo de processo, o objetivo é demonstrar como “as coisas” trabalham na organização. Já no modo descrição das transições, o objetivo é resumir as transições possíveis de um objeto ao longo do processo. No modo de descrição das transições, um objeto muda do estado A para o estado B, mediante um processo de transformação descrito na UOB.

Entidade: são os itens a serem processados pelo sistema, representando matéria prima, produtos, pessoas, documentos, entre outros. Elas podem ser agrupadas ou divididas ao longo do processo produtivo e são movimentadas por meios próprios ou por meio de recursos. Uma vez representada, o símbolo somente aparecerá no momento em que uma nova entidade for criada. Desta forma, torna-se claro o número de entidades a ser utilizada e em que pontos do modelo a entidade sofrerá uma transformação.

Funções: representam os locais onde a entidade sofrerá alguma ação. Entende-se como funções postos de trabalho, esteiras de movimentação, filas e estoques, postos de atendimento. Estas funções podem modificar uma entidade, como no caso de postos de trabalho, ou mesmo alterar o ritmo de tempo desta entidade no fluxo, como uma espera (fila, estoque).

Fluxo da entidade: direcionamento da entidade dentro do modelo, caracterizando os momentos de entrada e saída da entidade nas funções.

Recursos: representam elementos utilizados para movimentar as entidades e executar funções. Os recursos podem representar pessoas ou equipamentos. Em um sistema pode haver recursos estáticos ou dinâmicos. Os recursos estáticos não são dotados de movimento. Os recursos dinâmicos, por sua vez, podem se mover sobre um caminho definido.

Controles: regras utilizadas nas funções, como sequenciamento, regras de filas, programações, entre outros.

Regras para fluxos paralelos e/ou alternativos: estas regras são chamadas de junções, na técnica IDEF3. Dois ou mais caminhos, após uma função, podem ser executados juntos (junção E), ou de forma alternativa (junção OU), ou permitindo ambas as regras (junção E/OU).

Movimentação: representa um deslocamento de entidade, no qual o modelador acredita possuir efeito importante sobre o modelo. Ao representar este elemento, espera-se encontrar no modelo computacional uma programação específica para este movimento, como tempo gasto e recurso utilizado.

Informação explicativa: utilizado para inserir no modelo uma explicação, com o objetivo de facilitar o entendimento do modelo.

Fluxo de entrada no sistema modelado: define a entrada ou criação das entidades dentro do modelo.

Ponto final do sistema: defini o final de um caminho dentro do fluxo modelado.

Conexão com outra figura: utilizado para dividir o modelo em figuras diferentes.

Leal *et al* (2009) aplicaram a técnica IDEF-SIM no sistema produtivo de uma indústria do setor de autopeças, composto por duas células de montagem. O modelo conceitual então criado foi convertido em modelo computacional por meio dos elementos lógicos do *software Promodel*®. Foi observada a possibilidade de melhorar o processo de validação face-a-face com os especialistas do processo, uma vez que a lógica do IDEF-SIM é semelhante à utilizada no processo de modelagem computacional. Além disso, os autores constataram a possibilidade de utilização da técnica dois momentos distintos do projeto de simulação: na etapa de modelagem e; na etapa de documentação.

Rangel e Nunes (2011) utilizaram um sistema hipotético fundamentado nas operações de movimentação de cargas paletizadas para avaliar o grau de compatibilidade dos elementos lógicos característicos do IDEF-SIM com os módulos do *template Basic Process* do *software* de simulação Arena®. Com isso, foi observado também que a sua estrutura em forma de fluxo, onde são apresentadas as funções e variáveis do sistema, bem como as interconexões e regras estabelecidas, são bastante similares à interface computacional utilizada.

Lobato e Lima (2011) utilizaram o IDEF-SIM para a modelagem dos processos na seleção de materiais recicláveis de resíduos sólidos urbanos objetivando dar um melhor suporte a simulação computacional do processo de seleção. O modelo conceitual desenvolvido possibilitou o entendimento mais profundo do processo e norteou possíveis ganhos em produtividade, uma vez que possibilitou uma percepção mais ampliada dos gargalos de produção.

Oliveira (2010) realizou uma pesquisa-ação em uma empresa voltada ao desenvolvimento, fabricação e comercialização de sistemas de comunicações ópticas a fim de analisar o comportamento da técnica IDEF-SIM em todas as etapas de um projeto de simulação. O método adotado contemplou três passos: o pré-passo, relacionado ao entendimento do contexto e planejamento da pesquisa; os passos principais, que formam um ciclo conhecido como ciclo principal da pesquisa-ação e; o meta-passo para monitoração. E ao final, o autor concluiu que a referida técnica se mostrou aplicável tanto na etapa de concepção, na etapa de implementação, quanto na etapa de análise.

#### 2.4.5 Verificação e Validação de Modelos de Simulação

De acordo com Chwif e Medina (2010), a verificação está relacionada com o modelo computacional e, serve para retirar os elementos que estão causando o seu mau funcionamento. Para os mesmos, o objetivo equivale a responder a seguinte pergunta: “será que estamos desenvolvendo corretamente o modelo?”. Harrell *et al.* (2000) acrescentam que a procedência da verificação é através de um trabalho de depuração da programação procurando dois tipos de erros: erros de sintaxe e erros de semântica.

Freitas Filho (2008) descreve algumas técnicas destinadas à verificação de modelos de simulação computacional. Essas técnicas baseiam-se em dois conjuntos de elementos: a) Métodos típicos de correção de programas tratando do desenvolvimento de programas de computadores; e b) procedimentos especialmente relacionados ao desenvolvimento de modelos de simulação.

**Uso de modelos determinísticos:** um problema comum que se apresenta durante a verificação dos modelos de simulação é o da variabilidade das respostas do programa devido ao comportamento das variáveis aleatórias. Tais variáveis, necessárias para representar os processos estocásticos que ocorrem nos sistemas do mundo real, podem dificultar o trabalho de verificação. Logo esse modelo de verificação consiste em atribuir valores determinísticos as variáveis aleatórias, tornando mais simples a previsão de respostas do sistema e, como consequência, a verificação e a busca de erros nos vários módulos do programa.

**Variações sobre os dados de entrada:** outra técnica de análise bastante comum é variar os dados de entrada do modelo e verificar se as respostas obtidas são adequadas e consistentes com as variações realizadas. Logo se os dados de entrada sofrem variações, o esperado é que os resultados sofram variações condizentes.

**Uso de rotinas de rastreamento (*Trace*):** as rotinas de rastreamento ou acompanhamento são módulos existentes na maioria das linguagens de simulação, que permitem uma visualização na lista dos eventos ocorridos, ordenados pelo tempo de sua ocorrência. Ao lado dos eventos, a lista também apresenta as modificações ocorridas nos conteúdos das inúmeras variáveis e atributos deles dependentes. Tais rotinas podem ser ativadas ou desativadas pelo usuário.

**Aplicação de testes de continuidade:** são aplicados sobre várias rodadas de simulação do mesmo modelo. A cada rodada aplica-se uma pequena alteração sobre os parâmetros de entrada. Para cada um dos parâmetros, uma pequena alteração geralmente provoca uma pequena mudança nos resultados. Qualquer mudança mais radical nos resultados deve ser investigada, pois, quase sempre, são provocadas por erros no programa.

**Emprego de testes de degenerescência ou robustez:** esses testes consistem em verificar o funcionamento do modelo quando, sobre os parâmetros, aplicam-se valores extremos (menores ou maiores) do que os permitidos.

**Verificação de Consistência:** servem para verificar se o modelo produz resultados similares quando aos parâmetros de entrada são atribuídos valores equivalentes em diferentes execuções.

**Independência de sementes geradoras de números aleatórios:** as sementes geradoras de números aleatórios utilizados nas funções geradoras de variáveis aleatórias, não devem influenciar o comportamento geral dos resultados. Diferenças entre as diversas rodadas de simulação são esperadas, mas tais diferenças, considerando-se as médias de diversas amostras (rodadas) devem ser pequenas, caracterizando que estas são devidas aos processos aleatórios envolvidos no sistema real e bem representados no modelo.

**Rotinas de verificação:** são elementos extras adicionais ao programa ou modelo, que permitem ao moderador averiguar a ocorrência de determinados tipos de erros, se eles existirem. Paralelamente, é possível a emissão de alarmes, sinais ou relatórios, indicando a presença de problemas.

Chwif e Medina (2010) citam outras técnicas de verificação:

**Implementação modular ou verificação modular:** é uma técnica de programação que também é aplicada a implementação de modelos de simulação. Consiste em implementar partes do modelo e depois rodar somente esta parte. Se esta parte aparentemente estiver correta, então, procede-se com a implementação da segunda parte, e assim, sucessivamente.

**Simulação manual:** realizar uma simulação manual é uma atividade dispendiosa, mas permite que o analista ganhe uma sensibilidade prévia do comportamento do modelo e assim, quando este implementar o modelo no computador, terá uma percepção maior sobre a correspondência entre modelo conceitual e computacional. Esta técnica não se aplica a modelos muito grandes.

**Valores constantes ou simplificados versus cálculos manuais:** em um modelo de simulação utiliza-se uma ampla gama de distribuições e probabilidades. Para o uso desta técnica tomam-se os valores médios de cada distribuição e consideram-se estes valores como constantes determinísticos e então se comparam os resultados do modelo com os resultados de uma planilha de cálculo e observa-se se eles coincidem.

**Utilização do *debugger*, *trace* ou depurador:** *softwares* de simulação possuem um depurador que faz com que a simulação ocorra passo a passo e assim é possível visualizar os eventos que estão correndo e eventos futuros, bem como os valores das variáveis do modelo. Este depurador funciona como uma lente de aumento que auxilia na descoberta de erros presentes no modelo.

**Animação gráfica:** é uma poderosa ferramenta de verificação, pois diagnostica diversos tipos de erros, como por exemplo, entidades que somem do modelo ou seguem a rota errada.

**Revisão em grupo:** esta técnica se resume em implementar o modelo e deixar que uma outra pessoa ou grupo verifique onde o modelo não está funcionando adequadamente.

A qualidade e a validade de um modelo de simulação são medidas pela proximidade entre os resultados obtidos pelo modelo e aqueles originados do sistema real. Uma vez que uma série de pressupostos e simplificações sobre o comportamento do sistema real costuma ser realizada no desenvolvimento do modelo, qualquer tomada de decisão com base em seus resultados deve ser precedida de uma avaliação de sua qualidade e apropriação (FREITAS FILHO, 2008).

Validação, na concepção de Banks (2000), é um processo iterativo de comparação entre o real comportamento e as discrepâncias apresentadas pelo modelo, incrementando-o continuamente até o nível de detalhe, ou precisão desejada.

Para Harrell *et al.* (2000), a validação é o processo onde se determina a relação de aproximação entre o modelo e a realidade que o mesmo representa. Esta parte da simulação é considerada de fundamental importância, pois todas as decisões sobre o que fazer no sistema real serão baseadas nos resultados que o modelo produzir.

Harrell *et al.*(2000) enfatizam que existem diversas técnicas para validar um modelo, desde uma simples visualização até complexos métodos estatísticos, sendo comum a combinação de duas ou mais técnicas para a validação. Sargent (2009) cita alguma destas técnicas de validação:

**Animação:** o modelo operacional do modelo é apresentado mostrando-se graficamente como o modelo se move através do tempo. Por exemplo, os movimentos de peças através de uma fábrica durante uma rodada de simulação são mostrados graficamente.

**Comparação com outros modelos:** diversos resultados gerados pelo modelo computacional podem ser comparados com resultados já conhecidos de modelos analíticos ou ainda com outros modelos computacionais já validados.

**Testes degenerativos:** a degeneração do comportamento do modelo é testada pela seleção adequada dos valores de entrada e parâmetros internos. Por exemplo, o número médio na fila de um único servidor continua a aumentar ao longo do tempo, quando a taxa de chegada é maior do que a taxa de serviço?

**Validade de eventos:** a ocorrência dos eventos de um modelo de simulação é comparada com o do sistema real para determinar se estas são similares. Por exemplo, comparar o número de incêndios em uma simulação de um departamento de bombeiros.

**Teste de Condição Extrema:** a estrutura do modelo e saídas devem ser plausíveis para uma extrema e improvável combinação níveis dos fatores no sistema. Por exemplo, se os estoques em processo são iguais à zero, a saída da produção deveria ser igual a zero.

**Validade de Face:** especialistas do sistema são questionados a fim de saber se o modelo e/ou seu comportamento estão razoáveis. Por exemplo, questionar se a lógica do modelo conceitual está correta e se o relacionamento entre entrada e saída do modelo está correto.

**Validação com Dados Históricos:** se existem dados históricos (por exemplo, os dados coletados em um sistema especificamente para construir e testar um modelo), parte destes dados é utilizada para construir o modelo e os dados restantes são usados para determinar (testar) se o modelo se comporta como o sistema.

**Métodos Históricos:** os três métodos históricos de validação são o racionalismo, o empirismo, e economia positiva. Racionalismo pressupõe que todos sabem se as hipóteses assumidas em um modelo são verdadeiras. Deduções

lógicas são utilizadas a partir destes pressupostos para o desenvolvimento correto (válido) do modelo. Empirismo exige cada pressuposto e resultado para ser empiricamente validado. A economia positiva exige apenas que o modelo seja capaz de prever o futuro e não se preocupa com suposições de um modelo ou estrutura (relações de causalidade ou mecanismos).

**Validade Interna:** várias repetições (rodadas) de um modelo estocástico são feitas para determinar a quantidade de variabilidade estocástica do modelo. Uma grande quantidade de variabilidade (falta de coerência) do modelo pode causar resultados questionáveis.

**Gráficos operacionais:** valores de diferentes medidas de desempenho, como por exemplo, o número na fila e percentual de servidores ocupados, é mostrado graficamente. O comportamento dinâmico de indicadores de desempenho é mostrado durante a execução do modelo de simulação para garantir que eles se comportam corretamente.

**Análise de Sensibilidade:** esta técnica consiste em alterar os valores das entradas e parâmetros internos de um modelo para determinar o efeito sobre o comportamento deste modelo ou dos resultados. As mesmas relações devem ocorrer tanto no modelo como no sistema real. Esses parâmetros que são sensíveis, ou seja, provocam mudanças significativas no comportamento do modelo ou resultados, devem ser então suficientemente precisos.

**Validação preditiva:** o modelo é utilizado para prever o comportamento do sistema e, em seguida, são feitas comparações entre a previsão do modelo e o comportamento do sistema para determinar se eles são os mesmos. Os dados do sistema podem ser provenientes de um sistema operacional ou obtidos através da condução de experimentos no próprio sistema.

**Rastros:** os comportamentos de diferentes tipos de entidades específicas no modelo são rastreados (seguidos) através do modelo para determinar se a lógica do modelo está correta e se a precisão necessária foi obtida.

**Teste de Turing:** apresentam-se aos especialistas do sistema modelado os resultados do modelo e resultados do sistema, sem identificar a origem, se eles não conseguirem discriminar os resultados o modelo pode ser considerado validado.

## 2.4.6 Questões Estatísticas na Simulação

Neste tópico será realizada uma rápida revisão sobre estatística focando nos principais tipos de distribuição de probabilidades e teste de aderência, tópicos necessário são desenvolvimento do trabalho de simulação e interpretação dos resultados gerados pelo modelo computacional.

Uma distribuição de probabilidade é um conjunto de valores ou medidas que relaciona a frequência relativa com a qual o evento ocorre ou é provável ocorrer. Os modelos de simulação estocástica utilizam distribuições de probabilidade (HARRELL *et al.*, 2002).

A pertinência em utilizar as distribuições de probabilidade em modelos de simulação reside no fato que, muitas das variáveis de entrada de um sistema de simulação de manufatura tem um comportamento aleatório no tempo. Portanto, as variáveis de saída do modelo, que são calculadas a partir das variáveis de entrada, também são aleatórias. Daí, a necessidade de modelar a aleatoriedade do sistema de maneira correta, assim como a programação e a análise dos experimentos. Neste sentido, cada uma das fontes de aleatoriedade do sistema deve ser modelada por uma distribuição de probabilidade apropriada.

Seguem algumas variáveis de natureza aleatória com relação ao tempo que necessitam serem simulados em sistemas de manufatura: chegadas de pedidos, peças ou matéria-prima; tempo de processamento, montagem ou inspeção; tempos de falha de máquinas e equipamentos; tempos de reparo de máquinas e equipamentos; tempos de carga e descarga e; tempos de *setup*.

### 2.4.6.1 Distribuição Normal

A distribuição normal é a mais importante das distribuições contínuas de probabilidade. Conhecida como a curva do sino, descreve fenômenos simétricos em torno da média. Possui dois parâmetros: a média e o desvio padrão. É utilizada sempre que a aleatoriedade for causada por várias fontes independentes agindo de forma aditiva (FREITAS FILHO, 2008).

Um exemplo na área de manufatura poderia ser o das medidas coletadas nas inspeções de medição feitas na peça após uma determinada operação, como as feitas por relógios comparadores, paquímetros, micrômetros, etc.

A representação gráfica da distribuição normal está ilustrada na Figura 2.12.

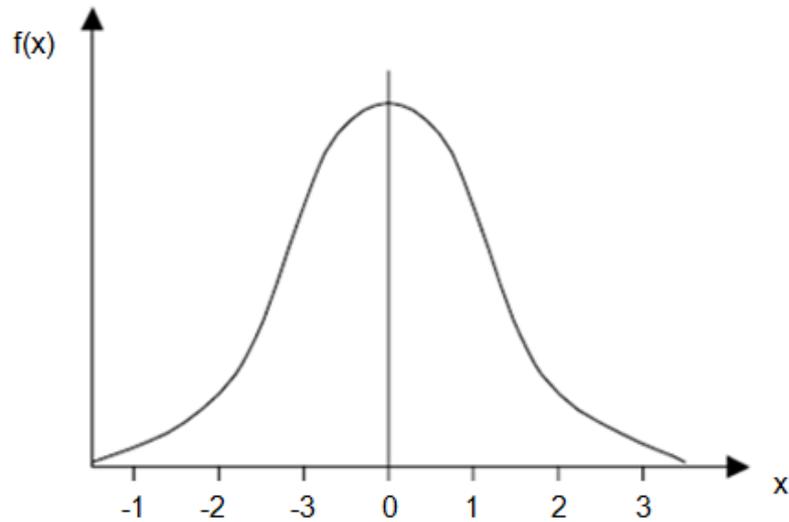


Figura 2.12 – Distribuição Normal (Fonte: Freitas Filho,2008).

A equação representativa da distribuição normal é apresentada na fórmula 2.1, a média pela fórmula 2.2, o desvio padrão pela fórmula 2.3.

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-1/2\left[\frac{(x-\mu)}{\sigma}\right]^2} \quad (2.1)$$

para  $-\infty < x < \infty$

$$\mu = \bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (2.2)$$

para  $-\infty < \mu < \infty$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (2.3)$$

para  $\sigma > 0$

#### 2.4.6.2 Distribuição Exponencial

Segundo Harrell *et al.*, (2002), a distribuição exponencial é um modelo probabilístico largamente usado em sistemas de espera. É utilizada para gerar valores aleatórios para o tempo entre chegadas de clientes em um sistema. O termo

clientes envolve um infinito número de possibilidades desde pacotes chegando a uma posição até pedidos em sistema computacional.

Pode ser exemplificado na área de manufatura como, o intervalo de tempo entre chegada das peças em uma determinada máquina, ou mesmo o tempo para se completar uma operação.

A forma da curva de distribuição exponencial está representada na Figura 2.13. A função densidade de probabilidade é dada pela equação 2.4, seus parâmetros pela equação 2.5 e sua função de distribuição acumulada pela equação 2.6.

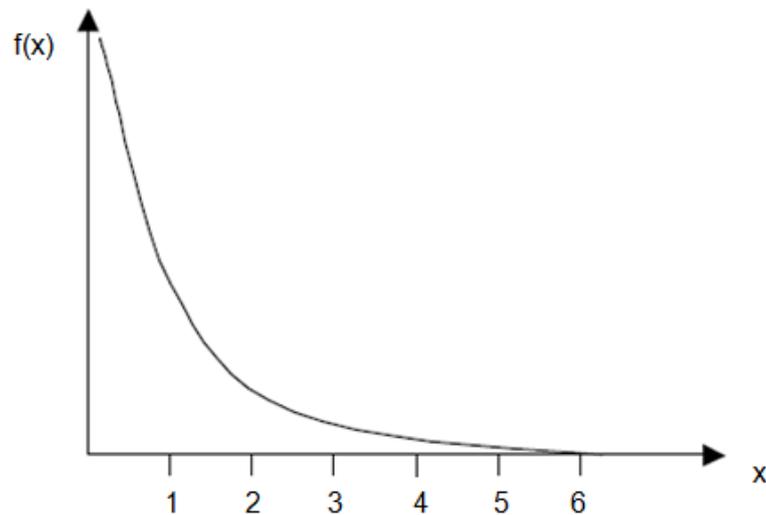


Figura 2.13 – Distribuição Exponencial (Fonte: Harrell *et al.*,2002).

$$f(x) = \alpha e^{-\alpha x} \quad (2.4)$$

para  $x \geq 0$ ;  $\alpha > 0$ ;

0 para outros valores

$$\text{Desvio padrão} = \mu = \alpha^{-1} \quad (2.5)$$

$$f(x) = 1 - e^{-\alpha x} \quad (2.6)$$

### 2.4.6.3 Distribuição Gama

É uma distribuição contínua de probabilidade e que pode ser usada para representar o tempo necessário para completar uma tarefa ou grupo de tarefas (HARRELL *et al.*, 2002). Na área de manufatura, esses tempos podem ser exemplificados como o tempo de troca de um dispositivo ou o tempo de troca de ferramentas.

A forma da curva de distribuição gama está representada na Figura 2.14. Sua função densidade de probabilidade é dada pela equação 2.7, seus parâmetros por 2.8 e 2.9 e sua função de distribuição acumulada por 2.10.

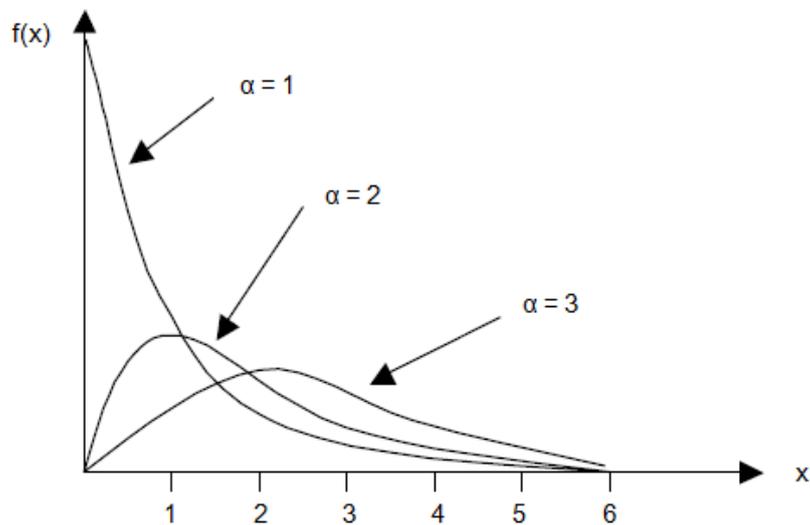


Figura 2.14 – Distribuição Gama (Fonte: Soares,1992).

$$f(x) = \frac{x^{\alpha-1}}{\beta^{\alpha}\Gamma(\alpha)} e^{-x/\beta} \quad (2.7)$$

para  $x > 0$ ;

0 para os demais valores

$$\mu = \alpha \beta \quad (2.8)$$

$$\text{Var}(x) = \alpha \beta^2 \quad (2.9)$$

$$f(x) = 1 - \sum_{j=0}^{k-1} e^{-\lambda x} \frac{(\lambda x)^j}{j!} \quad (2.10)$$

#### 2.4.6.4 Distribuição de Erlang

É uma distribuição utilizada como uma extensão da exponencial, especialmente quando o fenômeno aleatório é observado ao longo de diversas etapas as quais podem ser escritas, de forma independente, com distribuições exponenciais (FREITAS FILHO, 2008).

A forma da curva de distribuição de Erlang está representada na Figura 2.15 e sua função densidade de probabilidade é dada pela equação 2.11, sua média por 2.12 e a variância por 2.13.

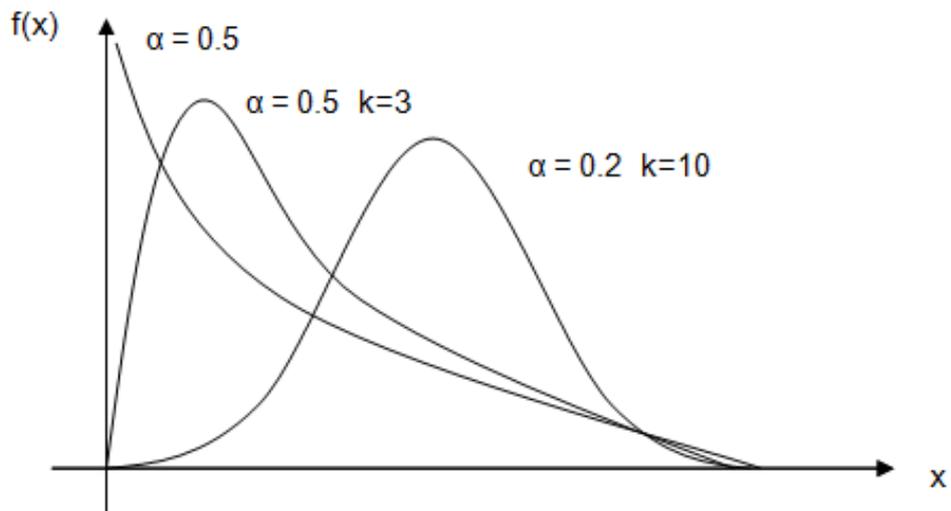


Figura 2.15 – Distribuição de Erlang (Fonte: Freitas Filho, 2008).

$$f(x) = \begin{cases} \frac{\alpha(\alpha x)^{k-1} e^{-\alpha x}}{(k-1)!}, & x \geq 0 \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (2.11)$$

$$\text{Média} = \frac{k}{\alpha} \quad (2.12)$$

$$\text{Variância} = \frac{k}{\alpha^2} \quad (2.13)$$

### 2.4.6.5 Distribuição de Weibull

É uma distribuição contínua de probabilidade que utiliza variáveis aleatórias para descrever características de confiabilidade de sistemas ou equipamentos. Uma aplicação típica desta é no objetivo de estimar tempo de falha de uma peça ou o tempo para completar uma tarefa (HARRELL *et al.*, 2002).

A forma da curva de distribuição de Weibull está representada na Figura 2.16 e sua função densidade de probabilidade é dada pela equação 2.14, seus parâmetros por 2.15 e 2.16 e sua função de distribuição acumulada por 2.17.

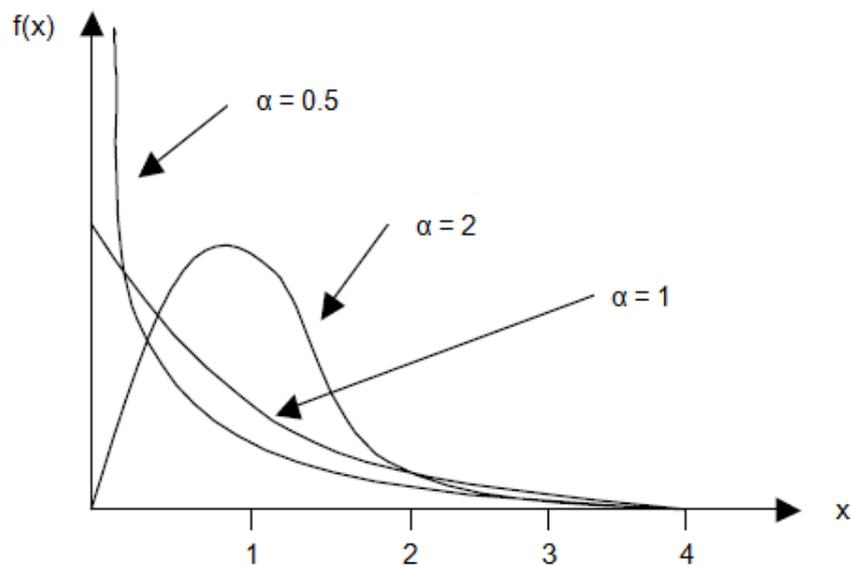


Figura 2.16 – Distribuição de Weibull (Fonte: Soares,1992).

$$f(x) = \frac{\alpha}{\beta^{\alpha-1}} x^{\alpha-1} e^{-\left(\frac{x}{\beta}\right)^{\alpha}} \quad (2.14)$$

para  $x \geq 0$  ;

0 para os demais valores

$$\mu = \beta \Gamma \left( 1 + \frac{1}{\alpha} \right) \quad (2.15)$$

$$\text{Var}(x) = \beta^2 \left[ \Gamma \left( 1 + \frac{2}{\alpha} \right) - \Gamma \left( 1 + \frac{1}{\alpha} \right)^2 \right] \quad (2.16)$$

$$f(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{\beta}\right)^{\alpha}} \quad (2.17)$$

### 2.4.6.6 Distribuição Binomial

A distribuição binomial ou de Bernoulli é uma distribuição discreta de probabilidades e é usada para encontrar a probabilidade de  $p$  números de ocorrências ou sucessos de um evento, em  $n$  tentativas do mesmo experimento quando existirem somente dois resultados mutuamente exclusivos, as  $n$  tentativas são independentes, e a probabilidade de ocorrência ou sucesso, permanece constante em cada tentativa. Pode ser utilizada para se determinar a probabilidade de se encontrar um determinado número de peças defeituosas em um lote de produção de tamanho  $n$ , sabendo-se a probabilidade de ocorrência de defeitos  $p$  (HARRELL *et al.*, 2002).

