

MILENA ESTANISLAU DINIZ

**UM MODELO DE APOIO A TOMADA DE DECISÃO
PARA SOLUÇÃO DO PROBLEMA DE
BALANCEAMENTO DE LINHA DE MONTAGEM:
ESTUDO DE CASO EM UMA MANUFATURA
ELETRÔNICA**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da UFMG como requisito para obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Produção.

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG

2005

MILENA ESTANISLAU DINIZ

**UM MODELO DE APOIO A TOMADA DE DECISÃO
PARA SOLUÇÃO DO PROBLEMA DE
BALANCEAMENTO DE LINHA DE MONTAGEM:
ESTUDO DE CASO EM UMA MANUFATURA
ELETRÔNICA**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da UFMG como requisito para obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Produção.

Linha de pesquisa: **Engenharia Logística e de Manufatura**

Orientador: **Prof. Samuel Vieira Conceição, PhD**

Co-orientador: **Prof. Luiz Ricardo Pinto, Dr.**

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2005

AGRADECIMENTOS

À Deus pela força e disposição para enfrentar os obstáculos e seguir em frente.

À meu orientador Prof. PhD. Samuel Vieira Conceição pelo incentivo, apoio, dedicação e inigualável contribuição para a execução dessa Dissertação.

Ao Prof. Dr. Luiz Ricardo Pinto pelo incentivo e colaboração na construção dos modelos.

Aos meus pais João Da Cruz Diniz e Maria Geralda Estanislau Diniz que com renúncia, amor, carinho e dedicação me deram força e toda ajuda necessária para o alcance de meus objetivos.

Aos demais professores do curso de Mestrado em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Minas Gerais que contribuíram para a consolidação de conhecimentos durante esses dois anos.

À EMS, pela cooperação, apoio, enfim, por ter sido o campo de observações e análises, sem as quais seria impossível a realização do presente trabalho.

Aos meus irmãos Wender, Weiller, Wilhiam e Heloísa pela ajuda, incentivo e força nos momentos difíceis e a Marcelo Mansur pelo amor, apoio e encorajamento.

A Ana Carolina e ao Thiago Augusto por terem sido os sustentáculos para a construção da presente dissertação.

A todos os amigos de OP, BH e Itabira e às doçuras, pelo apoio e incentivo indispensáveis nessa caminhada. Aos amigos do Mestrado e da Graduação pelo companheirismo e apoio em todos os momentos, principalmente a Irce, Lásara, Iana, Ormeu, Francilene, Rafael, Alexandre, Rogério, Elias, Paulo e Osmar.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	7
LISTA DE TABELAS	8
LISTA DE QUADROS E GRÁFICOS	9
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	10
RESUMO	11
ABSTRACT	12
1 INTRODUÇÃO	13
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA	13
1.2 OBJETIVOS DO ESTUDO	16
1.2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
1.3 HIPÓTESE DO ESTUDO	17
1.4 RELEVÂNCIA DA PESQUISA	18
1.5 METODOLOGIA DA PESQUISA	19
1.6 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA	21
1.7 ESTRUTURA DA PESQUISA	22
2 PROBLEMA DE BALANCEAMENTO DE LINHA DE MONTAGEM	23
2.1 MÉTODOS DE SOLUÇÃO DO PROBLEMA DE BALANCEAMENTO DE LINHA	31
2.1.1 MÉTODOS HEURÍSTICOS	33
2.1.2 MÉTODOS EXATOS	35
3 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	39
3.1 HISTÓRICO E EVOLUÇÃO DA SIMULAÇÃO	39
3.2 TIPOS DE MODELOS	42
3.3 SIMULAÇÃO A EVENTOS DISCRETOS	45
3.4 PROCEDIMENTOS DE SIMULAÇÃO	47
3.4.1 ARENA	58
3.5 VANTAGENS E DESVANTAGENS DA SIMULAÇÃO	59
3.6 REPRESENTAÇÃO VISUAL DA SIMULAÇÃO	60
3.7 APLICAÇÃO DA SIMULAÇÃO	61

4	ESTUDO DE CASO	69
4.1	APLICAÇÃO DA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	69
4.2	CONSTRUÇÃO DO MODELO CONCEITUAL	71
4.3	TESTE DE VALIDAÇÃO DO MODELO CONCEITUAL	85
4.4	PROGRAMAÇÃO DO MODELO	85
4.5	VERIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO	88
4.6	PROJETO EXPERIMENTAL	89
4.7	ANÁLISE DE RESULTADOS, ELABORAÇÃO DE RELATÓRIOS E DOCUMENTAÇÃO DO PROGRAMA	101
5	CONCLUSÕES, RECOMENDAÇÕES E TRABALHOS FUTUROS	109
5.1	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	112
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	113
	APÊNDICE	121
	APÊNDICE A – ATRIBUTOS DAS ENTIDADES	121
	APÊNDICE B- TEMPOS DO SISTEMA MODELADO	122
	APÊNDICE C – RENDIMENTO DAS PLACAS POR ORIGEM	130
	APÊNDICE D –LÓGICA DO MODELO	131

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Apresentação da metodologia de pesquisa utilizada.....	21
Figura 2.1 - Exemplo de uma linha de montagem.....	23
Figura 2.2 - Representação de linhas de montagem.....	24
Figura 2.3 - Diagrama de precedência.....	26
Figura 2.4 - Layout de linha em forma de U simples.....	30
Figura 2.5 - Layout de linha em série.....	31
Figura 2.6 - Estações paralelas.....	38
Figura 3.1 - Formas de estudo de um sistema.....	44
Figura 3.2 - Abordagem de sete passos da simulação.....	49
Figura 4.1 - Diagrama espinha de peixe.....	70
Figura 4.2 - Linha de montagem.....	73
Figura 4.3 - Representação do processo produtivo de placas de circuito impresso	75
Figura 4.4 - Característica dual da entidade placa.....	82

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1.-	Relação dos recursos por estação na modelagem.....	83
Tabela 4.2	- Relação de testadores por família de produtos.....	84
Tabela 4.3	- Confrontação dos tempos históricos de inserção manual X tempos resultantes do modelo	89
Tabela 4.4	- Tempo médio de espera em fila no modelo final (Parte I).....	90
Tabela 4.5	- Tempo médio de espera em fila no modelo final (Parte II).....	91
Tabela 4.6	- Tempo médio de espera em fila no modelo final (Parte III).....	92
Tabela 4.7	- Contadores de pedidos do modelo final.....	92
Tabela 4.8	- Tempo médio de montagem por tipo de placa na Inserção Manual.....	93
Tabela 4.9	- Taxa de utilização dos recursos no modelo final (%)......	95
Tabela 4.10	- Variação de recursos por cenário.....	100
Tabela 4.11	- Número de componentes considerados por cenário.....	102
Tabela 4.12	- Tempos de Inserção Manual nas linhas 1 e 2 (horas).....	103
Tabela 4.13	- Estoque em processo dos cenários 1-6.....	103
Tabela 4.14	- Estoque de placas em processo no modelo final e cenários 7-10.....	104
Tabela 4.15	- Tempo médio de espera em filas no modelo final e cenários 7-8 (I)....	105
Tabela 4.16	- Tempo médio de espera em filas no modelo final e cenários 9-10 II)..	106
Tabela 4.17	- Tempo médio de espera na fila IM.....	106
Tabela 4.18	- Tempo médio total de montagem dos lotes nos cenários 7-13.....	106
Tabela A.1	- Atributos das entidades placas.....	121
Tabela B.1	- Intervalo entre chegada de pedidos.....	123
Tabela B.2	- Entidades (Pedidos) por chegada.....	124
Tabela B.3	- Tempo de reparo das placas por origem (ICT / FVT Acabamento)	124
Tabela B.4	- Tempo de processamento na Pré-Formatação.....	125
Tabela B.5	- Tempos de processamento do Acabamento e da Embalagem.....	125
Tabela B.6	- Tempo de montagem na inserção manual Postos 1-3.....	126
Tabela B.7	- Tempo de montagem na inserção manual Postos 4-6.....	126
Tabela B.8	- Tempos de montagem na inserção manual Postos 7-8.....	127
Tabela B.9	- Tempos de montagem na inserção manual Postos 9-10.....	128
Tabela B.10	- Intervalo entre paradas e tempo de parada dos testadores.....	129
Tabela C.1	- Rendimento das placas por origem (ICT / FVT Acabamento).....	130

LISTA DE QUADROS E GRÁFICOS

Quadro 2.1 - Versões do SABL P	28
Quadro 3.1 - Principais temas discutidos na literatura.....	63
Quadro 4.1 - Recursos dos processos da modelagem.....	100
Quadro D.1 - Expressões das linhas de SMT.....	133
Quadro D.2 -Atualização de dados no <i>Assign</i> Controlecomp1 na linha 1.....	137
Quadro D.3 Atualização de dados no <i>Assign</i> Controlecomp2 na linha 1.....	137
Gráfico 4.1 – Demanda de placas.....	79
Gráfico 4.2 –Porcentagem de pedidos por tipo de placas.....	80
Gráfico 4.3 - Taxa de utilização dos recursos no modelo final (%).....	96

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AG - Algoritmos genéticos

B&B - *Branch and bound*

EMS - *Electronic Manufacturing Service*

JIT - *Just in time*

OEM - *Original Equipment Service*

OP - Ordem de produção

PCI - Placa de circuito impresso

PCP - Planejamento e controle da produção

PTH- *Pin Through Hole*

SCP- Sistema de controle e planejamento da produção

SMT - *Surface Mount Technology*

Wip - *Work in process*

RESUMO

O objetivo principal do presente estudo foi estudar e desenvolver um modelo de apoio à tomada de decisão para solução do problema de balanceamento de linha de montagem, em uma empresa contratada de produtos eletrônicos.

Um diagrama espinha de peixe foi construído para identificação das causas do problema de balanceamento de linha na pesquisa de campo. A partir dos resultados e dados obtidos com o estudo de caso, um modelo de simulação computacional foi construído.

O presente estudo concentrou-se na eficácia da simulação computacional na solução do problema de balanceamento de linha de montagem e na sua utilização como ferramenta de apoio à tomada de decisão.

Palavras Chave: problema de balanceamento de linha, diagrama espinha de peixe, modelo, simulação computacional, EMS.

ABSTRACT

The main objective of the present study is to develop a support model for the decision taking in solving the assembly line balancing problem, in a contract manufacturing company of electronic products.

A fish bone diagram was constructed for identification of the causes of the assembly line balancing problem in field research. From the results and data gotten with the case study, a model of computational simulation was constructed.

The present study was concentrated in the effectiveness of the computational simulation in the solution of the problem of balancing of assembly line and in its use as support tool the decision taking.

Words Key: assembly line balancing problem, simulation, fish bone diagram, model, EMS.

1 INTRODUÇÃO

A necessidade de atendimento a requisitos do mercado da manufatura eletrônica como flexibilidade, redução do tempo de desenvolvimento do produto, do tempo de mercado para novos produtos e do tempo de compra do cliente para produtos existentes motivaram as empresas de equipamentos originais a utilizarem os serviços de manufatura contratada.

1.1 Contextualização do problema

Diante da competitividade do mercado global, a indústria de eletro-eletrônicos e de informática procura reduzir o tempo de ciclo dos produtos, reduzir os custos de produção e aumentar a qualidade de seus produtos por questões de sobrevivência (HABERLE e GRAVES, 2001).

De acordo com HUNT e JONES (1998), o mercado de manufatura contratada está crescendo e se tornando mais competitivo. As manufaturas de equipamentos originais (*Original Equipment Manufacturing - OEM*) têm utilizado as empresas de serviços de manufatura eletrônica (EMS) para balanceamento de carga de trabalho, diminuição de custos operacionais e contenção de gastos. Os consumidores estão buscando, cada vez mais, baixos custos, alta qualidade de produto e maior velocidade na entrega de produtos e serviços.

A produção de placas de circuito impresso é um processo complexo, envolvendo um alto custo de capital. Estes fatos aliados à necessidade de manutenção de qualidade com entrega no prazo definido, custos baixos e alta flexibilidade tornam o balanceamento de linhas produtivas e a capacidade das empresas de se adaptarem a uma demanda variável e aos avanços tecnológicos, cruciais para a competitividade nesse mercado.

Devido à necessidade de diminuição de custos com montagem de placas de circuito impresso, as OEM's passaram a ter como foco de negócio, o desenvolvimento de produtos. A partir dos anos 80, com a difusão da tecnologia de montagem em superfície (SMT - *Surface Mount Technology*), a manufatura contratada passou a ter um grande crescimento.

A manufatura contratada eletrônica está inserida em um mercado caracterizado por um cenário de grande variabilidade de demanda e competitividade, produtos com ciclo de vida decrescente, além de constantes inovações tecnológicas.

Empresas de serviços de manufatura eletrônica fornecem serviços de manufatura para empresas de manufaturas de equipamentos originais, o que pode ser explicado pela necessidade de atendimento dos objetivos, tais como os citados, a seguir:

- flexibilidade e confiabilidade no fornecimento de produtos acabados;
- redução dos custos de produção;
- aumento de participação no mercado;
- respostas rápidas ante a introdução de novos produtos, oscilações no mercado e mudanças tecnológicas;
- capacidade instalada e tecnologia compatível com a produção.

As empresas de serviço de manufatura eletrônica (EMS) suprem a demanda do mercado, através da oferta de produtos e serviços como testes, montagem do produto final e embalagem. A variabilidade da demanda do mercado da indústria eletrônica impõe a necessidade de flexibilização por parte da empresa de serviço de manufatura eletrônica no tocante a sua produção e entrega e ao avanço tecnológico que são cruciais para a competitividade.

KUNG e CHANGCHIT (1991) afirmam que a manufatura de placas de circuito impresso (PCI) apresenta grande complexidade de componentes, de processo e variedade de *mix*, que representam as causas da maior parte das flutuações de tempos de processamento em linhas de montagem.

De acordo com KUNG e CHANGCHIT (1991), a complexidade dos vários tipos de placas de circuito impresso produzidas em uma linha de montagem associada à complexidade de processos é causa de alterações nos tempos de processamento e desbalanceamento de linhas produtivas. A complexidade de processo pode ser explicada pelas várias operações incluindo mecânica e química que são utilizadas para montagem de PCI. A complexidade de componentes e placas refere-se à estrutura dos mesmos e a variedade de *mix* de produtos concerne à produção de grande número de tipos de PCI demandados por OEM's.

KUNG e CHANGCHIT (1991) afirmam que, na indústria eletrônica altamente competitiva dos dias atuais, empresas devem ser capazes de se adaptar a variabilidade da demanda. Uma resposta rápida para mudanças tecnológicas, de projeto e flutuações de demanda, segundo os autores, se faz necessária diante desse quadro de competitividade. Essas mudanças podem ser traduzidas em termos de qualidade, entrega, custo e flexibilidade de acordo com as funções de produção de uma empresa.

Com o objetivo de atender rapidamente ao mercado, visto que os produtos possuem data definida de entrega, pode ocorrer parada de produção de itens em processo, alocação ineficiente de funcionários em postos de trabalho e até mesmo criação ou extinção de linhas de montagem. Isso evidencia o desbalanceamento nas estações de trabalho e a necessidade de um planejamento eficaz da configuração das linhas produtivas. Sendo assim, as seguintes perguntas podem ser formuladas para o presente estudo:

- Quais elementos evidenciam a influência do mercado sobre a produção na manufatura eletrônica?
- Quais são as causas para o desbalanceamento das linhas de produção de uma manufatura eletrônica?
- Quais variáveis presentes em linhas produtivas interferem na disposição e produtividade das estações de trabalho e contribuem para o desbalanceamento da linha produtiva?
- Quais técnicas de apoio à decisão podem ser utilizadas para o balanceamento de linhas de produção?
- Como configurar eficientemente as linhas produtivas de uma empresa de EMS de modo a promover a solução do problema de balanceamento?

A pesquisa e desenvolvimento de técnicas e modelos computacionais são imprescindíveis no auxílio à tomada de decisão no que se refere ao planejamento e balanceamento das linhas produtivas, ao atendimento rápido à variabilidade da demanda e às alterações tecnológicas de processos, ao projeto de uma nova linha, à mudança de *mix* de produtos e à maximização da utilização de recursos disponíveis.

Nessa dissertação, a metodologia de pesquisa utilizada, para obtenção de respostas e busca de evidências de modo que fossem alcançados os objetivos, foi o desenvolvimento de um estudo de caso com o respaldo e a aplicação de uma técnica de apoio a decisão: simulação computacional.

Além disso, para compreensão do tema, do problema e para o alcance de respostas às perguntas, foi executada revisão de literatura em livros, periódicos, sites eletrônicos e outros meios acadêmicos.

1.2 Objetivos do estudo

O *objetivo geral* do presente estudo é estudar e desenvolver um modelo de apoio à tomada de decisão para solução do problema de balanceamento de linha de montagem, em uma empresa contratada de produtos eletrônicos, através da simulação. Essa solução pode ser obtida pela análise dos resultados obtidos pela simulação a partir da geração de um modelo do sistema real. O significado do termo configuração da linha de montagem, na presente dissertação, é a estrutura e o ambiente de funcionamento com a qual a linha de montagem atende a demanda de produtos.

Assim, dados referentes à linha de montagem como tipo e número de estações de trabalho, capacidade de atendimento de funcionários e equipamentos (recursos), tempos de processamento de placas, de chegada das placas e componentes, bem como informações de ordens de produção (por exemplo, tamanho do lote a ser produzido, rotas de produção), regras de decisão para montagem dos produtos, representam alguns dos elementos que compõem a configuração da linha de montagem. Esses elementos representam entradas para o modelo de simulação. Este modelo será o ponto de partida para construção dos cenários.