A forma da distribuição binomial está representada na Figura 2.17. E sua função de probabilidades é dada pela fórmula 2.18, a média por 2.19 e a variância por 2.20.

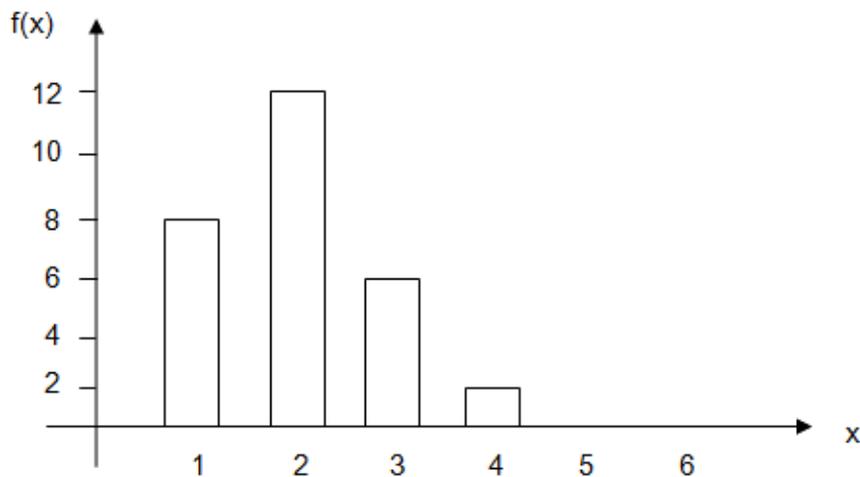


Figura 2.17 – Distribuição Binomial (Fonte: Harrellet *al.*,2002).

$$f(x) = P(X = x) = \binom{n}{x} p^x (1 - p)^{n-x} = \frac{n!}{x!(n-x)!} p^x (1 - p)^{n-x} \quad (2.18)$$

para  $x=0, 1, \dots, n$

$$\mu = np \quad (2.19)$$

$$\text{Var}(x) = npq \quad (2.20)$$

### 2.4.6.7 Distribuição de Poisson

A distribuição de Poisson é uma distribuição discreta de probabilidades e, está associada com taxas de chegadas. Reflete a probabilidade associada com um número finito de sucessos (chegadas) ocorrendo em um determinado intervalo de tempo ou área específica. Para cada valor inteiro da variável aleatória  $x$ , há uma única probabilidade de ocorrência (HARRELL *et al.*, 2002).

A forma da distribuição de Poisson está representada na Figura 2.18. E sua função de probabilidades é dada pela fórmula 2.21, a média e a variância são iguais e dadas por 2.22.

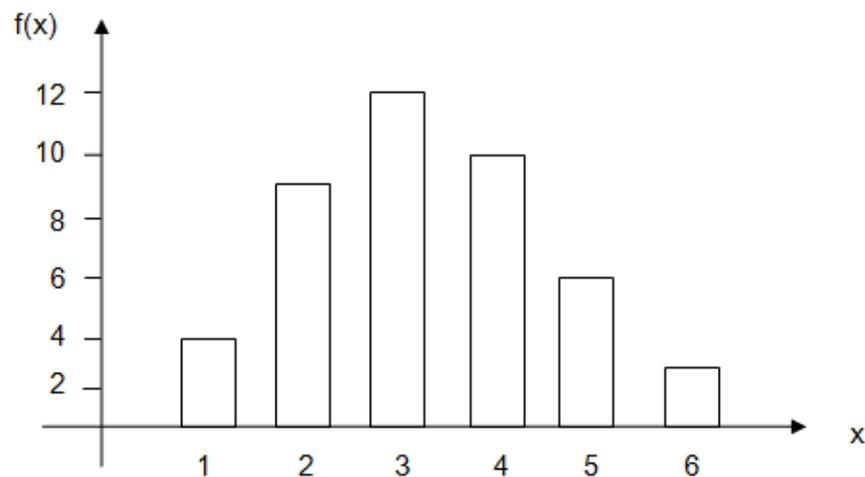


Figura 2.18 – Distribuição Poisson (Fonte: Harrell *et al.*,2002).

$$f(x) = P(X = x) = \frac{e^{-\alpha} \alpha^x}{x!} \quad (2.21)$$

para  $x = 0, 1, 2, \dots$

$$\mu = \text{Var}(x) = \alpha \quad (2.22)$$

### 2.4.6.8 Testes de Aderência

De acordo com Freitas Filho (2008), os testes estatísticos são divididos em dois tipos, os testes paramétricos e os testes não paramétricos. Nos testes paramétricos é suposto que os dados seguem determinada distribuição de probabilidades. Os testes não paramétricos são utilizados quando as suposições para se aplicar os testes paramétricos não são satisfeitas.

Para Freitas Filho (2008), os testes de aderência fazem parte dos testes não paramétricos. E tem como objetivo verificar se os dados de uma amostra aderem (seguem) a uma determinada distribuição teórica. Georges (2005) declara que os testes de aderência são usados em dois momentos distintos na simulação, para testar a aleatoriedade dos números gerados aleatoriamente e para a análise dos dados de entrada.

Além das questões técnicas com relação ao objetivo de testar a aderência, estes testes também tem a finalidade de verificar a qualidade do resultado de escolha da distribuição que se acredita melhor represente os dados da população (FREITAS FILHO, 2008).

O teste de aderência é, em síntese, um teste de hipótese, em que se testa, no primeiro momento se a sequência gerada pode ser de fato, considerada aleatória e, no segundo momento, se os dados de entrada podem ser considerados provenientes de uma dada distribuição em questão. Porém há diferenças marcantes que fazem com que os testes de aderência tenham este nome, justamente pela diferentes formas com que os testes são aplicados, havendo mais de um possível teste (GEORGES, 2005).

#### 2.4.6.8.1 Teste Qui-quadrado ( $X^2$ )

De acordo com Georges (2005), o teste do Qui-quadrado é um teste em que se compara a frequência dos valores obtidos empiricamente com valores obtidos teoricamente (valores esperados).

Os procedimentos tem início pelo arranjo das  $n$  observações em um conjunto de  $k$  classes ou intervalos. Segue-se o cálculo do teste estatístico dado pela equação 2.23.

$$x_v^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i} = \sum_{i=1}^k \frac{O_i^2}{E_i} - n \quad (2.23)$$

Onde:

$X^2$  é a estatística de teste, com  $v$  graus de liberdade;

$O_i$  é a frequência observada para os dados de uma determinada classe;

$E_i$  é a frequência esperada para os dados de uma determinada classe;

$K$  é o número de classes;

$n$  é o número de elementos da amostra.

Para que a distribuição de probabilidades dos dados que estão sendo analisados corresponda à distribuição de probabilidades teórica, é necessário que a condição 2.24 seja atendida.

$$x_v^2 \leq x_{\alpha;v}^2 \quad (2.24)$$

Onde:

$\alpha$  é o nível de significância;

$v$  é o número de graus de liberdade dado por:  $v = k - 1 - m$ , sendo  $m$  o número de parâmetros usados para calcular as frequências esperadas.

Uma das condições do teste é de que  $E_i \geq 5$ , caso seja menor haverá necessidade de se agrupar as classes adjacentes até que essa condição seja satisfeita. O cálculo das frequências esperadas é realizado através da equação 2.25.

$$E_i = np_i \quad (2.25)$$

#### 2.4.6.8.2 Teste Kolmogorov-Smirnov (K-S)

O teste Kolmogorov-Smirnov se enquadra na mesma categoria do Teste do Qui-quadrado, que é na comparação da frequência dos valores empíricos com os valores teóricos.

Também conhecido como Teste KS, envolve a comparação da função distribuição da distribuição ajustada com a função distribuição dos dados empíricos. Sendo útil para avaliar distribuições contínuas, pois não requer agrupamento de dados em intervalos discretos. Por outro lado, o uso do Teste KS em distribuições discretas, tem sido limitado pela necessidade de cálculos complexos dos valores críticos (HARRELL *et al.*, 2002).

De acordo com Freitas Filho (2008), este teste baseia-se na comparação das probabilidades acumuladas das duas distribuições (observada e a teórica). Para a consulta em uma tabela de valores críticos, toma-se o maior valor/desvio entre as duas distribuições (valores calculados dentro de cada classe).

Em Freitas Filho (2008), têm-se como exemplo, a avaliação de dados apresentados na Tabela 2.4 e a verificação quanto a sua aderência a uma distribuição uniforme com  $\alpha=1\%$ .

Tabela 2.4 – Dados brutos. (Fonte: Freitas Filho, 2008)

17,38	18,09	22,47	15,29	10,33	28,98	14,70	11,26	27,49	15,90	13,47	14,43
23,73	18,09	19,09	29,29	22,12	11,86	28,31	15,79	17,48	27,78	10,27	11,94
11,77	11,72	10,72	22,20	12,05	24,28	17,33	10,42	28,78	10,16	13,63	17,31
21,56	12,61	11,76	18,37	27,00	11,86	19,90	23,92	18,61	17,38	12,66	28,29
23,17	22,28	25,24	17,58	14,66	14,41	28,59	21,72	10,56	12,48	13,02	27,84

Na Tabela 2.5 têm-se os dados brutos divididos em 10 (dez) classes associados as suas frequências relativas e acumuladas. O valor da estatística K-S será obtido a partir das diferenças entre os valores das colunas *Frequência Observada Acumulada* e *Frequência Teórica Acumulada*. Ainda na Tabela 2.5, as maiores diferenças são observadas nas classes que iniciam em 14,00 e vão até 20,00 e, o valor da diferença é 0,1500.

Tabela 2.5 – Distribuição de frequências (Fonte: Freitas Filho, 2008).

Classes	Frequência Absoluta Observada	Frequência Relativa Observada	Frequência Relativa Acumulada	Frequência Relativa Esperada	Diferenças Frequências Acumuladas
[10; 12)	13	0,2167	0,2167	0,1000	0,1167
[12; 14)	7	0,1167	0,3333	0,2000	0,1333
[14; 16)	7	0,1167	0,4500	0,3000	0,1500
[16; 18)	6	0,1000	0,5500	0,4000	0,1500
[18; 20)	6	0,1000	0,6500	0,5000	0,1500
[20; 22)	2	0,0333	0,6833	0,6000	0,0833
[22; 24)	7	0,1167	0,8000	0,7000	0,1000
[24; 26)	2	0,0333	0,8333	0,8000	0,0333
[26; 28)	4	0,0667	0,9000	0,9000	0,0000
[28; 30)	6	0,1000	1,0000	1,0000	0,0000

## 2.5 O Software Promodel

O software de simulação *Promodel®*, foi desenvolvido pelo Professor Charles Harrell, (por meio da *Promodel Corporation*), na qual foi fundador. O *Promodel* possui características voltadas para a manufatura abrangendo desde pequenas

células até produção em grande escala e sistemas de manufatura flexível (GUIA *PROMODEL*, 2010).

Foi desenvolvido para o *Windows*, aproveitando todas as vantagens do popular ambiente operacional da *Microsoft*. Tem-se como exemplo a possibilidade de importação e exportação de dados para outros *softwares*, como *Word*, *Excell*, *Access* e *CAD*.

Law e Kelton (2000) classificam o *software Promodel* como um dos simuladores mais flexíveis devido a sua capacidade de construir lógicas complexas. Utiliza uma técnica de modelagem baseada na representação dos processos diretamente e unicamente através de seu *layout*, com a definição de seus postos de trabalho, caminhos, recursos e entidades. Apresenta boa qualidade dos recursos de animação, pois proporciona ao usuário tanto o acompanhamento das mudanças de estado na simulação, quanto um suporte de análise pós-simulação com os gráficos gerados. O *software* também possui bons recursos de análise estatística, interface simples, permite considerar paradas baseadas em calendário, turnos de trabalho e múltiplas replicações de simulação.

De acordo com Harrell *et al.*, (2002), os principais elementos do *Promodel* são:

**Locais (*locations*):** são elementos fixos (estacionários) onde as operações acontecem. São definidos nos locais: a capacidade; as unidades; as regras de atendimento. Os locais podem ser simples (comportam apenas uma entidade de cada vez) ou múltiplos (comportam mais de uma entidade simultaneamente). Os locais podem possuir regras de entrada e saída, onde as regras de entrada são usadas para selecionar qual a próxima entidade a ser manipulada caso exista mais de uma destas com essa possibilidade, ao passo que as de saída são usadas num local de capacidade múltipla para determinar a ordem com que deixarão o mesmo. Tendo como exemplo: as máquinas de usinagem, o *buffer* de entrada, o *buffer* de saída e a esteira transportadora são modelados como locais.

**Entidades (*Entities*):** são elementos móveis que sofrem alguma transformação nos locais. Podem representar matéria-prima, produtos, documentos, informações, pessoas, etc. As entidades podem receber atributos, que podem ser testados para a tomada de decisão ou para se obter estatísticas específicas. A imagem que representa uma entidade pode ser trocada como resultado de uma operação para se ilustrar uma mudança física da entidade durante uma simulação.

Como exemplo tem-se: a peça fabricada e a matéria-prima desta são modelados como entidades.

**Chegadas (*Arrivals*):** neste elemento é definido o mecanismo de determinação dos momentos em que uma entidade é introduzida no sistema. Uma chegada indica como uma entidade é introduzida no sistema. Através da ferramenta chegada, definem-se parâmetros como local da chegada da entidade no sistema, a quantidade, a frequência e as distribuições de probabilidade.

**Processos (*Processing*):** a lógica de um processo define qual a operação e o roteamento para cada tipo de entidade em cada local do sistema. Os processos definem as interligações entre os locais, os tempos de operação, os recursos necessários, a lógica de movimentação, os roteamentos de entidades, etc.

**Recursos (*Resources*):** recursos podem ser pessoas, ferramentas, veículos ou qualquer outro objeto que possa ser usado para transportar materiais entre dois locais, realizar uma operação sobre um material em um local, ou realizar manutenção em um local ou em outro recurso que esteja quebrado. Os recursos são elementos necessários para a operação das entidades. Recursos podem ser dinâmicos ou estáticos, onde o que diferem é o fato de o primeiro ser vinculado a uma rota e o segundo não. Regras de decisão podem ser utilizadas para alocar os recursos e priorizar os carregamentos e entregas. Características de movimentação dos recursos, como velocidades quando cheio e quando vazio aceleração, desaceleração, tempo de carga e descarga, entre outros, podem ser especificados. Como exemplo, o operário é modelado como um recurso.

**Rede de Caminhos (*Path Networks*):** definem o caminho pelo qual os recursos se movimentam, e as inter-relações desses recursos com os locais e entidades. Podem ser unidirecionais ou bidirecionais.

## **CAPÍTULO 3 - METODOLOGIA**

Este capítulo apresenta o método a ser empregado no desenvolvimento do estudo de aplicação da modelagem e simulação para o balanceamento de produção de uma fábrica oleiro-cerâmica do APL de São Miguel do Guamá. Neste sentido, é citada a definição da pesquisa, a função do método de pesquisa bem como a classificação do estudo segundo as citações dos autores consultados. Também é definido o agente físico que serviu de campo de estudos. Uma vez de posse desses elementos é definido o método de condução do estudo de modelagem e simulação. No caso o método escolhido foi o de Chwif (1999).

### **3.1 Pesquisa e Método Científico**

Para Marconi e Lakatos (2008), a pesquisa “é um procedimento reflexivo sistemático, controlado e científico que permite descobrir novos fatos ou dados, relações ou leis, em qualquer campo do conhecimento”. Gil (2002), por sua vez, define pesquisa como um: “procedimento racional e sistemático que tem como objetivo proporcionar respostas aos problemas que são propostos”. Gil (2002) continua afirmando que a pesquisa é desenvolvida mediante o concurso dos conhecimentos disponíveis e a utilização cuidadosa de métodos, técnicas e outros procedimentos científicos.

Oliveira (2004) discorre em seu tratado de metodologia científica, que o método é um conjunto de processos pelos quais se torna possível conhecer uma determinada realidade, produzir determinado objeto ou desenvolver certos procedimentos ou comportamentos. Acrescenta Oliveira (2004), o método e a técnica são os instrumentos que auxiliam o pesquisador a chegar um determinado resultado para um dado problema. Sendo o papel do método na pesquisa científica encaminhar os passos para investigar um problema e alcançar um determinado fim ou objetivo, pois se trata de um conjunto de processos pelos quais possibilitam conhecer uma determinada realidade, produzir determinado objeto ou desenvolver certos procedimentos ou comportamentos. A técnica, por sua vez, é o suporte físico que auxilia o método científico; é a parte material, é a parte prática pela qual se desenvolve a habilidade de ensinar, aprender, produzir, descobrir e inventar.

### 3.2 Classificação da Pesquisa

Segundo Silva e Menezes (2005), existem várias formas de classificar as pesquisas. Onde as formas clássicas de classificação são quanto ao: ponto de vista da natureza da pesquisa; ponto de vista dos objetivos da pesquisa; ponto de vista da forma de abordagem da pesquisa e; ponto de vista dos procedimentos técnicos da pesquisa.

A Figura 3.1, apresenta as opções de classificação, sendo que, no final de cada ramificação (destacado da cor azul) está a classificação deste estudo.

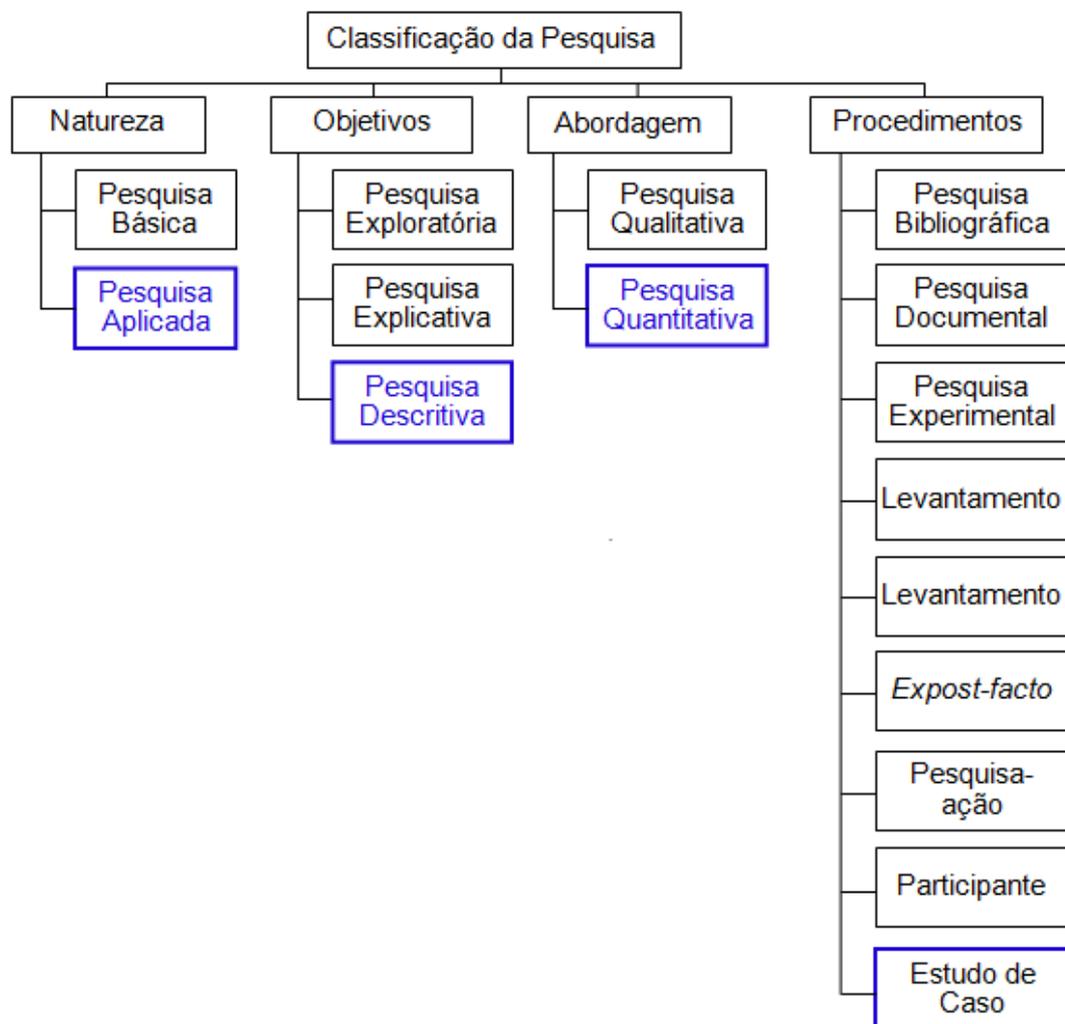


Figura 3.1 – Classificação da pesquisa (Fonte: Silva e Menezes, 2005).

Do ponto de vista da natureza do estudo, trata-se de uma **pesquisa aplicada**, uma vez que, este tipo de estudo caracteriza-se por seu interesse prático, isto é, que

os resultados sejam aplicados ou utilizados na solução de problemas que ocorrem na realidade (MARCONI E LAKATOS, 2008).

Para atingir seus objetivos, esta pesquisa possui **caráter descritivo**, pois para Marconi e Lakatos (2008), ela aborda a descrição, registro, análise e interpretação de fenômenos atuais, objetivando seu funcionamento no presente. Silva e Menezes (2005) afirmam que esse estudo envolve o uso de técnicas padronizadas de coleta de dados: questionário e observação sistemática. Assume, em geral, a forma de levantamento. Quanto à forma de abordagem do problema, será utilizada a **pesquisa quantitativa**, pois se apropriará de métodos estatísticos na coleta e análise de informações. Sobre essa forma de abordagem, é evidenciado o uso da quantificação de opiniões, dados, nas formas de coleta de informações, assim como também o emprego de recursos e técnicas estatísticas (OLIVEIRA, 2004).

Com relação aos procedimentos técnicos, será utilizado o **estudo de caso**. De acordo com Yin (2005), o método estudo de caso é o delineamento mais adequado para a investigação de um fenômeno contemporâneo dentro de seu contexto da vida real, especialmente quando os limites entre o fenômeno e o contexto não estão claramente definidos, onde enfrenta uma situação tecnicamente única em que haverá muito mais variáveis de interesse do que pontos de dados e, como resultado, baseia-se em várias fontes de evidência e beneficia-se do desenvolvimento prévio de proposições teóricas para conduzir a coleta e análise dos dados. Acrescenta Yin (2005), o estudo de caso é o método indicado quando se colocam questionamentos do tipo “como?” e “por quê?”, quando o pesquisador tem pouco controle sobre o evento estudado. A ideia é complementar esta abordagem com conceitos próprios do estudo de caso, a fim de formalizar um modelo de simulação representativo de um cenário real específico a ser adotado.

Ainda conforme Yin (2005), a realização de um estudo de caso como método de pesquisa, envolve três etapas distintas de trabalho: a escolha do referencial teórico sobre o qual se pretende trabalhar; a seleção dos casos e o desenvolvimento de protocolos para a coleta de dados; condução do estudo de caso, com a coleta e análise de dados, culminando com o relatório do caso; a análise dos dados obtidos à luz da teoria selecionada, interpretando os resultados.

### 3.3 Campo de Observação da Pesquisa

O campo de observação da pesquisa apresenta o objeto de realização do estudo, dividido em dois tópicos: o geográfico e o empresarial.

#### 3.3.1 A Ótica Geográfica

O objeto de análise é uma empresa do setor industrial de cerâmica vermelha, que se situa no município de São Miguel do Guamá, nordeste do Estado do Pará e, a 143 km da capital, Belém (*Vide Figura 3.2*).

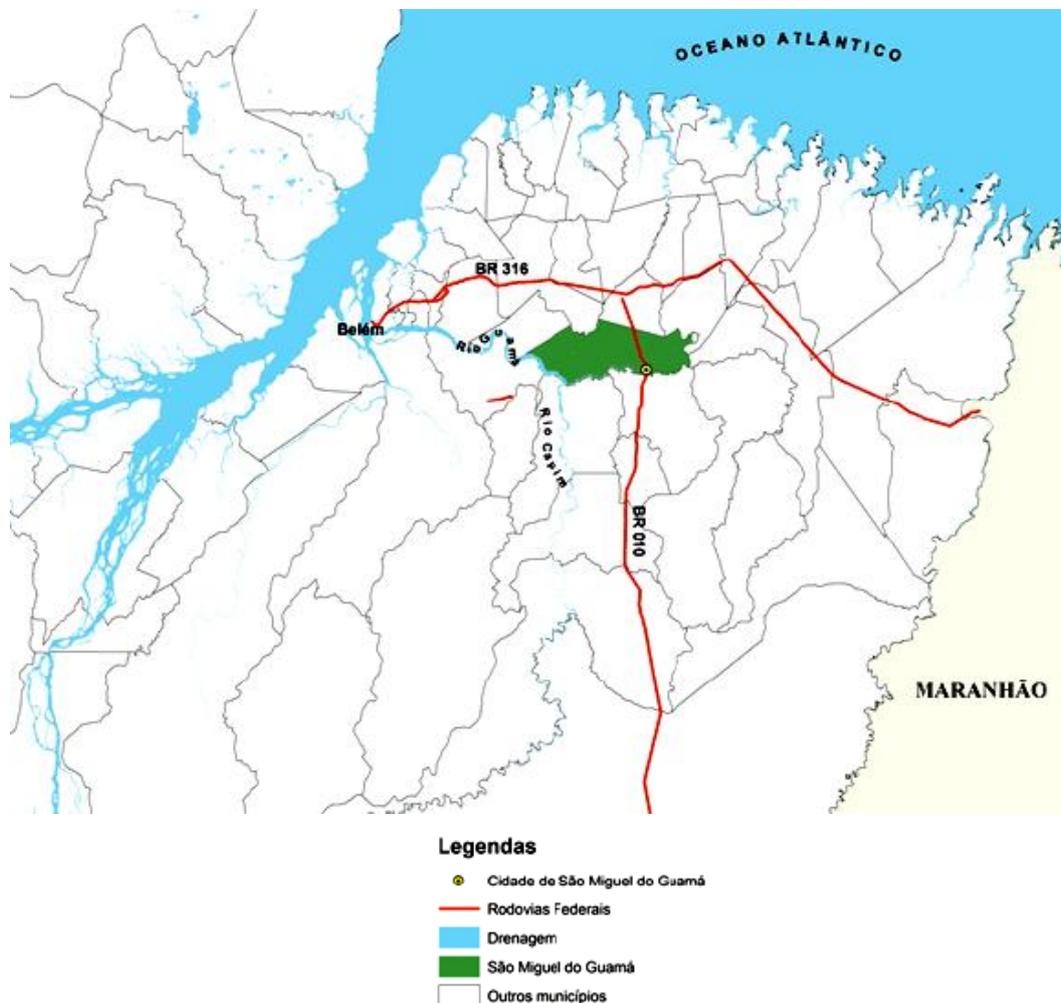


Figura 3.2 – Localização do município de São Miguel do Guamá (Fonte: IBGE *apud* Cordovil, 2010).

De acordo com Cordovil (2010), a atividade da cerâmica vermelha é uma das marcas da economia do território de São Miguel do Guamá, pois esta existe desde o início do século passado. No começo do século XX, eram as olarias que

transformavam a matéria-prima argila em telhas e em tijolos, entretanto, a partir da década de oitenta do mesmo século, as olarias são substituídas pelas indústrias cerâmicas que formam o pólo cerâmico produtor de telhas e tijolos do município.

De acordo com o SINDICER (2009), o município de São Miguel do Guamá é caracterizado pelo aglomerado de empresas cerâmicas, considerado o maior polo da Região Norte do País em termos de volume de produção. São 52 indústrias ceramistas SINTIMIG – Sindicato dos Trabalhadores da Indústria de São Miguel do Guamá (2013) e apresenta o volume de 27 milhões de peças mensais entre blocos de vedação, blocos estruturais, bloco de laje e telhas (SEBRAE, 2004). Entretanto, destes 42, apenas 28 são associadas ao sindicato dos ceramistas e somente 34 estão cadastradas à prefeitura do município. Apesar do pólo cerâmico de São Miguel do Guamá ser considerado o maior da região Norte do Brasil, ele apresenta uma grande diversidade quanto ao tamanho dos empreendimentos, grau de tecnologia, produtividade, eficiência no ato da produção e distribuição das mercadorias produzidas.