Os cenários são criados através de alterações no modelo, representando, assim, configurações alternativas à do modelo do sistema. Assim sendo, os cenários, no caso de estudo em questão, representam as diferentes configurações da linha de montagem. Com vistas à concretização do atendimento do objetivo geral do presente trabalho, foram considerados os seguintes objetivos específicos:

1.2.1 Objetivos específicos

1. Revisão de literatura com o objetivo de aprofundar os conhecimentos sobre o estado da arte concernente ao problema de balanceamento de linha e seus métodos de solução e à simulação computacional.
2. Identificar os principais métodos quantitativos de solução do problema de balanceamento de linha.
3. Analisar as principais características das linhas de montagem e de placas de circuito impresso.
4. Levantar as principais causas do problema de balanceamento de linha de montagem relatadas na literatura.
5. Levantar as principais causas do problema de balanceamento de linha de montagem através da realização de um estudo de caso em uma empresa de manufatura eletrônica.
6. Construir um diagrama espinha de peixe com as principais causas do problema de balanceamento de linha relatadas através do estudo de caso.

1.3 Hipótese do estudo

MARCONI e LAKATOS (2003) definem hipótese como “uma suposta, provável e provisória resposta a um problema, cuja adequação será verificada através da pesquisa”.

A hipótese construída para o presente estudo encontra-se descrita a seguir.

Hipótese

A simulação computacional pode ser utilizada como ferramenta de apoio à decisão para determinação das melhores configurações de produção em uma EMS, promovendo uma solução eficiente do problema de balanceamento de linha de montagem.

1.4 Relevância da pesquisa

A natureza complexa das linhas de montagem de placas de circuito impresso dificulta o seu controle, a sua programação diária e a alocação da mão de obra necessária para executar o trabalho de montagem.

Essa dificuldade, por sua vez, leva empresas a buscarem técnicas de análise de diferentes alternativas de funcionamento da produção, que possibilitem prever seu comportamento sob diversas condições, visando obter melhores soluções em termos de configuração da linha de montagem com atendimento eficiente da demanda dentro no prazo determinado.

Surge, também, a análise estratégica e financeira de incrementar o *mix* de produção, aumentar sua carteira de clientes ou investir em uma nova linha e/ou um novo equipamento.

Esses fatores podem conduzir à ocorrência do problema de balanceamento de linha de montagem, caso não se encontre uma configuração adequada e flexível da linha diante do cenário de variabilidade imposta pelo mercado de produtos eletrônicos.

O presente trabalho contempla a utilização da simulação como sistema de suporte a tomada de decisão, com o intuito de balancear eficientemente as linhas produtivas de uma EMS através do ajuste de capacidade de produção às necessidades demandadas pelo mercado com maior rapidez e eficiência, de utilização adequada da linha e com flexibilidade, através da criação de vários cenários diante de um contexto de produção complexo e variável.

1.5 Metodologia da pesquisa

A metodologia de estudo de caso é útil na busca de resposta a perguntas “como” e “por quê?” em uma pesquisa. YIN (2001) afirma que “o estudo de caso é a estratégia a ser utilizada ao se examinarem acontecimentos contemporâneos”.

Para VOSS et al. (2002), a pesquisa de caso é importante não só pela oportunidade de desenvolvimento de pesquisadores e da investigação de questões como e por quê, mas também porque favorece o desenvolvimento de novas teorias e idéias que podem colaborar no teste e refinamento da teoria.

A metodologia de estudo de caso foi utilizada pela necessidade da análise específica de uma linha de montagem de placas de circuito impresso sem a interferência no ambiente analisado, envolvendo a descrição e compreensão de fatos existentes a partir dos seguintes instrumentos de coleta de dados: observação, questionário e entrevista estruturada. Com isso, foi possível a obtenção de subsídios para a modelagem do sistema observado.

Deste modo, a metodologia de pesquisa será qualitativa e aplicada por buscar evidências do assunto apresentado através de um estudo de caso real; exploratória por buscar aprofundamento de conhecimento no que se refere ao tema balanceamento de linha e seus métodos de solução e quantitativa, por se pautar na simulação computacional para obtenção de respostas às questões da pesquisa.

Os passos, a seguir, foram utilizados para o delineamento da metodologia proposta para desenvolvimento da dissertação:

- Seleção do assunto a ser abordado.
- Definição do problema a ser analisado.
- Determinação do objetivo e das perguntas e hipóteses da pesquisa.

- Levantamento das causas do problema através da literatura e do estudo de caso realizado.
- Construção de um diagrama espinha de peixe para relatar e agregar as causas do problema relatado, verificando a importância de cada um destas no contexto da empresa analisada.
- Aplicação da ferramenta de apoio à decisão com vistas à solução do problema pertinente ao estudo de caso e análise dos resultados encontrados.

A pesquisa bibliográfica foi utilizada como ferramenta imprescindível na busca de respostas às perguntas do estudo. Sob a ótica do estudo proposto, tendo em vista tema, hipóteses e objetivos, foram identificadas as variáveis a serem analisadas no processo produtivo, estando estas relacionadas ao processo produtivo e ao mercado de serviços eletrônicos.

Assim, o estudo de caso foi realizado através das etapas relacionadas a seguir. Primeiramente, foram feitas visitas à empresa, posteriormente foi construído um diagrama espinha de peixe para identificação do problema a ser pesquisado mediante observações e entrevistas estruturadas. Assim, as causas do problema puderam ser identificadas e dados relevantes referentes ao mesmo, puderam ser coletados. A partir dos resultados e dados obtidos com o estudo de caso e a revisão de literatura, um modelo de simulação computacional foi construído. A partir dos resultados do modelo, análises de cenários foram realizadas com vistas à obtenção de sugestões para melhoria do desempenho da linha de produção. O estudo de caso foi utilizado com a finalidade de fundamentar as hipóteses, atingir os objetivos e responder às perguntas da pesquisa e como forma de validação da dissertação.

Por fim, a partir da execução da revisão de literatura, da realização do estudo de caso, da simulação computacional, os resultados foram analisados e registrados. A figura 1.1 apresenta a metodologia de pesquisa utilizada na presente dissertação.

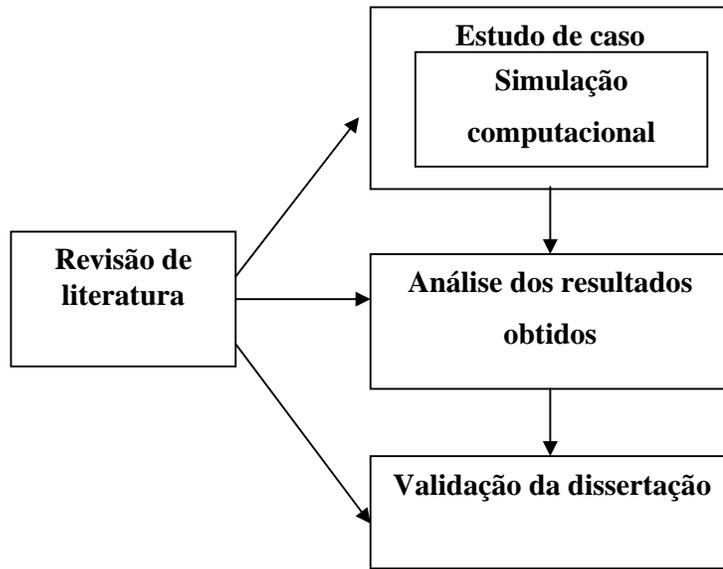


Figura 1.1 Apresentação da metodologia de pesquisa utilizada

1.6 Delimitação da pesquisa

A pesquisa descrita apresentou delimitações estruturais, estando as mesmas descritas a seguir:

- Excepcionalmente, por questões de delineamento do escopo do presente estudo, somente as seguintes causas do problema de balanceamento de linha listadas a partir do diagrama espinha de peixe foram estudadas através da construção de cenários: alocação da mão de obra, variabilidade de tempos de montagem, complexidade de produtos e de processos, elevado índice de quebra de equipamentos, variabilidade da demanda e necessidade de entrega de produtos no prazo.
- Cenários relacionados com habilidade de funcionários e compartilhamento de recursos da linha de montagem entre clientes não foram modelados.

- A falta de dados históricos confiáveis e em número adequado não permitiu uma análise mais aprofundada do sistema modelado, gerando simplificações do processo produtivo na modelagem e causando redução na quantidade de cenários modelados. Na chegada e separação de pedidos, por exemplo, distribuições empíricas foram utilizadas com o intuito de reproduzir o sistema real de maneira mais adequada, dada a escassez de dados referentes a intervalo entre chegadas de pedidos e entidades por chegada.

1.7 Estrutura da pesquisa

No presente capítulo, é abordada a contextualização do problema, além dos objetivos, hipótese, metodologia e delimitação da pesquisa. O capítulo 2 apresenta uma revisão teórica acerca do problema de balanceamento de linha e de seus métodos de solução presentes na literatura. O capítulo 3 enfoca a teoria concernente à simulação computacional, bem como sua aplicação em ambientes produtivos.

O capítulo 4 apresenta um estudo de caso, em uma linha de montagem, utilizado para estudo do problema com maior profundidade e observação dos resultados da aplicação da simulação computacional para solução do problema de balanceamento de linha e como ferramenta de apoio à tomada de decisão. O capítulo 5 encerra a pesquisa através das conclusões extraídas da revisão de literatura e do estudo de caso, trazendo, ainda, recomendações e sugestões para os trabalhos futuros. O capítulo 6 apresenta as referências bibliográficas utilizadas na presente dissertação.

2 PROBLEMA DE BALANCEAMENTO DE LINHA DE MONTAGEM

Este capítulo tem como objetivo a discussão de conceitos e aspectos concernentes a balanceamento de linha de montagem, bem como a explicitação de pesquisas e aplicações relacionadas a esse assunto.

Neste capítulo, uma conceituação referente à montagem e processo de montagem, apresenta-se como de grande relevância, anteriormente à discussão sobre balanceamento de linha de montagem. De acordo com SÜER (1998), o processo de montagem envolve “submontagens, partes manufaturadas e componentes dispostos juntos para obtenção de produtos finais”. FLESZAR E HINDI (2003) afirmam que linha de montagem é um conjunto de estações de trabalho atreladas a um dispositivo de transporte. Em uma linha de montagem tradicional, conforme destacado na figura 2.1, estações de trabalho são consecutivamente organizadas em uma linha em série (GONÇALVES e ALMEIDA; 2002).

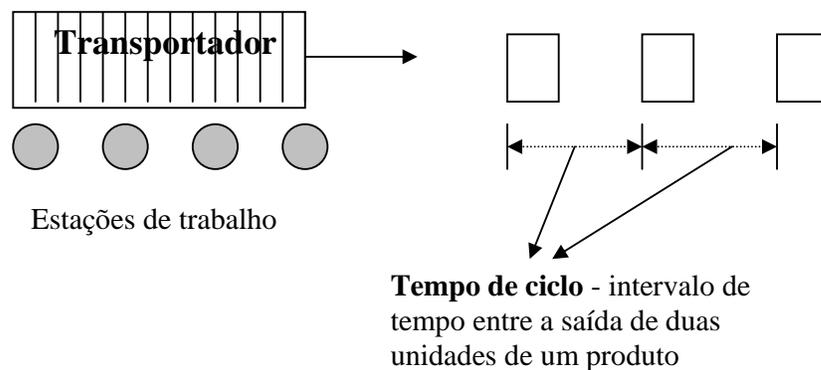


Figura 2.1- Exemplo de uma linha de montagem

Fonte: GONÇALVES e ALMEIDA (2002)

PONNAMBALAM et al. (1999) afirmam que as seguintes restrições devem ser impostas para agrupamento de elementos de trabalho:

- Existência de relações de precedência.
- O número de elementos de trabalho não deve exceder o número de estações de trabalho.
- O número mínimo de estações de trabalho deve ser 1.
- O tempo de ciclo deve ser maior que ou igual ao tempo de qualquer elemento de trabalho e não deve ser excedido pelo tempo de cada uma das estações.

De acordo com a literatura, autores como BAYBARS (1986), BOUTEVIN et al. (2003) e BECKER e SCHOLL (2004) consideram a seguinte classificação de linhas de montagem (figura 2.2) baseados na consideração dos tipos de produtos a serem manufaturados:

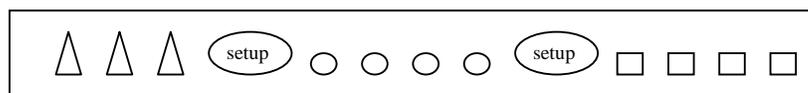
- Linha de montagem de produto único: onde ocorre a fabricação de um único tipo de produto.
- Linha de montagem de produto misto: onde unidades de modelos variados são produzidas.
- Linha de montagem de multimodelos: onde ocorre a montagem de uma seqüência de lotes, compostos com unidades de um modelo único ou de modelos similares com operações de preparação intermediárias. Nesse caso, o problema de balanceamento de linha de montagem está atrelado a um problema de sequenciamento e de dimensionamento de lotes.



a. Linha de modelo único



b. Linha de modelo misto



c. Linha de multimodelo

Figura 2.2- Representação de linhas de montagem

Fonte: BECKER e SCHOLL (2004)

A modelagem de linhas de montagem tem sido pesquisada há décadas. SALVESON (1955) foi o primeiro a discutir o problema de balanceamento de linha de montagem de forma analítica na literatura. O autor o descreveu como um conjunto de restrições de precedência entre tarefas. Alguns autores definiram o balanceamento de linha conforme se segue:

“O balanceamento de linha é o processo de alocação de tarefas a estações de trabalho de modo que as mesmas apresentem a mesma quantidade de trabalho com minimização do número de estações para uma dada capacidade (THOMOPOULOS, 1967)”.

“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 (BETTS e MAHMOUD, 1989)”.

O problema de balanceamento de linha de montagem pode ser descrito, de forma generalizada, conforme a seguir. Os elementos de trabalho são movidos de uma estação para outra através de um mecanismo de transporte. Dada uma quantidade total de trabalho, um conjunto de operações elementares (tarefas) deve ser realizado em cada estação de trabalho. Essas tarefas possuem restrições tecnológicas que se traduzem em restrições de precedência que determinam sua execução e sequenciamento. GONÇALVES e ALMEIDA (2002) apresentaram uma representação esquemática de um diagrama de precedência que pode ser visualizada na figura 2.3.

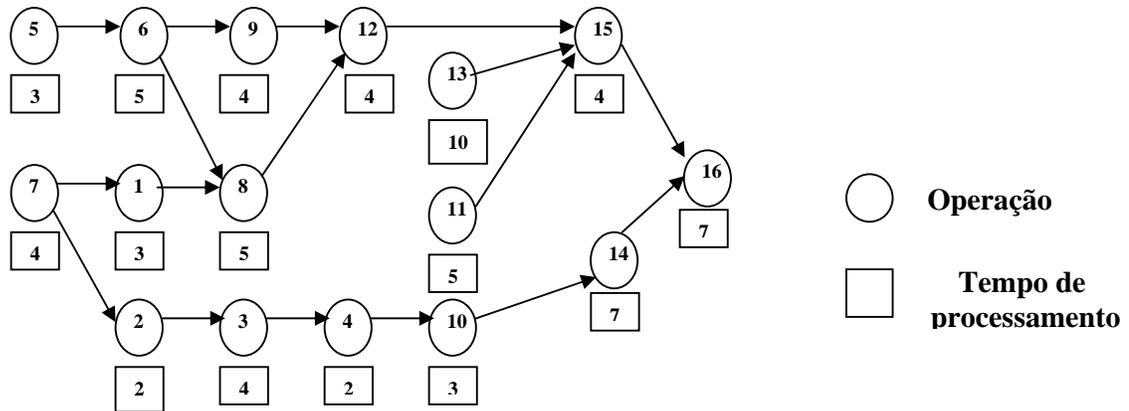


Figura. 2.3 - Diagrama de precedência

Fonte: GONÇALVES e ALMEIDA (2002)

No diagrama de precedência, estão representadas as tarefas (círculos), tempos de processamento de cada tarefa (quadrados). Além desses elementos, as relações ou restrições de precedência das tarefas apresentam-se representadas pelas setas. Pelo gráfico, pode-se perceber ainda a existência de tarefas antecessoras e sucessoras. Por exemplo, as tarefas 1 e 6 (antecessoras) devem ser iniciadas antes que a tarefa 8 (sucessora) comece a ser executada. Outra observação que pode ser feita a partir do gráfico é a existência de tarefas paralelas. A tarefa 7, por exemplo, pode ser executada em paralelo com a tarefa 5, uma vez que essas tarefas não têm relação de precedência.

A instalação de uma linha de montagem é uma decisão de longo prazo e usualmente requer grande investimento. Sendo assim, objetivos, recursos e restrições tecnológicas de uma organização devem ser levados em consideração para um eficiente balanceamento de linhas de montagem, tais como: existência de disponibilidade de máquinas e mão de obra para execução das tarefas, compartilhamento de recursos, existência de paralelismo de estações e tarefas.

REKIEK et al. (2002) relatou o estado da arte de métodos de otimização para projeto de linha de montagem. Segundo os autores, o projeto de um sistema de manufatura é baseado em dados do produto e restrições tecnológicas relacionadas a máquinas existentes e equipamentos de manufatura. Ele compreende outros problemas como balanceamento e dimensionamento de estações de trabalho, layout, entre outros.

Os autores consideram o problema como de grande importância industrial por seu principal objetivo ser o aumento de eficiência da linha pela maximização da relação entre a taxa de saída dos produtos e custos requeridos, sendo a montagem uma atividade estratégica central. Os autores destacaram trabalhos concernentes a projetos de linha de montagem, principalmente, no balanceamento de linha e recursos de planejamento.

De acordo com SON et al. (2001), o balanceamento de linha tem sido uma importante técnica para os sistemas de manufatura, pois um sistema balanceado pode prover uma máxima utilização dos recursos disponíveis.

O problema de balanceamento de linha de montagem (*assembly balancing problem* - ABLP) pode ser classificado como problema de linha de montagem simples ou generalizado conforme a classificação a seguir. BAYBARS (1986); SCHOLL e BECKER (2004) citam as características principais que delineiam o problema de balanceamento de linha de montagem:

- 1 montagem de um produto homogêneo;
- 2 processo de produção definido;
- 3 cadência da linha com limitação ao tempo de ciclo c ;
- 4 tempos de operação determinísticos t_j ;
- 5 restrições de designação baseadas na precedência das tarefas;
- 6 layout em linha com um número m de estações;
- 7 todas as estações são igualmente equipadas com recursos (máquinas e funcionários);
- 8 maximização da eficiência da linha $t_{\text{soma}}/(m.c)$ com tempo total da tarefa igual a

$$t_{\text{soma}} = \sum_{j=1}^n t_j$$

SÜER (1998) afirma que a formulação do problema de balanceamento de linha normalmente pode ser obtida através de duas possibilidades: “encontrar o número mínimo de estações para um dado tempo de ciclo ou encontrar o tempo de ciclo para um dado número de estações”.

Quando há apenas um modelo de produto sendo montado em uma linha, o problema resultante é chamado de problema de balanceamento de linha de montagem simples (SALBP). A solução abordada para esse problema tem duas variações típicas. O problema de atribuir operações para estações é formulado com o objetivo de minimizar o número de estações utilizadas para encontrar um determinado tempo de ciclo (SALBP-1), ou com o objetivo de minimizar o tempo de ciclo dado um número de estações previamente determinado (SALBP-2). Em ambos os casos, as relações de precedência são consideradas restrições do problema (SÜER, 1998; SCHOLL e BECKER, 2004).

De acordo com BECKER e SCHOLL (2004), o SALBP-F consiste em estabelecer se existe ou não uma possibilidade viável de balanceamento dada uma combinação de número de estações (m) e tempo de ciclo (c). O SALBP-E considera a minimização simultânea de número de estações e de tempo de ciclo. As versões do problema de balanceamento de linha simples se encontram no quadro 2.1, a seguir:

Quadro 2.1 - Versões do SABL

	Tempo de ciclo c	
	Dado	Minimizar
Número m de estações		
Dado	SALBP-F	SALBP-2
Minimizar	SALBP-1	SALBP-E

Fonte: BECKER e SCHOLL (2004)

O problema de linha de montagem generalizado (GALBP) considera, ao mesmo tempo, restrições comuns e outras menos usuais, tais como: agrupamento de operações (operações designadas a uma mesma estação), incompatibilidade (operações designadas a estações diferentes), paralelismo de estações (operações realizadas em várias estações), entre outras. Segundo BECKER e SCHOLL (2004), as pesquisas feitas para balanceamento de linhas de montagem são tradicionalmente focadas em problemas simples de balanceamento de linha (SALBP), mas recentemente muitos trabalhos de pesquisas têm sido feitos para descrever e resolver problemas de balanceamento de linha de montagem generalizado (GALBP).

CHAKRAVARTY (1998) afirma que os efeitos do aprendizado da tarefa têm sido desconsiderados em grande parte dos estudos referentes a balanceamento de linha. Devido ao caráter repetitivo das tarefas de montagem, os tempos de tarefa podem ser reduzidos com repetições. O autor buscou mostrar como o aprendizado de cada tarefa pode ser incorporado no projeto inicial de estações de trabalho.

Uma importante característica que define as diferentes versões de problema de balanceamento de linha de montagem é a variação dos tempos de tarefa. A variação dos tempos da tarefa em estações de trabalho automatizadas é pequena, assim, os tempos de tarefa podem ser considerados determinísticos. Tempos de tarefa estocásticos podem ocorrer no caso de linha de montagem manual, onde situações como motivação, problemas emocionais e habilidade influenciam a produtividade e o trabalho (REKIEK et al, 2002; BECKER e SCHOLL, 2004).

De acordo com a literatura, os seguintes objetivos são retratados quando da solução do problema de balanceamento de linha (GHOSH e GAGNON, 1989; BOUTEVIN et al., 2003):

- minimização do número de estações com tempo de ciclo dado;
- minimização do tempo de ciclo com um número de estações dado;
- minimização do atraso;
- minimização do comprimento da linha;
- minimização da data de saída do último produto;

- minimização da ocorrência de uma ou mais estações ultrapassarem o tempo de ciclo;
- minimização do custo de trabalho por unidade;
- maximização do lucro.

BECKER e SCHOLL (2004) relataram os principais objetivos para o balanceamento de linha de montagem encontrados na literatura como modelos orientados a custos e lucro, seleção de equipamentos e alternativas de processo.

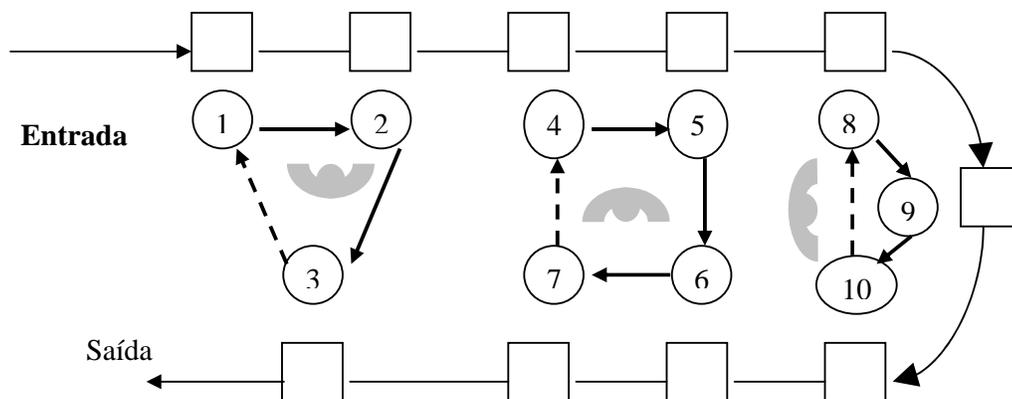


Figura 2.4 - *Layout* de linha em forma de U simples

Fonte: MILTENBURG e WIJNGAARD (1994)

MILTENBURG e WIJNGAARD (1994) introduziram na literatura o problema de balanceamento de linha com linha em forma de U (*U-line Line Balancing Problem*). Este se apresenta como de grande complexidade, sendo NP árduo. De acordo com os autores, com a utilização dos princípios de *Just in Time* (JIT), muitas linhas de produção têm sido projetadas em forma de U. Os autores exemplificaram o *layout* de linha em forma de U simples conforme a figura 2.4 disposta acima.

MILTENBURG e WIJNGAARD (1994) utilizaram o método de ranking posicional de pesos e um procedimento de programação dinâmica existente na literatura para obtenção de balanceamento de linha em forma de U.

A complexidade do problema em forma de U é maior que a do problema tradicional de balanceamento de linha por que as tarefas podem se agrupadas em estações para frente, para trás ou em ambas as direções pela rede de precedência. A figuras 2.5 apresenta um exemplo de linha de montagem tradicional.

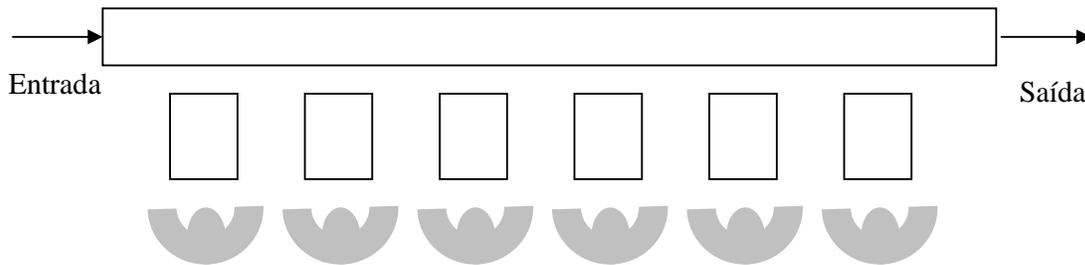


Figura 2.5- Layout de linha em série

2.1 Métodos de solução do problema de balanceamento de linha

GONÇALVES e ALMEIDA (2002) afirmam que SABL-1 e SABL-2 são problemas NP árduo. SABL-1 pode ser reduzido ao problema *bin packing* (empacotamento) e o SABL-2 ao problema de programação de máquinas idênticas com o objetivo de minimizar o *makespan* desde que restrições de precedência sejam desconsideradas.

REKIEK et al. (2002) relata que problema de balanceamento de linha de montagem simples pode ser reduzido ao problema de *bin packing*, onde o objetivo é acondicionar, enquanto haja possibilidade, mercadorias de vários tamanhos dentro de containeres de uma dada capacidade. Assumindo que a duração das tarefas a serem realizadas é fixa, elas podem ser tomadas para a dimensão única das mercadorias. Então, considerando o tempo de ciclo como a capacidade dos pacotes, o problema transforma-se em como distribuir operações entre estações de tal modo que nenhum tempo de processamento em estações se sobreponha ao tempo de ciclo e um número mínimo de estações seja utilizado.

DRISCOLL e THILAKAWARDANA (2001) discutem sobre a dificuldade e qualidade da solução do problema de balanceamento de linha. Os autores enumeram e definem as medidas de dificuldade no problema de balanceamento de linha.

De acordo com DRISCOLL e THILAKAWARDANA (2001), a solução do problema de balanceamento de linha por enumeração total é inviável e a incorporação de fatores como operador estocástico e comportamento de programação da produção trazem dificuldades para a obtenção de soluções ótimas. Algumas medidas de dificuldade do problema de balanceamento de linha, presentes na literatura, referem-se ao número de relações de precedência existentes em um grafo de precedência, ao número médio de tarefas na estação e a variação dos tempos das tarefas tendo em vista o tempo de ciclo. As medidas de dificuldade são calculadas e agrupadas em índice de precedência e índice de tempo de tarefa. Os autores relatam que a ordem de precedência tem sido considerada a maior influência com relação à dificuldade ou facilidade no balanceamento de linha.

Duas medidas de qualidade de solução presentes na literatura fazem referência à ineficiência da linha e a interpretação de valores indexados para resultados individuais (índice de suavidade). Os autores compararam as novas abordagens com medidas de análise de problema anteriores. As novas medidas de avaliação, eficiência de linha e eficiência de balanceamento facilitam a compreensão e a produção de resultados significantes. Eficiência de balanceamento refere-se à distribuição de trabalho com satisfação pessoal combinada com aumento das possibilidades de maiores taxas de saída de produtos. As medidas de atraso de balanceamento e índice de suavidade demonstraram soluções com resultados desfavoráveis. Um pacote de balanceamento de linha denominado *A~Line* foi utilizado para os testes.

BOUTEVIN et al. (2003) abordaram o problema de balanceamento de linha retratando as restrições e métodos de solução mais discutidos na literatura. Através de diferentes métodos de otimização como modelagem matemática, heurísticas e algoritmos estocásticos procuraram resolver o problema de balanceamento de linha do tipo modelo misto.

Diferentes métodos empregando algoritmos exatos (B&B, programação inteira), metaheurísticas e simulação, têm sido utilizados para solução do problema de balanceamento. Métodos tais como B&B têm sido utilizados para solução do problema de balanceamento de linha de montagem. Grande parte dos trabalhos realizados tem buscado a solução do problema de balanceamento de linha através de métodos exatos, como o B&B (*branch and bound*). Esses métodos têm a desvantagem de alto custo computacional.

REKIEK et al. (2002) afirmam que a maior parte dos métodos exatos utilizados para solução do problema de balanceamento de linha é baseada em algoritmo *branch and bound*. Para os autores, algoritmos acadêmicos não são suficientemente utilizados na indústria. O motivo disso é que apesar de sua efetividade e facilidade de uso, utilizam poucos dados e apresentam perdas substanciais de informação, resolvendo problemas fictícios em detrimento de problemas industriais.

2.1.1 Métodos heurísticos

O procedimento heurístico implementado por HOFFMANN (1963) foi feito com base em uma matriz de precedência binária. O procedimento se inicia a partir da primeira estação de trabalho, consecutivamente designando para cada estação de trabalho o subconjunto viável que minimiza o tempo ocioso de cada estação.

BETTS e MAHMOUD (1989) afirmam que o método de Hoffmann não assegura a obtenção de solução ótima apesar de ser um bom método para geração de soluções viáveis em estações de trabalho particulares.

GONÇALVES e ALMEIDA (2002) apresentaram um algoritmo híbrido genético para o problema de balanceamento de linha de montagem (simples), SABL-1. A nova abordagem é composta de uma regra heurística combinada a um procedimento de busca local e um algoritmo genético. A designação de operações às estações de trabalho é baseada em regra de prioridade definidas por cromossomos e uma busca local foi usada pra melhorar a solução.

A aproximação foi testada em um conjunto de problemas conhecidos na literatura e comparada com trabalhos anteriores. Dentre os resultados apresentados, o novo algoritmo obteve soluções tão boas quanto a apresentada pelo algoritmo EUREKA de Hoffmann (1992) para as instâncias analisadas da literatura.

GONÇALVES e ALMEIDA (2002) apresentaram um algoritmo híbrido genético para o problema de linha de montagem de produto único, SABL P-1. A designação de operações às estações de trabalho é baseada em regras de prioridade definidas por cromossomos, sendo uma busca local usada pra melhorar a solução. Os resultados computacionais validam a efetividade do algoritmo.

WEE e MAGAZINE (1982) discutiram a solução do problema de balanceamento de linha por meio de heurísticas *bin packing* generalizadas. FLESZAR e HINDI (2003) apresentaram um novo algoritmo heurístico e novas técnicas de redução para o SABL P1. O novo algoritmo heurístico fundamenta-se na heurística de Hoffmann, obtendo a melhor dentre as soluções encontradas em ambos os lados da rede de precedência. O algoritmo foi testado individualmente e combinado com as técnicas de redução, a partir de um conjunto de instâncias de problemas encontrada na literatura. Nos testes, os aspectos referentes à qualidade de solução, verificação de otimalidade e eficiência computacional foram objeto de análise.

RACHAMADUGU (1991) estudou o problema de balanceamento de linha com a adição de restrição relacionada à tarefa, a incompatibilidade da tarefa. Nesta, pares de tarefas não podem ser designados à mesma estação por fatores como segurança, qualidade, considerações tecnológicas. Em alguns casos, pode ocorrer a designação forçada, situação na qual duas ou mais tarefas são forçadas para designação a uma mesma estação devido a considerações como compartilhamento de recursos. O autor afirma que a adição de restrições adicionais como as relacionadas à tarefa tornam a solução do problema mais difícil de se resolver otimamente. O autor propôs um procedimento de enumeração para solução do problema de balanceamento de maneira ótima através da atualização de prioridades das tarefas.

2.1.2 Métodos exatos

BETTS e MAHMOUD (1989) propuseram uma técnica baseada na matriz de precedência de Hoffman (1963) e no método B&B (*branch and bound*) descrito por JOHNSON (1981) para solução do problema de balanceamento de linha. O objetivo dos autores foi melhorar a matriz para obtenção de uma solução ótima através do desenvolvimento de um algoritmo B&B, onde limites são calculados em nós de espera com utilização da matriz de precedência.

DECKRO (1989) desenvolveu um modelo que considera ao mesmo tempo a minimização do tempo de ciclo e o número de estações de trabalho através de um modelo de formulação 0-1, o que o difere de grande parte de trabalhos realizados. Através do método proposto, pôde-se observar melhoria na solução do problema de balanceamento de linha se comparado a modelos anteriores.

SÜER (1998) considera variações do problema clássico de balanceamento de linha de montagem, pois acrescenta a análise do número de operadores que devem ser designados para cada estação e a determinação da configuração das linhas de montagem, além de considerar a existência de um número de operadores maior que o número de estações.

Para tanto, o autor propõe uma metodologia trifásica (balanceamento de linha, determinação de estações de trabalho paralelas e determinação de linhas paralelas) com objetivo de minimizar a força de trabalho total para uma linha de montagem de produto único. A modelagem proposta pode apresentar-se como de grande utilidade para casos onde haja necessidade de resposta rápida a variações de demanda. A modelagem trifásica constitui-se das fases descritas a seguir:

- 1) **Fase de balanceamento de linha:** realizada através da variação de número de operações em cada estação.

2) *Fase de estações paralelas*: caracterizada pela determinação do número de operadores que devem ser designadas em cada estação. Diferentes alternativas são geradas devido à consideração de diferentes configurações. A alternativa com taxa de montagem máxima obtida através desta primeira função objetivo é utilizada na próxima fase.

Função objetivo:

$$\text{Max } Z = R \quad (1)$$

Sujeito a :

$$(X_i * \frac{1}{ST_i}) - R > 0 \quad i=1,2,\dots,s \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^s X_i < M \quad (3)$$

X_i número inteiro positivo para todo i ;

R número positivo;

onde

R taxa de montagem;

X_i número de operadores designados para a estação i ;

ST_i tempo da estação i ;

M número total de operadores disponíveis para montagem ;

s número de estações.

A equação (1) refere-se ao objetivo de maximização da taxa de montagem. A equação (2) garante a existência de trabalhadores em quantidade suficiente para atender a taxa de montagem. A equação (3) garante que o número total de operadores disponíveis para a montagem não deve ser excedido.