A formação do aglomerado de empresas cerâmicas naquele município está ligada aos fatores de ordem naturais e humanos presentes na sua configuração territorial, destacando-se as redes de integração espacial (energia, transporte e telecomunicação) e a concentração de recursos naturais (argila) de boa qualidade nas proximidades da cidade, onde está localizada boa parte das unidades de produção (CORDOVIL, 2010).

Cordovil (2010) discute ainda as vantagens proporcionadas pelas malhas viárias. A rodovia Belém-Brasília (BR-010) também colabora para a existência do pólo cerâmico, visto que ela se integra a um sistema de rodovias, tanto federal (BR 316) quanto estadual (PA 251), fato que permite a ligação das unidades produtoras de cerâmicas vermelhas de São Miguel do Guamá com outros municípios consumidores de suas mercadorias, que estão distribuídos pelo Estado do Pará (Região Metropolitana de Belém, Castanhal, Paragominas e outros). Essa rodovia federal, por conta de sua importância na distribuição, constitui-se como o principal eixo de escoamento das mercadorias geradas nas indústrias cerâmicas. A Belém-Brasília também é a via de ligação entre as cerâmicas e os ramais. Estes são as estradas vicinais de mão dupla que não apresentam nenhum tipo de infra-estrutura ou sinalização e que dão acesso aos barreiros, nome popular dado aos locais de extração de argila em São Miguel do Guamá.

### 3.3.2 A Ótica Empresarial

O estudo foi realizado em uma única empresa do Arranjo Produtivo Local de São Miguel do Guamá. A referida empresa é considerada representativa as demais empresas tanto pelas características do seu sistema produtivo, como em termos de volume de produção.

Yin (2005) discute sobre a validade do estudo de um único caso. O mesmo salienta que, se o caso estudado representa um caso crítico ele irá afetar diretamente uma teoria bem formulada, servindo de teste para confirmá-la, desafiá-la ou até mesmo ampliá-la. O caso pode representar também um caso extremo ou único ou pode se tratar de um caso revelador que não era possível de ser investigado anteriormente e, desta forma se constituírem objetos válidos para estudo. Deve-se ressaltar, entretanto, que estudos de caso único devem ser feitos com cuidado, principalmente no tocante às generalizações que são feitas a partir dos mesmos; além disto, pode-se verificar ao longo do estudo que o caso estudado não se constituía na situação que se pensava estudar, podendo assim não ter adesão à teoria inicialmente proposta (YIN, 2001).

### 3.4 Definição da Metodologia de Modelagem e Simulação

No tópico 2.4.3, do Capítulo 2 foram apresentadas algumas das metodologias de abordagem do trabalho de simulação encontradas na literatura. Comparando-se as metodologias percebe-se que não diferem muito em seus princípios básicos. A metodologia escolhida foi a de Chwif (1999), com base em que o problema de pesquisa já fora definido no Capítulo 1, que é o problema do balanceamento de linhas, cabendo a necessidade, a partir de então de: identificar os indicadores potenciais da linha de produção; modelar o sistema produtivo, abrangendo todos os indicadores e buscando a melhor sincronização de seus recursos disponíveis; experimentar o modelo por meio de rodadas de simulação computacional, buscando o maior número de replicações, à medida que se insere mais informações (entrada) no modelo com objetivo de obter (saída) uma amostragem estatística confiável; analisar os resultados e apresentá-los com base nos relatórios gerados pelo *software*.

Sendo assim, a metodologia proposta por Chwif (1999) está compatível para com os preceitos da pesquisa. A Figura 3.3 ilustra a referida metodologia.

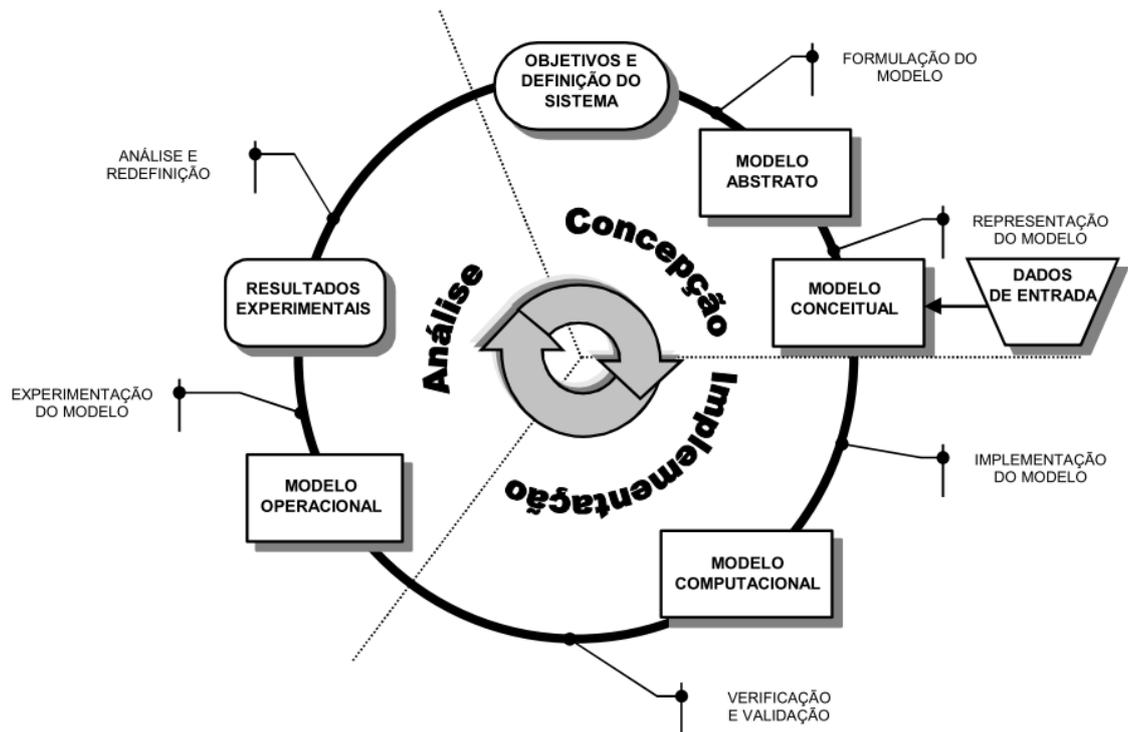


Figura 3.3 - Metodologia de modelagem e simulação (Fonte: Chwif 1999).

Conforme a metodologia de Chwif (1999), esta pesquisa foi dividida em 03 macro etapas: a etapa de concepção; a etapa de implementação e; a etapa de análise.

Na etapa de concepção, envolve a realização de uma pesquisa bibliográfica visando embasar e confirmar a problemática quanto ao uso de ferramentas computacionais como instrumento de balanceamento na indústria cerâmica em questão quanto ao processo produtivo complexo. A partir de então, realiza-se um estudo de campo preliminar com intuito de definir o tamanho do sistema a ser explorado. Essa etapa também envolve o levantamento e identificação dos indicadores a serem analisados, bem como as variáveis de entrada do modelo conceitual.

Ainda na etapa de concepção, procede-se a coleta de dados no chão de fábrica e modelagem dos dados de entrada do modelo conceitual. E de acordo com Chwif e Medina (2010), a qualidade dos dados de entrada é fundamental no desenvolvimento de um modelo, para que o mesmo reflita da melhor forma possível a realidade analisada. Neste sentido, utilizam-se técnicas para o tratamento dos dados de modo a restringir os dados discrepantes e, posteriormente, segue com a inferência no software de simulação.

E finalizando a etapa de concepção, ocorre a representação do sistema real através do modelo conceitual. Neste modelo, procura-se se abstrair os conceitos do sistema produtivo das fábricas cerâmicas, a fim de representar todas as características e peculiaridades do sistema estudado. Logo o modelo conceitual além de agilizar o processo de elaboração do modelo computacional, também corresponde ao mapeamento do processo. Autores como Law (1991) e Chwif e Medina (2010) alertam em seus trabalhos que a etapa de criação do modelo conceitual é um dos aspectos mais importantes de um estudo de simulação, muito embora algumas literaturas não abordem este aspecto. Neste sentido, o modelo conceitual é desenvolvido conforme a técnica IDEF-SIM, proposta por Leal, Almeida e Montevechi (2008).

Na etapa de implementação, é desenvolvido o modelo computacional. Onde se abstrai as informações do modelo conceitual e as transfere para o modelo computacional, com crescentes níveis de detalhes adicionados à medida que se proceda ao seu desenvolvimento. É recomendado que o modelo inicie de forma simplificada e vá crescendo até alcançar algo mais complexo, de forma que o mesmo esteja passível de experimentações e ofereça resultados que satisfaçam aos objetivos do trabalho.

Posteriormente, segue a verificação e validação do modelo computacional. Quanto à verificação, busca-se identificar e corrigir as falhas de programação do modelo, a fim de assegurar que o mesmo funcione conforme o desejo de seu usuário. A validação por sua vez, ocorre um comparativo entre os resultados da simulação do modelo computacional e os parâmetros reais do processo produtivo estudado. É nesta etapa que se busca confirmar se as informações geradas, as configurações e se os dados de entrada foram assimilados corretamente pelo modelo computacional (LAW E KELTON, 2000).

A etapa de análise é composta pelo projeto de experimentos, que traz a possibilidade de um aprendizado mais conciso do sistema a ser analisado. Nessa etapa, ocorre a determinação de alternativas a serem simuladas e adequação do modelo a cada uma das alternativas. Para cada uma das configurações analisadas, são decididos períodos de aquecimento (quantidade de tempo que o modelo precisa correr antes que a coleta de dados estatísticos seja iniciada), duração da simulação, número de replicações (uso do mesmo modelo com diferente conjunto de valores aleatórios).

## **CAPÍTULO 4 – ESTUDO DE CASO**

Este capítulo faz uma descrição do estudo de caso realizado em uma empresa cerâmica de São Miguel do Guamá. São citados os aspectos contextuais e produtivos da referida empresa bem como a aplicação da modelagem e simulação da linha de produção com base na metodologia de Chwif (1999). Através da simulação computacional e do embasamento na literatura especializada, procurou-se atingir o objetivo geral da pesquisa.

### **4.1 A Empresa**

A empresa objeto de estudo está localizada no Município de São Miguel do Guamá, desempenha atividade industrial de produção de minerais não metálicos e atua no segmento de produtos cerâmicos de vedação para construção civil.

A referida empresa foi fundada em 1995 e, ao longo desses anos, vem desempenhando atividades visando ao desenvolvimento local, através da adoção de políticas voltadas para a preservação ambiental, como o programa de créditos de carbono, bem como a adoção de parcerias com as universidades da região, servindo de campo de pesquisa.

A empresa investe continuamente em tecnologias de produção, e hoje é destaque na região, seja pela técnica avançada de produção em comparação as demais empresas do setor de São Miguel do Guamá, seja pelo alto volume de produção aliado à qualidade do produto.

Atualmente, a empresa conta com 53 funcionários, sendo que 2 deles trabalham no escritório, 7 dedicados aos serviços gerais e 44 funcionários ligados diretamente à produção.

A mesma produz blocos de vedação (tijolo) para alvenaria, sendo 04 tipos: 9x14x19 – tijolo 6 furos; 9x19x19 – tijolo 8 furos; 9x19x29 – tijolo 8 furos e; o tijolo 11x23x23 – tijolo 8 furos. Atende ao mercado da Capital do Estado, Belém e da região nordeste do Pará. Sendo suas vendas direcionadas para empresas construtoras, para lojas de materiais de construção e consumidores de pequenas quantidades.

#### **4.1.1 Tecnologia de Fabricação**

Segundo Macke (1999), o nível tecnológico de uma indústria cerâmica vermelha pode ser analisado de acordo com as características presentes nas

diversas etapas produtivas. No caso deste trabalho é analisado o sistema de manufatura da empresa. Ainda de acordo com Macke (1999), essa análise visa levantar pontos de melhoria no sistema de manufatura que possam ser combinados com as melhorias do sistema produtivo. Isso porque, às vezes, não basta somente olhar para o sistema de produção e propor melhorias em cima de tecnologias de manufaturas completamente ultrapassadas.

Desta forma, são apresentadas para cada etapa de fabricação, as principais características do sistema de manufatura da indústria de cerâmica vermelha em estudo.

**Primeira etapa: Preparação da massa** – a empresa realiza o destorroamento e a moagem da argila para posteriormente beneficiamento da mesma (homogeneização no misturador e adensamento no laminador).

**Segunda etapa: Extrusão** – a massa plástica é compactada na extrusora (maromba) a partir da alta pressão, em uma câmara a vácuo, contra um molde chamado boquilha, onde a massa ganha o número de furos desejado. Posteriormente, a massa moldada passa pelo corte automatizado. Neste existe um comando elétrico com temporizador, no qual regula os cortes dos elementos cerâmicos. A cortadora também possui escoras laterais que tem a função de definir o formato da peça quanto à largura e também possui uns finos cabos de aço que tem a função de cortar a peça na dimensão desejada quanto ao comprimento.

**Terceira etapa: Secagem** – a empresa realiza secagem em uma estufa estruturada por exaustores conectados ao forno paulista, o que proporciona o reaproveitamento do ar quente oriundo destes fornos. O secador também é estruturado por trilhos que permite o transporte das vagonetes carregadas em seu interior. Existe ainda dispositivos de controle de temperatura interna, umidade e distribuição do ar quente.

**Quarta etapa: Sinterização (Queima)** – a empresa possui 2 tipos de fornos: um forno semi-contínuo, denominado forno Hoffmann e; o forno do tipo túnel, denominado forno Paulista. O forno Hoffmann possui 72 linhas, sendo que cada linha possui capacidade de 2.100 tijolos, as quais não funcionam independentemente uma das outras, pois o calor percorre uma a uma das linhas de acordo com a alimentação (combustível) e com a abertura de válvulas de ar. Este forno utiliza como combustível, a lenha. Existe o controle da temperatura, porém não existe um procedimento formalizado para a abertura das válvulas. Por outro lado,

tem-se 3 fornos paulistas, sendo que cada forno possui duas câmaras e cada câmara tem capacidade de 24.500 tijolos. Esse tipo de forno possui um fluxo produtivo contínuo e ritmado, e apresenta pouca variabilidade no tempo de queima. Este emprega serragem como combustível e há controle da temperatura e da duração da queima.

Tem-se então a planta da empresa em estudo na Figura 4.1.

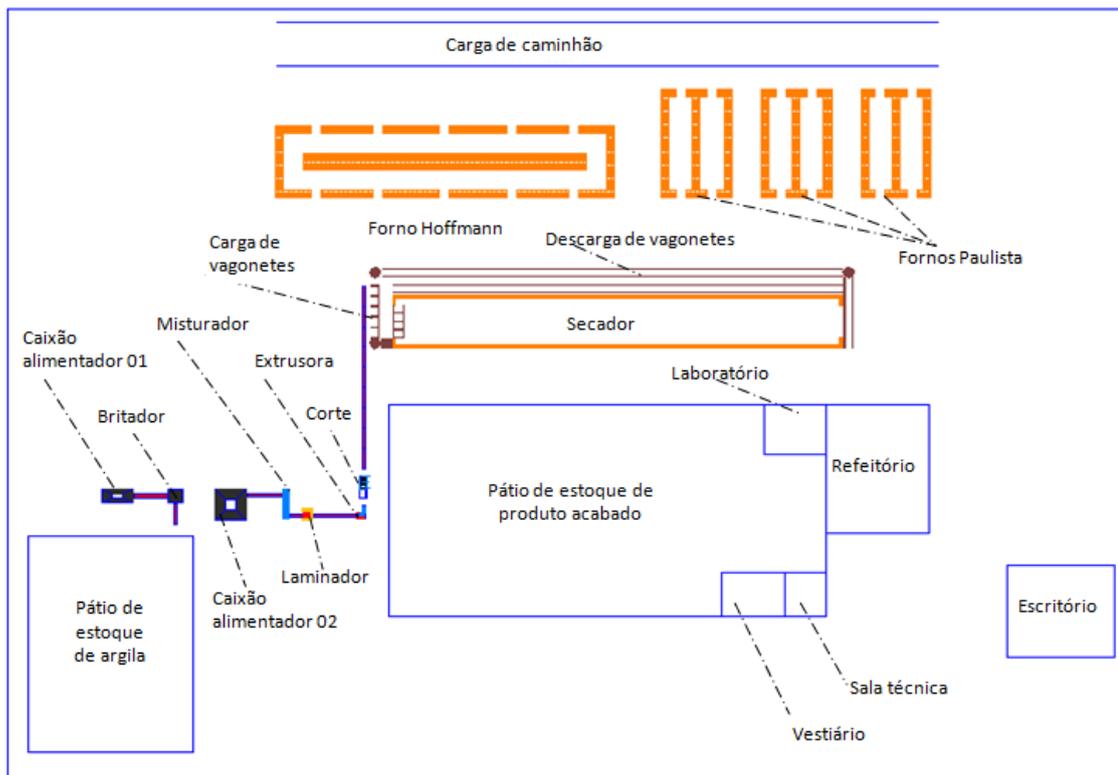


Figura 4.1 – Planta da Empresa em estudo (Fonte: O autor, 2013).

#### 4.1.2 Descrição do Processo Produtivo

A matéria-prima (argila) fica armazenada num pátio coberto, próximo ao primeiro caixão alimentador. Vale ressaltar que o abastecimento de argila no pátio da fábrica ocorre uma vez ao ano. Com a matéria-prima estocada durante esse tempo, ocorre a decomposição da matéria orgânica presente na camada do solo, tornando a matéria mais pura e homogênea para a entrada no processo.

O fluxo inicia com a britagem da argila no primeiro caixão alimentador. São colocadas quantidades não padronizadas de cada tipo de argila neste caixão. Este trabalho é realizado com uma retro-escavadeira. O britador converte a argila em grãos menores e alimenta gradativamente uma esteira. Esta transporta a argila para

próximo do segundo caixão alimentador e a descarrega no chão, gerando um estoque em processo.

O operador da retro-escavadeira alimenta o segundo caixão alimentador já com a argila britada. O material britado é conduzido então ao desintegrador, onde os blocos de argila são desintegrados e as pedras, quando existirem, são separadas por centrifugação.

Todo material desagregado é transportado por uma esteira mecânica até o misturador, onde ocorre a homogeneização da massa, através da adição de água. Na sequência, a mistura é transferida também por esteira mecânica ao laminador, que tem a função de ajustar a granulometria, completar a homogeneização e cortar a massa em laminas.

A massa em formato de laminas é transportada até a extrusora, também conhecida como maromba, onde finalmente a argila é extrudada e logo em seguida ocorre o corte longitudinal da massa argilosa. Os elementos cortados percorrem uma esteira mecânica, havendo posteriormente, intensa mão de obra na retirada dos blocos da esteira e colocadas nas estantes (vagonetes). Uma vez completada a capacidade de uma vagonete, esta é transportada até a balsa. Esta balsa transporta a vagonete carregada até o secador.

No secador, as vagonetes vão se movimentando através de trilhos, sendo que esse movimento fica condicionado a partir da entrada de mais vagonetes no referido secador. Esse percurso é completado em aproximadamente 48 horas consecutivas, o que é um tempo admissível para a secagem dos blocos cerâmicos.

Na sequência, as vagonetes são retiradas do secador por um operário sendo auxiliado por outra balsa, e transportadas por trilhos, ficando estocadas próximas aos fornos, tem-se então mais estoques em processo.

Posteriormente, tem-se o seguinte ciclo: alguns operários carregam uns carrinhos de mão com os elementos cerâmicos secos e transportam até o forno e comportam os mesmos elementos na câmara e retornam para fazer um novo carregamento. Este ciclo é chamado de enforna e se repete até que a câmara atinja sua capacidade máxima.

A queima tem duração bastante variada, uma vez que as câmaras apresentam características bem distintas. A duração média do ciclo completo de queima (pré-aquecimento, queima e resfriamento) gira em torno 48 horas para o forno paulista e de 36 horas para o forno Hoffmann.

Após a queima, ocorre a desenfora, que é a retirada dos blocos cerâmicos da câmara e dando destinação para o produto acabado. Esse processo é semelhante ao da enfora, só que com um operário retirando os blocos do interior da câmara e acomodando-os no pátio de estocagem de produto acabado ou no caminhão para expedição.

A Figura 4.2 ilustra o processo produtivo comentado.

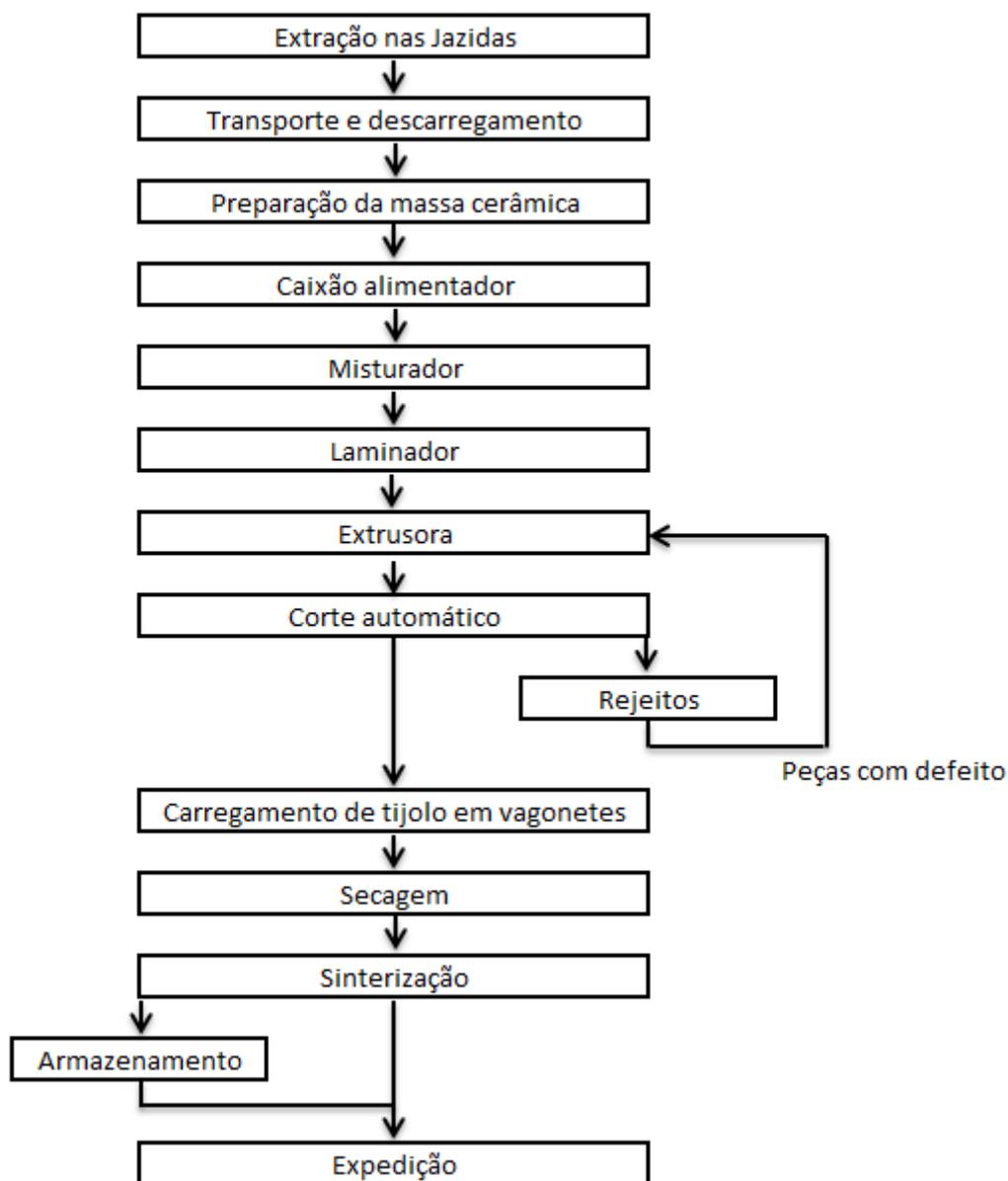


Figura 4.2 – Fluxograma do processo produtivo (Fonte: O autor, 2012).

#### 4.1.3 O Produto

A empresa produz 04 tipos de tijolos de vedação: 9x14x19 – tijolo 6 furos; 9x19x19 – tijolo 8 furos; 9x19x29 – tijolo 8 furos e; o tijolo 11x23x23 – tijolo 8 furos.

Porém, ao verificar o histórico de produção abrangendo o mês de janeiro a maio de 2103 (período de estudo *in loco*), constatou-se que houve concentração na produção do tijolo 9x14x19 (tijolo 6F) e do tijolo 9x19x29 (tijolo 8F), o que possibilitou o estudo da linha somente desses 2 tipos de peças. O relatório de produção (Tabela 4.1) apresenta os quantitativos de cada mês mencionado.

Tabela 4.1 – Relatório de produção mensal (Fonte: A Empresa, 2013).

Mês	Extrusora		Enforna		Desenforna	
	Tijolo - 6F	Tijolo - 8F	Tijolo - 6F	Tijolo - 8F	Tijolo - 6F	Tijolo - 8F
Jan	1.533.300	18.696	1.112.480	22.000	1.142.350	25.000
Fev	1.075.310	90.248	1.191.880	84.300	1.093.900	60.300
Mar	1.218.440	42.811	1.136.980	160.000	1.158.100	99.540
Abr	1.183.754	94.922	1.252.160	204.840	995.300	93.800
Mai	1.142.256	112.660	1.137.420	160.000	1.217.650	159.300
Média	1.230.612	71.867	1.166.184	126.228	1.121.460	87.588
Total	6.512.397		6.462.060		6.045.240	

Nota-se que há uma significativa variabilidade nas quantidades produzidas em cada mês, influenciada pela acentuada variabilidade de produção diária, conforme mostra a Figura 4.3. Acredita-se que uma razão para isso é o desconhecimento de indicadores de desempenho da linha, o que impossibilita uma efetiva programação da produção.

Figura 4.3 – Relatório de produção diária (Fonte: A Empresa, 2013).

E levando-se em consideração a necessidade de estimar uma quantidade de produção tanto do tijolo 9x14x19 como o tijolo 9x14x29 para fins de programação do modelo computacional, gerou a seguinte pergunta: Como estimar uma quantidade de produção para cada tijolo de modo a proporcionar confiabilidade aos dados de saída do modelo computacional e que represente a linha de produção em estudo?

Uma alternativa encontrada foi realizar um estudo de formação de lotes para os 02 tipos de tijolos. Neste sentido optou-se em explorar os meses que tiveram um volume de produção aproximado. Portanto, os meses utilizados no estudo de formação de lotes foram o mês de fevereiro, abril e maio.

Procedeu-se com a formação aleatória de 05 lotes produzidos dos 02 tipos de tijolos para cada mês. Posteriormente calculou-se a média destes 05 lotes. E finalmente, calcularam-se duas médias: a primeira englobando as médias obtidas nos 03 meses para o tijolo 6F resultando um lote de 176.120 tijolos e; a segunda média abrangeu as médias dos 03 meses para o tijolo 8F, resultando um lote de 14.705 peças. Leia-se, portanto: para cada 176.120 tijolos 6F produzidos, há a produção de 14.705 tijolos 8F (*vide* Tabela 4.2).

Tabela 4.2 – Formação dos lotes (Fonte: O Autor, 2013).

Lote	Fevereiro		Abril		Maio		Formação dos Lotes	
	Tijolo 6F	Tijolo 8F	Tijolo 6F	Tijolo 8F	Tijolo 6F	Tijolo 8F	Tijolo 6F	Tijolo 8F
1	170.710	18.148	147.740	22.410	127.820	16.100	176.120	14.705
2	100.100	11.200	235.654	11.200	162.680	7.480		
3	273.430	9.800	340.530	25.550	127.100	14.960		
4	244.720	11.200	122.020	15.484	127.820	11.560		
5	188.410	21.000	144.420	16.320	128.650	8.160		
<b>Média</b>	195.474	14.270	198.073	18.193	134.814	11.652		

A adoção do cálculo da média aritmética foi uma alternativa estatística plausível para a formação dos lotes, uma vez que os parâmetros determinísticos obtidos servem somente para mensurar o intervalo de tempo de formação dos lotes. Portanto, acredita-se que o método estatístico empregado não compromete a aderência do modelo.

## **4.2 Aplicação da Modelagem e Simulação**

Esta seção faz uma abordagem do estudo de modelagem e simulação da linha de produção da empresa estudo de caso.