3) *Fase de linhas paralelas*

A modelagem proposta nesta fase da metodologia trifásica tem como objetivo a minimização do número total de operadores através da determinação do número e configurações de linhas de montagem, estando descrita a seguir.

Função objetivo:

$$\text{Min } Z = \sum_{j=1}^k C_j Y_j \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^k R_j Y_j \geq D \quad (5)$$

Y_j , inteiro positivo

onde

R_j taxa de montagem para alternativa j ;

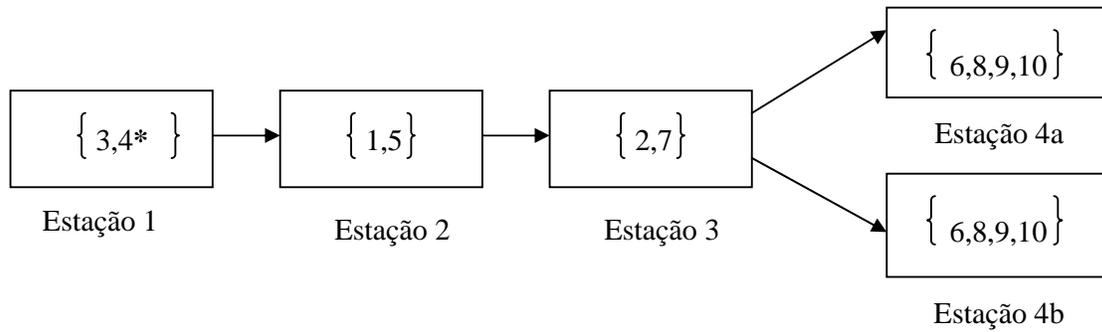
Y_j número de linhas da alternativa j ;

C_j número de operadores necessários para a alternativa j ;

k número de alternativas ;

D demanda para o produto.

A equação (4) refere-se ao objetivo de minimização do total de operadores para satisfazer a demanda e a equação (5) garante a existência de linhas em número suficiente para atendimento da demanda.



* Os valores indicados entre chaves indicam as tarefas designadas a cada estação de trabalho.

Figura 2.6 - Estações paralelas

Fonte: BECKER e SCHOLL(2004)

BECKER e SCHOLL (2004) afirmaram que a existência de linhas e estações paralelas deve ser considerada em uma linha de montagem, uma vez que podem prover flexibilidade e melhoria no balanceamento de linha. Os autores exemplificaram um caso de estações paralelas conforme figura 2.6. BECKER e SCHOLL (2004) relataram os principais objetivos para o balanceamento de linha de montagem encontrados na literatura, tais como modelos orientados a custos e lucro, seleção de equipamentos e alternativas de processo.

3 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

A maioria dos sistemas reais apresenta grande complexidade que dificulta sua análise analiticamente, podendo ser modelados pela simulação. Na literatura, vários estudiosos têm discutido, nos últimos anos, temas concernentes à simulação. Vários autores definiram simulação, algumas dos quais estão citados a seguir.

LAW e KELTON (1991) afirmam que a

“simulação é uma técnica computacional usada para imitar, ou simular operações ou vários tipos de processos do mundo real”.

Para BANKS (1999),

“a simulação envolve a geração e a observação de uma história artificial do sistema para realizar inferências com relação às características operacionais do sistema real que é representado”.

De acordo com GOGG e MOTT (1993), a simulação representa a arte e ciência de criar uma representação de um processo ou sistema para o propósito de experimentação de um processo ou avaliação.

3.1 Histórico e evolução da simulação

A história da simulação e sua evolução têm sido retratadas na literatura (NANCE, 1983; NANCE, 1993). Nesses trabalhos, o autor discutiu sobre o desenvolvimento de um modelo de simulação, acrescentando à literatura um histórico concernente à simulação. Em 1993, seu trabalho se dedicou em grande parte à história da simulação. A cronologia feita por esse autor, encontra-se resumidamente, a seguir.

O autor relatou que a história da simulação pode ser dividida em 5 períodos:

- 1955-1960: período de busca (era dos programas customizados)
- 1961-1965: advento (período de emergência de linguagens de programação de simulação).
- 1966-1970: período de aperfeiçoamento (segunda geração de linguagens de programação de simulação)
- 1971-1978: período de expansão
- 1979-1986: período de consolidação e de regeneração (era atual).

No período de 1955 a 1960, a pesquisa na literatura concentrou-se na descoberta de conceitos de representação do modelo e na necessidade de promover uma maior simplificação dessa representação. Nos anos 50, houve um rápido interesse na simulação, nos Estados Unidos. O ano de 1960 é considerado como o de criação do primeiro simulador, o GSP (*General Simulation Program*). A simulação era realizada por meio de programas customizados. Os softwares desenvolvidos nessa época, tais como GPSS, SIMULA, GASP são os precursores dos softwares dos dias atuais.

O período que compreende os anos de 1961 a 1965 foi marcado pela adição de características a softwares existentes e pelo aparecimento de versões interativas de outros softwares. É caracterizado pelo aparecimento das maiores linguagens de programação em uso: GPPS (Simulador e Propósito Geral - *General Purpose Simulator*), SIMULA I, SIMSCRIPT, CSL, GASP, OPS-3, DYNAMO, entre outras linguagens.

Nos anos de 1966 a 1970, conceitos anteriormente vistos como necessários para a implementação de modelos foram revistos e refinados com melhoria da representação das situações analisadas e do conhecimento de usuários. Assim, ocorreram avanços computacionais para adequação a essa realidade e a de evolução de hardware.

Entre os anos de 1971 a 1978, surge o conceito de gerador de programas de simulação com o intuito de consideração de uma definição em uma forma não executável e produção de um programa executável ou que permitisse a execução depois da realização de modificações.

Nos anos de 1979-1986, as linguagens de programação começaram a ser implementadas em microcomputadores e microprocessadores. A linguagem de simulação surgiu nesse período. De acordo com ANDERSSON e OLSSON (1998), nos anos 80, com a introdução do computador pessoal, o software de simulação tornou-se mais fácil de ser utilizado. A simulação era usada como ferramenta para decisões estratégicas e táticas. Em meados dos anos 90, houve um real crescimento da simulação por razões como facilidade de uso, computadores mais rápidos e a utilização de simuladores.

NANCE e SARGENT (2002) apresentaram as perspectivas e evolução da simulação ao longo de, aproximadamente, 50 anos. Os autores afirmam que a evolução da simulação pode ser categorizada de acordo com vários critérios, entre os quais: objetivos do estudo da simulação, representação do tempo e do estado no modelo de simulação. Cinco objetivos são relatados no estudo dos autores:

- 1 análise de sistemas onde o que se deseja é a imitação de comportamento para melhorar o desempenho do sistema;
- 2 educação e treinamento para compreensão de sistemas e a aplicação de conceitos;
- 3 aquisição e aceitação de sistema;
- 4 pesquisa relacionada à criação de um ambiente artificial;
- 5 entretenimento através do uso interativo do modelo de simulação em tempo real.

3.2 Tipos de modelos

De acordo com BANKS (1999), modelo é uma representação de um sistema real. Os modelos de simulação podem ser classificados conforme a seguir:

Modelos de simulação estáticos e modelos dinâmicos

Os modelos estáticos não são influenciados pelo elemento tempo. No modelo dinâmico, este elemento é considerado, uma vez que mudanças ocorrem com o passar do tempo.

Modelos de simulação estocásticos e determinísticos

No modelo estocástico, no mínimo alguma das entradas apresenta características randômicas, ou seja, são regidas por distribuições de probabilidade. Os modelos determinísticos se dividem em duas classes: modelo estático e dinâmico. Os modelos estocásticos, assim como os modelos determinísticos, também podem ser classificados em modelos estático e dinâmico. Um modelo determinístico é aquele no qual não é reconhecido o comportamento randômico de componentes.

Modelos de simulação contínuos e discretos

Na simulação contínua, as variáveis do sistema apresentam valores de modo contínuo ao longo do tempo. Em modelos discretos, as variáveis mudam em pontos separados no tempo.

SCHMIDT (1985) acrescenta outras análises à classificação de modelos conforme se segue. As dimensões de classificação de modelos podem ser: a maneira na qual o modelo descreve o sistema, o propósito do modelo, a descrição do comportamento de dependente do sistema do tempo, a descrição do comportamento aleatório dos elementos do sistema, a descrição de mudanças do sistema como um fenômeno discreto ou contínuo.

Considerando a maneira pela qual um modelo representa um sistema, um modelo pode ser icônico, analógico ou simbólico. A propriedade comum de modelos icônicos é a reprodução de uma característica física da entidade modelada, embora a escala do modelo possa diferir daquela da entidade física. Isso é um modelo icônico se parece com a entidade modelada, como exemplo pode-se citar a maquete. A característica comum de modelos analógicos é a substituição das propriedades físicas do sistema por uma propriedade substituta no modelo. Exemplo de modelo analógico: termômetro (a temperatura é substituída pelo peso do mercúrio no termômetro).

Modelos de simulação e modelos matemáticos são classes de modelos simbólicos. A característica comum de modelos simbólicos é a substituição de propriedades físicas do sistema por símbolos. Um modelo pode ser classificado pelo propósito para o qual é desenvolvido. Nesse contexto, o modelo pode ser descritivo ou normativo. Um modelo descritivo é aquele no qual simplesmente ocorre a descrição do comportamento do sistema modelado.

Um modelo cuja intenção é recomendar ou prescrever um curso de ação é chamado normativo. Tais modelos são referenciados como prescritivos. Um modelo que descreve o comportamento de um sistema através do tempo é dito dinâmico. Um modelo que descreve o comportamento do sistema em um único ponto de um sistema é dito estático.

Um estudo de um sistema, conforme destacado na figura 3.1, pode ser feito a partir de experimentos com o sistema atual ou através de um modelo do sistema. A realização de experimento por meio de um sistema real pode provocar interrupção do sistema, prejudicar a eficiência do sistema e aumento de custos. Além disso, nem sempre o sistema existe, impossibilitando o experimento com o mesmo. Assim, torna-se necessária a construção de modelos que representem o sistema.

Os experimentos realizados através da modelagem de um sistema podem ser modelos físicos (icônicos) ou matemáticos. A maioria dos modelos existentes é de cunho matemático, com a representação do sistema por meio de relacionamentos lógicos e quantitativos que são manipulados para verificação da reação do sistema a modificações propostas.

A partir da construção do modelo matemático, a solução pode ser encontrada de maneira analítica ou pela simulação. Quando o modelo é simples, existe a possibilidade de resolver o modelo matemático com obtenção de respostas exatas a questões de interesse.

A simulação, ao contrário, requer que haja, primeiramente, a coleta de dados, para que, em seguida, os dados sejam usados para estimar os parâmetros de saída. Realizar experimentos com um sistema real é uma tarefa complicada devido ao custo para implementação de mudanças, ou perigo potencial que pode resultar de algumas políticas testadas.

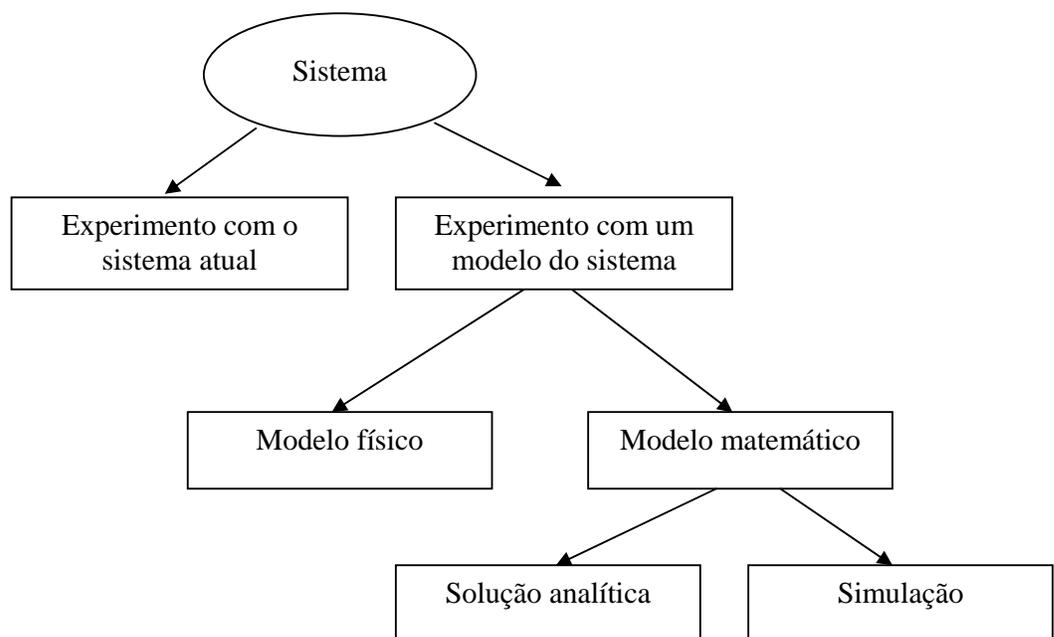


Figura 3.1- Formas de estudo de um sistema

Fonte: Law e Kelton (1991)

3.3 Simulação a eventos discretos

De acordo com NANCE (1993), a simulação computacional pode ser dividida em três 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.

A simulação contínua usa modelos envolvendo equações, freqüentemente de modelos físicos, apresentando descontinuidades, uma vez que não requerem representação explícita de estado. NANCE (1993) considera a simulação a eventos discretos como sendo *“um modelo lógico/matemático de um sistema físico que retrata mudanças de estado em pontos precisos em um tempo simulado”*.

3.3.1 Terminologia da simulação

INGALLS (2001) afirma que os componentes envolvidos em uma simulação a eventos discretos incluem entidades, atributos, recursos, atividades e eventos, filas, variáveis globais, a geração de números aleatórios, um calendário, variáveis do estado, e estatísticas.

1. Entidades: agentes de mudanças no estado da simulação que circulam no sistema. São classificadas como temporárias ou permanentes. Exemplos de entidades: peças, pedido de clientes, carros, prioridades, datas de entrega, tempo computacional requerido.

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

3. Recursos: têm o papel de transformação das entidades, tais como máquinas, operadores, esteiras, entre outros.
4. Eventos: condições que ocorrem em um ponto no tempo com mudança no estado do sistema. Eventos são gerados através da interação de entidades com atividades.
5. Atividades: períodos de tempo entre dois eventos que geralmente envolve alguma ação em uma entidade.
6. 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.
7. Variáveis globais: variáveis disponíveis para todo o modelo por todo o tempo.
8. 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.
9. Calendário: corresponde a uma lista de eventos que são programados para ocorrer no futuro.
10. Estado do sistema: inclui entidades, valores de todos seus atributos, seus relacionamentos e quaisquer outras variáveis do sistema que possam ser definidas.
11. Coletores de estatísticas: responsáveis pela coleta de estatísticas em certos estados ou valor de variáveis globais ou algumas estatísticas de desempenho baseadas em atributos de entidades.

CENTENO e CARRILLO (2001) enumeraram as capacidades e limitações da simulação. Entre as capacidades, podem ser citadas: o fornecimento de estimativas de medidas de desempenho (tempo no sistema, utilização de operador/máquina, número na fila, tempo de fila) e avaliação dos efeitos de mudanças em parâmetros operacionais do sistema (troca de entradas como taxa de chegada, taxa de atendimento). Algumas limitações citadas pelos autores estão dispostas, a seguir:

- A simulação não pode garantir a acurácia dos resultados se as entradas não possuem acurácia.
- A simulação não pode descrever características que não tenham sido explicitamente modeladas.
- A simulação não pode resolver problemas, ela somente pode fornecer informações que podem ser deduzidas dos resultados.

3.4 Procedimentos de simulação

De acordo com SHANNON (1998), um modelo de simulação é um programa computacional que representa a lógica do sistema. Em adição à lógica de movimentação da entidade pelo sistema, o programa de computador mantém a lógica do avanço de tempo e da utilização do recurso, tempo de espera nas filas, tempo no sistema e outras estatísticas desejadas.

Um modelo de simulação a eventos discretos envolve uma seqüência repetitiva de instruções similares conforme listado a seguir:

- Determinar qual o próximo tipo de evento irá ocorrer.
- Fixar uma variável de relógio de simulação igual ao tempo do próximo evento a ocorrer e atualizar quaisquer variáveis estatísticas necessárias.
- Realizar as ações associadas com o evento mais atual.
- Programar um tempo para a ocorrência do próximo tipo de evento.

A condução de projetos de simulação vem se baseando em tutoriais como os de Pidd (1994) e Seila (1995), Banks (1999). SEILA (1995) apresentou um tutorial com conceitos básicos de simulação, destacando a modelagem de simulação a eventos discretos, a utilização da simulação como ferramenta de suporte a tomada de decisão, escolha de software e considerações estatísticas para modelagem.

LAW e McCOMAS (2001) apresentaram uma abordagem de sete passos para ser utilizada em um projeto de simulação com técnicas para construção de modelos válidos e confiáveis, explicada a seguir e delineada na figura 3.2.

Passo 1- Formulação do problema. Nessa etapa, devem ser discutidos os objetivos específicos, questões a serem respondidas pelo estudo, medidas de desempenho para avaliação das diferentes alternativas, escopo do modelo, configurações a serem modeladas, tempo e recursos disponíveis para o estudo.

Passo 2- Coleta de dados e construção do modelo conceitual

Esta etapa compreende as atividades a seguir:

- Coleta de dados sobre o layout do sistema e sobre o processo produtivo.
- Coleta de dados para especificação dos parâmetros do modelo e distribuições de probabilidade.
- Elaboração de um modelo conceitual contendo informações concernentes aos dados coletados e considerações do modelo.
- Coleta dados de desempenho do sistema analisado.

Para MUSSELMAN (1994), a modelagem conceitual envolve a abstração do sistema em um modelo pelos elementos do sistema, suas características e interações de acordo com a formulação do problema. Em um modelo conceitual, primeiro deve-se compreender o ambiente a ser simulado. A partir de sua abstração, elabora-se uma lista de questões específicas que suportem os objetivos do projeto. Depois, devem ser determinadas quais medidas de desempenho são necessárias para responder a essas questões. Por fim, a partir de discussões deve-se definir o escopo do modelo e as entradas do modelo.

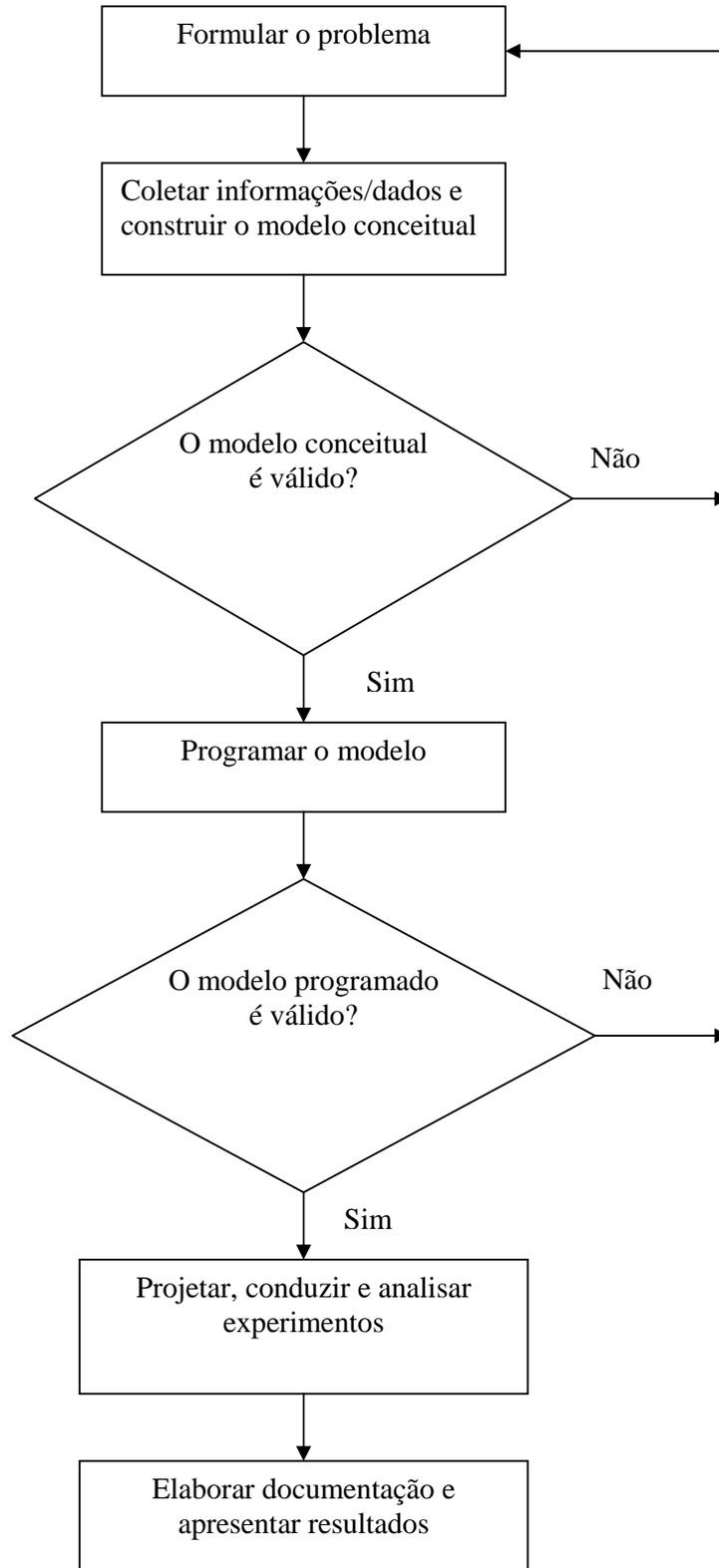


Figura 3.2- Abordagem dos sete passos da simulação

Fonte: Law e McComas (2001)

SHANNON (1998) afirma que duas atividades na primeira fase da construção do modelo são fundamentais: o estudo do sistema e a análise das distribuições de entrada. No estudo de sistemas, componentes e suas interações devem ser identificados e descritos. O conhecimento do comportamento das variáveis de entrada pode ser conhecido através da análise de distribuições de entrada. Cada variável aleatória do modelo deve ser examinada, e a forma de suas distribuições e os parâmetros de distribuição determinados.

De acordo com SHANNON (1998), algumas fontes de dados potenciais podem ser: registros históricos, dados de observação, sistemas similares, estimativas de operadores e de projetistas, considerações teóricas.

Passo 3- Teste de validade do modelo conceitual

Este teste consiste na avaliação da eficiência do programa computacional no que se refere a propósitos da simulação e da existência de uma correta representação de parâmetros de entrada e estrutura lógica do modelo. Caso ocorram problemas na validação do modelo, o mesmo deverá passar por atualizações, voltando ao passo anterior.

1.1 Passo 4- Programação do modelo

A programação envolve a implementação do modelo conceitual em um software de simulação ou em uma linguagem de propósito geral seguida de sua depuração computacional.

Passo 5- Teste de validade do programa

A validação envolve a depuração do modelo, é o processo de averiguação de uma representação correta do sistema real e a interação de seus componentes por parte do modelo. Nessa etapa, ocorre a comparação de medidas de desempenho existentes do sistema com as obtidas através do modelo. Caso haja aprovação dos analistas e dos tomadores de decisão de acordo com suas vivências do sistema analisado, ocorre validação do modelo.

Passo 6-Projeto de experimentos

O projeto de experimentos 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).

Os resultados da simulação devem ser analisados para delineamento de inferências e realização de recomendações para solução do problema. CENTENO (1996) afirma que a natureza estatística da simulação requer muitas corridas do mesmo modelo para que resultados sejam obtidos com acurácia e com confiabilidade.

Passo 7- Elaboração de documentos e apresentação de resultados.

A documentação do modelo deverá conter o modelo conceitual com todas as suas considerações, descrição detalhada do modelo computacional e relato de resultados encontrados.

Para condução eficiente do processo de simulação, aspectos como os parâmetros de entrada, suas possibilidades de variação e combinações, duração da corrida do modelo, o período de aquecimento e o número de replicações devem ser cuidadosamente analisados.

De acordo com CENTENO e CARRILLO (2001), estabelecimento de objetivos claros, planejamento cuidadoso do projeto e revisão e reavaliação contínua do mesmo podem fazer a diferença no alcance de sucesso no processo de simulação.

Para LAW e McCOMAS (2001), o nível do detalhamento do modelo depende de considerações como objetivos de projeto, medidas de desempenho, disponibilidade de dados, restrições computacionais, financeiras e temporais.

De acordo com a literatura, para que a simulação tenha resultados satisfatórios, conhecimentos tais como de ferramentas da pesquisa operacional e de estatística são necessários.

LAW e McCOMAS (2001) discutiram sobre formas de adquirir validação e credibilidade em modelos de simulação, como as listadas a seguir:

- Formulação precisa do modelo;
- Interação entre os envolvidos no processo de criação e análise do modelo;
- Utilização de técnicas quantitativas para validação do modelo.
- Realização de experimentos para determinação de fatores importantes no modelo (interferem nas medidas de desempenho).
- Uso de técnicas estatísticas para análise do sistema e de dados de saída do modelo.
- Utilização de animação e interação entre os analistas e tomadores de decisão

Em um sistema com variáveis randômicas, torna-se de fundamental importância a utilização de distribuições de probabilidade para retratar o seu comportamento estocástico. A utilização de variáveis estocásticas permite a inclusão do comportamento dinâmico em um sistema de produção. Exemplos de variáveis estocásticas: tempo de reparo, tempos de operação, tamanho de lotes.

As distribuições de probabilidade são a base para a geração de comportamento estocástico em simulações. Em geral, qualquer processo que repetitivamente produz saídas que variam de uma ocorrência para outra podem ser representadas com uma distribuição de probabilidade.

De acordo com SARGENT (1988), a análise de dados de entrada e de saída em uma simulação, mostra-se como de fundamental importância. A análise de dados de entrada refere-se à técnica de estimar parâmetros de populações associadas com variáveis randômicas no modelo e ajustar distribuições para dados coletados dessas populações no sistema real.

Sempre o modelador está interessado em encontrar, entre todas as possíveis candidatas, a distribuição que melhor se ajuste a um conjunto de dados. Isso é possível através da utilização de *Best Fit* e *Input Analyser*. Entre outras técnicas, pode-se usar um número de replicações independentes de simulação, cada uma com duração curta ou pode ser usada somente uma replicação com uma duração longa.

SARGENT (1988) apresentou um tutorial sobre validação e verificação de modelos de simulação. Um modelo deve ser desenvolvido para um propósito específico ou uso e sua validade determinada com relação a esse propósito. Um modelo pode ser válido para um conjunto de condições experimentais e inválido para outro.

SARGENT (1988) cita algumas técnicas de validação citadas por e abordadas na literatura são:

1. Validação de eventos: Os eventos de ocorrência da simulação são comparados com aqueles do sistema real para determinar se eles são os mesmos.
2. Testes de condições extremas: a estrutura do modelo e a saída deverão ser plausíveis para qualquer combinação extrema e desconhecida de níveis de fatores no sistema (ex. estoques intermediários são zero, saída da produção igual a zero). Também o modelo deverá se limitar ao comportamento anormal de operações.
3. Valores fixos: São usados para todos os modelos de entrada e variáveis internas. Isso deverá permitir analisar os resultados do modelo em oposição à valores calculados manualmente.
4. Validação de dados históricos: confrontação de dados reais com os resultantes da modelagem.
5. Análise de sensibilidade: Esta técnica consiste de mudar os parâmetros de entrada e parâmetros internos de um modelo para determinar o efeito sobre o modelo e sua saída.

Para obter um grau de confiança no modelo e em seus resultados, a comparação do comportamento de entrada-saída do sistema e modelo é geralmente necessária. Algumas abordagens básicas existentes na literatura, estão explicitadas a seguir:

Gráficos de dados do comportamento do modelo e do sistema: os dados de comportamento do sistema e do modelo são plotados nos gráficos para vários conjuntos de condições experimentais para determinar se o comportamento de saída do modelo tem suficiente acurácia para a finalidade em questão.

Intervalos de confiança: podem ser obtidos pelas diferenças entre os parâmetros da população, em geral, médias e variâncias, e distribuições do modelo e variáveis de saída do sistema para cada conjunto de condições experimentais.

Testes de hipóteses: podem ser usados na comparação de parâmetros, distribuições e séries de tempo de dados de saída de um modelo e um sistema para cada conjunto de condições experimentais para determinar se o comportamento de saída do modelo tem um nível aceitável de acurácia.

LAW e McCOMAS (1986) e CARSON (2003) destacaram possíveis armadilhas que podem surgir quando do projeto, desenvolvimento e análise de experimentos de simulação, tais como:

1. Falha na escolha do conjunto de objetivos da simulação;
2. Tratar um estudo de simulação como um exercício de programação;
3. Falta de interação regular com os gerentes ou tomadores de decisão;
4. Escolha incorreta de distribuições de probabilidade;
5. Realização de apenas uma corrida na simulação para um sistema particular.
6. Escolha incorreta do tempo de aquecimento para a simulação.
7. Modelagem com detalhamento excessivo.

3.5 Linguagens de simulação

Uma linguagem de simulação a eventos discretos necessita dos seguintes fatores para prover a análise do modelo simulado (NANCE, 1993):

- Transformações no processo, para permitir que a geração de números aleatórios resulte em distribuições estatísticas.
- Capacidade de processamento de lista para que haja criação e movimentação de objetos.
- Rotinas de análise estatística para possibilitar comparação do comportamento do sistema simulado para validação e análises para melhor compreensão e melhoria do sistema.
- Geração de relatórios como auxílio à tomada de decisão.
- Contagem de tempo para melhor representação do sistema.
- Componentes e organização de um modelo de simulação a eventos discretos;
- Relógio da simulação (variável que indica o valor corrente do tempo simulado);
- Lista de evento (uma lista contendo o próximo tempo quando cada tipo de evento deverá ocorrer).
- Contadores (variáveis usadas para armazenar informações estatísticas sobre o desempenho do sistema).
- Rotina de início (um subprograma para iniciar o modelo de simulação no tempo zero).
- Rotina de contagem de tempo (um subprograma que determina o próximo evento de uma lista de eventos e então avança o relógio de simulação para o tempo de ocorrência desse evento).
- Programa principal.

Para SHANNON (1998), o software de simulação deve ser capaz de representar o estado do sistema e suas alterações através do tempo. Todos os pacotes de software de simulação têm várias características em comum. Eles são capazes de representar entidades, atributos e conjuntos, podem criar e eliminar entidades temporárias, armazená-las em filas, mudar os valores de atributos e representar recursos utilizados pelas entidades.

De acordo com SHANNON (1998), um modelo de simulação pode ser construído com base em três tipos de linguagens de simulação, a saber:

- Linguagem de propósito geral (FORTRAN, C++, *Visual Basic*, Pascal, entre outras).
- Linguagem de simulação de propósito geral.
- Pacote de simulação de propósito especial (particular).

Para SHANNON (1998), um pacote de simulação tem como objetivo traduzir com precisão o modelo conceitual em uma forma executável. O pacote de simulação possui algumas vantagens sobre as outras linguagens, tais como: redução da tarefa de programação, aumento de flexibilidade quando da mudança do modelo, menos erros de programação e coleta automática de estatísticas. Os pacotes de simulação são classificados como linguagens de simulação de propósito geral e simuladores de propósito especial. As linguagens de simulação de propósito geral se destinam a solução de grande parte dos problemas de simulação discretos. *ARENA*, *AweSim*, *GPSS/H*, *Simscrip II.5*, *Extend* são exemplos concretos desse tipo de linguagem. Os simuladores de propósito especial (particular), podem ser exemplificados pelo *SimFactory*, *ProModel*, *AutoMod*, *Taylor II*, e *Witness*, sendo usados para a simulação de manufatura e problemas de movimentação, de material e de manufatura. *BPSimulator*, *ProcessModel*, *SIMPROCESS* e *Extend+BPR* são destinados a estudos de reengenharia e processos de negócios e *COMNET II.5* para redes de comunicação.

Para LAW e McCOMAS (1998), os critérios mais comuns para seleção de software são flexibilidade na modelagem e facilidade de uso. Uma linguagem de simulação é um pacote de software que é geral por natureza (em termos de aplicações a que são destinados) e onde o desenvolvimento do modelo é feito por “programação”.

Tradicionalmente, programar significa o desenvolvimento de um modelo de simulação por meio de um código escrito, mas recentemente, tem ocorrido um movimento forte em direção às linguagens que empregam uma abordagem gráfica de construção de modelo. Exemplo de linguagens de simulação são *Arena*, *AweSim*, *Extend*, *GPSS/H*, *Micro Saint*, *MODSIM III*, *SIMPLE++*, *SIMSCRIPT II.5*, *SIMUL8* e *SLX*.

A maior vantagem de uma boa linguagem de simulação é a flexibilidade de modelagem, sendo a sua maior desvantagem a necessidade de um programador experiente. Exemplos de linguagem de simulação orientadas a manufatura são *AutoMod* e *Quest*, específicas para manufatura e movimentação de material,. Uma vantagem deste tipo de software é que o tempo de programação pode ser reduzido (comparado com uma linguagem de programação) devido, entre outros fatores, à forte capacidade de construção.

Nos últimos anos, tem havido considerável interesse em softwares de simulação que apresentam grande facilidade de uso com adicional diminuição de programação exigida para modelagem. Estes são classificados como simuladores orientados a manufatura, tendo duas características principais: orientação à manufatura e pouca ou nenhuma programação necessária para construção do modelo. Exemplos de simuladores são *FACTOR/AIM*, *ProModel*, *Taylor II* e *WITNESS*.

Um modelo de simulação é construído pelo uso de gráficos, pela seleção de itens de menus com o *mouse* e pelo preenchimento de caixas de diálogo. A maior vantagem de um simulador é que se ele é aplicável a um determinado problema, então a quantidade de tempo requerida para desenvolver o modelo pode ser reduzida consideravelmente. A maior desvantagem de simuladores é que eles não são flexíveis como as linguagens de simulação.

De acordo com a literatura, a distinção entre linguagem de simulação e simuladores está cada vez menos clara. Entretanto, ainda pode-se dizer que uma linguagem de simulação é geral por natureza e usa programação para desenvolver um modelo. Simuladores, por outro lado são aplicações específicas, em sua maioria, e talvez, no máximo, vinte por cento do modelo, é desenvolvido por alguma forma de programação (LAW e McCOMAS,1998).

3.5.1 Arena

MARKOVITCH e PROFOZICH (1996) fizeram uma descrição do pacote de simulação Arena. O *Arena* foi lançado em 1993, tendo como linguagem de construção, o SIMAN. Após criação de um modelo gráfico, o *Arena* automaticamente gera um modelo em SIMAN para realizar as corridas do modelo.