### **4.2.1 Concepção**

Na etapa de concepção o analista de simulação deve entender claramente o sistema a ser simulado, decidir qual a abrangência do modelo e o nível de detalhe, para enfim transformar o modelo abstrato (modelo que se encontra na mente do analista) em modelo conceitual através de uma técnica apropriada de representação de modelo. O principal resultado desta etapa em um projeto de simulação é o modelo conceitual validado, que juntamente com dados de entrada modelados, irá possibilitar a construção do modelo computacional do sistema (CHWIF, 1999).

#### **4.2.1.1 Definição do Sistema e Objetivos**

A planta da fábrica possui arranjo físico por produto, ou seja, todos os elementos cerâmicos passam pela mesma sequência de operações não possuindo assim rotas alternativas. Portanto a planta da fábrica possui uma única linha.

A linha de produção origina um único produto (tijolo), sendo que este produto possui 04 tipos de modelos diferentes (9x14x19, 9x19x19, 9x19x29 e 11x23x23) e com tempo de *setup* (troca da boquilha da extrusora) relativamente pequeno. Ao analisar a classificação de Scholl (1999), percebe-se que a linha de produção em questão é do tipo misto.

Conforme a revisão de literatura no Capítulo 2, a linha tem as seguintes características:

- Possui variações consideráveis de tempos de execução das tarefas atribuídas à instabilidade dos trabalhadores em relação à taxa de trabalho, requerendo uma consideração de tempos estocásticos para a execução da modelagem (BECKER E SCHOLL, 2003);
- O sistema de transporte é sincronizado (por esteira mecânica) até a zona de carregamento de vagonetes, posteriormente o sistema se torna não sincronizado, onde o dispositivo transportador é o operário (MERENGO, NAVA E POZZETTI, 1999);

- O trabalho avança conforme as operações anteriores são concluídas não ficando restritas a um tempo de ciclo (BOYSEN, FLIEDNER E SCHOLL, 2007);

Seguem outras características peculiares ao chão de fábrica estudado:

- Trabalho em 01 único turno diário para os operadores dedicados à extrusão, sendo de segunda a sexta-feira: de 07:00 as 12:00 horas e de 13:30 as 16:30 horas com intervalo de 09:00 as 09:15 para o café da manhã e de 12:00 as 13:30 para o almoço. E no sábado o turno é de 07:00 as 11:00 horas sem intervalos. Totalizando em 41,25 horas de carga horária semanal;
- Os operadores dedicados a enfora e desenfora trabalham com meta diária, sendo: os operadores da enfora para o forno paulista tem meta de enchimento de uma câmara (capacidade de uma câmara é 24.500 tijolos) por dia, os operadores da enfora para o forno Hoffmann tem meta de enchimento de 20 linhas por dia (cada linha tem capacidade de 2.100 tijolos) e os operadores responsáveis pela desenfora tem meta de desenforar 40.000 tijolos/dia e, conseqüentemente, encher 04 caminhões (capacidade de 01 caminhão é de 10.000 tijolos ou 10 milheiros);
- Trabalho em 03 turnos para os operários dedicados a inspeção da queima dos tijolos no forno;
- Demanda de 40.000 tijolos/dia. Equivalente à expedição de 04 caminhões/dias com capacidade de 10.000 tijolos (10 milheiros) cada;

Ao ter conhecimento das características da linha em estudo, partiu-se para a determinação do escopo do modelo.

Chwif e Medina (2010) afirmam que o conteúdo do modelo envolve o escopo do modelo, onde a sua descrição do escopo deve ser curta e direta; o nível de detalhamento esperado, sendo um pouco mais sutil e especificando o grau de profundidade do modelo.

Antes da determinação do escopo, têm-se as seguintes considerações a respeito da linha de produção com vista à modelagem e simulação de eventos discretos, a dizer:

- A impossibilidade de mensuração do processo de preparação da matéria-prima, devido à argila passar pelos processos de desintegração, homogeneização e laminação em pequenos fragmentos (eventos contínuos);
- A possibilidade de modelagem da etapa de extrusão onde após a saída da extrusora, a massa argilosa obtém forma de bloco (corte), sendo configurado como evento discreto;
- Com relação ao processo de secagem, será considerado uma média do tempo em que o produto em processo passa no interior do secador;
- As etapas inerentes ao processo de queima (transporte e enfora) são passíveis de mensuração e, também têm características de eventos discretos;
- Quanto ao processo de queima, só será considerada a média dos tempos tanto para o forno Hoffmann quanto para o forno paulista;
- A etapa de desenfora (descarregamento do forno, transporte e carregamento do caminhão para expedição) possui características similares à etapa de enfora, portanto sendo passível de mensuração;
- A empresa possui produção por demanda, ou seja, o produto acabado é logo expedido, o que resulta em pouca prática de processos de estocagem do produto acabado. Sendo assim, a etapa de estocagem não será inclusa no modelo;

Com base nestas considerações, o escopo do modelo abrangerá desde a saída do bloco da extrusora até a etapa de carregamento do caminhão para expedição. E como detalhamento, o modelo considerará somente os recursos que integram as 03 etapas citadas, tais como: operadores; máquinas e dispositivos de transportes.

Têm-se a relação das variáveis de entrada e de saída do modelo (Tabela 4.3). Sendo a obtenção das variáveis de entrada a partir da coleta de dados no chão de fábrica e as variáveis de saída a partir de experimentação do modelo computacional. Variáveis de saída estas que auxiliaram o autor na obtenção dos indicadores de desempenho da presente dissertação.

A Tabela 4.3 explicita as variáveis de entrada e de saída do modelo.

Tabela 4.3 – Variáveis de entrada e de saída (Fonte: O Autor, 2013).

Variáveis de entrada	Intervalo de chegadas de tijolos na esteira Intervalo de chegadas de tijolos na vagonete Tempo de retirada do tijolo da esteira Tempo de depósito do tijolo na vagonete Tempo de retirada do tijolo da vagonete Tempo de depósito do tijolo no carrinho de mão Tempo de retirada do tijolo do carrinho de mão Tempo de depósito do tijolo no caminhão Tempo de secagem Tempo do ciclo de queima do forno Hoffmann Tempo do ciclo de queima do forno Paulista Intervalo entre paradas da extrusora Tempo de parada para manutenção da extrusora Tempo de setup da extrusora
Variáveis de saída	Quantidade de tijolos 6F extrudados Quantidade de tijolos 8F extrudados Quantidade de tijolos 6F enfornados Quantidade de tijolos 8F enfornados Quantidade de tijolos 6F desenfundados Quantidade de tijolos 8F desenfundados Tempo de processamento

E, portanto, têm-se os indicadores preconizados por Becker e Scholl (2006), os quais são suficientes para resolver a questão do balanceamento de linha de produção do presente estudo. Os indicadores de desempenho, a saber, são:

- A taxa de produção da linha;
- A taxa de utilização dos recursos.

#### 4.2.1.2 Coleta dos Dados de Entrada do Modelo

De acordo com Chwif e Medina (2010), um cuidado especial deve ser tomado para diferenciar o que são “dados de entrada” (valores fornecidos ao modelo de simulação) e o que são “dados de saída” (valores obtidos do modelo de simulação).

Ainda Segundo os mesmos autores, o tamanho da amostra deve estar entre 100 e 200 observações. Amostras com menos de 100 observações podem comprometer a identificação do melhor modelo probabilístico, e amostras com mais de 200 observações não trazem ganhos significativos.

Desta forma, foram cronometrados 100 amostras pelo autor no chão de fábrica, e posteriormente, esses dados foram transformados em minutos como medidas de tempo. Os dados da amostra são relativos às variáveis de entrada comentadas anteriormente.

É importante frisar que, embora, os dados citados acima sejam suficientes para a modelagem conceitual. Outros dados foram coletados no chão de fábrica e outros foram obtidos juntamente com o setor administrativos, tais como: número de funcionários; quantidade produzida por mês; quantidade produzida por dia; tipos de famílias de produtos; tempo de produção diária e por turnos de trabalho; histórico da demanda; início e término da produção; quantidade de peças produzidas por hora; tipo de peças produzidas por dia; número de funcionários que intervêm no processo.

#### 4.2.1.3 Tratamento dos Dados de Entrada do Modelo

Por se tratar de um sistema estocástico (valores de entrada aleatórios), as amostras coletadas tiveram que sofrer um tratamento para, então, serem aderidas às distribuições estatísticas conhecidas. Para esse processo de identificação das distribuições e aderência estatística, foi utilizado o módulo para modelagem de dados do *Promodel*, o *Stat:Fit*. A Figura 4.4 mostra a interface de entrada do *Stat:Fit*.

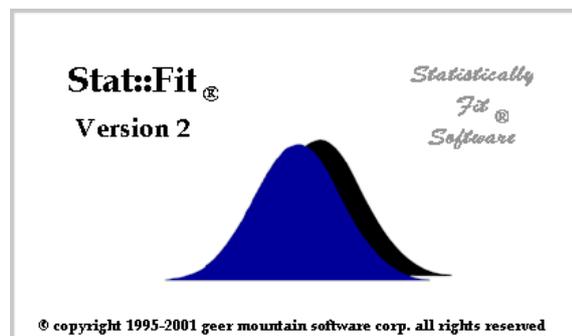


Figura 4.4 – Interface do módulo *Stat:Fit* (Fonte: *Promodel*, 2011).

Primeiramente, aplicou-se a técnica de identificação de *outliers* (valores discrepantes). Para Chwif e Medina (2010) as razões mais comuns para o surgimento dos *outliers* são algum erro na coleta de dados ou um evento raro e totalmente inesperado. Com este intuito, todos os dados coletados em campo foram inseridos no módulo *Stat:Fit* do *Promodel*. Estes valores foram plotados em forma de gráficos *Box-plot*.

Tomando como exemplo o gráfico *boxplot* (Figura 4.5) referente ao intervalo de chegadas à esteira, a “caixa” marca o intervalo entre o primeiro e o terceiro quartis e as linhas retas horizontais representam os extremos para os valores não discrepantes. Percebe-se que o valor de entrada 0.035 minutos está fora da zona que representa valores não discrepantes, o que possibilita apontá-lo como *outlier*. Porém essa leitura ainda não torna conclusiva quanto à decisão em relação a mantê-lo ou suprimi-lo da amostra.

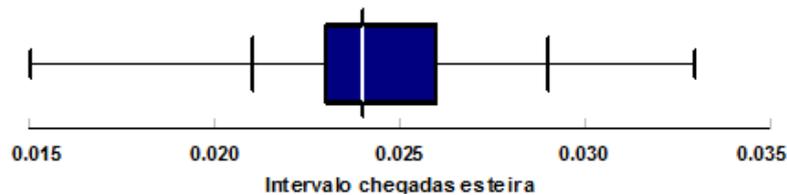


Figura 4.5 – Gráfico *Box-Plot* (Fonte: Autor, 2013).

Foi então aplicada à técnica apresentada por Chwif e Medina (2010), que é a de construir um intervalo de valores a partir dos quartis da amostra ( $Q$ ). Considerando que  $Q_1$  e  $Q_3$  são, respectivamente, os valores do primeiro e terceiro quartis e a amplitude interquartil ( $A$ ) é calculada pela diferença:

$$A = Q_3 - Q_1 \quad (4.1)$$

Onde:

$Q1-1,5A$  (abaixo desse valor considera-se *outlier* moderado);

$Q3+1,5A$  (acima desse valor considera-se *outlier* moderado).

Desta forma os quartis das amostras coletadas foram obtidos através da “fórmula quartil do *Excel*” e em seguida houve a identificação dos *outliers* a partir da utilização das expressões  $Q3+1,5*(Q3-Q1)$  e  $Q1-1,5*(Q3-Q1)$ . Tomando-se ainda como exemplo, o intervalo entre chegadas à esteira, os resultados das expressões foram 0,017583 e 0,030250 minutos, respectivamente. Identificam-se como valores discrepantes (*outliers*), os valores abaixo de 0,017583 e acima de 0,030250. Uma vez identificados os *outliers*, estes foram suprimidos da amostra. É válido destacar que esses procedimentos foram realizados para todas as amostras consideradas de variáveis de entrada do modelo computacional (ver Apêndice A).

O passo seguinte foi fazer um estudo para verificar se a amostra (sem *outlier*) representa uma sequência de valores independentes e identicamente distribuídos, em outras palavras, se não existem correlações entre as observações que compõem a amostra. A hipótese de independência geralmente não é válida em situações que existe uma curva de aprendizado ou quando existe correlação entre mais de um parâmetro de entrada no modelo (CHWIF E MEDINA, 2010).

A análise de correlação foi realizada com base nos diagramas de dispersão gerados pelo *Stat:Fit*. A Figura 4.6 mostra o diagrama de dispersão para o intervalo de chegadas a esteira, os pontos dispersos indicam que não há correlação entre os dados que compõem a amostra. Conclui-se que estes dados estão identicamente distribuídos e representam uma sequência de valores independentes.

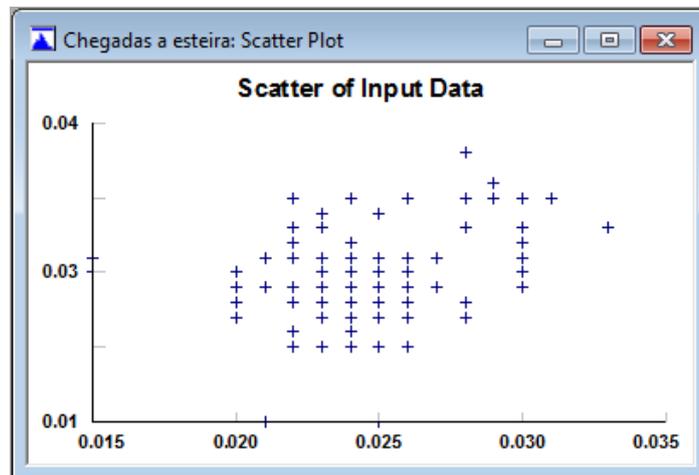


Figura 4.6 – Diagrama de dispersão (Fonte: Autor, 2013).

Dados os valores das amostras, agora tratados, realizou-se o ajuste estatístico ainda com o *Stat:Fit*, com a finalidade de identificar uma distribuição de probabilidades que representasse o fenômeno. Neste sentido, foi construído um histograma para cada amostra, a fim de verificar a consistência dos dados e, posteriormente, foi realizado o teste de aderência, com isso verificou a distribuição estatisticamente adequada para representar os dados coletados. A Figura 4.7, apresenta o histograma, evidenciando uma distribuição normal para o intervalo de chegadas à esteira.

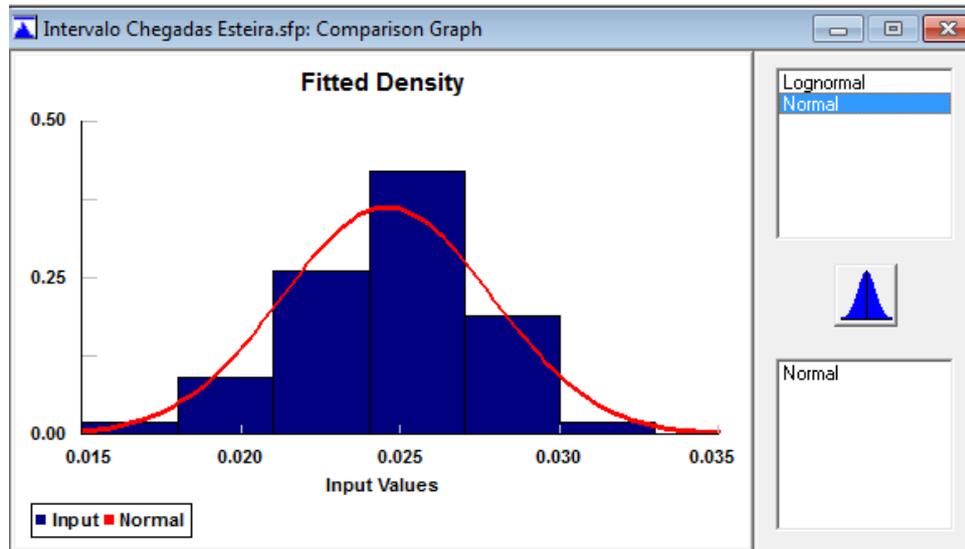


Figura 4.7 – Histograma (Fonte: Autor, 2013).

As informações relativas às distribuições estão expressas na Tabela 4.4. Este estudo estatístico possibilitou analisar o comportamento das amostras que serão inseridas nos modelos e forneceu informações relevantes para a modelagem computacional, garantindo que este modelo represente o real comportamento do objeto estudado. A partir de então, passa-se a desenvolver o modelo conceitual.

Tabela 4.4 – Distribuições de probabilidade obtidas (Fonte: O Autor, 2013).

Variáveis de Entrada	Média	Distribuição	Expressão
Intervalo de chegadas de tijolos na esteira	0,024	Normal	$N(2.46e-002, 3.29e-003)$
Intervalo de chegadas de tijolos na vagonete	0,043	Erlang	$ER(4.28e-002, 134)$
Tempo de retirada do tijolo da esteira	0,0026	Erlang	$ER(2.56e003, 22.)$
Tempo de depósito do tijolo na vagonete	0,004	Erlang	$ER(3.54e-003, 29.)$
Tempo de retirada do tijolo da vagonete	0,0026	Erlang	$ER(2.56e003, 22.)$
Tempo de depósito do tijolo no carrinho de mão	0,004	Erlang	$ER(3.54e-003, 29.)$
Tempo de retirada do tijolo do carrinho de mão	0,0026	Erlang	$ER(2.56e003, 22.)$
Tempo de depósito do tijolo no caminhão	0,004	Erlang	$ER(3.54e-003, 29.)$
Tempo de secagem	2760,66	*	*
Tempo do ciclo de queima do forno Hoffmann	744	*	*
Tempo do ciclo de queima do forno Paulista	1824	*	*
Intervalo entre paradas da extrusora	36,2	Weibull	$20.+W(2.32, 18.)$
Tempo de parada para manutenção da extrusora	8	Weibull	$3.+W(1.37, 9.)$
Tempo de setup da extrusora	36,58	Gama	$29.+G(2.98, 2.42)$

#### 4.2.1.4 Desenvolvimento do Modelo Conceitual

O modelo conceitual foi construído tendo por base os conceitos do método IDEF-SIM. Neste modelo o pesquisador agregou o conhecimento adquirido durante

as visitas ao chão de fábrica tanto por observações, como por entrevistas informais com os envolvidos no processo. Através desta modelagem, obtiveram-se algumas informações importantes do funcionamento do sistema que facilitaram a construção do modelo computacional. O modelo conceitual está expresso na Figura 4.8.

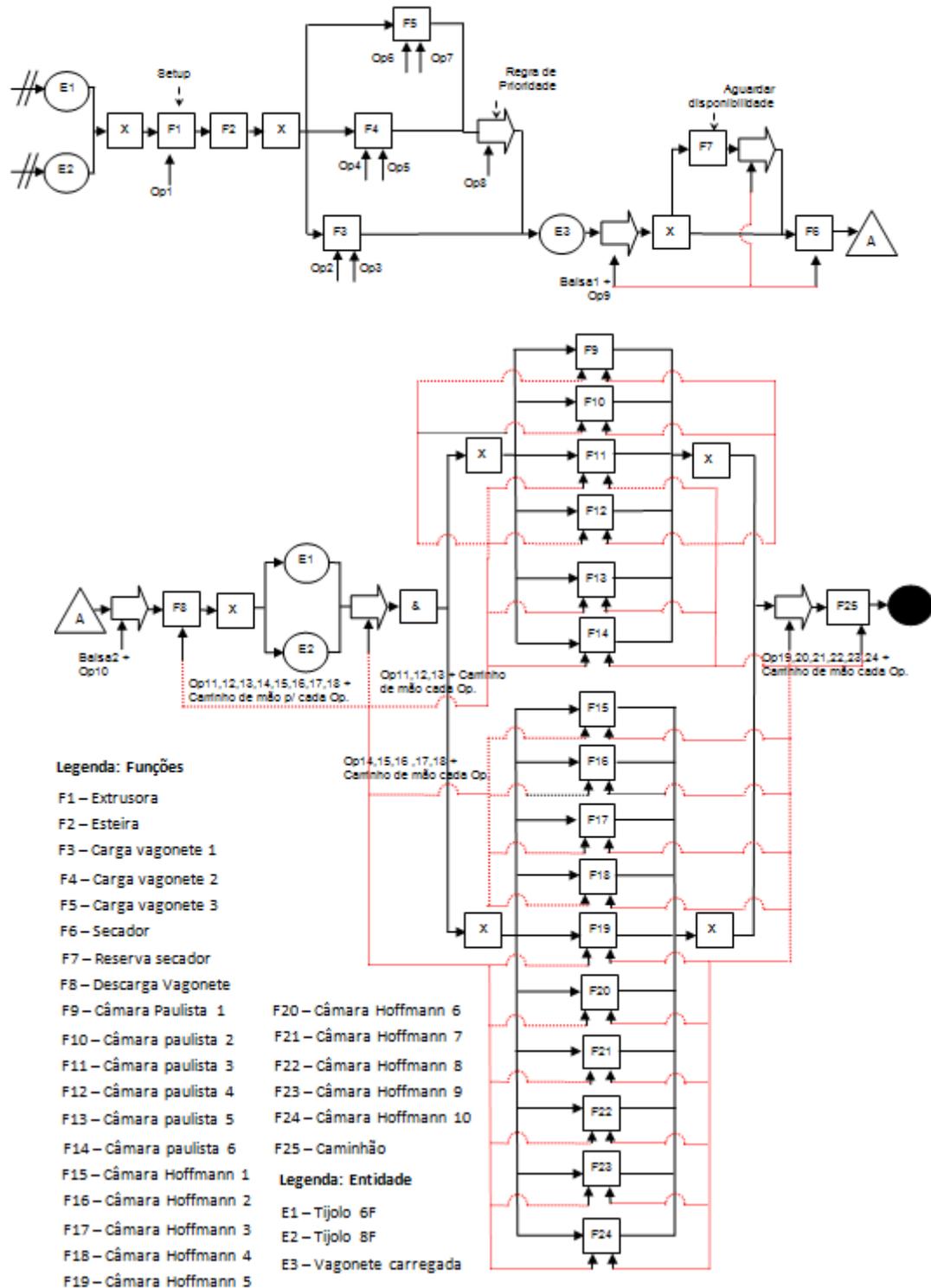


Figura 4.8 – Modelo conceitual (Fonte: O Autor, 2013).

Conforme a Figura 4.8, as setas duplamente riscadas significam a entrada do sistema. A entidade E1 e E2 representam a entrada do tijolo 6F e 8F, respectivamente. Essas entidades são seguidas pela junção “X”, que indica que somente uma das entidades pode estar em processo. Após a entidade passar pela extrusora em F1, a mesma percorre a esteira em F2. A existência da junção “X” indica que as entidades são carregadas tanto pelos operadores Op2 e Op3 em F3 (carga de vagonete 1), pelos Op4 e Op5 em F4 (carga de vagonete 2) como pelos operadores Op6 e Op7 na função F5 (carga de vagonete 2). O carregamento das vagonetes ocorre da seguinte maneira: tanto em F4 como em F5 há o preenchimento de metade da capacidade da vagonete, sendo que a outra metade é preenchida em F3. A regra de prioridade indica que a adição ocorrerá com quem estiver mais próximo de F3. Passada estas etapas, a entidade assume a forma de E3 (vagonete carregada). Esta então é transportada ao secador F6 com o auxílio dos recursos Op8, Op9 e mais a Balsa1. Em situações que o secador atingir sua capacidade, a mesma entidade é transportada a reserva do secador E7 e fica em espera até o secador ficar disponível. Após o regime de secagem, E3 é transportada pelos recursos Op10 e mais a balsa 2 até a área de descarga de vagonete F8.

Vale destacar, que em F8 começa o ciclo da enfora. Nesta etapa a entidade volta a forma de E1 ou E2. A entidade em F8 é descarregada por 8 recursos (Op11, 12, 13, 14, 15, 16, 17 e Op18) e carregadas no recurso carrinho de mão (cada operador utiliza um carrinho de mão), estas são transportadas até as câmaras do fornos. A existência da junção “&” indica as 2 destinações diferentes dadas a entidade, sendo o seguinte: os operadores Op11, 12 e Op13 transportam as entidades até as câmaras paulistas (F9, F10, F11, F12, F13 e F14) e as descarregam das referidas câmaras e; os operadores Op14, 15, 16, 17 e Op18, transportam até as câmaras do forno Hoffmann (F15, F16, 17, F18, F19, F20, F21, F22, F23 e F24) seguindo de descarregamento. A existência das junções “X” antes dos 2 tipos de câmaras indicam a forma alternada do transporte da entidade.

As atividades da etapa de desenfora são semelhantes a enfora. Os operadores Op19, 20, 21, 22, 23 e Op24 carregam seus respectivos carrinho de mão com a entidade e as transportam para o caminhão, este último representado pela função F25. A partir de então, têm-se a bola preenchida que representa o fim do sistema.

Antes de iniciar a modelagem computacional, o modelo conceitual passou pelo teste de validação. Validação está considerada importante, pois garante que o modelo conceitual represente corretamente o funcionamento do sistema modelado, tornando assim o modelo computacional mais fiel a realidade (SARGENT, 2009).

Chwif e Medina (2010), a validação do modelo conceitual ocorre através do confronto do modelo conceitual com o sistema do mundo real. A análise deste confronto é favorecida quando se dispõe da participação de especialistas do sistema real, que podem avaliar os modelos conceituais. Como esta pesquisa contempla um sistema de manufatura cerâmica vermelha, foi utilizada a participação de um especialista deste setor.

Ocorreu uma reunião semiestruturada com este especialista, onde o pesquisador fez uma breve apresentação da simbologia utilizada pela técnica IDEF-SIM e, posteriormente, fez a leitura detalhada do modelo conceitual, explicando cada etapa do mesmo, para que o avaliador entendesse todos os detalhes da técnica e para que também pudesse associar cada etapa com a realidade. Após a leitura, o especialista considerou que o modelo conceitual representava fielmente o funcionamento do sistema estudado. Portanto, o modelo conceitual foi validado.

#### **4.2.2 Implementação**

A etapa de implementação corresponde à construção, verificação e validação do modelo computacional. Nesta etapa, o modelador utiliza os dados tratados do sistema e o modelo conceitual validado para a elaboração do modelo computacional. O uso de uma técnica de modelagem conceitual de fácil entendimento e alto nível de detalhamento se faz importante neste momento de conversão, uma vez que auxilia na construção de um modelo computacional mais fiel a realidade, além de reduzir o tempo gasto na construção do mesmo.

##### **4.2.2.1 Desenvolvimento do Modelo Computacional**

Foi utilizado o *software Promodel®* versão 8.6 para a construção do modelo computacional. Nesta etapa foram utilizados os seguintes elementos que compõem o *software*: locais; entidades; recursos; redes de caminho; chegadas; variáveis; atributos; macros; turnos e processos. A Figura 4.9 mostra a interface de apresentação do *Promodel*.



Figura 4.9 – Interface do software *Promodel* (Fonte: *Promodel*, 2011).

**Locais:** para a construção dos modelos de simulação, o *promodel* requer a definição dos locais, que são as estações de trabalho e seu respectivo posicionamento nos mesmos. Os Locais no modelo computacional correspondem à função “F” presente no modelo conceitual. A Figura 4.10 mostra a configuração dos locais.

Nome	Cap.	Unidade	Descrição	Estatísticas	Regras...	Anotações...
Camara_paulista1	123	1	Mesbuna	Série de Tempo	O Mais Velho	
Camara_paulista2	123	1	Mesbuna	Série de Tempo	O Mais Velho	
Camara_paulista3	123	1	Mesbuna	Série de Tempo	O Mais Velho	
Camara_paulista4	123	1	Mesbuna	Série de Tempo	O Mais Velho	
Camara_paulista5	123	1	Mesbuna	Série de Tempo	O Mais Velho	
Camara_paulista6	123	1	Mesbuna	Série de Tempo	O Mais Velho	
Camara_hoffmann1	74	1	Mesbuna	Série de Tempo	O Mais Velho	
Camara_hoffmann2	74	1	Mesbuna	Série de Tempo	O Mais Velho	
Camara_hoffmann3	74	1	Mesbuna	Série de Tempo	O Mais Velho	
Camara_hoffmann4	74	1	Mesbuna	Série de Tempo	O Mais Velho	

Figura 4.10 – Configuração dos locais (Fonte: Autor, 2013).

**Entidades:** as entidades são os itens que serão processados no sistema. Estas também correspondem às entidades utilizadas no modelo conceitual conforme configuração expressa na Figura 4.11.

Nome	Velocidade (rpm)	Estatísticas	Anotações...
Tijolo_6F	150	Série de Tempo	
Tijolo_8F	150	Série de Tempo	
Vagonete_Carregada	150	Série de Tempo	

Figura 4.11 – Configuração das entidades (Fonte: Autor, 2013).

**Recursos:** Os recursos introduzidos com suas respectivas quantidades no modelo são os operadores e mais os dispositivos de transportes. Os recursos

recebem as mesmas denominações dos recursos utilizados no modelo conceitual. A Figura 4.12 mostra isso.

Ícone	Nome	Unid.	Paradas...	Estatísticas	Especificações	Pesquisar...	Lógica...	Pss...	Anotações...
	Op_ext	1	Relógio	Por Unidade, Série	Red7, R1	Nenhuma	0	1	
	Op_1	2	Relógio/Use	Por Unidade	Não Existe uma Rede	Nenhuma	0	2	
	Op_2	2	Relógio/Use	Por Unidade	Não Existe uma Rede	Nenhuma	0	2	
	Op_3	2	Relógio/Use	Por Unidade	Não Existe uma Rede	Nenhuma	0	2	
	Op_cor	1	Relógio	Por Unidade	Red1, R1, Rtn Home	Nenhuma	0	1	
	Balsa_1	1	Nenhuma	Por Unidade	Red2, R5, Rtn Home	Nenhuma	0	1	
	Balsa_2	1	Nenhuma	Por Unidade	Red3, R1, Rtn Home	Nenhuma	0	1	
	Carrinho_de_mao_1	3	Relógio	Por Unidade	Red4, R1, Rtn Home	Nenhuma	0	2	
	Carrinho_de_mao_2	5	Relógio	Por Unidade, Série	Red6, R1, Rtn Home	Nenhuma	0	1	
	Carrinho_de_mao_3	6	Relógio	Por Unidade, Série	Red5, R1, Rtn Home	Nenhuma	0	1	

Figura 4.12 – Configuração dos recursos (Fonte: Autor, 2013).

**Rede de Caminho:** a Figura 4.13 mostra a configuração das redes de caminhos inseridas no modelo. Estas auxiliam os recursos através da predefinição dos caminhos e distâncias a serem percorridos pelo(s) recursos.

Imagem...	Nome	Tipo	T/S	Caminhos...	Interfaces...	Mapeamento...	Nós
	Red1	Passante	Velocidade & Distância	4	4	2	5
	Red2	Passante	Velocidade & Distância	3	3	0	4
	Red3	Passante	Velocidade & Distância	2	2	0	3
	Red4	Passante	Velocidade & Distância	14	7	17	15
	Red5	Passante	Velocidade & Distância	39	17	52	40
	Red6	Passante	Velocidade & Distância	25	11	33	26
	Red7	Passante	Velocidade & Distância	2	1	0	3

Figura 4.13 – Configuração das redes de caminho (Fonte: Autor, 2013).

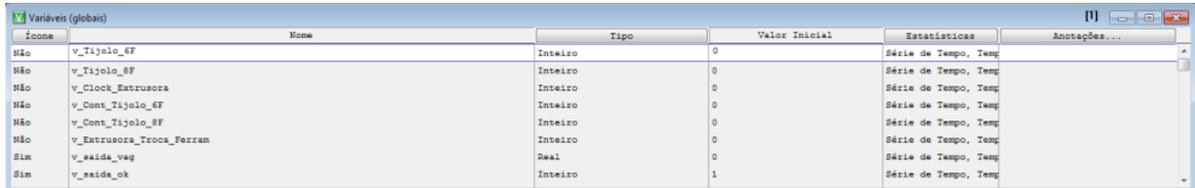
**Chegadas:** As chegadas fazem referência à quantidade, frequência das entidades ingressantes no processo e o local onde ocorre este ingresso. Logo foram inseridas 03 chegadas correspondentes a 03 entidades utilizadas no modelo.

**Turnos:** Foi configurado no modelo 01 turno conforme a jornada real de trabalho na fábrica, sendo o regime de segunda a sexta-feira de 7:00 as 12:00 horas e de 13:30 as 16:30 horas, com intervalos de 15 minutos para o café da manhã (9:00-9:15 horas) de 1,5 horas para almoço (12:00-13:30 horas). E aos sábados de 7:00 as 11:00 horas sem intervalos. Ao fazer testes do modelo durante a modelagem computacional, verificou-se a necessidade de designar turnos para os recursos destinados a enforma e desenforma, muito embora no sistema real estes recursos desempenhem atividades por metas diárias.

**Macros:** permitiu a troca de parâmetros do modelo antes de executá-lo. Essa configuração foi útil nos testes dos diferentes cenários propostos.

**Atributos:** estes foram configurados no modelo a fim de representar características às entidades. No caso, os mesmos definiu a hora de entrada e saída das entidades bem como definir o número de peças dos 2 tipos de tijolos.

**Variáveis:** as variáveis foram inseridas com o objetivo de obter dados para comparar os sistemas simulados. Segue a configuração das variáveis na Figura 4.14.



Ícone	Nome	Tipo	Valor Inicial	Estatísticas	Anotações...
Não	v_Tijolo_EF	Inteiro	0	Série de Tempo, Temp	
Não	v_Tijolo_BF	Inteiro	0	Série de Tempo, Temp	
Não	v_Clock_Extrusora	Inteiro	0	Série de Tempo, Temp	
Não	v_Cont_Tijolo_EF	Inteiro	0	Série de Tempo, Temp	
Não	v_Cont_Tijolo_BF	Inteiro	0	Série de Tempo, Temp	
Não	v_Extrusora_Troca_Ferram	Inteiro	0	Série de Tempo, Temp	
Sim	v_saida_vag	Real	0	Série de Tempo, Temp	
Sim	v_saida_ok	Inteiro	1	Série de Tempo, Temp	

Figura 4.14 – Configuração das variáveis (Fonte: Autor, 2013).

**Processos:** Esta etapa da modelagem consistiu na definição de cada entidade em cada local e o recurso necessário para esta operação, também configurou-se as rotas que define o destino e a movimentação de cada entidade, bem como o modo como se dá essa movimentação e os recursos necessários. Nesta etapa foram inseridas os tempos de processamento de cada local de forma probabilística, a partir das distribuições de probabilidade obtidas com o uso do *stat:fit* na modelagem dos dados de entrada. A Figura 4.15 apresenta o *menu* processos.

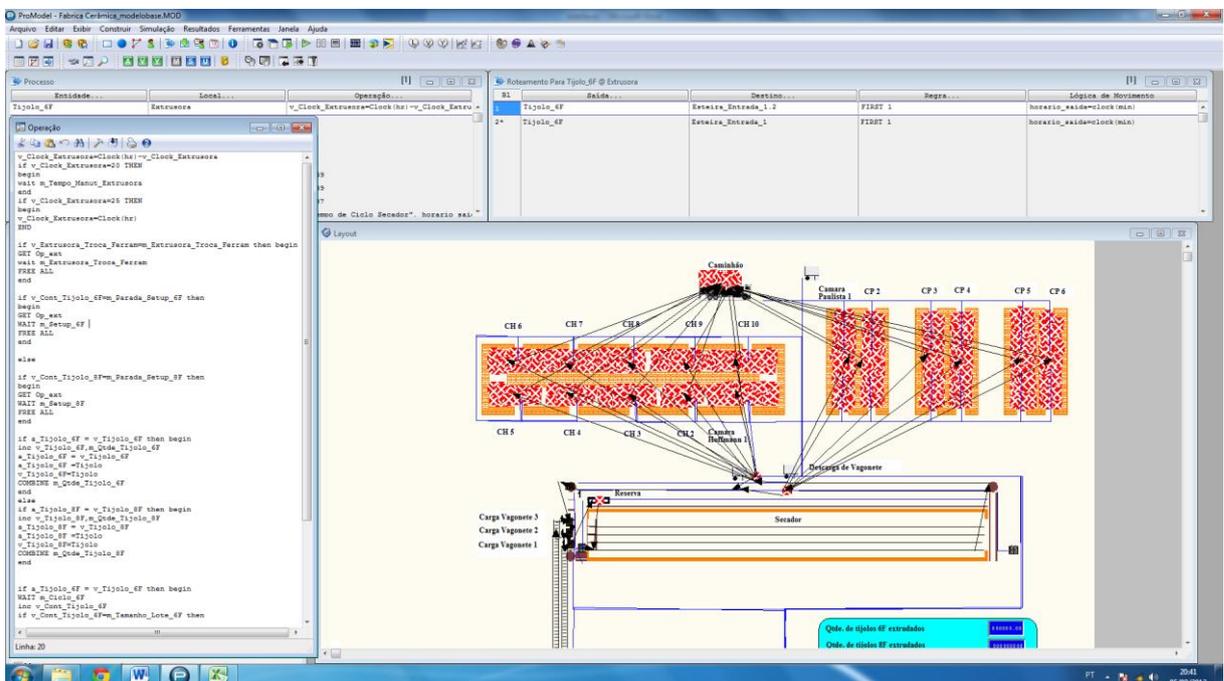


Figura 4.15 – Configuração dos processos (Fonte: Autor, 2013).

Ao final destas etapas, tem-se o modelo computacional objeto de estudo, conforme a Figura 4.16.

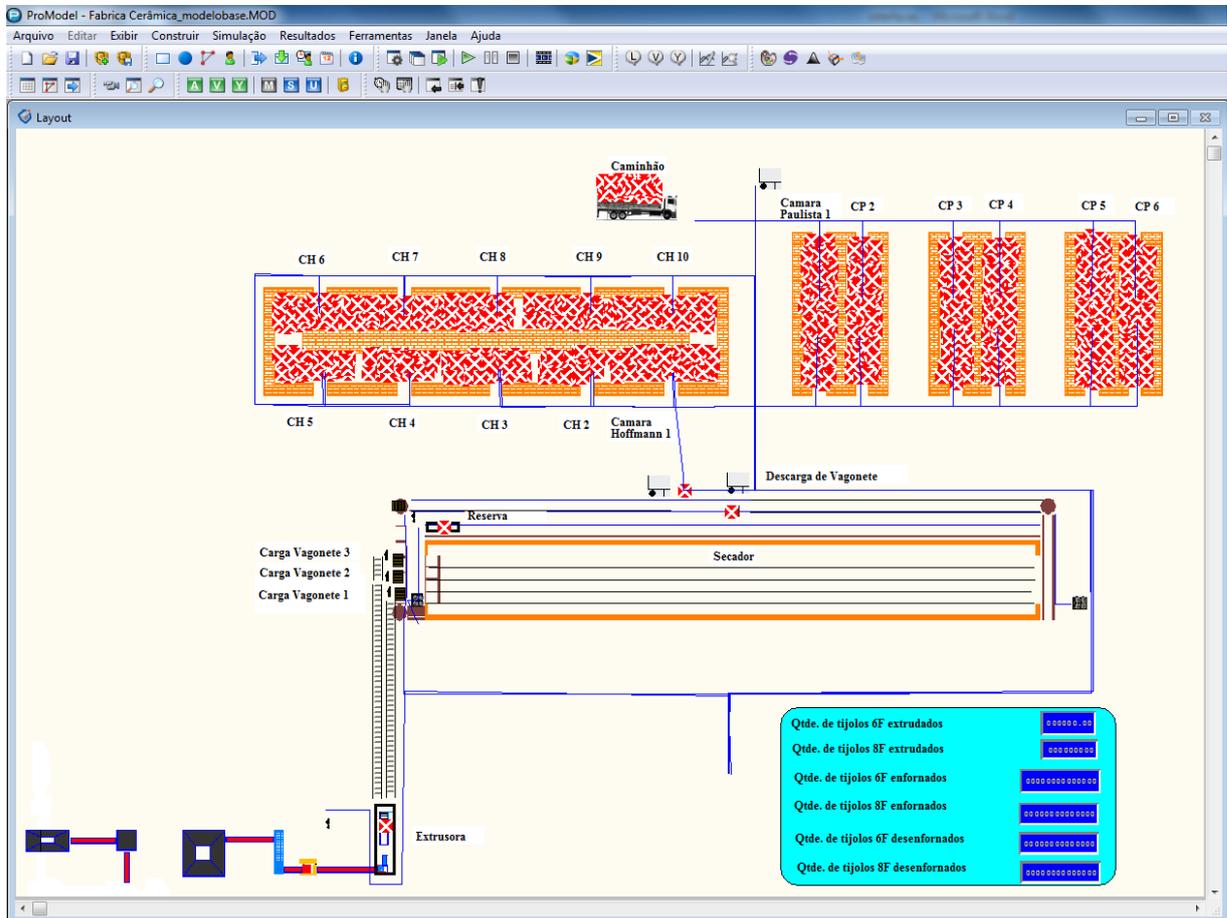


Figura 4.16 – Modelo computacional (Fonte: Autor, 2013).

#### 4.2.2.2 Verificação e Validação do Modelo Computacional

Com relação à verificação, o primeiro passo realizado foi à depuração dos erros de sintaxe e lógicas existentes no modelo. Esta etapa seguiu em paralelo a construção do modelo, pois a cada novo processo introduzido no modelo, procedia com o teste de verificação de funcionamento. E em complemento, foi utilizado o recurso da animação gráfica do *Promodel* na verificação do fluxo das entidades e dos recursos indicados no roteiro de operações. Ao fim o modelo foi considerado satisfatório quanto à verificação.

Quanto à validação, o autor utilizou o teste de análise de sensibilidade. O referido teste sucedeu-se da seguinte forma: o autor fez algumas modificações na variável intervalo de chegadas de tijolos na esteira e avaliou os dados de saída da desenforma do modelo, avaliando assim a linha do início ao fim.

Tendo como referência N(2.46) como o dado de entrada do intervalo de chegadas de tijolos na esteira e os quantitativos de 1.143.682 de tijolos 6F produzidos e 61.185 do tipo tijolo 8F. O autor fez pequenas alterações nos dados de entrada, a saber: N(2.45) e; N(2.47). E após uma replicação para cada mudança verificou que os dados de saída também tiveram sensíveis modificações e, além disso, verificou que hora quando o intervalo de chegadas diminuiu, o dado de saída aumentou, hora quando o intervalo de chegadas aumentou, o dado de saída se mostrou inversamente proporcional. Posteriormente, foram realizadas modificações acentuadas no intervalo de chegadas do modelo: N(2.0) e; N(3.0). E após replicar uma vez para cada modificação, constatou que os resultados também sofreram modificações acentuadas e, além disso, os dados de saída também se apresentaram inversamente proporcionais aos dados de entrada. Os resultados comentados constam na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Resultados do teste de análise de sensibilidade (Fonte: O Autor, 2013).

Intervalo de chegadas de tijolos na esteira	Desenforna	
	Dados de saída	
	Tijolo 6F	Tijolo 8F
N(2.46)	1.143.682	61.185
N(2.45)	1.143.699	61.196
N(2.47)	1.143.671	61.176
N(2.0)	1.143.747	61.225
N(3.0)	1.143.534	61.135

Desta forma, o teste de análise de sensibilidade foi considerado positivo, tornado o modelo, portanto, válido.

### 4.2.3 Análise

De acordo com Chwif e Medina (2010), a etapa de análise envolve a elaboração do projeto experimental, projeto este que fornece subsídios para as experimentações do modelo e a obtenção de resultados.

#### 4.2.3.1 Projeto Experimental

Ao analisar a linha de produção da fábrica, percebe-se que o estado natural é iniciar o primeiro dia de trabalho em uma condição vazia, e ao final do dia a entidade

tijolo continua em processo, logo os dias sequencias de trabalho iniciam em uma condição não vazia. Desta forma, caracteriza-se esse sistema como não-terminante. Chwif e Medina (2010) afirmam que neste tipo de sistema os dados de saída sejam obrigatoriamente coletados durante o estado de regime permanente, o que requer a determinação do período de aquecimento (*warm-up*).

O estudo do período de aquecimento foi realizado a partir da simulação do modelo base com o tempo de 120 horas com 5 replicações (número mínimo de replicações). O tempo de processo foi escolhido para ser o indicativo da estabilização do sistema, pois ela indica o estado dos últimos recursos da linha (desenforma). A Tabela 4.6 mostra os dados obtidos com as replicações.

Tabela 4.6 – Tempo de processo (Fonte: O Autor, 2013).

Tempo (hora)	Replicação 01	Replicação 02	Replicação 03	Replicação 04	Replicação 05	Média
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
94	86,14	87,25	88,16	86,21	82,20	85,99
95	89,18	84,21	86,16	89,16	89,20	87,58
96	85,22	88,14	82,20	95,02	95,02	89,12
97	96,18	87,25	92,21	87,25	97,27	92,03
98	95,02	88,21	95,02	97,14	97,20	94,52
99	97,27	89,02	101,19	103,02	101,14	98,33
100	97,27	97,27	101,29	102,07	102,02	99,98
101	102,14	102,23	102,16	102,16	102,14	102,17
102	104,14	103,20	102,20	104,16	97,27	102,19
103	103,04	103,20	103,22	103,07	103,20	103,15
104	103,02	104,14	106,02	97,27	102,14	102,52
105	106,22	104,21	106,27	102,02	103,02	104,35
106	102,19	106,20	106,18	104,16	106,02	104,95
107	103,02	105,27	104,14	97,14	102,19	102,35
108	106,16	103,02	102,14	105,27	105,27	104,37
109	104,14	100,02	107,18	104,16	102,14	103,53
110	102,14	102,14	103,18	104,14	101,02	102,52
111	107,02	105,27	102,19	105,27	107,02	105,35
112	103,07	103,20	104,21	104,16	105,27	103,98
113	101,02	106,14	102,14	102,19	106,27	103,55
114	106,27	104,14	106,02	104,21	107,02	105,53
115	106,22	105,27	106,27	105,27	107,02	106,01
116	107,18	102,19	106,18	106,27	106,02	105,57
117	103,02	107,18	104,14	104,21	102,19	104,15
118	106,16	103,02	102,14	102,19	106,27	103,96
119	104,14	100,02	107,18	104,16	102,14	103,53
120	104,21	102,14	103,18	104,14	101,02	102,94

De posse dos dados, estabeleceu-se o período de aquecimento de 101 horas, conforme mostra a Figura 4.17.

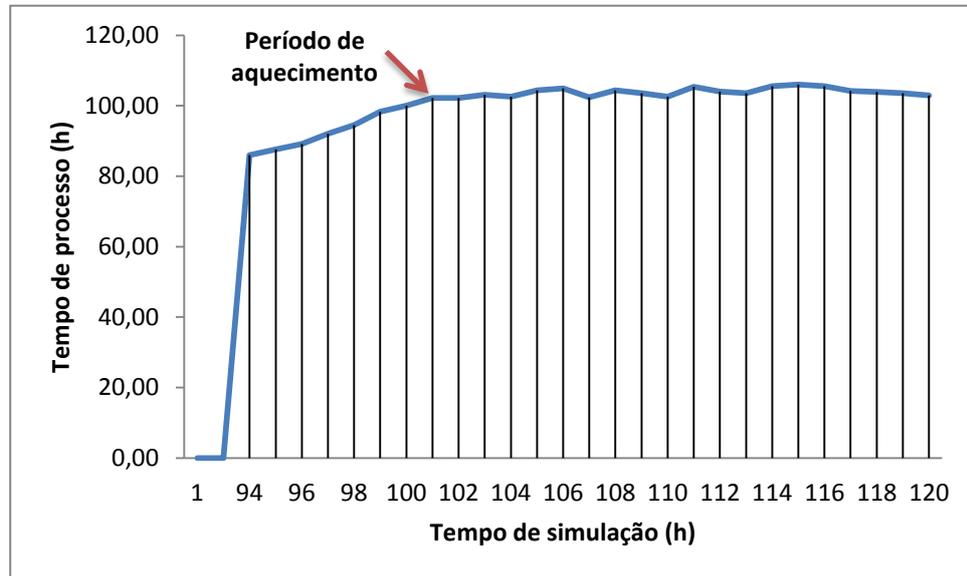


Figura 4.17 – Período de aquecimento (Fonte: Autor, 2011).

Como os dados introduzidos no modelo possuem natureza estocástica (distribuição de probabilidade), são esperadas saídas (*outputs*) através da simulação, também de natureza estocástica. Logo para cada replicação têm-se resultados diferentes. Com isso, necessitou criar um intervalo de confiança, considerando uma precisão desejada. O intervalo de confiança é um intervalo em que há a probabilidade dos valores se encontrarem. Já precisão, é o tamanho desse intervalo. Neste contexto, o objetivo é determinar um número de replicações de modo a garantir que os resultados sejam estatisticamente confiáveis.

O cálculo do número de replicações foi realizado com base na técnica descrita por (Chwif e Medina, 2010). A técnica denominada Amostra Piloto, consiste em rodar uma amostra piloto com um número de replicações pré-determinado e calcular a precisão (metade do intervalo de confiança) da rodada pela fórmula:

$$h = t_{n-1, \alpha/2} \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (4.1)$$

onde  $h$  é a metade do tamanho do intervalo de confiança (precisão);  $t_{n-1, \alpha/2} \frac{S}{\sqrt{n}}$  é o  $(1 - \alpha/2)$  percentil da distribuição  $t$  de Student com  $n - 1$  graus de liberdade;  $S$  é o desvio padrão e;  $n$  é o número de replicações da amostra. Em seguida, de acordo

com a técnica descrita pelos autores, pode-se encontrar o tamanho do número de replicações para a precisão desejada pela fórmula:

$$n^* = \left\lceil n \left( \frac{h}{h^*} \right)^2 \right\rceil \quad (4.2)$$

onde  $n^*$  é o número de replicações para a precisão desejada;  $n$  o número de replicações da amostra piloto;  $h^*$  a precisão desejada e;  $h$  a precisão da amostra piloto. Caso a precisão encontrada não seja a desejada, deve-se repetir o cálculo 4.2 até se encontrar o número de replicações adequado.

Construiu-se uma amostra piloto com 10 replicações sendo que nessa amostra o tempo de simulação foi duplicado de 120 para 240 horas, uma vez que foi inserido o período de aquecimento (101 horas). Calculou-se a metade do intervalo de confiança para a média do tempo em processo da linha. A confiança estatística foi de 95% (portanto  $\alpha= 0,05$ ) e uma precisão de 5 horas ( $h^* \leq 5$ ), estipulada com base na experiência do autor.

Os tempos resultantes destas replicações geraram uma média do tempo de processo de 108,03 horas e o desvio padrão de 6,80 horas conforme segue Tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Amostra piloto com 10 replicações (Fonte: O Autor, 2013).

Replicação	Média
1	101,14
2	116,59
3	115,20
4	101,47
5	112,65
6	114,16
7	115,22
8	101,86
9	101,01
10	101,02
Média	108,03
Desvio Padrão	6,80

Calculou-se  $h$  (metade da amplitude como intervalo de confiança) como segue:

$$h = 2,26 \frac{6,80}{\sqrt{10}} = 5,13 \quad (4.3)$$

Como a precisão da amostra piloto ( $h=5,13$ ) foi maior que a precisão desejada ( $h^*=5$ ) a condição não foi satisfeita, necessitou-se de uma amostragem maior que 10 replicações. Tal amostragem foi descoberta a partir do cálculo.

$$n^* = \left\lceil 10 \left( \frac{5,13}{5} \right)^2 \right\rceil = 10,526 \cong 11 \quad (4.4)$$

Embora o número resultante de replicações obtido seja 11, optou-se por arredondar o tamanho da amostra para 15 replicações.

Considerando as 10 amostras iniciais, procedeu-se com mais 5 replicações (totalizando 15), e os novos valores para a média e o desvio padrão obtidos estão na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 – Amostra piloto com 15 replicações (Fonte: O Autor, 2013).

Replicação	Média
1	101,14
2	116,59
3	115,20
4	101,47
5	112,65
6	114,16
7	115,22
8	101,86
9	101,01
10	101,02
11	107,22
12	104,14
13	103,45
14	112,16
15	101,16
Média	107,23
Desvio Padrão	6,08

Calculando novamente  $h$ , tem-se:

$$h = 2,14 \frac{6,08}{\sqrt{15}} = 3,48 \quad (4.5)$$

Como a precisão amostra piloto foi menor que a precisão desejada ( $h=3,48 < h^*=5$ ), concluiu-se que **15 replicações** são suficientes para simular a linha de produção em estudo.

#### 4.2.3.2 Experimentos, Resultados e Discussões

Foram simuladas 15 replicações do modelo base com inclusão do tempo de aquecimento. O período de simulação foi 960 horas, ou seja, 5 meses, conforme o calendário designado. Os resultados nortearam novas possibilidades de configuração do modelo da linha produtiva em termos de variação de parâmetros de entrada para que fossem alcançados os objetivos da simulação e da presente dissertação.

##### 4.2.3.2.1 Cenário Base

A Tabela 4.9 apresenta as variáveis de saída (tijolo de 6 e de 8 furos) das etapas de extrusão, enforna e desenforna nos 5 meses em estudo. Para a etapa de extrusão, foram fabricados em média, 1.219.400 tijolos de 6 furos e 75.388 tijolos de 8 furos. Quanto a média de saídas da etapa de enforna, foi de 1.212.298 para o tijolo 6F e 72.874 para o tijolo 8F. E na etapa de desenforna, esta que corresponde a saída de produtos acabados, obtiveram-se em média, 1.212.298 e 72.874 saídas de tijolos de 6F e de 8F respectivamente. Efetuando-se uma somatória dos produtos acabados envolvendo os 5 meses, obteve-se um volume de produção de 6.225.817 tijolos.

Tabela 4.9 – Variáveis de saídas do modelo base (Fonte: O Autor, 2013).

Mês	Extrusora		Enforna		Desenforna	
	Tijolo - 6F	Tijolo - 8F	Tijolo - 6F	Tijolo - 8F	Tijolo - 6F	Tijolo - 8F
<b>Janeiro</b>	1.220.154	76.051	1.184.536	63.376	1.143.690	61.190
<b>Fevereiro</b>	1.218.252	74.651	1.218.545	75.118	1.177.699	77.303
<b>Março</b>	1.219.578	75.142	1.219.228	74.745	1.177.209	77.335
<b>Abril</b>	1.219.751	75.591	1.219.826	75.523	1.177.784	78.101
<b>Mai</b>	1.219.267	75.503	1.219.355	75.607	1.177.292	78.214
<b>Qtde. Média Produzida</b>	1.219.400	75.388	1.212.298	72.874	1.170.735	74.429
<b>Total de Tijolos Produzidos</b>					<b>6.225.817</b>	

Em seguida, os quantitativos de produtos acabados em cada mês foram tabulados, onde o quociente entre o produto acabado e o número de dias trabalhados em um mês (26 dias), possibilitou a obtenção da taxa de produção diária para os 2 tipos de tijolos de cada mês. A taxa de produção simulado, 47.891 tijolos por dia, esta correspondente a taxa de produção diária da linha foi obtida a partir da média entre as taxas de produção diária de cada mês. A Tabela 4.10 apresenta os quantitativos.

Tabela 4.10 – Taxa de produção do modelo base (Fonte: O Autor, 2013).

Mês	Produto Acabado		Taxa de Produção Diária		Taxa de Produção Simulado	Taxa de Produção Real	Diferença
	Tijolo 6F	Tijolo 8F	Tijolo 6F	Tijolo 8F			
Jan	1.143.690	61.190	43.988	2.353	<b>47.891</b>	<b>46.502</b>	<b>2,9%</b>
Fev	1.177.699	77.303	45.296	2.973			
Mar	1.177.209	77.335	45.277	2.974			
Abr	1.177.784	78.101	45.299	3.004			
Mai	1.177.292	78.214	45.280	3.008			

Confrontando com o sistema real, esta com uma taxa de produção de 46.502 tijolos por dia, apresentou inferioridade com relação à taxa de produção simulada, sendo que as mesmas apresentaram uma diferença de 2,9%, o que é considerado admissível.

Com relação à taxa de utilização dos recursos, é apresentado o relatório de estado dos recursos, onde mostra em termos percentuais o quanto os recursos estão em uso, em movimento para uso, em movimento para parada, em estado ocioso e em paradas não planejadas. É válido ressaltar, que o relatório considera como utilização o tempo de operação do recurso (em uso) e o movimento do mesmo para a operação (movimento para uso). Com base ainda na Figura 4.18, a média geral de utilização é de 87,24%, sendo que 73,20% representam os recursos responsáveis pelo carregamento das vagonetes; os recursos responsáveis pela enfora apresentaram 92,76% de utilização e; a taxa de utilização dos recursos dedicados a desenfora é de 93,91%.