O *template* do *Arena* é constituído de 3 painéis: o painel *Common* que contém módulos representando processos de simulação básicos como chegadas, atendimento; o painel *Support* contendo módulos para ações específicas como lógica de decisão e o painel *Transfer* cujos módulos são usados para movimentar (*transfer*) entidades através do sistema.

O *Input Analyzer* é utilizado para determinar uma distribuição para entrada em um modelo no *Arena*. O *Output Analyzer* é usado para mostrar e analisar dados dos modelos depois de finalizada a simulação, além de possibilitar análise de características como intervalo de confiança. O Gerenciador de Cenário permite ao usuário especificar vários cenários de um modelo. O *Arena Viewer* permite a visualização dos modelos de simulação.

3.6 Vantagens e desvantagens da simulação

As vantagens de se utilizar a simulação estão sendo descritas por vários autores, tais como, Banks (1999); Carson (2003); Musselman (1994); Centeno e Carrillo (2001):

Vantagens da simulação

- A simulação permite a identificação de problemas e gargalos antes da construção ou modificação de um sistema.
- Permite a compreensão de alternativas de projeto e regras de processo.
- Permite o estudo da dinâmica de um sistema, sua mudança através do tempo e a interação de seus componentes permite uma análise detalhada do projeto.
- Estudar o sistema sem que haja necessidade de modificar o sistema real;
- Verificar a viabilidade de alguma mudança com análise de resultados.
- Comparar medidas de desempenho e a capacidade instalada de um sistema, entre outras.
- Utilizar repetidamente um mesmo modelo para diversas análises.

Desvantagens da simulação

- Tomadores de decisão podem tirar conclusões prematuras com base em evidências insuficientes devido a fatores como pressões de tempo e animações.
- A construção de modelos requer treinamento especializado.
- Os resultados da simulação são, muitas vezes, de difícil interpretação.
- As análises feitas via simulação podem ser muito longas e caras.
- A construção de modelos de simulação pode se tornar cara.
- Devido à natureza estatística da simulação, muitas corridas do mesmo modelo são necessárias para que dados confiáveis sejam encontrados.
- Utilização desnecessária da Simulação quando a solução por técnicas analíticas seria suficiente.

3.7 Representação Visual do Modelo de Simulação

A simulação pode ser visualizada através de ferramentas, tais como Diagrama de Ciclo de Atividades e Redes de Petri.

Diagrama de ciclo de atividades

PIDD (1992) apresentou um tutorial sobre a utilização da simulação computacional, retratando o Método das Três Fases. PAUL (1993) apresenta um tutorial sobre as ferramentas de modelagem Diagrama de Ciclo de Atividades (DCA) e Método das Três Fases. O DCA representa graficamente o fluxo lógico de um modelo. A utilização do DCA têm sido recomendada para a modelagem de sistemas com forte estrutura de filas. Além disso, em alguns casos, o DCA pode ser utilizado para compreensão de um problema anteriormente à sua modelagem.. A combinação do Diagrama de Ciclo de Atividades e do Método das Três Fases tem obtido sucesso.

O Método das Três Fases é composto normalmente pelas fases A, B e C. A construção do método basicamente envolve uma atividade e dois eventos que a descrevem: um evento de início de uma atividade (evento C) e outro de finalização dessa atividade (evento B).

Redes de Petri

O conceito de Rede de Petri foi criado, nos anos 50, por Carl Adam Petri, sendo uma ferramenta de grande auxílio para compreensão de sistemas. De acordo com PETERSON (1977), *“uma Rede de Petri é uma abstração, um modelo formal de fluxo de informação”*.

As Redes de Petri permitem uma representação mais simples do sistema a ser modelado, apresentando uma representação com menor quantidade de elementos. A representação gráfica de uma Rede de Petri possui normalmente o formato de um grafo. Numa Rede de Petri, dois tipos de nós estão presentes: lugares e transições. Os lugares são representados por círculos e as transições por traços. Os lugares são conectados aos traços através de arcos, que representam funções de entrada e saída.

De acordo com MACÍAS e DE LA PARTE (2004), as Redes de Petri apresentam as seguintes características:

- possibilitam uma interpretação matemática/gráfica clara com menor esforço computacional;
- são capazes de lidar com sistemas complexos, concorrentes e de grandes dimensões apesar de sua representação gráfica clara;
- fornecem uma boa metodologia e formalismo para modelar sistemas discretos;
- podem ser aplicadas devido a seus vários níveis de abstração em diversos sistemas com variados níveis de detalhe;
- podem ser tratadas sob dois pontos de vista, dinâmico ou contínuo.

As Redes de Petri têm grande aplicação em sistemas produtivos, sistemas de manufatura e sistemas digitais.

3.8 Aplicação da Simulação

De acordo com a literatura, a simulação tem sido aplicada nos seguintes campos:

- processos de negócios;
- sistemas de transporte;
- sistemas computacionais / comunicações e militares;
- meio ambiente;
- restaurantes;

- sistemas públicos;
- hospitais, centros de saúde e centrais de atendimento;
- educação;
- setor energético (análise de demanda e suprimento de energia);
- análise de controle de tráfego aéreo;
- transportes.

Alguns dos assuntos mais discutidos na literatura acerca da simulação de manufatura referem-se à alocação de mão-de-obra, *layout* de facilidades e equipamentos, efeitos da mudança de *mix* de produto, aquisição de novo equipamento, programação *Job Shop*, planejamento e controle da produção, determinação da necessidade de mão de obra. O quadro 3.1 referencia alguns dos principais temas retratados na literatura relacionados à simulação computacional.

De acordo com CARSON (2003), a simulação pode ser usada em situações como as listadas a seguir.

- Consideração de um sistema real com algum nível de complexidade, interação ou interdependência entre vários componentes.
- Projeção de um novo sistema, considerando mudanças como *layout* ou regras de operação ou variabilidade da demanda e novo *mix* de produtos.
- Consideração de um grande investimento em um novo ou existente sistema.
- Necessidade de uma ferramenta que permita a visualização de resultados e efeitos de várias possibilidades, permitindo a compreensão do sistema existente.
- Treinamento e educação.

LAW e McCOMAS (1998) discutiram sobre como a simulação é usada para projetar novos sistemas de manufatura e melhorar o desempenho de sistemas existentes. Os autores citaram os principais temas discutidos na literatura acerca da simulação, relacionados à necessidade e a quantidade de equipamento e pessoal, avaliação de desempenho e avaliação de procedimentos operacionais (quadro 3.1).

Quadro 3.1 – Principais temas discutidos na literatura

Principais temas discutidos na literatura	
Necessidade e quantidade de recursos (equipamento/ pessoal)	Número, tipo e layout de máquinas para um objetivo particular.
	Requisitos para equipamentos de transporte.
	Avaliação de mudança de <i>mix</i> ou volume de produto.
	Avaliação do efeito de introdução de um novo equipamento em um sistema de manufatura existente.
	Avaliação de investimento de capitais.
	Planejamento da necessidade de mão de obra.
	Quantidade de turnos de trabalho.
Avaliação de desempenho	Análise de taxa de saída de produtos (<i>throughput</i>)
	Análise de tempo no sistema.
	Análise de gargalos (<i>bottleneck</i>).
Avaliação de procedimentos operacionais	Programação da produção.
	Políticas de estoque.
	Estratégias de controle.
	Análise de confiabilidade.
	Políticas de controle de qualidade.

Fonte: Adaptado de LAW e McCOMAS (1998)

Em sistemas de manufatura, fontes de aleatoriedade analisadas são chegadas de pedidos, componentes ou matéria-prima; tempos de processamento, montagem ou inspeção, tempos de quebra e de reparo de máquinas, tempos de carregamento e descarregamento, tempo de preparação.

Para SEILA (1995), a simulação é desenvolvida para determinar o desempenho do sistema tendo em vista alternativas de projetos ou ambientes com o objetivo de otimizar o projeto ou a operação do sistema. Na simulação, decisões podem ser representadas por valores de alguns parâmetros de entrada. Parâmetros de saída são valores que são determinados pelo sistema e geralmente são usados para especificar o desempenho do sistema.

LAW e KELTON (1991) relatam que a simulação da produção pode proporcionar uma visão sistêmica do efeito de alterações locais sobre o desempenho global do sistema de produção.

WELGAMA e MILLS (1995) afirmam que a simulação é uma ferramenta útil na fase de projeto dos sistemas de produção, para testar o desempenho de diferentes tipos de *layout*, estimar a taxa de utilização dos operadores em condições dinâmicas da linha de produção e identificar previamente possíveis gargalos.

LAW e McCOMAS (1986) afirmam que a utilização da simulação na manufatura tem aumentado no decorrer do tempo, tendo como possíveis causas o aumento da complexidade de sistemas e a utilização de animação nos modelos.

De acordo com CLARK (1995) e PIDD (1998), a simulação pode ser utilizada para análise de cenários em sistemas de manufatura, pois através de interações entre componentes do sistema, o desempenho do sistema pode ser mensurado.

DEMERICI (2003) realizou um estudo para identificar gargalos nas operações de um porto e a utilização de novos equipamentos nesses pontos críticos através de um modelo de simulação. A linguagem de simulação *AweSim* foi utilizada para o estudo, sendo o modelo programado em processo interativo. Os elementos considerados no modelo foram os cais do porto, navios, cargas, veículos de carregamento/descarregamento e de transporte e armazéns. Os dados de entrada para o modelo foram características do porto e dos navios e estratégias (regras de prioridade, estratégia de capacidade plena, estratégia de investimento).

As atividades de carga e descarga de veículos foram consideradas os pontos mais críticos do sistema analisado. Assim, uma estratégia de investimento foi aplicada ao modelo, para a determinação do nível ótimo de investimento para balancear a carga dos veículos e para avaliação de estratégias. O modelo demonstrou diminuição do número de navios e de tempo de espera em linhas pela aplicação da estratégia de investimento. O autor concluiu que o modelo de simulação de porto pode ser utilizado como ferramenta de apoio à tomada de decisão para o gerenciamento do porto em questão.

HABCHI e LABRUNE (1995) realizaram um estudo sobre os efeitos do tamanho de lotes no desempenho de sistemas de produção em uma manufatura de produto único sem tempo de *set up* e em uma manufatura de multiproduto com rotas cruzadas e tempos improdutivos. A originalidade do estudo está no método utilizado para analisar o impacto do tamanho de lotes e tempo de *set up* no projeto e otimização de um *job shop* ou sistema de produção intermitente. Para determinação do tamanho do lote ótimo, um critério de desempenho foi definido com base na produção total, média do *lead time* da produção e média da taxa de atividade do sistema. O modelo foi testado através da linguagem SIMAN. Os casos de sistema de manufatura de produto único e de multiproduto foram analisados. No estudo de caso de manufatura multiproduto, o estudo foi limitado a três diferentes produtos. Os efeitos dos tamanhos dos lotes são analisados sob as condições de demanda variável e estável em cada um dos casos.

Os dados de entrada utilizados para o modelo foram tempos de processamento, capacidade das estações, tamanho de lotes, intervalo de tempo entre chegadas, taxas de produção, tempos de *set up*, tempos de transferência, tempo de simulação e rotas de produção. Concluiu-se no caso de produto único que a utilização de pequenos lotes de produção permite melhoria de desempenho no tocante a melhoria da utilização de recursos, crescimento da produção total e diminuição do *lead time* de produção e aumento da saída de produtos. No caso de multiprodutos, concluiu-se que a escolha do tamanho do lote ótimo de produção está fortemente relacionada com o *set up*.

SAVSAR (1997) desenvolveu um modelo de simulação para análise de uma linha de montagem eletrônica. O estudo teve como intuito a determinação do número mínimo de *kanbans* posicionados junto aos lotes no sistema para satisfazer uma porcentagem de demanda no tempo, a estimação do tempo de ciclo, a determinação das taxas de saída da produção e a observação da utilização de estações de trabalho.

O estoque em processo (*work in process - wip*) e o estoque final de placas foram considerados no modelo. De acordo com o autor, a maioria dos estudos para medição do desempenho de linha de montagem concentra-se na taxa de saída da linha de montagem e na utilização das estações sem considerar a programação da demanda.

Sendo assim, o modelo proposto por SAVSAR (1997) diferenciou-se dos anteriores por duas principais razões:

- Apresenta um caso real de utilização de uma estratégia de combinação de sistemas puxado e empurrado para operação diante de uma demanda conhecida, com transferência dos *kanbans* da última estação para a primeira estação semanalmente (ou diariamente, se a demanda não é conhecida no tempo);
- Obteve resposta para a questão dos efeitos do número de *kanbans* e os níveis de estoque em processo/estoque de produtos finais na porcentagem de demanda.

RAO et al. (1998) realizaram um estudo sobre as aplicações de modelos de sistemas de fila de espera na manufatura. Um sistema de fila compõe-se de clientes e servidores, um processo de chegada e outro de atendimento, além de outras características como disciplina da fila, tamanho da fila e tempo médio de espera na fila. Os autores consideram que a principal definição de fila é “sistema que mantém clientes em excesso que não podem ser imediatamente atendidos”.

KUNG e CHANGCHIT (1989) utilizaram a simulação com o objetivo de melhora de desempenho de um sistema de montagem de PCI (placa de circuito impresso) em ambiente de produção JIT através de parâmetros como regras de sequenciamento, tamanho de lotes, número de *kanbans* utilizados e número de tipos de PCI's através da comparação de regras de prioridade. O modelo de simulação foi desenvolvido com a utilização da linguagem de simulação WITNESS.

KELTON (1983) apresenta uma discussão sobre a utilização de modelos de simulação e, mais precisamente, na análise das saídas destes modelos.

SOUZA et al. (2003) utilizaram a simulação para análise da necessidade e alocação da mão de obra em linhas de multimodelos de produtos tendo em vista a variabilidade da demanda. Para tanto, vários cenários foram construídos, através da exploração de relações de paralelismo entre tarefas, variação do número de montadores, forma de trabalho e organização dos montadores para realização das tarefas, além da observação da forma de entrada de motores na linha de produção.

A partir da programação de demanda mensal e diária foi desenvolvida a programação das linhas de submontagem tendo em vista a previsão das linhas principais de montagem. O objetivo da simulação foi analisar o comportamento dinâmico das linhas de submontagem de motores projetadas, visando identificar a necessidade e o balanceamento de mão de obra por estação de trabalho; e sincronizar a linha de submontagem com as linhas principais de montagem, procurando minimizar o estoque intermediário.

SHEVELL et al. (1986) utilizaram um modelo de simulação para analisar, em um sistema de manufatura complexo e de produção em larga escala, os efeitos dos seguintes fatores: frequência de produção, liberação de produtos, regra de prioridade de despacho usada para designação do próximo produto a ser processado, máximo tamanho de lote permitido, entre outros. Os maiores problemas encontrados nesse sistema foram alto nível de estoque em processo e dificuldades com a programação da produção.

JOSEPH et al. (1990) discute o uso de modelagem através de simulação na análise de desenvolvimento de um novo produto. O modelo enfatiza o desempenho do processo do ponto de vista de capacidade e qualidade. O estudo destaca o impacto de defeitos em termos de material e processo e a estratégia do processo de manufatura. O modelo de simulação foi desenvolvido por meio da linguagem SLAM II. O modelo foi construído tendo em vista a capacidade de flexibilidade para atendimento rápido à mudanças no ambiente da manufatura e grande nível de detalhamento de forma a contemplar todo o processo. Os autores utilizaram o diagrama de espinha de peixe para identificar as causas e os efeitos de falhas e coletar os dados para serem usados no modelo de simulação.

VAIDYANATHAN et al. (1998) utilizaram a simulação a eventos discretos como ferramenta de programação diária da produção através da construção de um sistema integrado. A partir do programa de produção diário, o modelo de simulação é usado para simular a produção de café e gerar um programa de produção modificado. O modelo de simulação foi realizado a partir das seguintes considerações do sistema real: longos *lead times* de produção, capacidade limitada, grande número de unidades, sazonalidade da demanda, produtos homogêneos.

SHEVELL (1985) construiu um modelo de simulação na linguagem SLAM II para analisar os efeitos de determinados aspectos em um sistema de manufatura de placas de circuito. Problemas como elevados níveis de estoque em processo (*wip-work in process*) e dificuldades na satisfação da programação da produção foram o foco do estudo. O sistema de manufatura analisado caracteriza-se por apresentar produção em grande escala e alto grau de complexidade.

4 ESTUDO DE CASO

A empresa analisada é uma empresa de serviços de manufatura eletrônica que presta serviços de montagem e testes (EMS), atuando no segmento de produtos eletroeletrônicos e de informática, mais precisamente na produção de placas de circuito integrado e montagem de impressoras laser e terminais de cartão eletrônico.

A empresa, objeto da pesquisa, apresenta uma produção com complexidade de roteiros, processos e grande volume de produção. A manufatura modela, monta, testa, repara e embala várias placas de circuito impresso que são usadas para fabricação de impressoras.

4.1 Aplicação da Simulação Computacional

A partir da metodologia apresentada no capítulo de Simulação Computacional de Law e McComas (2001) foi desenvolvida a simulação do presente estudo. Através da simulação computacional e do embasamento na literatura, procurou-se responder às perguntas da pesquisa.

4.1.1 Formulação do problema

Conforme discussão anterior no capítulo 1 (Introdução), a produção de placas de circuito impresso apresenta grande complexidade, tanto do ponto de vista de processos e de produtos quanto da demanda do mercado, além de alto volume de produção.

Um diagrama espinha de peixe foi construído para indicar os problemas encontrados na linha de montagem. O diagrama de *Ishikawa* permite identificar as causas e efeitos para um determinado problema, com vistas à sua melhoria. Através da indicação dos principais problemas, chegou-se à conclusão que estes convergiram para o problema de balanceamento de linha de montagem, o que pode ser visualizado na figura 4.1.