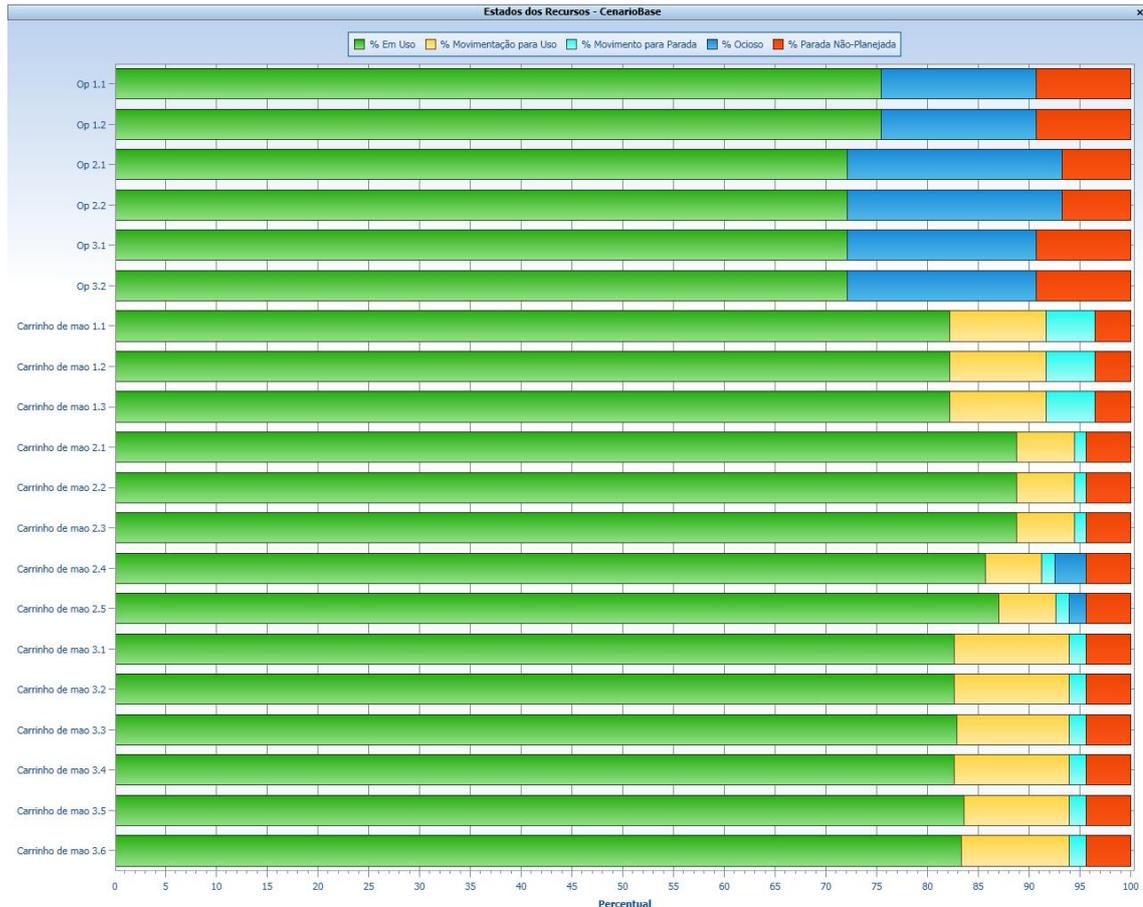


Figura 4.18 – Estado dos Recursos do modelo base (Fonte: Autor, 2011).

Alguns recursos foram suprimidos da análise, a saber: o operador dedicado a extrusora (Op5); o operador coringa (Op4) e; as balsas destinadas a depósito e retirada das entidades no secador. Embora estes recursos sejam indispensáveis ao processo, há pouco acionamento dos mesmos, o que comprometeria na análise geral da taxa de utilização dos recursos.

Foi identificada como operação gargalo da linha, a etapa de extrusão. O relatório mostra um percentual de aproximadamente 9% de paradas não planejadas, o que equivale a 43 minutos diários inoperáveis. Enquanto a etapa de enforna apresentou um percentual de 4,05% e a etapa de desenforna, 4,38%.

A respeito da etapa de extrusão, as causas destas paradas estão relacionadas à questão da má qualidade de preparação da massa o que acarreta na entrada de pedra e/ou raízes influenciando a formação de tijolos defeituosos. Também causam paradas no processo de extrusão à quebra de equipamentos antecedentes a extrusão, falta de argila no caixão alimentador. Além disso, a falta de programação da produção acarreta em mudanças inesperadas no tipo de tijolo,

ocasionando mais paradas na produção em função da troca da boquilha da extrusora (*setup*) bem como na alteração do espaçamento dos cabos de aços da cortadora que determinam a dimensão do comprimento do tijolo (*setup*).

De posse da taxa de produção, da taxa de utilização dos recursos, que são os indicadores de análise da presente dissertação bem como e da a ciência da operação gargalo da linha de produção, possibilitou construir outros cenários com graduais mudanças nos dados de entrada e seguido de análise destas mudanças tendo em vista o balanceamento da linha produtiva.

#### 4.2.3.2.2 Cenário 01

Foram realizadas mudanças somente nas configurações dos componentes pertencentes à operação gargalo, que é a extrusora. Segue as modificações:

- Reduziu-se o tempo de *setup* da extrusora para aproximadamente 33 minutos,
- Admitiu-se no máximo 8% de paradas não planejadas.

Com novas 15 replicações, obteve-se em média, 1.243.788 tijolos de 6 furos e 76.895 tijolos de 8 furos, ficando 1,96% superior com relação ao total de tijolos extrudados do modelo base. A etapa de enforna apresentou em média 1.236.311 para o tijolo 6F e 74.331 para o tijolo 8F, com superioridade de 1,94% em comparação a média obtida com o modelo base. E na etapa de desenforna, obteve-se um percentual de 1,94%, maior comparativamente ao modelo base, sendo em média de 1.193.932 e 75.917 saídas de tijolos de 6F e de 8F, respectivamente. No geral, obteve-se um volume de produção de 6.349.249 tijolos (*Vide* Tabela 4.11).

Tabela 4.11 – Variáveis de saídas do cenário 01 (Fonte: O Autor, 2013).

Mês	Extrusora		Enforna		Desenforna	
	Tijolo - 6F	Tijolo - 8F	Tijolo - 6F	Tijolo - 8F	Tijolo - 6F	Tijolo - 8F
<b>Janeiro</b>	1.244.557	77.572	1.207.062	64.643	1.165.439	62.414
<b>Fevereiro</b>	1.242.617	76.144	1.242.916	76.620	1.201.293	78.849
<b>Março</b>	1.243.970	76.645	1.243.612	76.240	1.200.753	78.882
<b>Abril</b>	1.244.146	77.103	1.244.223	77.034	1.201.340	79.663
<b>Mai</b>	1.243.652	77.013	1.243.742	77.119	1.200.838	79.779
<b>Qtde. Média Produzida</b>	1.243.788	76.895	1.236.311	74.331	1.193.932	75.917
<b>Total de Tijolos Produzidos</b>					<b>6.349.249</b>	

Em seguida, tem-se na Tabela 4.12 o comparativo entre as taxas de produção do cenário 01 e do modelo base. Sendo a taxa de produção obtida do cenário 01 de 48.840 tijolos por dia, sendo superior em 1,94% a taxa do modelo base.

Tabela 4.12 – Taxa de produção do cenário 01 (Fonte: O Autor, 2013).

Mês	Produto Acabado		Taxa de Produção Diária		Taxa de Produção Cenário 01	Taxa de Produção Cenário Base	Diferença
	Tijolo 6F	Tijolo 8F	Tijolo 6F	Tijolo 8F			
Jan	1.165.439	62.414	44.825	2.401	48.840	47.891	1,94%
Fev	1.201.293	78.849	46.204	3.033			
Mar	1.200.753	78.882	46.183	3.034			
Abr	1.201.340	79.663	46.205	3.064			
Mai	1.200.838	79.779	46.186	3.068			

No tocante as taxas de utilização dos recursos têm-se na Figura 4.19 o relatório de utilização dos recursos extraído do cenário 01.



Figura 4.19–Relatório de utilização dos recursos do cenário1 (Fonte: O Autor, 2013).

Conforme o relatório, os operários responsáveis na etapa de extrusão apresentaram 74,96% de utilização, melhorando em 2,34% em relação à taxa de utilização obtida com o modelo base. Analisando conjuntamente, a linha apresentou uma taxa de 88%, melhorando em 1% em comparação a taxa de utilização do modelo base.

#### 4.2.3.2.3 Cenário 02

Seguem as novas configurações realizadas no cenário 02:

- Reduziu-se o tempo de *setup* da extrusora para aproximadamente 30 minutos,
- Admitiu-se no máximo 7% de paradas não planejadas.

A etapa de extrusão teve em média, 1.255.982 saídas de tijolos de 6 furos e 77.649 saídas de tijolos de 8 furos, aumentando em 2,91% a produção em comparação aos extratos do modelo base. A etapa de enforna apresentou em média 1.248.317 para o tijolo 6F e 75.060 para o tijolo 8F, elevando em 3% em relação às saídas do modelo base. Ainda seguindo a mesma comparação, os extratos da desenforna apresentaram superioridade em 2,89%, sendo em média 1.205.531 e 76.662 saídas de tijolos de 6F e de 8F respectivamente. Totalizando o número de tijolos desenformados, obteve-se um volume de produção de 6.410.965, conforme mostra a Tabela 4.13.

Tabela 4.13 – Variáveis de saídas do cenário 02 (Fonte: O Autor, 2013).

Mês	Extrusora		Enforna		Desenforna	
	Tijolo - 6F	Tijolo - 8F	Tijolo - 6F	Tijolo - 8F	Tijolo - 6F	Tijolo - 8F
<b>Janeiro</b>	1.256.759	78.333	1.218.325	65.277	1.176.314	63.026
<b>Fevereiro</b>	1.254.800	76.891	1.255.101	77.371	1.213.090	79.622
<b>Março</b>	1.256.165	77.396	1.255.805	76.987	1.212.525	79.655
<b>Abril</b>	1.256.344	77.859	1.256.421	77.789	1.213.118	80.444
<b>Mai</b>	1.255.845	77.768	1.255.935	77.875	1.212.611	80.561
<b>Qtde. Média Produzida</b>	1.255.982	77.649	1.248.317	75.060	1.205.531	76.662
<b>Total de Tijolos Produzidos</b>					<b>6.410.965</b>	

Quanto à taxa de produção (Tabela 4.14), o cenário 02 apresentou um extrato de 49.315 tijolos por dia, elevando em 2,89% em comparação ao modelo base.

Tabela 4.14 – Taxa de produção do cenário 02 (Fonte: O Autor, 2013).

Mês	Produto Acabado		Taxa de Produção Diária		Taxa de Produção Cenário 02	Taxa de Produção Cenário Base	Diferença
	Tijolo 6F	Tijolo 8F	Tijolo 6F	Tijolo 8F			
Jan	1.176.314	63.026	45.243	2.424	<b>49.315</b>	<b>47.891</b>	<b>2,89%</b>
Fev	1.213.090	79.622	46.657	3.062			
Mar	1.212.525	79.655	46.636	3.064			
Abr	1.213.118	80.444	46.658	3.094			
Mai	1.212.611	80.561	46.639	3.098			

A taxa de utilização dos recursos por sua vez, essa extraída do cenário 02, apresentou uma média de 89,22%, um acréscimo de 2% relativamente ao modelo base. Este acréscimo foi proporcionado pela elevação da utilização dos recursos dedicados a etapa de extrusão, ficando em 79,34%, um ganho de 7,74% em relação ao modelo base. Segue o relatório de utilização na Figura 4.20.

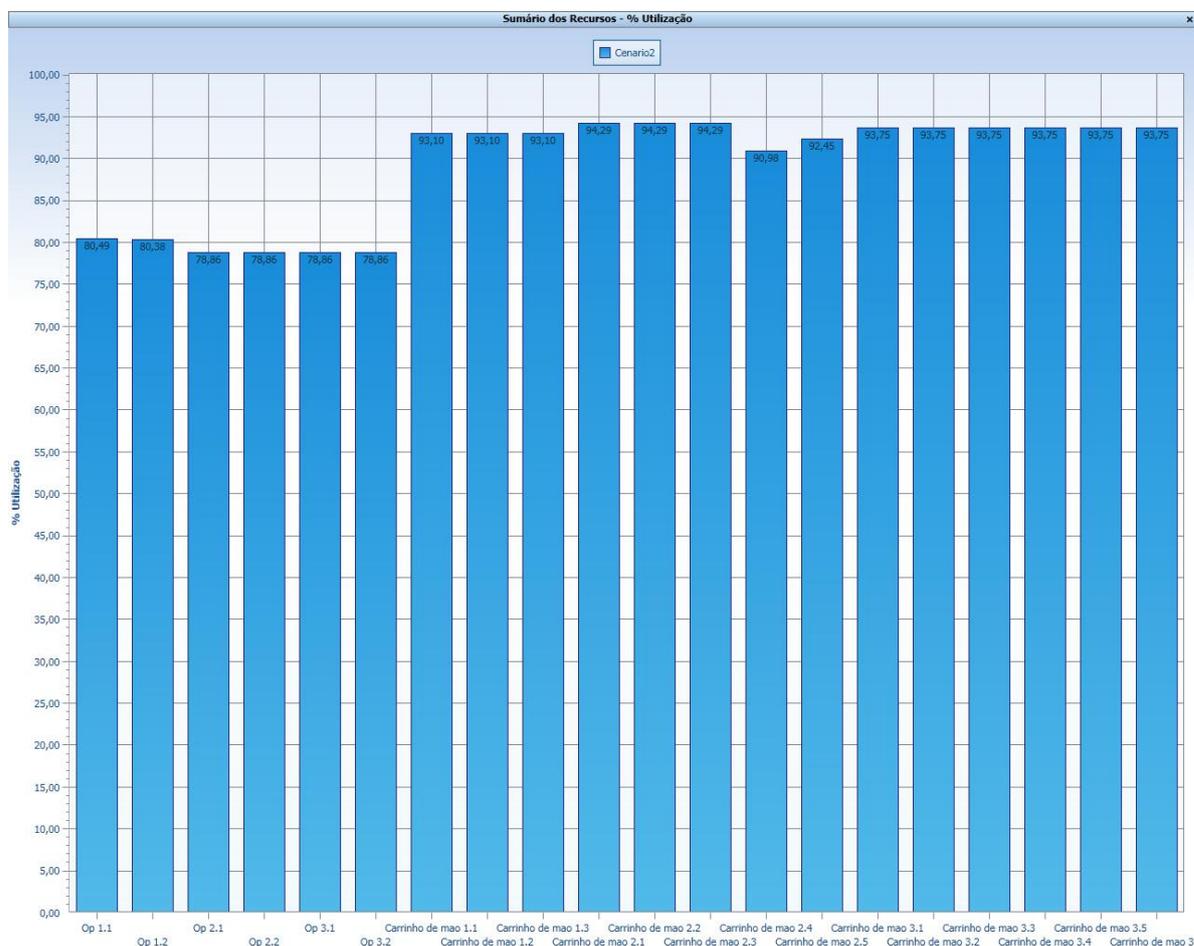


Figura 4.20–Relatório de utilização dos recursos do cenário2 (Fonte: O Autor, 2013).

#### 4.2.3.2.4 Cenário 03

Seguem as novas configurações realizadas no cenário 03:

- Reduziu-se o tempo de *setup* da extrusora para aproximadamente 27 minutos;
- Admitiu-se no máximo 6% de paradas não planejadas.

Ainda tendo os dados gerados pelo cenário base como elementos comparativos, o cenário 03 forneceu os seguintes dados de saída: média de tijolos extrudados de 1.268.176 do tipo 6F e 78.403 do tipo 8F, elevando em 3,85%; os extratos da etapa de enforna foi em média 1.260.324 para o tijolo 6F e 75.789 para o tijolo 8F, registrando um acréscimo de 3,81%; a etapa de desenforna também cresceu em 3,81% a partir da elevação de tijolos desenforados, sendo em média de 1.217.130 e 77.406 saídas de tijolos de 6F e de 8F respectivamente. No geral, obteve-se um volume de produção de 6.472.681. A Tabela 4.15 mostra isso.

Tabela 4.15 – Variáveis de saídas do cenário 03 (Fonte: O Autor, 2013).

Mês	Extrusora		Enforna		Desenforna	
	Tijolo - 6F	Tijolo - 8F	Tijolo - 6F	Tijolo - 8F	Tijolo - 6F	Tijolo - 8F
<b>Janeiro</b>	1.268.960	79.093	1.229.588	65.911	1.187.188	63.638
<b>Fevereiro</b>	1.266.982	77.637	1.267.286	78.122	1.224.887	80.395
<b>Março</b>	1.268.361	78.148	1.267.997	77.735	1.224.297	80.429
<b>Abril</b>	1.268.541	78.615	1.268.619	78.544	1.224.895	81.225
<b>Mai</b>	1.268.038	78.523	1.268.129	78.631	1.224.383	81.343
<b>Qtde. Média Produzida</b>	1.268.176	78.403	1.260.324	75.789	1.217.130	77.406
<b>Total de Tijolos Produzidos</b>					<b>6.472.681</b>	

O cenário 03 apresentou uma taxa de produção de 51.792 tijolos por dia e com isso, elevou em 7,53% a taxa de produção em relação ao cenário base. Vide Tabela 4.16.

Tabela 4.16 – Taxa de produção do cenário 03 (Fonte: O Autor, 2013).

Mês	Produto Acabado		Taxa de Produção Diária		Taxa de Produção Cenário 03	Taxa de Produção Cenário Base	Diferença
	Tijolo 6F	Tijolo 8F	Tijolo 6F	Tijolo 8F			
Jan	1.268.960	79.093	48.806	3.042	51.792	47.891	7,53%
Fev	1.266.982	77.637	48.730	2.986			
Mar	1.268.361	78.148	48.783	3.006			
Abr	1.268.541	78.615	48.790	3.024			
Mai	1.268.038	78.523	48.771	3.020			

Os recursos responsáveis pela etapa de extrusão, elevou a taxa de utilização para 88,71%, melhorando em 17,48% em relação a taxa de utilização obtida pelos mesmos recursos com o cenário base. Analisando a linha de forma geral, a média obtida foi 92%, com acréscimo de 5,17% em comparação a taxa de utilização dos recursos do cenário base. A Figura 4.21 expressa isso.



Figura 4.21–Relatório de utilização dos recursos do cenário3 (Fonte: O Autor, 2013).

Finalizando este capítulo, apresenta-se na Tabela 4.17, o resumo com os indicadores obtidos a partir das experimentações dos cenários. À medida que os cenários foram construídos e simulados, foram-se coletados melhores resultados e, os indicadores obtidos com cenário 03, taxa de utilização de 51.792 tijolos por dia e com uma taxa de utilização dos recursos de 92% foram considerados satisfatórios para com objetivo geral da presente dissertação.

Tabela 4.17 – Resumo dos indicadores (Fonte: O Autor, 2013).

<b>Cenário Base</b>		<b>Cenário 01</b>		<b>Cenário 02</b>		<b>Cenário 03</b>	
Taxa de Produção	Taxa de Utilização dos Recursos	Taxa de Produção	Taxa de Utilização dos Recursos	Taxa de Produção	Taxa de Utilização dos Recursos	Taxa de Produção	Taxa de Utilização dos Recursos
47.891	87,24%	48.840	88,00%	49.315	89,22%	51.792	92,00%

É válido considerar que não foram sugeridos outros cenários considerando analisar mudanças em outros locais de trabalho devido o autor entender como somente a operação gargalo como crítica a linha de produção. Assim como dentro da operação gargalo, entendeu-se como inviável a alteração do número de operadores e/ou alteração no número de algum equipamento existente.

## **CAPÍTULO 05 – CONCLUSÕES**

Neste capítulo são apresentadas as conclusões da pesquisa, e serão oferecidas sugestões para trabalhos futuros.

### **5.1 Conclusões**

Esta dissertação buscou atingir o balanceamento da linha de produção de uma fábrica cerâmica vermelha pertencente ao Arranjo Produtivo Local de São Miguel Guamá mediante a utilização da modelagem e simulação computacional.

O objetivo geral da pesquisa foi atingido uma vez que o terceiro cenário construído forneceu os melhores resultados, 92% de taxa de utilização dos recursos e uma taxa de produção diária de 51.972 tijolos e, este modelo propiciou o balanceamento de produção da linha estudada. A taxa de utilização foi considerada satisfatória, tanto em uma análise comparativa com a taxa de utilização obtida com o modelo base, tanto ao considerar este percentual significativo, uma vez que há o uso intensivo da mão-de-obra dentro do chão de fábrica. E a taxa de produção se mostrou diretamente proporcional a crescente da taxa de utilização dos recursos, logo a produção atingiu a sua maior taxa com o cenário 3. Conclui-se então que o cenário 3 representa o modelo de simulação para balanceamento da linha de produção da empresa estudada.

No âmbito da revisão de literatura, a revisão dos tipos de sistemas com ênfase ao sistema de eventos discretos foi de suma importância para o autor se familiarizar com os termos e conceitos que fazem parte do universo da simulação computacional. Além disso, outra conclusão extraída do assunto sistemas é que em um ambiente industrial encontram-se vários tipos de sistemas, seja pela natureza do modo de produção seja pelas inúmeras variáveis intervenientes no processo de fabricação. Fato que exigiu uma definição precisa do autor quanto ao tipo de sistema. Logo se concluiu que a partir das características discretas da linha de produção era possível modelar e encaminhar resultados pertinentes à resolução do problema de pesquisa. Por outro lado, a revisão do assunto balanceamento de linhas possibilitou investigar as melhores práticas de resolução do balanceamento pela seara da simulação. As características bastante peculiares do sistema produtivo da fábrica cerâmica exigiu uma investigação aprofundada para aquisição de conhecimento, a ponto de definir as variáveis e indicadores necessários para definir

o sistema a ser modelado, programar a coleta de dados no chão de fábrica, bem como avaliar a linha de produção. E por fim, a revisão dos conceitos de modelagem e simulação possibilitou adquirir conhecimentos quanto aos métodos de condução de um projeto de simulação, as vantagens e desvantagens envolvidas, as práticas de verificação e validação de modelos e as formas de tratamentos estatísticos dos resultados.

A execução do estudo de caso foi seguida a partir do método de modelagem e simulação proposto por Chwif (1999). No decorrer do estudo de caso, percebeu-se a utilidade do método no que diz respeito à organização e planejamento das etapas de trabalho, uma vez que o trabalho foi extenso e explorou muitos dados e detalhes. Porém o método não cita a formação e treinamento de equipe de trabalho para atividades de campo, pressupondo que o modelador já disponha de equipe formada a ponto de fornecer todos os dados necessários para a modelagem. O que não foi o caso deste trabalho, pois o autor precisou de um tempo longo de vivência de chão de fábrica para conhecer detalhadamente o processo, bem como coletar todos os dados necessários para a modelagem computacional. Entendeu-se como de elevada importância à etapa de tratamento dos dados de entrada do modelo através do cálculo dos dados discrepantes (*outliers*). Esse procedimento garantiu a exclusão de dados que por ventura poderiam comprometer o desempenho do modelo, pois é comum a coleta de dados discrepantes, ocasionados seja pela fadiga dos operadores recorrente do trabalho manual exaustivo, seja pela falha na coleta de dados por parte do autor.

Pode-se concluir que o modelo conceitual IDEF-SIM se tornou um facilitador da modelagem computacional devido sua lógica de construção ser voltada para modelos computacionais. O modelo trouxe a representação dos locais de trabalho, das regras envolvendo a movimentação, do uso dos recursos, além das transformações de entidades, detalhes estes que possibilitam a representação de um modelo mais próximo das exigências de um modelo computacional. Também permitiu um maior entendimento por parte dos leitores do trabalho, devido ser uma técnica de fácil compreensão por não especialistas em simulação. Porém, sendo necessário, em alguns casos, o esclarecimento dos conceitos da técnica por parte do autor do modelo.

Com a prática da simulação, comprovaram-se algumas vantagens com uso desta, antes evidenciado somente na literatura. Dando destaque à obtenção de

resultados significativos sem a necessidade de intervir no sistema real, eliminando assim um alto risco de desperdício de tempo e custo. Indo mais além, estes resultados representam um ponto de análise que está amarrado ao problema desta dissertação, podendo ser ampliado a partir de um objeto de estudo mais complexo da linha de produção, utilizando outros indicadores e testando outros cenários. Outrossim, com a simulação pode-se avaliar o desempenho da linha de produção, o que leva-se a considerar o modelo como uma ferramenta de diagnóstico e que pode auxiliar os decisores tanto na tarefa de programação da produção, quanto nas realizações de mudanças de condições de operação do sistema, tendo por exemplo a implementação de melhorias na linha, através de plano de ataque a operação gargalo.

O *software Promodel* enquanto recurso computacional atendeu ao propósito da pesquisa. Através do *menu* simplificado do *software* pode-se representar as condições existentes do chão de fábrica. Os comandos presentes no construtor de lógica diminuem as chances de erros de programação, o que torna uma ferramenta acessível para modeladores com pouco conhecimento em linguagem de programação. Os recursos de animação permitiram visualizar as movimentações das entidades e recursos bem como avaliar o estado destes elementos durante a simulação, o que auxiliou na verificação do modelo. O *Stat:fit* possibilitou o tratamento estatístico dos dados de entrada do modelo assim como forneceu as distribuições de probabilidades representativas do sistema real. E análise dos relatórios gerados possibilitou o questionamento dos dados obtidos e encaminhamento de alterações no modelo até o ponto deste atingir o objetivo da pesquisa.

Com relação às contingências ocorridas durante esta pesquisa, cita-se a etapa de educação do autor quanto ao uso do *software*. Esta etapa demandou um tempo maior que o programado, chegando a conflitar com o período de estudo de campo, o que acarretou também em atraso quanto à coleta de dados, chegando a provocar retrabalho em algumas situações. Outro ponto contingencial que interrompeu o estudo de campo foi em decorrência de problema infraestrutural ocorrido no forno Hoffmann, comprometendo em  $\frac{1}{4}$  de sua capacidade e, paralelamente, a reforma do forno Hoffmann, a empresa construiu o terceiro forno paulista. Diante destes fatos, o autor optou em esperar a retomada de regime de operação total da fábrica, o que culminou em mais atrasos a pesquisa.

E por fim, tem-se como as principais contribuições deste trabalho: o fato de trazer para dentro da universidade a experiência da aplicação prática da simulação envolvendo uma indústria cerâmica vermelha de São Miguel do Guamá. Entendendo que este setor tem carência de tecnologias de processo e de informação, sendo um campo robusto a ser explorado por pesquisas vislumbrando proporcionar vantagens competitivas em termos de mercado ao setor e; o modelo computacional construído pode ser utilizado por outras empresas cerâmicas vermelhas de São Miguel do Guamá, porém sendo necessário adaptar a configuração do modelo a cultura empresarial. Portanto a técnica de modelagem computacional pode ser considerada genérica, uma vez que é passível de aplicação em outros casos empresariais. O que torna o modelo de simulação um ferramenta potencial de consultoria empresarial.

## 5.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

A partir da pesquisa, sugerem-se os seguintes trabalhos futuros:

- Avaliar o balanceamento agregando outros produtos à linha de produção, tais como: telha; tijolo estrutural; etc.;
- Estudar o balanceamento de linhas de produção de fábrica cerâmica utilizando outro *software*;
- Estudar o balanceamento de linhas de produção de fábrica cerâmica utilizando células de produção;
- Avaliar o balanceamento de linhas de produção de fábrica cerâmica utilizando outras variáveis, outros indicadores;
- Avaliação da linha a partir de comparativos do modelo simulado com modelos heurísticos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**ANTUNES JR., J. A. V.** *Em Direção a uma Teoria Geral do Processo na Administração da Produção: Uma Discussão sobre a Possibilidade de Unificação da Teoria das Restrições e da Teoria que Sustenta a Construção dos Sistemas de Produção com Estoque Zero*. Porto Alegre: UFRGS, 1998. (Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Administração da Universidade Federal do Rio Grande do Sul).

**ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA CERÂMICA – ANICER**, 2012. Disponível em: < <http://www.anicer.com.br/index.asp?pg=agenda.asp>>. Acesso em: 20 de março de 2012.

**BANKS, J.** *Introduction to simulation*. Proceedings of the Winter Simulation Conference. Atlanta, 2000.

**BANKS, J.; CARSON, J. S.; NELSON, B. L.; NICOL, D. M.**, *Discrete event system simulation*, 4ª Edição, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 2005.

**BARNES, R. M.** *Estudo de movimentos e de tempos: Projeto e medida do trabalho*. Editora Edgard Blucher Ltda, 1986.

**BEJA. M. J. G. P.** *Escola e Família: Da Inevitabilidade da Comunicação à Construção de uma Realidade Relacional (Estudo exploratório no 1º ciclo do ensino básico)*: 2009. Tese de Doutorado, Universidade da Madeira, Funchal.

**BELLINGER, G.** *System Thinking – An Operational Perspective of the Universe.System*. University on the Net, 1996.

**BETINI, D. G.** *Inovação na tecnologia de produtos de cerâmica vermelha com uso de chamote em São Miguel do Guamá*. Belém: UFPA, 2007.113p. (Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará).