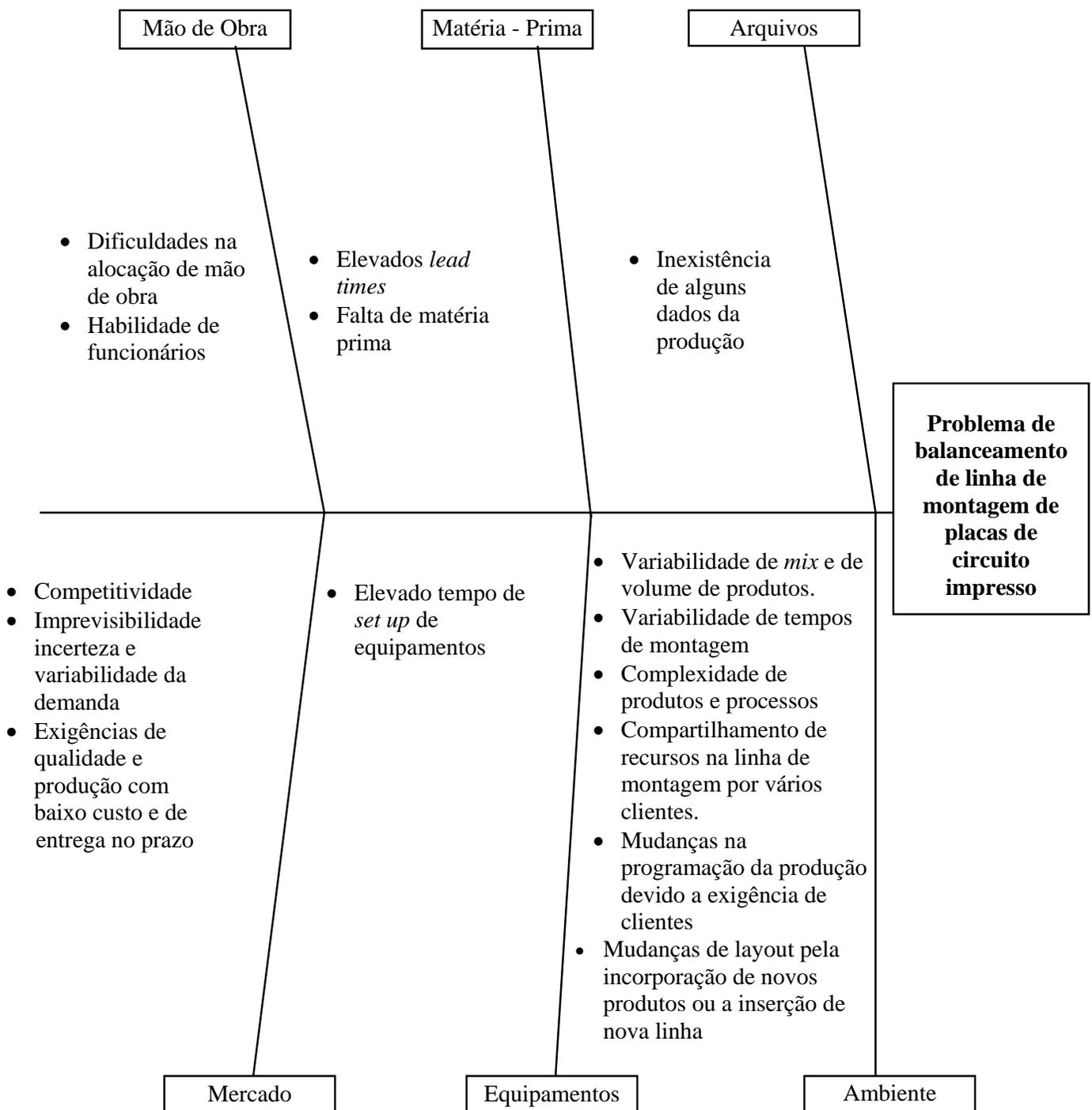


Figura 4.1- Diagrama espinha de peixe referente à linha de montagem analisada

Percebe-se, assim, que as causas encontradas na manufatura eletrônica para o problema de balanceamento de linha coincidem com a revisão de literatura destacada anteriormente. O problema a ser estudado refere-se a análise do comportamento atual da linha de montagem e modelagem de cenários que proporcionem melhorias na produtividade e eficiência da linha de montagem de modo a atender rapidamente a demanda. Para tanto, os seguintes aspectos apresentados no diagrama de espinha de peixe foram estudadas: mão-de-obra, equipamentos, ambiente interno e mercado.

Assim, em conformidade com os objetivos da pesquisa citados no capítulo 1 (Introdução), a simulação computacional foi realizada como ferramenta de apoio à decisão a fim de estudar o processo produtivo e para configurar e balancear linhas produtivas de uma EMS de modo a atender a demanda variável diante de um cenário de complexidade de processos e circuitos, variedade e grande volume de produtos.

4.1.2 Construção do modelo conceitual

O modelo conceitual desenvolvido, para a modelagem proposta, constituiu-se das seguintes atividades: definição do produto, descrição e representação do processo produtivo das placas, identificação e coleta dos dados de entrada e elaboração dos pressupostos do modelo. Estas últimas etapas foram realizadas concomitantemente.

Definição do produto e da tecnologia de processo

A placa de circuito impresso (PCI) é constituída por uma placa ou cartão de material com propriedades de isolamento elétrico e sobre a qual estão impressas trilhas de cobre. As tecnologias de fabricação empregadas na empresa para produção das placas escolhidas para análise são SMT (*Surface Mount Technology* - Tecnologia de Montagem em Superfície) e PTH (*Pin Through Hole*).

O SMT é um processo automatizado de montagem de componentes em superfícies. O PTH é composto, principalmente, dos seguintes processos: Pré-Formatação, Inserção Manual, Solda onda, Acabamento, Teste ICT, Teste funcional (FVT), Reparo, Embalagem.

- Pré-formatação: etapa do processo onde os terminais dos componentes eletrônicos são dobrados ou alinhados.
- Inserção manual : etapa do processo onde componentes maiores são inseridos na placa.
- Solda Onda: etapa do processo onde ocorre a soldagem dos componentes.
- Teste ICT e Teste funcional: etapas de testes para avaliar defeitos em circuitos e funcionais, respectivamente, nas placas.
- Acabamento
- Reparo: etapa de realização de ajustes em placas que acusaram defeitos durante a montagem.
- Embalagem: etapa onde ocorre o acondicionamento das placas.

Descrição e representação do processo produtivo

Antes da descrição do processo produtivo, cabe ressaltar algumas considerações acerca do layout e da linha de produção. O layout da produção é funcional com disposição de máquinas por função em estações. A linha de produção analisada (figura 4.2) caracteriza-se como linha de montagem multimodelos, por apresentar produção de uma seqüência de lotes com operações de set up intermediárias. Essa característica, conforme descrito na literatura e de acordo com pesquisa de campo está ligada ao problema de dimensionamento de lotes e a um problema de sequenciamento.

Os recursos disponíveis para produção das placas de circuito impresso são máquinas, testadores, montadores, estações de trabalho, material para a embalagem, equipamentos de transporte e armazenagem. Os recursos utilizados na simulação, bem como as estações de trabalho e processos referentes à produção, estão relacionados na figura 4.2.

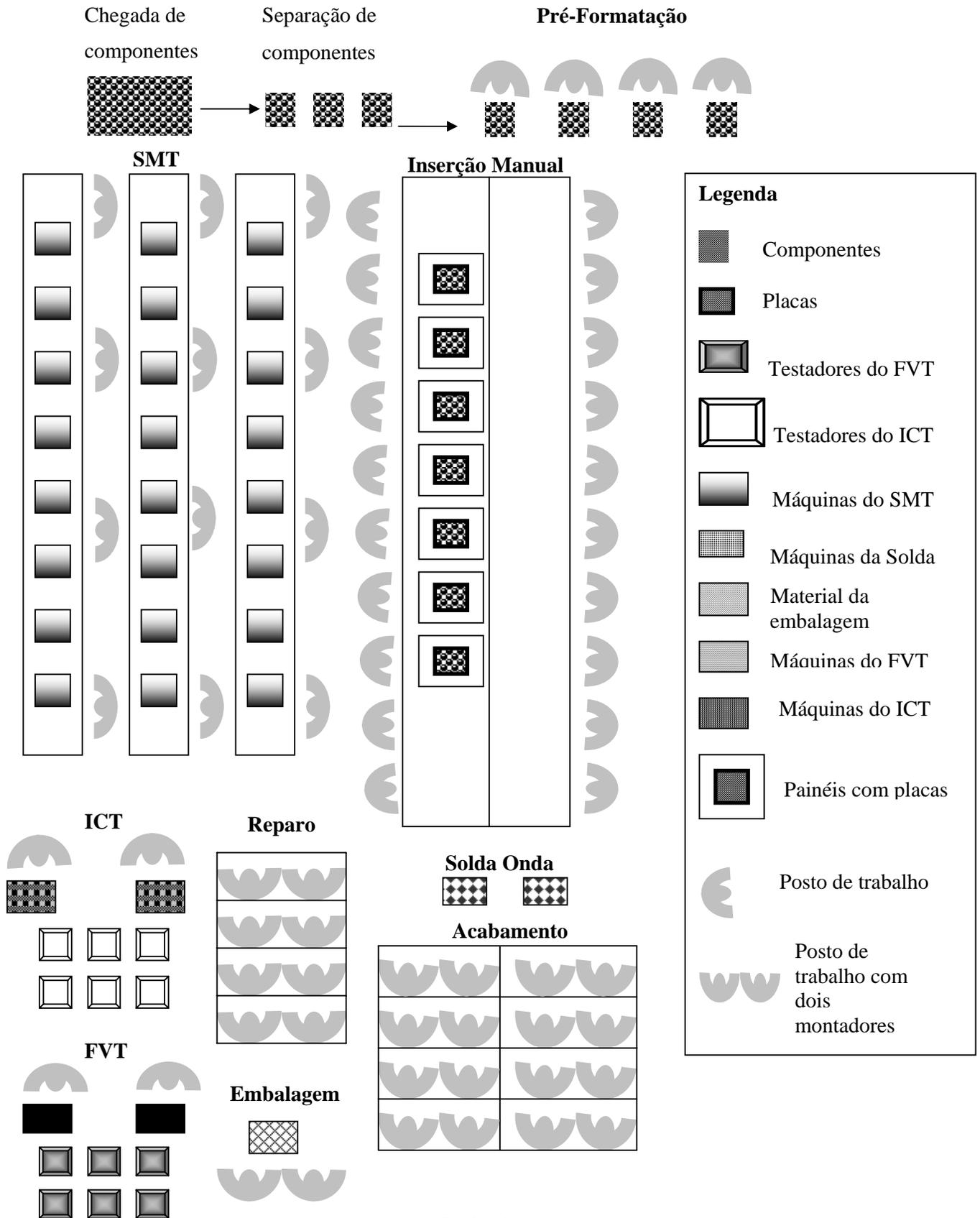


Figura 4.2- Linha de montagem

A partir das considerações anteriores, as etapas de produção das placas de circuito impresso são apresentadas a seguir, podendo também ser visualizadas através da figura 4.3. A programação da produção, a partir dos pedidos de vários clientes, determina a separação desses pedidos e o sequenciamento da produção, sendo posteriormente geradas ordens de produção. Atualmente, os seguintes fatos são considerados para o processamento de uma ordem de produção (OP):

- Data de entrega do produto.
- Disponibilidade de funcionário mediante consideração de turnos de trabalho, faltas e reuniões.
- Existência de componentes e placas.
- Processamento total ou parcial de lotes .
- Sensibilidade de componentes e placas.

Posteriormente à geração da ordem de produção, é feito o pedido de separação de materiais no almoxarifado. O estoque do SMT é formado apenas pelos itens usados no SMT (placas, fitas de componentes, entre outros) de acordo com a ordem de produção das placas. A partir das ordens de produção diárias, o almoxarifado envia os materiais necessários para a produção no início de cada turno. Estes materiais são armazenados no início da linha de produção.

O SMT é composto de 3 linhas de produção tendo em cada uma destas 8 máquinas. As máquinas do SMT são programadas e preparadas (*set up* de material e de máquinas), no início de processamento de cada ordem. A programação se refere a configuração das máquinas para processamento das placas e a preparação se refere a etiquetagem das placas e a troca de alimentadores (*feeders*).

As placas são processadas na parte *top* e *back*, quando os componentes são inseridos nas mesmas. Após essa inserção, é feita uma inspeção visual para a conferência dos componentes e para a verificação de curto e registro das placas no sistema de controle da produção (SCP). As placas não rejeitadas são armazenadas em um transportador e encaminhadas para a inserção manual.

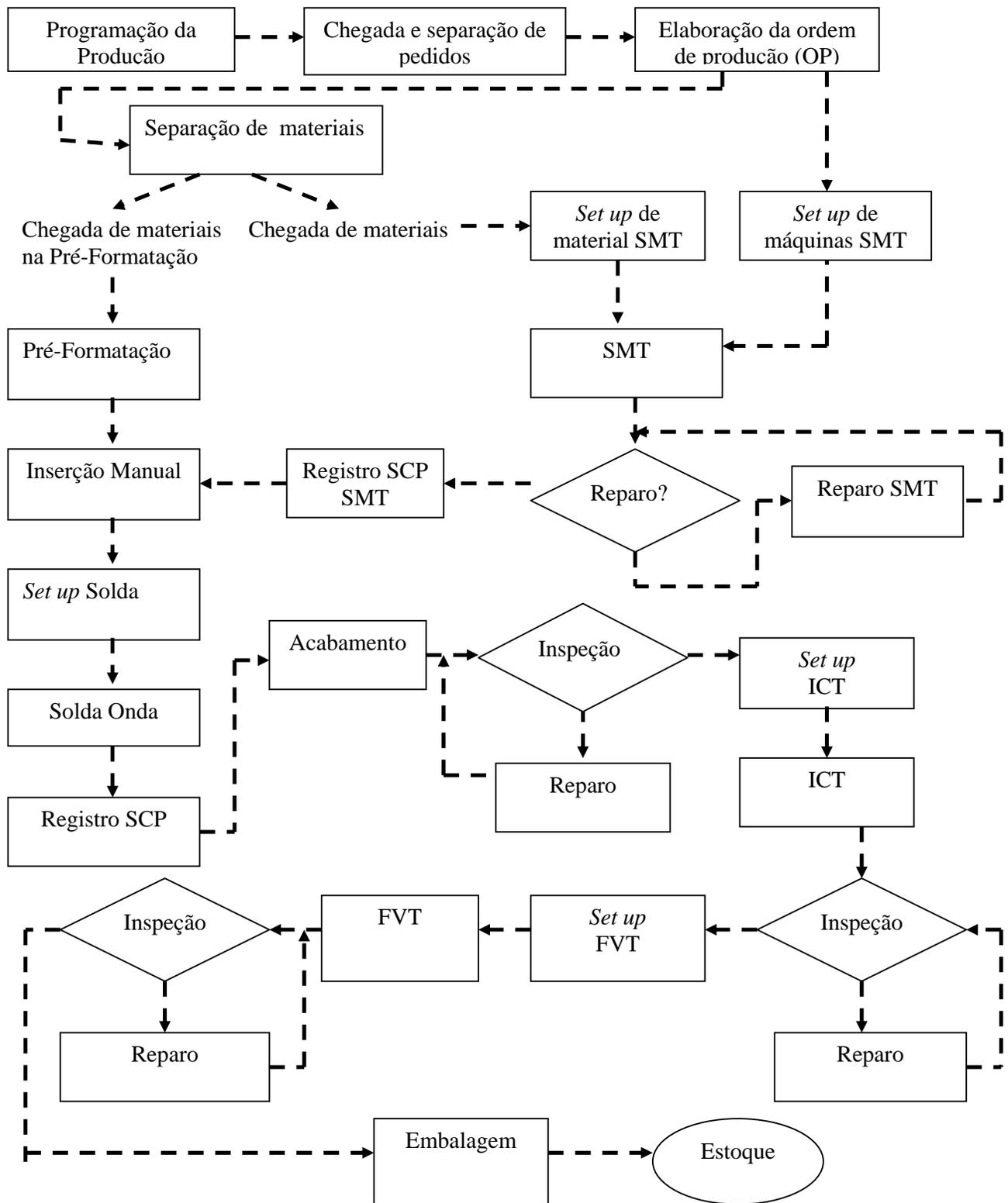


Figura 4.3- Representação do processo produtivo de placas de circuito impresso

O processamento no SMT e a pré-formatação são atividades executadas em paralelo. Os componentes que serão utilizados na inserção manual são enviados para a pré-formatação de acordo com a ordem de produção. Na pré-formatação, os materiais necessários para a produção, no início de cada turno, que necessitam de pré-formatação são cortados e/ ou dobrados.

Durante a execução de uma OP, quase sempre ocorre falta de componentes, havendo reposição de estoque na linha. Caso não existam os componentes necessários no almoxarifado, a produção da placa pára até que seja solucionado o problema. Os componentes pré-formatados são enviados à linha de inserção manual. A liberação de placas e componentes para a operação ocorre desde que existam máquinas ou estações disponíveis. As placas são armazenadas em fila e processadas nas estações de trabalho.

No primeiro posto de inserção, o funcionário fixa a placa para inserção dos componentes em um painel que será deslocado pelos diversos postos de trabalho. A partir do segundo posto, os funcionários inspecionam o trabalho do posto anterior antes da inserção do próprio posto. Após inserção no último posto, os painéis são armazenados em prateleiras. Quando estas ficam totalmente ocupadas, os painéis são enviados para a solda onda.