**BETTS, J.; MAHMOUD. K. I.** *A Method for Assembly Line Balancing*. *Engineering Costs and Production Economics*, 1989, vol. 18, p.55-64.

**BERTALANFFY, L. V.** *Teoria Geral dos Sistemas: Fundamentos, desenvolvimento e aplicações*. 5ª ed. – Petrópolis, RJ: Vozes, 2010.

**BECKER, C.; SCHOLL, A.** *A Survey on problems and methods in generalized assembly line balancing*. Jenaer Schriften zur Wirtschaftswissenschaft, n.21, FSU Jena, 2003.

**BECKER, C.; SCHOLL, A.** *State-of-the-art exact and heuristic solution procedures for simple assembly line balancing*. European Journal of Operational Research, 168(3):666–693, February, 2006.

**BOYSEN, N.; FLIEDNER, M.; SCHOLL, A.** *Sequencing mixed-model assembly lines: Survey, classification and model critique*. Jena Research Papers in Business and Economics - Working and Discussion Papers 02/2007, Friedrich-Schiller-University Jena, School of Economics and Business Administration, (2007).

**BRIGHENTI, J. R. N.** *Simulação e otimização de uma linha de manufatura em fase de projeto*. Itajubá: UNIFEI, 2006.113p. (Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Engenharia de Itajubá).

**BROOKS, R.J.; ROBINSON, S.** *Simulation, with inventory control*. Operational research series, Basingstoke: Palgrave, 2001.

**CASSANDRAS, C. G.** *Discrete-Event Systems: Modeling and Performance Analysis*. Ed. Irwin, 1993.

**CHUNG C. A.** *Simulation Modeling Handbook: A Practical Approach*, CRC Press, 2004.

**CHWIF, L.** *Redução de Modelos de Simulação de Eventos Discretos na sua Concepção: Uma Abordagem Causal*. São Paulo: USP, 1999.139p. (Tese de doutorado apresentada a Escola Politécnica da Universidade de São Paulo).

**CHWIF, L.; MEDINA, A. C.** *Modelagem e simulação de eventos discretos, teoria e aplicações*. Terceira edição. São Paulo, 2010.

**CORDOVIL, G. V.** *Pólo cerâmico e dinâmica territorial do desenvolvimento em São Miguel do Guamá–Pará*. Belém, 2010. (Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Geografia da Universidade Federal do Pará. Belém).

**DAVIS, M. M.; AQUILANO, N. J.; CHASE, R. B.** *Fundamentos da Administração da Produção*. 3 ed. Editora Bookman, Porto Alegre, 2001.

**DUARTE, R. N.** *Simulação computacional: Análise de uma célula de manufatura em lotes do setor de auto-peças*. Dissertação de mestrado em engenharia de produção. UNIFEI, Itajubá, MG, 2003.

**DRISCOLL, J.; ABDEL-SHAFI, A. A.** *A Simulation Approach to Evaluating Assembly Line Balancing Solutions*. International Journal of Production Research, 23, 975-985., 1985.

**FERREIRA, J. C. E.; MOURA, E. B.; RIBEIRO, L. P. G.** *O uso da simulação para aumentar a competência da indústria junto ao mercado externo*. XXII ENEGEP. Curitiba, outubro 2002.

**FONSECA, M. N. C. P.** *Sistema integrado de balanceamento de linhas de produção na indústria do calçado*, 2011. (Dissertação de Mestrado apresentada a Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto).

**FORRESTER, J. W.** *Principle of Systems*. Productivity Press. 1990.

**FREITAS FILHO, P. J.** *Introdução à modelagem e simulação de sistemas: com aplicações em Arena*. 2 ed. Florianópolis: Visual Books. 2008.

**GEORGES, M. R. R.** *Metodologia para modelagem em simulação de sistemas: aplicação em manufatura discreta*. Campinas, SP: UNICAMP, 2005. 233p. (Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas).

**GERHARDT, M. P.; FOGLIATTO, F. S.; CORTIMIGLIA, M. N.** *Metodologia para o balanceamento de linhas de montagem multi-modelo em ambientes de customização em massa*. Gestão e Produção, 14(2):267–279, 2007.

**GIL, A. C.** *Como Elaborar Projetos de Pesquisa*. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002.

**GLENNEY, N. E.; GERALD T. M.** *Modeling & Simulation Provide Key to CIM implementation Philosophy*. Industrial Engineering, may 1985.

**GROOVER, M. P.** *Automation, production, and computer-integrated manufacturing*. 2ª ad. Prentice Hall. New Jersey, 2000.

**GUIA PROMODEL.** *Guia de Referência Rápida do Promodel for Windows*. BELGE – Engenharia e Sistemas Corporation, 2010.

**HARRELL, C. R.; GHOSH, B. K.; BOWDEN, R.** *Simulation Using ProModel®*. McGraw-Hill, 2000.

**HARRELL, C., MOTT, J., BATEMAN, R., BOWDEN, R e GOGG T.** *Simulação: otimizando os sistemas*. Editora IMAM, São Paulo-SP, 2002.

**KELLNER, M. I., MADACHY, R. J., RAFFO, D. M.** *Software process simulation modeling: Why? What? How?*, 1998.

**KRAJEWSKI, L. J.; RITZMAN, L. P.** *Administração da Produção e Operações*. São Paulo: Prentice Hill, 2004.

**LACHTERMACHER, G.** *Pesquisa Operacional na Tomada de Decisões*. 3. Ed. Rio de Janeiro: Editora Campos Ltda., 2002.

**LAW, A.; KELTON, D.** *Simulation modeling and analysis*. New York, McGraw-Hill, 2000.

**LASTRES, H. M. M.; CASSIOLATO, J. E.; ALBAGLI, S.; MACIEL, M. L.; LEGEY, L. R.; LEMOS, C; SZAPIRO, M.** *Interagir para competir: promoção de arranjos produtivos e inovativos no Brasil*. Brasília: SEBRAE, 2002.

**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: Anais do XL Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, João Pessoa, PB, 2008.

**LEAL, F.; ALMEIDA, D. A.; MONTEVECHI, J. A. B.** *Desenvolvimento e aplicação de uma técnica de modelagem conceitual de processos em projetos de simulação: o IDEF-SIM.* In: Anais do XXIX Encontro Nacional de Engenharia de Produção, Salvador, BA, 2009.

**LIM, M. K.; ZHANG, Z.** *A mult-agent based manufacturing control strategy for responsive manufacturing.* Journal of Materials Processing Technology, 139, pp. 379-384, 2003.

**LOBÃO, E. C.; PORTO, A. J. V.** *Proposta para sistematização de estudos de simulação.* ENEGEP, 1997.

**LOBATO, K. C. D.; LIMA, J. P.** *Modelagem conceitual como procedimento de apoio para melhorias em processos de seleção de materiais recicláveis.* In: Anais do XXXI Encontro Nacional de Engenharia de Produção, Belo Horizonte, MG, 2011.

**MACKE, J.** *Desenvolvimento de um modelo de intervenção baseado no Sistema Toyota de Produção e na Teoria das Restrições: a utilização da pesquisa-ação em uma indústria de cerâmica vermelha de pequeno porte da região metropolitana de Porto Alegre.* Porto Alegre: UFRGS, 1999. (Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul).

**MAFRA, A. T.** *Proposta de indicadores de desempenho para a indústria de cerâmica vermelha.* Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 1999. 126p.

**MARCONI, M. A.; LAKATOS, E. M.** *Técnicas de Pesquisa: planejamento e execução de pesquisas, amostragens e técnicas de pesquisa, elaboração, análise e interpretação de dados.* 7ed. – São Paulo: Atlas, 2008.

**MCMULLEN, P. R.; FRAZIER, G. V.** *A Heuristic for Solving Mixed-Model Line Balancing Problems with Stochastic Task Durations and Parallel Stations.* International Journal of Production Economics, 51, 177-190, (1997).

**MCMULLEN, P. R.; FRAZIER, G. V.** *Using Simulated Annealing to solve a Multiobjective Line Balancing Problem with Parallel Workstations.* International Journal of Production Research, 36, 2717-2741, (1998).

**MCMULLEN, P. R.; FRAZIER, G. V.** *Using Simulation and Data Envelopment Analysis to Compare Assembly Line Balancing Solutions.* Journal of Productivity Analysis, 11, 149-168, (1998).

**MENDES, A. N. M. M.** *Qualidades Intrínsecas para Inovação de Produtos no Arranjo Produtivo Local de São Miguel do Guamá.* Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Pará. Belém, 2008.

**MERENGO, C.; NAVA, F.; POZZETTI, A.** *Balancing and Sequencing Manual Mixed-Model Assembly Lines.* International Journal of Production Research, 37, 2835-2860, (1999).

**MEZZENA, M. A. S.** *Comparação entre dois algoritmos para balanceamento de linhas de montagem utilizando o software de desenvolvimento Delphi, 2000.*

**MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA – MME.** *Anuário 2009 – Cerâmica Vermelha, 2009.*

**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, Washington, DC, USA, p 1624- 1635, 2010.

**MOREIRA, D. A.** *Administração da Produção e Operações.* 2ª. Ed: Cengage Learning, 2011.

**MULLER-MERBACH, H.** *A System of System Approaches.* Interfaces, 24/4, July-August, p. 16-25, 1994.

**NANCE, R. E.** *A history of discrete event simulation programming languages.* ACM SIGPLAN Notices, v. 28, n.3., 1993.

**NEGRÃO, L. L.** *Utilização da opção de diferimento na avaliação de implantação de projeto de mecanismo de desenvolvimento limpo em uma empresa de cerâmica vermelha.* Belém: UFPA, 2008.113p. (Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará).

**NUNES, A. F.; RANGEL, J. J. A.** *Uma proposta de documentação para modelos conceituais de simulação em IDEF-SIM.* In: Anais do XXIX Encontro Nacional de Engenharia de Produção, Salvador, BA, 2009.

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

**OLIVEIRA, M. L. M.** *Análise da aplicabilidade da técnica de modelagem IDEF-SIM nas etapas de um projeto de simulação a eventos discretos.* Itajubá: UNIFEI, 2010. (Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Engenharia de Itajubá).

**OLIVEIRA, S. L.** *Tratado de Metodologia Científica: projetos de pesquisas, TGI, TCC, monografias, dissertações e teses.* São Paulo: Pioneira, 2004.

**PALOMINO, R. C.** *Um modelo para o planejamento e a programação da produção em ambientes job shop baseado em Redes de Petri.* Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, UFSC, Florianópolis, 2001.

**PASA, G. S.** *Uma Abordagem para avaliar a consistência teórica de sistemas produtivos.* Porto Alegre: UFRGS, 2004.188p. (Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul).

**PAVANI JUNIOR, O.; SCUCUGLIA, R.** *Mapeamento e Gestão por Processo – BPM.* Editora M. Books, 2011.

**PEGDEN, C. D.; SHANNON, R. E.; SADOWSKI, R. P.** *Introduction to Simulation Using Siman.* 2º ed., McGraw-Hill, Nova Iorque, 1995.

- PEREIRA, I. C.** *Proposta de sistematização da simulação para fabricação em lotes*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, UNIFEI, Itajubá/MG, 2000.
- PIDD, M.** *Computer Simulation in Management Science*. 4<sup>a</sup> ed, John Wiley e Sons, Chichester, England, 1998.
- PRADO, D.** *Usando o arena em Simulação*. Belo Horizonte: Editora de Desenvolvimento Gerencial, 1999.
- ROBINSON, S.** *Conceptual modelling for simulation part 1: definition and requirements*. Journal of the Operational Research Society, v. 59, p. 278–290, 2008.
- ROSA, E. B.** *Racionalização da produção*. Apostila do curso de Pós-Graduação Especialização em Produtividade e Qualidade – UNIFEI, 2002.
- ROY, R.; ALLCHURCH, M. J.** *Development of a Knowledge-Based System for Balancing Complex Mixed Model Assembly Lines*. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 9, 205-216, 1996.
- SAAD, S. M.** *The reconfiguration issues in manufacturing systems*. Journal of Materials Processing Technology, 138, pp. 277-283, 2003.
- SAKARUDA, N; MIYAKE, D. I.** *Aplicação de simuladores de eventos discretos no processo de modelagem de sistemas de operações de serviços*. Revista Gestão e Produção, v. 16, n. 1, p. 25-43, 2009.
- SARGENT, R.G.** *Validation and verification of simulation models*. In: Proceedings of the 2008 Winter Simulations Conference, Miami, FL, USA, 2008.
- SARGENT, R.G.** *Verification and validation of simulation models*. In: Proceedings of the Winter Simulation Conference, Austin, USA, 2009.
- SCHOLL, A.** *Balancing and Sequencing of Assembly Lines*. Heidelberg: Physica-Verlag, 1999.

**SCHRAMM, F. K.** *Projeto de Sistemas de Produção na Construção Civil Utilizando Simulação Computacional como Ferramenta de Apoio à Tomada de Decisão*: Porto Alegre, 2009. (Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul).

**SENGE, P. M.** *A Quinta Disciplina – Arte e Prática da Organização que Aprende*. 23ª Ed.: Editora Best Seller, 2008.

**SEILA, A. F.** *Introduction to simulation*. Proceedings of the 1995 Winter Simulation Conference. Arlington, Virginia, United States, p. 7-15, 1995.

**SERVIÇO BRASILEIRO APOIO ÀS MICRO E PEQUENAS EMPRESAS DO PARÁ - SEBRAE/PA.** *Projeto APL de São Miguel do Guamá. Relatório Final Descritivo do Pólo Oleiro-Cerâmico de São Miguel do Guamá*. Belém. 2004.

**SERVIÇO BRASILEIRO APOIO ÀS MICRO E PEQUENAS EMPRESAS DO PARÁ - SEBRAE/PA.** *Arranjo Produtivo Local de São Miguel do Guamá. Relatório de Consultoria Técnica em Cerâmica Vermelha*. Belém. 2005.

**SERVIÇO BRASILEIRO APOIO ÀS MICRO E PEQUENAS EMPRESAS DO PARÁ - SEBRAE/PA.** *Diagnóstico Organizacional do Pólo Cerâmico Industrial de São Miguel do Guamá*. Belém. 2006.

**SERVIÇO BRASILEIRO APOIO ÀS MICRO E PEQUENAS EMPRESAS-SEBRAE:** *Estudos de Mercado: Empresas de cerâmica vermelha e seus principais problemas*, 2008.

**SHINGO, S.** *O sistema Toyota de Produção do ponto de vista da engenharia de produção*. Porto Alegre: Bookman, 1996.

**SILVA, E. D.; MENEZES, E. M.** *Metodologia da Pesquisa e elaboração da dissertação*. 4. ed. rev. atual. – Florianópolis: UFSC, 2005.138p.

**SINTIMIG – Sindicato dos Trabalhadores da Indústria de São Miguel do Guamá**, 2013.

**SLACK, N.; CHAMBERS, S.; JOHNSTON, R.** *Administração da produção*. 3 ed. São Paulo: Editora Atlas S.A. 2009.

**SOARES, L. F. G.** *Modelagem e simulação discreta de sistemas.* – Rio de Janeiro: Campus, 1992.

**TOLEDO JR., I. B.** *Racionalização Industrial, Balanceamento de Linhas.* Rio de Janeiro, 2004.

**TUBINO, D. F.** *Manual de Planejamento e Controle da Produção.* São Paulo: Atlas, 2006.

**VILARINHO, P.; SIMARIA, A. S.** *A two-stage heuristic method for balancing mixed-model assembly lines with parallel Workstations.* International Journal of Production Research, v.40, n.6, p. 1405-1420, 2002.

**VILELLA, C. S. S.** *Mapeamento do processo como ferramenta de reestruturação e aprendizagem organizacional.* Dissertação de mestrado. UFSC. Santa Catarina, 2000.

**WANG, W.; BROOKS, R. J.** *Empirical investigations of conceptual modeling and the modeling process.* In: Proceedings of the Winter Simulation Conference, Washington, USA, 2007.

**WELGAMA, P. S.; MILLS, R. G. J.** *Use of Simulation in the Design of a JIT System.* International Journal of Operations e Production Management, v. 15, n. 9, p. 245-260, 1995.

**YIN, R.K.** *Estudo De Caso: Planejamento e Métodos,* 3 ed., Bookman Companhia, 2005.

## APÊNDICE A – TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS DADOS DE ENTRADA

	Intervalo entre chegadas na esteira (min)	Intervalo entre chegadas na vagonete (min)	Tempo de retirada do tijolo da esteira, vagonete e carrinho de mão (min)	Tempo de depósito do tijolo na vagonete, carrinho de mão e caminhão (min)	Tempo de Secagem (min)	Tempo de ciclo de queima do forno Hoffmann (min)	Tempo de ciclo de queima do forno paulista (min)	Intervalo entre paradas da extrusora (min)	Tempo de parada da extrusora (min)	Tempo de setup da extrusora (min)
1	0,024	0,052	0,003	0,003	2703,00	744,00	1824,00	32,00	5,00	43,00
2	0,026	0,047	0,003	0,002	2704,00	746,00	1820,00	35,00	5,00	40,00
3	0,030	0,045	0,003	0,003	2730,00	740,00	1826,00	30,00	14,00	45,00
4	0,025	0,038	0,003	0,002	2685,00	735,00	1824,00	35,00	5,00	50,00
5	0,023	0,038	0,003	0,005	2716,00	752,00	1825,00	35,00	5,00	35,00
6	0,028	0,046	0,003	0,003	2700,00	745,00	1825,00	42,00	3,00	33,00
7	0,022	0,043	0,003	0,004	2730,00	738,00	1832,00	46,00	6,00	34,00
8	0,028	0,044	0,003	0,006	2687,00	742,00	1830,00	46,00	25,00	35,00
9	0,023	0,041	0,003	0,004	2553,00	740,00	1824,00	47,00	8,00	37,00
10	0,022	0,040	0,003	0,004	2695,00	736,00	1825,00	35,00	3,00	38,00
11	0,030	0,041	0,003	0,004	2689,00	750,00	1820,00	42,00	25,00	50,00
12	0,030	0,045	0,003	0,004	2678,00	754,00	1826,00	51,00	5,00	34,00
13	0,030	0,038	0,003	0,004	2672,00	755,00	1832,00	50,00	10,00	30,00
14	0,028	0,036	0,003	0,003	2657,00	754,00	1825,00	35,00	5,00	45,00
15	0,030	0,042	0,003	0,004	2656,00	754,00	1825,00	30,00	25,00	32,00
16	0,024	0,045	0,003	0,005	2830,00	748,00	1825,00	30,00	5,00	36,00
17	0,023	0,043	0,003	0,004	2990,00	748,00	1815,00	34,00	6,00	32,00
18	0,029	0,044	0,003	0,005	2874,00	745,00	1832,00	26,00	5,00	30,00
19	0,031	0,052	0,003	0,005	2859,00	745,00	1826,00	46,00	9,00	35,00
20	0,030	0,043	0,003	0,006	2985,00	745,00	1818,00	40,00	20,00	34,00
21	0,028	0,039	0,003	0,005	2844,00	740,00	1825,00	34,00	14,00	45,00
22	0,033	0,042	0,003	0,005	2945,00	742,00	1815,00	25,00	15,00	50,00
23	0,028	0,038	0,003	0,006	2834,00	740,00	1826,00	36,00	5,00	35,00
24	0,028	0,039	0,003	0,006	2819,00	740,00	1830,00	25,00	7,00	33,00
25	0,023	0,042	0,003	0,005	2824,00	738,00	1830,00	30,00	10,00	34,00

## APÊNDICE A - DADOS COLETADOS E CÁLCULO DOS OUTLIERS

26	0,020	0,042	0,003	0,006	2844,00	750,00	1824,00	34,00	12,00	38,00
27	0,023	0,040	0,003	0,005	2842,00	755,00	1825,00	32,00	25,00	37,00
28	0,020	0,042	0,003	0,005	2912,00	744,00	1825,00	46,00	8,00	38,00
29	0,024	0,040	0,003	0,004	2834,00	744,00	1820,00	38,00	8,00	50,00
30	0,024	0,038	0,003	0,006	2906,00	748,00	1824,00	46,00	10,00	33,00
31	0,024	0,043	0,003	0,005	2825,00	735,00	1825,00	47,00	20,00	34,00
32	0,026	0,043	0,003	0,004	2852,00	752,00	1830,00	35,00	25,00	39,00
33	0,024	0,046	0,003	0,004	2846,00	750,00	1824,00	42,00	5,00	37,00
34	0,021	0,041	0,003	0,004	2703,00	750,00	1825,00	35,00	3,00	38,00
35	0,026	0,041	0,003	0,003	2704,00	742,00	1825,00	42,00	6,00	50,00
36	0,026	0,039	0,003	0,005	2730,00	740,00	1825,00	35,00	5,00	38,00
37	0,023	0,045	0,003	0,004	2685,00	738,00	1830,00	30,00	8,00	35,00
38	0,025	0,043	0,003	0,005	2716,00	750,00	1825,00	46,00	3,00	37,00
39	0,024	0,043	0,003	0,004	2700,00	750,00	1825,00	25,00	3,00	38,00
40	0,025	0,041	0,003	0,005	2730,00	755,00	1825,00	28,00	5,00	50,00
41	0,029	0,045	0,003	0,004	2687,00	748,00	1824,00	47,00	12,00	33,00
42	0,030	0,049	0,003	0,006	2553,00	754,00	1832,00	46,00	5,00	36,00
43	0,027	0,047	0,003	0,004	2695,00	744,00	1824,00	38,00	10,00	32,00
44	0,024	0,043	0,003	0,004	2689,00	748,00	1825,00	28,00	2,00	30,00
45	0,021	0,039	0,003	0,004	2678,00	740,00	1825,00	30,00	14,00	35,00
46	0,024	0,037	0,003	0,003	2672,00	738,00	1825,00	43,00	5,00	34,00
47	0,024	0,039	0,003	0,003	2657,00	750,00	1815,00	27,00	5,00	35,00
48	0,022	0,039	0,003	0,003	2656,00	750,00	1825,00	47,00	3,00	37,00
49	0,020	0,046	0,003	0,003	2703,00	748,00	1824,00	46,00	6,00	38,00
50	0,022	0,037	0,003	0,003	2704,00	744,00	1832,00	20,00	5,00	39,00
51	0,023	0,046	0,003	0,003	2730,00	750,00	1824,00	25,00	8,00	33,00
52	0,020	0,037	0,003	0,003	2685,00	738,00	1825,00	46,00	12,00	37,00
53	0,024	0,050	0,003	0,003	2716,00	752,00	1825,00	20,00	14,00	38,00
54	0,030	0,038	0,003	0,003	2700,00	750,00	1820,00	25,00	21,00	34,00
55	0,026	0,049	0,003	0,003	2730,00	752,00	1824,00	30,00	31,00	34,00
56	0,025	0,040	0,003	0,003	2687,00	748,00	1825,00	34,00	12,00	30,00
57	0,025	0,045	0,003	0,003	2553,00	735,00	1830,00	30,00	27,00	29,00

## APÊNDICE A - DADOS COLETADOS E CÁLCULO DOS OUTLIERS

58	0,022	0,038	0,003	0,004	2695,00	755,00	1824,00	20,00	25,00	40,00
59	0,027	0,045	0,003	0,003	2689,00	750,00	1825,00	25,00	23,00	36,00
60	0,026	0,049	0,003	0,003	2678,00	752,00	1825,00	30,00	15,00	30,00
61	0,022	0,045	0,003	0,003	2672,00	748,00	1825,00	34,00	20,00	30,00
62	0,026	0,039	0,003	0,003	2657,00	740,00	1830,00	26,00	15,00	35,00
63	0,020	0,042	0,003	0,004	2656,00	738,00	1825,00	46,00	21,00	34,00
64	0,025	0,048	0,003	0,003	2830,00	750,00	1825,00	38,00	15,00	35,00
65	0,027	0,044	0,003	0,003	2990,00	750,00	1824,00	46,00	12,00	37,00
66	0,025	0,044	0,003	0,003	2874,00	755,00	1825,00	47,00	10,00	38,00
67	0,026	0,039	0,003	0,003	2859,00	748,00	1825,00	38,00	5,00	39,00
68	0,022	0,037	0,003	0,003	2985,00	740,00	1832,00	40,00	12,00	33,00
69	0,024	0,043	0,002	0,003	2844,00	738,00	1825,00	42,00	15,00	37,00
70	0,020	0,043	0,003	0,003	2945,00	740,00	1825,00	55,00	5,00	35,00
71	0,023	0,048	0,003	0,003	2834,00	738,00	1830,00	25,00	24,00	37,00
72	0,024	0,044	0,003	0,003	2819,00	750,00	1825,00	30,00	20,00	38,00
73	0,022	0,047	0,003	0,003	2824,00	750,00	1825,00	34,00	5,00	39,00
74	0,021	0,045	0,003	0,003	2844,00	755,00	1825,00	26,00	5,00	33,00
75	0,032	0,044	0,003	0,003	2842,00	748,00	1815,00	46,00	14,00	37,00
76	0,026	0,040	0,003	0,003	2912,00	744,00	1825,00	38,00	5,00	38,00
77	0,020	0,034	0,003	0,003	2834,00	748,00	1824,00	34,00	5,00	34,00
78	0,022	0,040	0,003	0,003	2906,00	744,00	1832,00	26,00	4,00	39,00
79	0,023	0,049	0,003	0,003	2825,00	750,00	1824,00	46,00	5,00	37,00
80	0,023	0,045	0,003	0,003	2852,00	738,00	1830,00	34,00	5,00	38,00
81	0,026	0,049	0,003	0,003	2846,00	752,00	1824,00	26,00	14,00	50,00
82	0,022	0,041	0,003	0,003	2716,00	750,00	1825,00	30,00	5,00	38,00
83	0,024	0,043	0,003	0,003	2704,00	752,00	1825,00	34,00	5,00	32,00
84	0,020	0,042	0,003	0,003	2730,00	748,00	1825,00	26,00	5,00	29,00
85	0,025	0,045	0,003	0,003	2730,00	738,00	1830,00	46,00	5,00	40,00
86	0,020	0,039	0,003	0,003	2716,00	750,00	1825,00	38,00	5,00	36,00
87	0,025	0,043	0,003	0,003	2695,00	755,00	1825,00	46,00	14,00	30,00
88	0,023	0,045	0,003	0,004	2730,00	744,00	1825,00	47,00	5,00	30,00
89	0,025	0,040	0,003	0,004	2678,00	744,00	1825,00	38,00	5,00	35,00

## APÊNDICE A - DADOS COLETADOS E CÁLCULO DOS OUTLIERS

90	0,023	0,045	0,003	0,003	2695,00	748,00	1825,00	40,00	12,00	34,00
91	0,024	0,042	0,003	0,003	2657,00	748,00	1815,00	26,00	12,00	35,00
92	0,024	0,050	0,003	0,003	2656,00	735,00	1825,00	35,00	15,00	37,00
93	0,030	0,044	0,003	0,003	2678,00	755,00	1824,00	30,00	14,00	38,00
94	0,025	0,041	0,003	0,003	2657,00	750,00	1832,00	46,00	5,00	39,00
95	0,024	0,042	0,003	0,003	2656,00	752,00	1824,00	25,00	5,00	33,00
96	0,024	0,046	0,003	0,003	2819,00	748,00	1825,00	20,00	14,00	32,00
97	0,023	0,044	0,003	0,003	2852,00	740,00	1830,00	47,00	5,00	30,00
98	0,026	0,043	0,003	0,003	2844,00	738,00	1824,00	46,00	5,00	41,00
99	0,024	0,048	0,003	0,003	2846,00	750,00	1825,00	38,00	5,00	40,00
100	0,025	0,049	0,003	0,003	2912,00	748,00	1825,00	50,00	5,00	29,00
QUARTIL 1	0,023	0,040	0,003	0,003	2687,00	740,00	1824,00	30,00	5,00	33,75
QUARTIL 3	0,026	0,045	0,003	0,004	2844,00	750,00	1825,00	46,00	14,00	38,00
Q3+1,5*(Q3-Q1)	0,031	0,053	0,003	0,006	3079,50	765,00	1826,50	70,00	27,50	44,38
Q1-1,5*(Q3-Q1)	0,018	0,032	0,002	0,001	2451,50	725,00	1822,50	6,00	-8,50	27,38



*Quartis*



*Outliers*

# APÊNDICE B – TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS DADOS DE ENTRADA

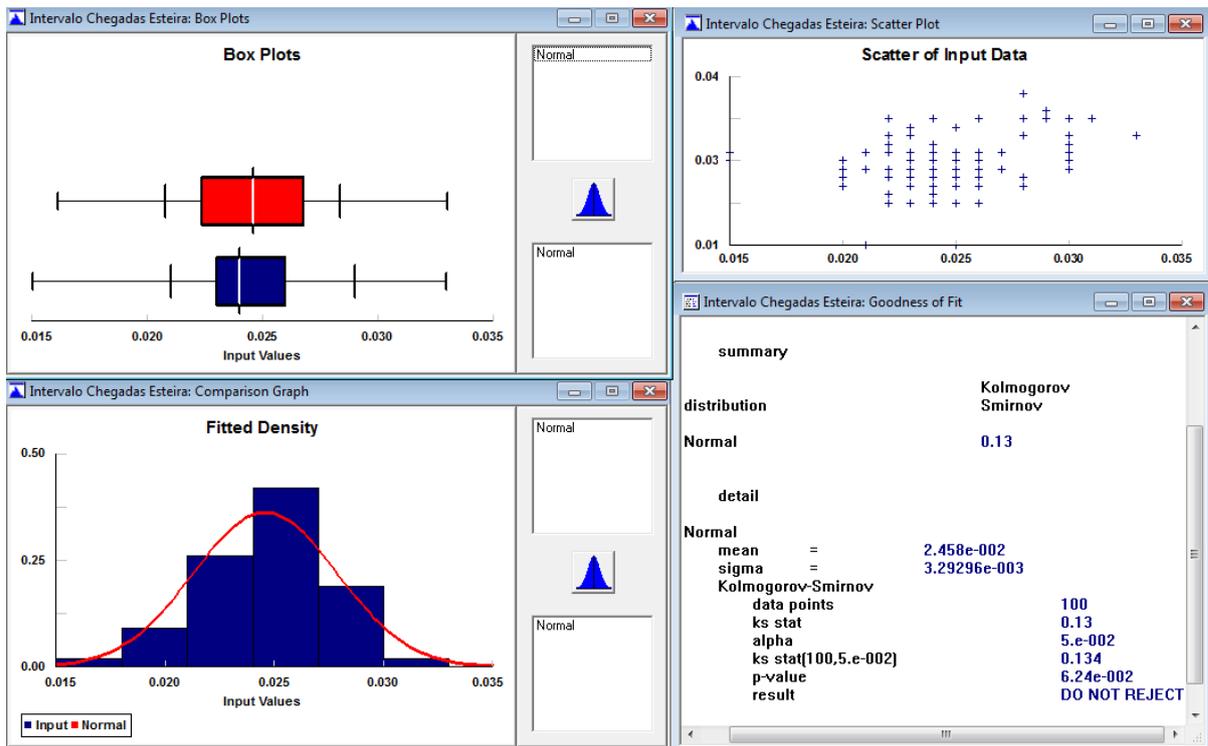


Figura B.1–Intervalo de chegadas a extrusora (Fonte: O Autor, 2013).

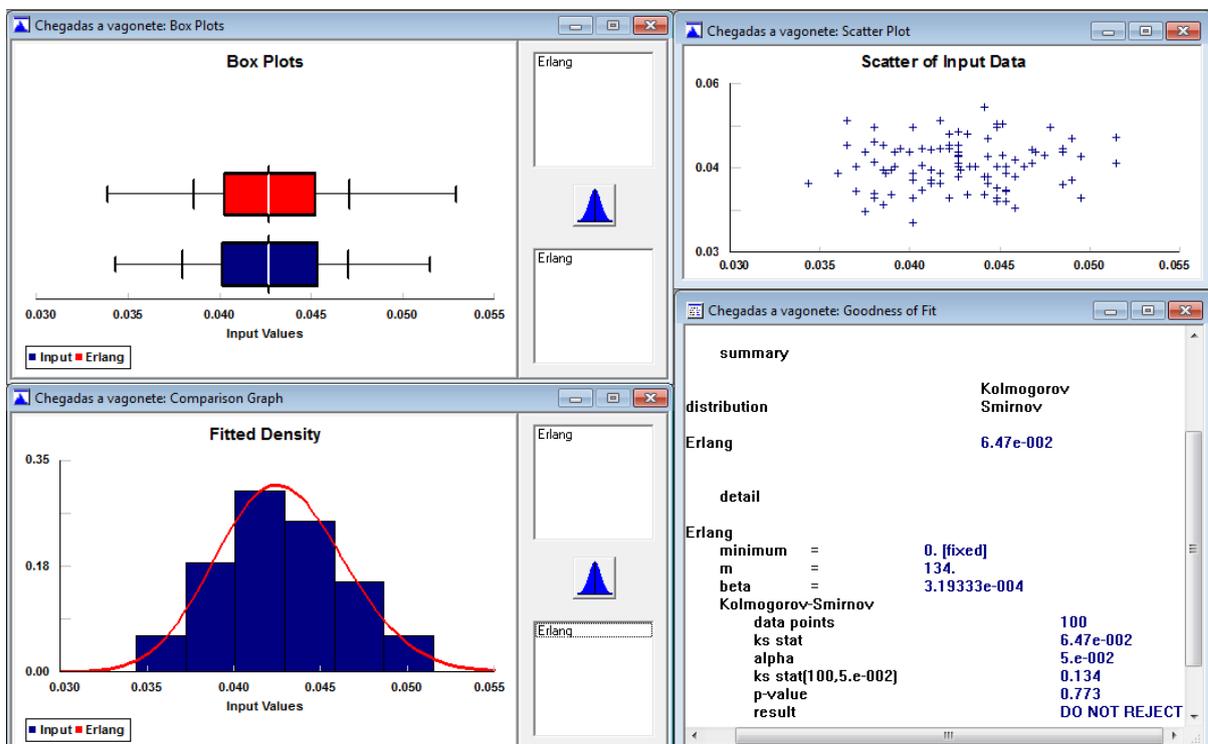


Figura B.2–Intervalo de chegadas a vagonete (Fonte: O Autor, 2013).

## APÊNDICE B – TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS DADOS DE ENTRADA

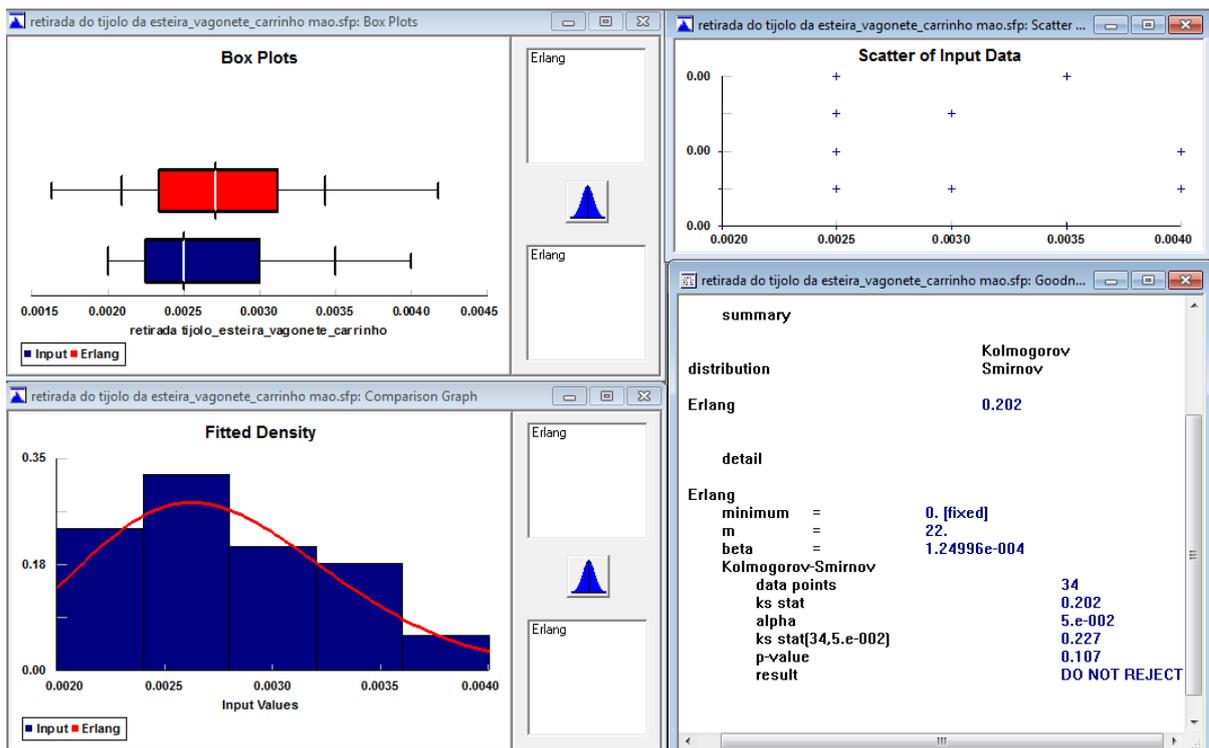


Figura B.3–Tempo de retirada do tijolo da esteira, da vagonete e do carrinho de mão (Fonte: O Autor, 2013).

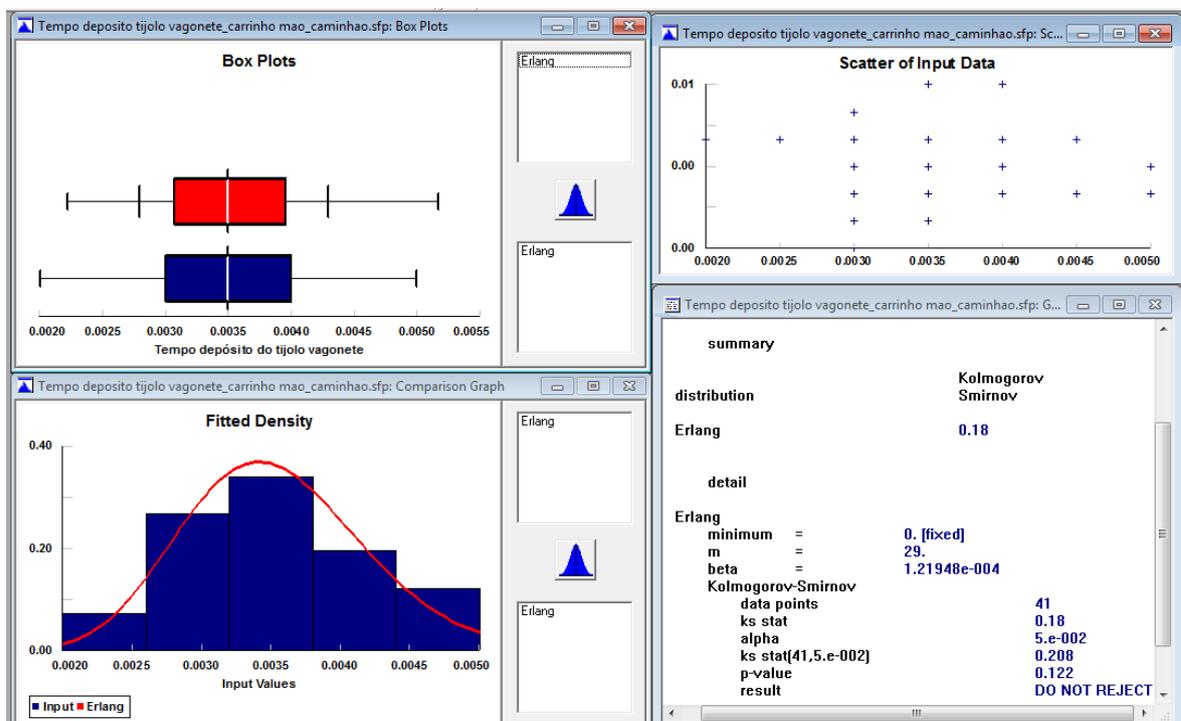


Figura B.4–Tempo de depósito do tijolo na da vagonete, no carrinho de mão e no caminhão (Fonte: O Autor, 2013).

# APÊNDICE B – TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS DADOS DE ENTRADA

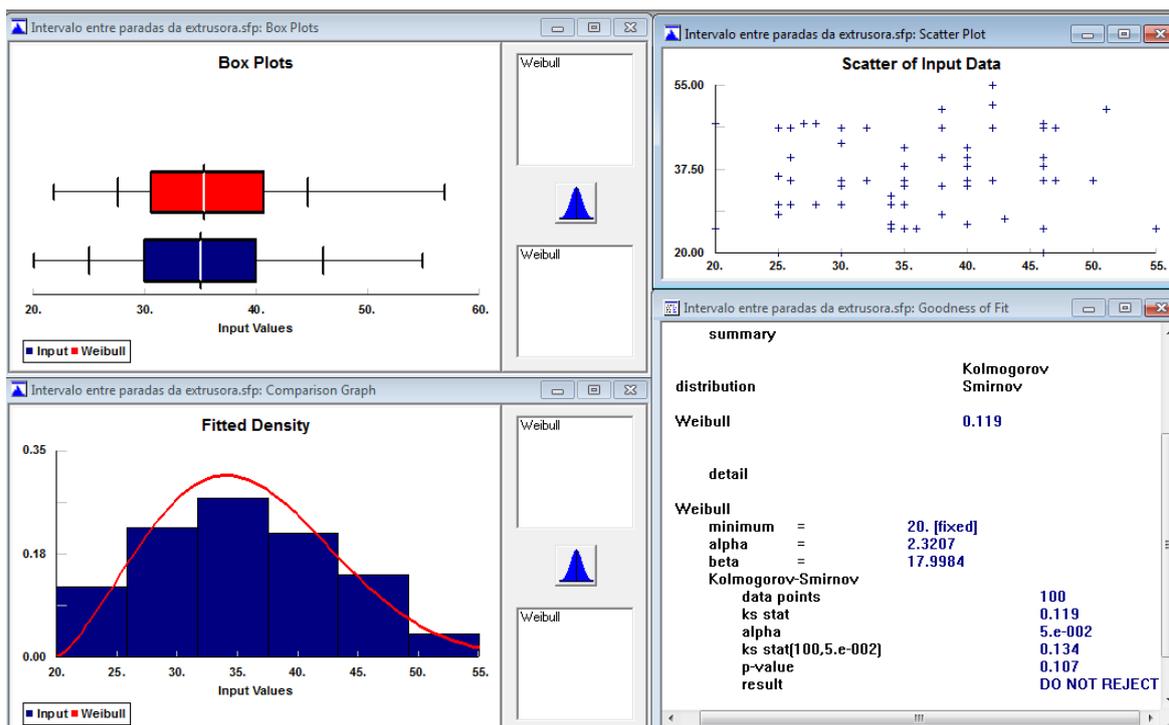


Figura B.5–Intervalo entre paradas da extrusora (Fonte: O Autor, 2013).

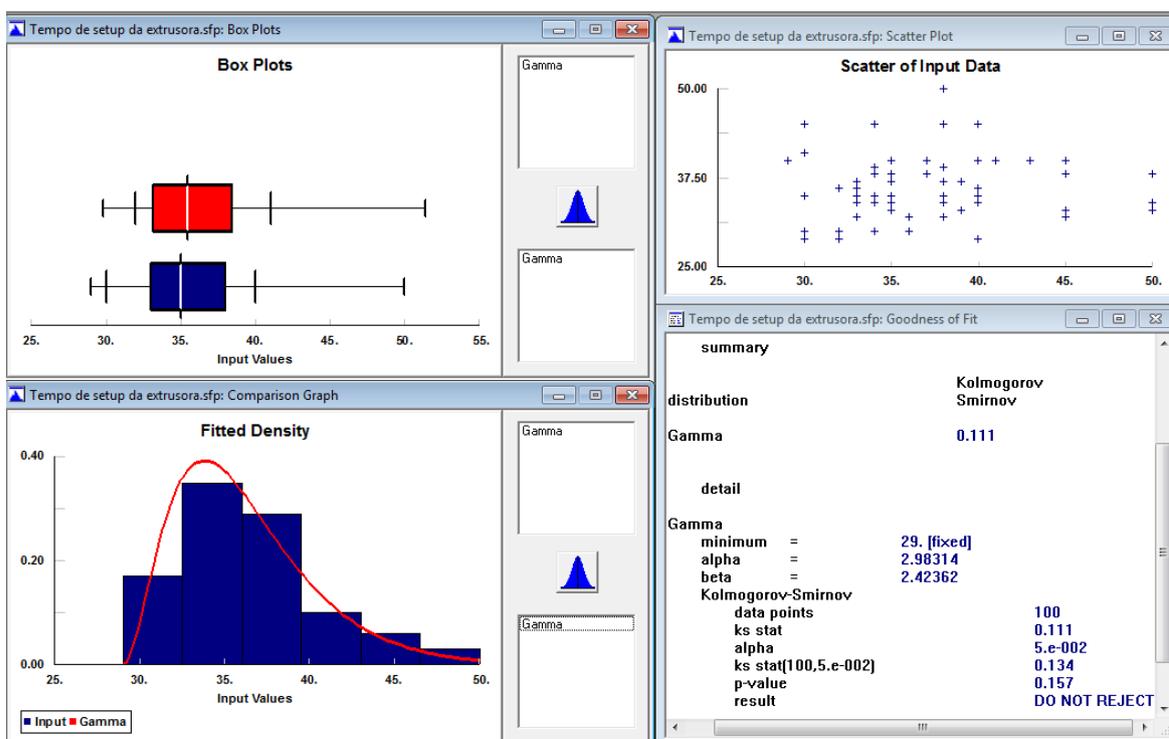


Figura B.6–Tempo de *setup* da extrusora (Fonte: O Autor, 2013).

# APÊNDICE B – TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS DADOS DE ENTRADA

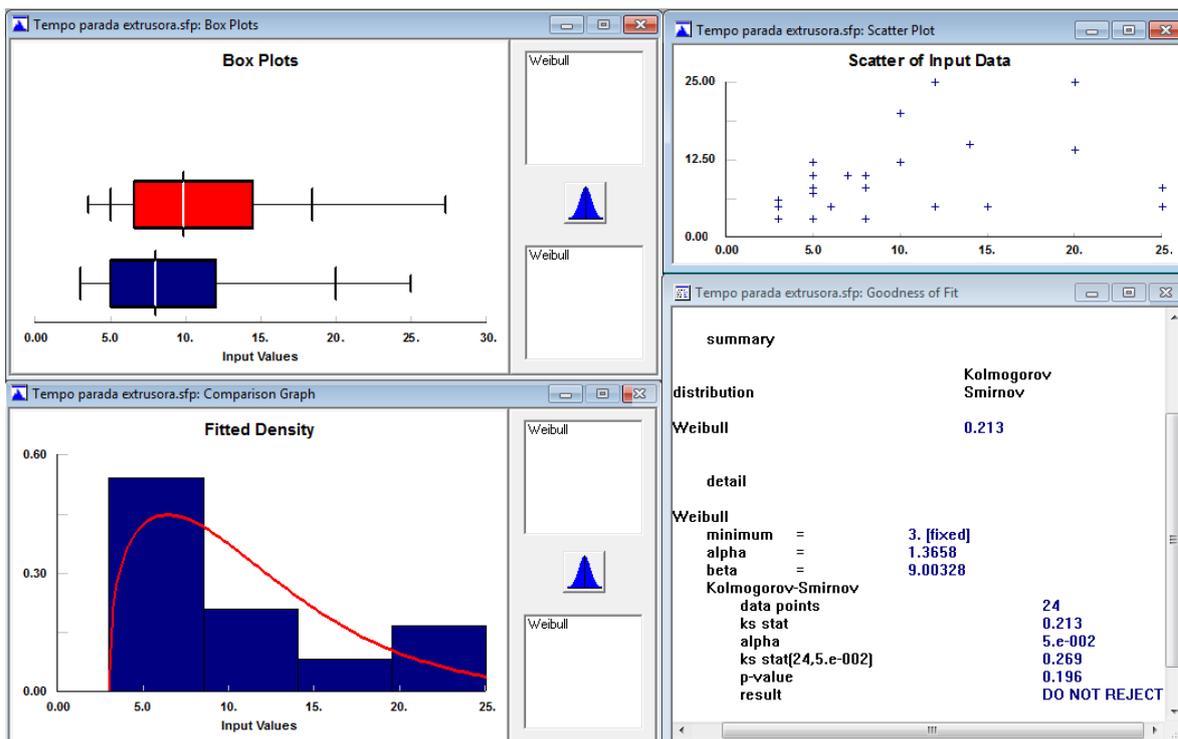


Figura B.7–Tempo de parada da extrusora (Fonte: O Autor, 2013).

## APÊNDICE C – RELATÓRIO NÚMÉRICO DO ESTADO DOS RECURSOS

Tabela C.1–Estado dos recursos do cenário base (Fonte: O Autor, 2013).

Estado dos Recursos							
Cenário	Replicação	Nome	% Em Uso	% Movimentação para Uso	% Movimento para Parada	% Ocioso	% Parada Não-Planejada
CenarioBase	15	Op 1.1	75,46	0,00	0,00	15,23	9,31
CenarioBase	15	Op 1.2	75,46	0,00	0,00	15,23	9,31
CenarioBase	15	Op 2.1	72,08	0,00	0,00	21,21	6,72
CenarioBase	15	Op 2.2	72,08	0,00	0,00	21,21	6,72
CenarioBase	15	Op 3.1	72,08	0,00	0,00	18,61	9,31
CenarioBase	15	Op 3.2	72,08	0,00	0,00	18,61	9,31
CenarioBase	15	Carrinho de mao 1.1	82,23	9,41	4,87	0,00	3,49
CenarioBase	15	Carrinho de mao 1.2	82,23	9,41	4,87	0,00	3,49
CenarioBase	15	Carrinho de mao 1.3	82,23	9,41	4,87	0,00	3,49
CenarioBase	15	Carrinho de mao 2.1	88,79	5,66	1,16	0,00	4,39
CenarioBase	15	Carrinho de mao 2.2	88,79	5,66	1,16	0,00	4,39
CenarioBase	15	Carrinho de mao 2.3	88,79	5,66	1,16	0,00	4,39
CenarioBase	15	Carrinho de mao 2.4	85,72	5,50	1,32	3,07	4,39
CenarioBase	15	Carrinho de mao 2.5	86,99	5,66	1,32	1,64	4,39
CenarioBase	15	Carrinho de mao 3.1	82,60	11,32	1,69	0,00	4,39
CenarioBase	15	Carrinho de mao 3.2	82,60	11,32	1,69	0,00	4,39
CenarioBase	15	Carrinho de mao 3.3	82,92	11,00	1,69	0,00	4,39
CenarioBase	15	Carrinho de mao 3.4	82,60	11,32	1,69	0,00	4,39
CenarioBase	15	Carrinho de mao 3.5	83,61	10,31	1,69	0,00	4,39
CenarioBase	15	Carrinho de mao 3.6	83,29	10,63	1,69	0,00	4,39

Tabela C.2–Estado dos recursos do cenário 01 (Fonte: O Autor, 2013).

Estado dos Recursos							
Cenário	Replicação	Nome	% Em Uso	% Movimentação para Uso	% Movimento para Parada	% Ocioso	% Parada Não-Planejada
Cenario1	15	Op 1.1	77,06	0,00	0,00	15,62	7,32
Cenario1	15	Op 1.2	77,06	0,00	0,00	15,62	7,32
Cenario1	15	Op 2.1	73,92	0,00	0,00	19,20	6,89
Cenario1	15	Op 2.2	73,92	0,00	0,00	19,20	6,89
Cenario1	15	Op 3.1	73,92	0,00	0,00	18,76	7,32
Cenario1	15	Op 3.2	73,92	0,00	0,00	18,76	7,32
Cenario1	15	Carrinho de mao 1.1	84,33	8,57	4,99	0,00	2,11
Cenario1	15	Carrinho de mao 1.2	84,33	8,57	4,99	0,00	2,11
Cenario1	15	Carrinho de mao 1.3	84,33	8,57	4,99	0,00	2,11
Cenario1	15	Carrinho de mao 2.1	88,50	5,80	1,19	0,00	4,50
Cenario1	15	Carrinho de mao 2.2	88,50	5,80	1,19	0,00	4,50
Cenario1	15	Carrinho de mao 2.3	88,50	5,80	1,19	0,00	4,50
Cenario1	15	Carrinho de mao 2.4	85,68	5,31	1,36	3,15	4,50
Cenario1	15	Carrinho de mao 2.5	86,98	5,48	1,36	1,68	4,50
Cenario1	15	Carrinho de mao 3.1	82,86	10,90	1,74	0,00	4,50
Cenario1	15	Carrinho de mao 3.2	82,16	11,61	1,74	0,00	4,50
Cenario1	15	Carrinho de mao 3.3	83,19	10,57	1,74	0,00	4,50
Cenario1	15	Carrinho de mao 3.4	82,16	11,61	1,74	0,00	4,50
Cenario1	15	Carrinho de mao 3.5	83,19	10,57	1,74	0,00	4,50
Cenario1	15	Carrinho de mao 3.6	82,86	10,90	1,74	0,00	4,50

## APÊNDICE C – RELATÓRIO NÚMÉRICO DO ESTADO DOS RECURSOS

Tabela C.3–Estado dos recursos do cenário 02 (Fonte: O Autor, 2013).

Estado dos Recursos							
Cenário	Replicação	Nome	% Em Uso	% Movimentação para Uso	% Movimento para Parada	% Ocioso	% Parada Não-Planejada
Cenario2	15	Op 1.1	80,49	0,00	0,00	13,10	6,41
Cenario2	15	Op 1.2	80,38	0,00	0,00	13,21	6,41
Cenario2	15	Op 2.1	78,86	0,00	0,00	15,16	5,98
Cenario2	15	Op 2.2	78,86	0,00	0,00	15,16	5,98
Cenario2	15	Op 3.1	78,86	0,00	0,00	14,73	6,41
Cenario2	15	Op 3.2	78,86	0,00	0,00	14,73	6,41
Cenario2	15	Carrinho de mao 1.1	84,51	8,59	5,00	0,00	1,90
Cenario2	15	Carrinho de mao 1.2	84,51	8,59	5,00	0,00	1,90
Cenario2	15	Carrinho de mao 1.3	84,51	8,59	5,00	0,00	1,90
Cenario2	15	Carrinho de mao 2.1	88,48	5,82	1,20	0,00	4,51
Cenario2	15	Carrinho de mao 2.2	88,48	5,82	1,20	0,00	4,51
Cenario2	15	Carrinho de mao 2.3	88,48	5,82	1,20	0,00	4,51
Cenario2	15	Carrinho de mao 2.4	85,65	5,33	1,36	3,15	4,51
Cenario2	15	Carrinho de mao 2.5	86,96	5,49	1,36	1,68	4,51
Cenario2	15	Carrinho de mao 3.1	82,83	10,92	1,74	0,00	4,51
Cenario2	15	Carrinho de mao 3.2	82,12	11,63	1,74	0,00	4,51
Cenario2	15	Carrinho de mao 3.3	83,15	10,60	1,74	0,00	4,51
Cenario2	15	Carrinho de mao 3.4	82,12	11,63	1,74	0,00	4,51
Cenario2	15	Carrinho de mao 3.5	83,15	10,60	1,74	0,00	4,51
Cenario2	15	Carrinho de mao 3.6	82,83	10,92	1,74	0,00	4,51

Tabela C.4–Estado dos recursos do cenário 03 (Fonte: O Autor, 2013).

Estado dos Recursos							
Cenário	Replicação	Nome	% Em Uso	% Movimentação para Uso	% Movimento para Parada	% Ocioso	% Parada Não-Planejada
Cenario3	15	Op 1.1	88,42	0,00	0,00	6,15	5,43
Cenario3	15	Op 1.2	88,30	0,00	0,00	6,27	5,43
Cenario3	15	Op 2.1	88,90	0,00	0,00	6,15	4,96
Cenario3	15	Op 2.2	88,90	0,00	0,00	6,15	4,96
Cenario3	15	Op 3.1	88,90	0,00	0,00	5,67	5,43
Cenario3	15	Op 3.2	88,90	0,00	0,00	5,67	5,43
Cenario3	15	Carrinho de mao 1.1	86,27	9,01	2,75	0,00	1,97
Cenario3	15	Carrinho de mao 1.2	86,27	9,01	2,75	0,00	1,97
Cenario3	15	Carrinho de mao 1.3	86,27	9,01	2,75	0,00	1,97
Cenario3	15	Carrinho de mao 2.1	88,06	5,67	1,31	0,00	4,96
Cenario3	15	Carrinho de mao 2.2	88,06	5,67	1,31	0,00	4,96
Cenario3	15	Carrinho de mao 2.3	88,06	5,67	1,31	0,00	4,96
Cenario3	15	Carrinho de mao 2.4	84,96	5,13	1,49	3,46	4,96
Cenario3	15	Carrinho de mao 2.5	86,39	5,31	1,49	1,85	4,96
Cenario3	15	Carrinho de mao 3.1	81,91	11,22	1,91	0,00	4,96
Cenario3	15	Carrinho de mao 3.2	81,91	11,22	1,91	0,00	4,96
Cenario3	15	Carrinho de mao 3.3	82,27	10,87	1,91	0,00	4,96
Cenario3	15	Carrinho de mao 3.4	81,91	11,22	1,91	0,00	4,96
Cenario3	15	Carrinho de mao 3.5	83,04	10,09	1,91	0,00	4,96
Cenario3	15	Carrinho de mao 3.6	82,69	10,45	1,91	0,00	4,96