No processo de Solda Onda, primeiramente é realizado o *set up* da máquina e uma amostra é soldada e posteriormente passa por uma inspeção. Se a amostra for aprovada na inspeção, as demais placas do lote são soldadas, caso contrário, são realizados ajustes na máquina considerada. Após a operação de solda, as placas são colocadas nas prateleiras para aguardarem a operação de acabamento.

No acabamento, são realizadas soldas manuais dos componentes que não foram soldados pela solda onda. O lote é dividido entre os postos e cada placa passa por um único posto. As placas que são aprovadas na inspeção do acabamento seguem para os testes.

No ICT, são realizados testes no circuito das placas. As placas aprovadas são encaminhadas ao FVT e as reprovadas são encaminhadas ao reparo. No FVT são realizados testes funcionais das placas. As placas aprovadas são encaminhadas para a embalagem, as reprovadas são encaminhadas ao reparo. Assim, placas originárias do Acabamento, ICT ou FVT com problemas são enviadas para o Reparo, sendo posteriormente, caso estejam sem defeitos, embaladas e estocadas. Caso alguma placa rejeitada, o lote de placas continuará o roteiro determinado de produção sem a placa defeituosa que após o reparo voltará a circular no sistema. Após esse processo, as placas finalizadas e sem defeitos são enviadas à embalagem.

Algumas considerações concernentes ao fluxo de montadores na linha de montagem são apresentadas a seguir. Quando não há inserção de componentes, os funcionários do PTH são deslocados para a estação de Pré-formatação ou para o Acabamento, mediante prévio treinamento. A execução de tarefas na estação de inserção manual também requer treinamento, por isso, quando há necessidade da utilização de outros funcionários de outras estações, como Acabamento ou Teste, estes são alocados em postos com menor número de componentes e cuja inserção é mais fácil. Geralmente, são alocados funcionários com aprendizado anterior da tarefa.

Outra consideração importante a ser destacada na Inserção Manual no tocante a funcionários, refere-se ao número de postos ocupados na Inserção. O número máximo de montadores da Inserção manual é doze para todos os clientes. Sendo assim, os vinte postos de trabalho da inserção manual, geralmente, não são totalmente preenchidos. Acrescenta-se o fato de que a Pré-formatação e a Inserção Manual são realizadas pelos mesmos montadores.

Identificação e coleta dos dados de entrada para o modelo de simulação

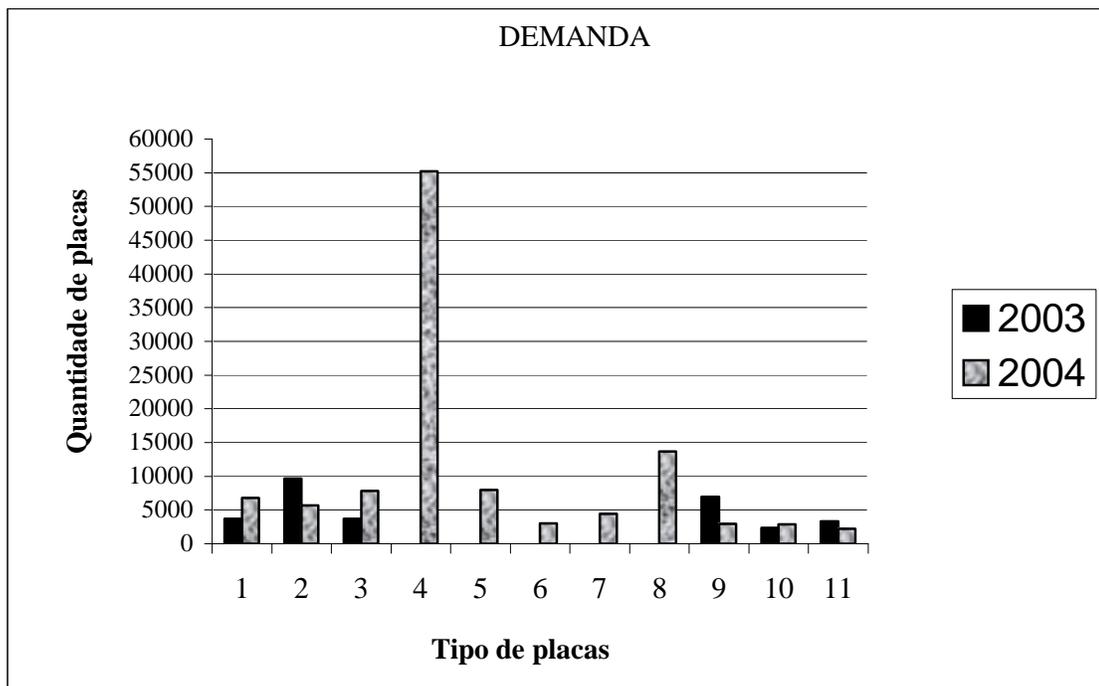
Os dados de entrada para o modelo foram identificados a partir da ligação entre problema e objetivos da simulação. A coleta de dados foi realizada a partir de visitas ao chão de fábrica da empresa e a dados históricos contidos em documentos e banco de dados. Os dados coletados referem-se aos seguintes elementos:

- Quantidade e tipo de recursos por estação.
- Prioridade de execução das tarefas.
- Número de linhas de produção no SMT e número de máquinas.
- Tempo de preparação das máquinas e de materiais (*set up*).
- Intervalo entre quebra de equipamentos(máquinas e testadores).
- Tempo de quebra de equipamentos (máquinas e testadores).
- Intervalo entre paradas nas linhas e duração.
- Tempo de produção diária e por turnos de trabalho.
- Paradas programadas no processo SMT.
- Relação de família de produtos e tipos de placas por família.
- Ordens de produção de cada tipo de placa.
- Número de componentes.
- Histórico da demanda.
- Porcentagem histórica de rejeição nas áreas de acabamento, inspeção e teste.
- Roteiro de produção por tipo de placa.
- Cadência da produção (placas/hora) e produtividade atual por tipo de placa.
- Numero de placas testadas por vez no ICT e no FVT.
- Relação de tempos em todas as estações de trabalho e por processos para contemplar a aleatoriedade do sistema (tempos de montagem, tempo de registro no sistema de controle da produção, tempo de Teste ICT e FVT, tempo de Reparo, tempo de Inspeção, tempo de *set up* e tempo de Embalagem) por tipo de placa.

A partir da coleta de dados referente ao histórico da demanda nos anos de 2003 e 2004, pode-se observar a variabilidade da demanda (gráfico 4.1) e a porcentagem de pedidos por tipo de placa (gráfico 4.2).

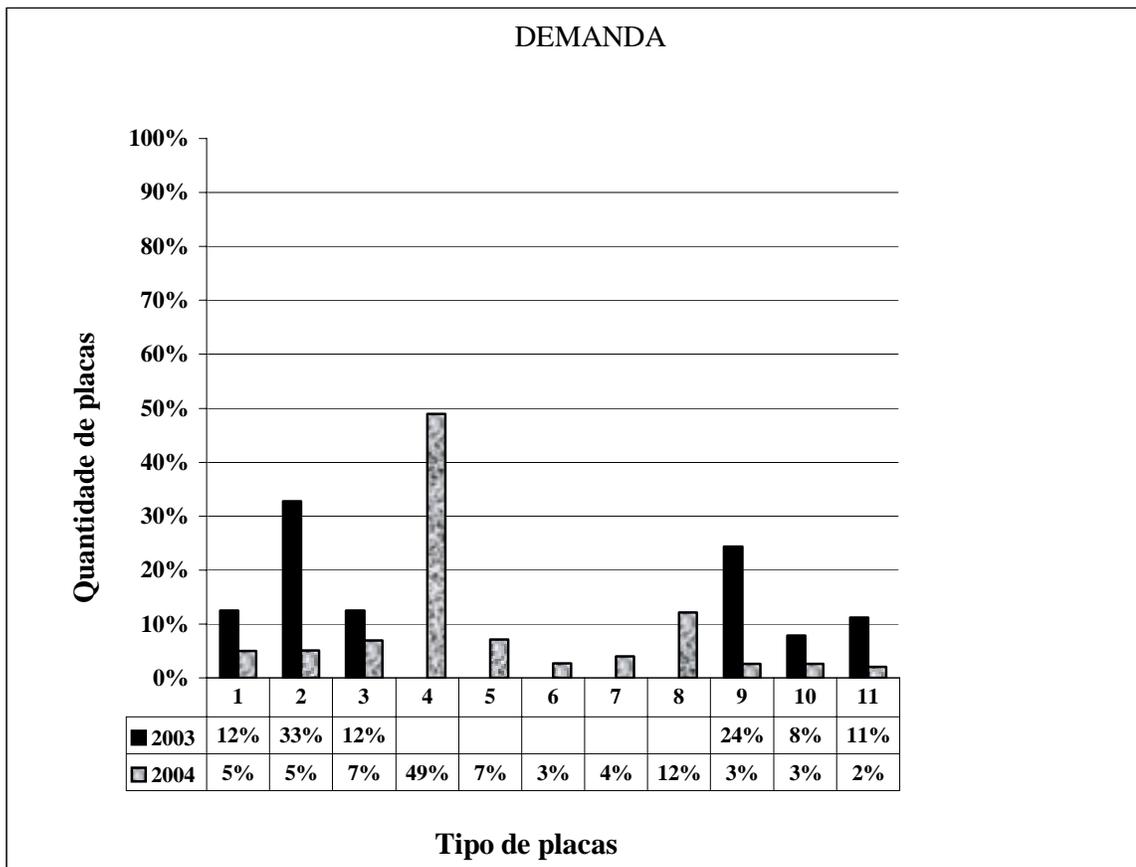
No gráfico 4.1, está representado o tipo e quantidade de placas contidas nos pedidos do cliente da empresa. Através desse gráfico, pôde -se observar que as placas 1, 3 e 10 tiveram um aumento na quantidade de pedidos e que as placas 2, 9 e 11 tiveram um decréscimo na quantidade demandada para produção. As placas 4, 5, 6, 7 e 8 tiveram sua produção iniciada em 2004 e as placas 2, 3, 9, 10 e 11 foram produzidas nos anos de 2003 e 2004. A placa 4 foi a que teve maior número de pedidos, no ano de 2004, totalizando 55200 placas, produzidas na linha de montagem. O histórico da demanda revelou que a demanda do cliente analisado ultrapassou o valor de 120000 placas produzidas nos anos de 2003 e 2004. Percebe-se assim, o grande volume de produção da planta, em questão, uma vez que conforme anteriormente mencionado, não ocorreu a contemplação de outros clientes.

Gráfico 4.1– Demanda de placas



Conforme dados extraídos do gráfico 4.1, foi construído o gráfico 4.2, para efeito de comparação da ocupação da linha de montagem para produção de cada tipo de placa. Nota-se que a placa que teve maior quantidade demandada em 2003 foi a tipo 2 (33%) e em 2004 foi a do tipo 4 (49%).

Gráfico 4.2 –Porcentagem de pedidos por tipo de placas



Assim através dos gráficos destacados anteriormente e da literatura percebe-se que a incerteza e a variabilidade da demanda são elementos comuns em uma linha de montagem de placas de circuito impresso. Estes elementos são causas do problema de balanceamento de linha, uma vez que essas alterações provocam mudanças na programação da produção, no número de funcionários e suas habilidades, disposição dos recursos na planta produtiva, além de questões relacionadas ao compartilhamento de recursos.

Nessa fase da modelagem, o tratamento dos dados estocásticos foi realizado através do *Input Analyser*, com obtenção das distribuições estatísticas utilizadas no modelo. A partir de consulta à literatura, coleta e tratamento de dados, observações e entrevistas estruturadas a tomadores de decisão da empresa, passou-se ao levantamento dos indicadores de desempenho a serem observados mediante os resultados da simulação computacional.

Relação dos indicadores de desempenho a serem analisados

Os indicadores de desempenho a serem contemplados a partir da coleta de dados e que servirão de base para a construção do modelo se encontram a seguir:

- Quantidade de itens de estoque em processo (*work in process* - wip)
- Produtividade do sistema.
- Tempo médio de espera na fila
- Utilização média dos recursos.

Após consideração dos indicadores de desempenho listados anteriormente, o modelo de simulação foi delineado pela construção de seus pressupostos, sendo esta uma etapa vital para o desenvolvimento da simulação computacional.

Pressupostos do modelo

O modelo de simulação contemplou 11 placas provenientes de 4 famílias de um produto da empresa, de um mesmo cliente. Através do histórico da demanda concernente a 1 ano, foi obtido o intervalo entre chegadas de pedidos que segue a distribuição discreta e o tamanho dos lotes para produção por tipo de placa.

A natureza da entidade placa, considerada na modelagem, indica dualidade, uma vez que placas são consideradas lotes quando chegam a um processo e unidades quando passam pelos processos. Esta característica pode ser visualizada na figura 4.4. Outra entidade é considerada no modelo, os componentes que são considerados na etapa de Pré-Formatação.

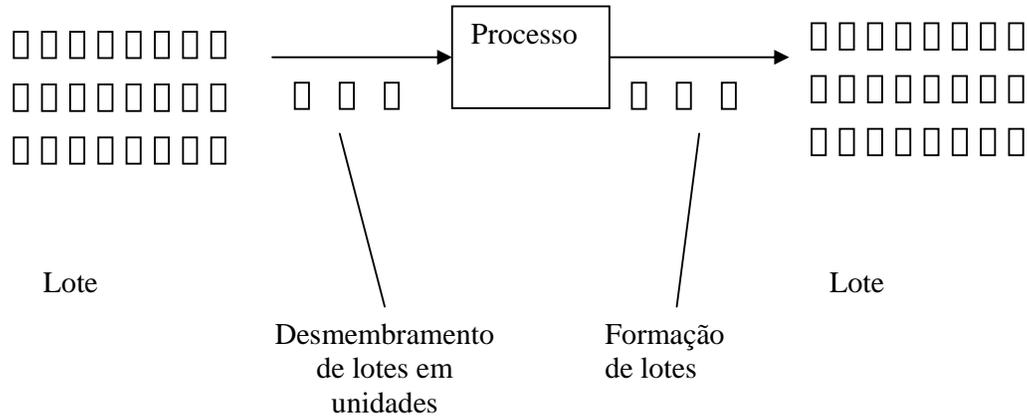


Figura 4.4 - Característica dual da entidade placa

As entidades consideradas na modelagem foram componentes, placas e lotes de placas. Cada placa está associada à quantidade de componentes para montagem, ao intervalo entre chegadas de pedidos e ao roteiro de produção. No roteiro de produção foi avaliada a seqüência tecnológica de produção de cada uma das placas analisadas. Assim, no SMT, o fato de uma placa requerer a montagem somente na parte superior da placa (*top*) e inferior (*back*) foi considerada. Na Inserção Manual, cada tipo de placa necessita de um determinado número de componentes e postos para sua montagem.

Cada processo apresenta tempos de montagem diferentes para cada tipo de placa, postos de trabalho, tipo e quantidade de recursos necessários e a prioridade para sua execução. Os tempos de montagem, reparo, testes, embalagem e inspeção são estocásticos, sendo específicos para cada tipo de placa e/ou família. Os tempos de Inserção no SMT foram considerados determinísticos, uma vez que o processo é automatizado.

Além dos fatores anteriormente citados, a modelagem computacional considerou os seguintes recursos: linhas de produção, operadores, monitores, postos de trabalho e máquinas. Uma relação contendo os tipo de recursos, quantidade e estações em que se encontram alocados e outra com a relação de testadores por família e por estação, estão dispostas, respectivamente, nas tabelas 4.1 e 4.2.

Os tempos de *set up* de material, máquinas e quebras de equipamentos foram avaliados para retratar o sistema com maior realismo e, portanto, efetividade. O tempo entre falhas de equipamentos e os tempos de reparo foram modelados como estocásticos. Os tempos de processamento e montagem, intervalo entre quebra e tempo de parada de testadores, e o rendimento nos testes das placas utilizados para a realização da simulação computacional, assim como outros dados de entrada. Estes últimos dados foram modificados por serem confidenciais.

Tabela 4.1- Relação dos recursos por estação na modelagem

RECURSOS		
Estação	Quantidade	Tipo
SMT	3	linhas
	6	operadores
	6	monitores
Pré-Formatação/Inserção Manual	12	operadores
Acabamento	8	postos
	16	operadores
ICT	2	máquinas
	2	operadores
	5	testadores
FVT	2	máquinas
	2	operadores
	5	testadores
Embalagem	1	posto
	2	operadores

Tabela 4.2 - Relação de testadores por família de produtos

TESTADORES		
Estação	Família	Quantidade
ICT	11	1
	21	1
	31	1
	41	2
FVT	11	2
	21	1
	31	1
	41	1

Outros pressupostos foram considerados para construção do modelo de simulação, estando os mesmos listados a seguir. No SMT, foram consideradas paradas programadas da produção. Estas se referem à parada de 23 minutos entre turnos, pausa de 1 hora para refeições e pausa de 8 min para descanso.

- A planta produtiva opera em 3 turnos de 8 horas em seis dias da semana.
- A maioria dos dados foi coletada em termos de família de produtos, pela similaridade das placas.
- O número máximo de clientes que podem chegar ao sistema foi tido como infinito.
- A regra de prioridade de atendimento utilizada foi a FIFO (*first in first out*), ou seja, a primeira entidade que chega é a primeira a ser atendida.
- Os operários da pré-formatação e da inserção manual são compartilhados, sendo que os demais setores do PTH possuem funcionários fixos.
- A Pré-Formatação de componentes que são inseridos na inserção manual se inicia no instante em que a OP chega na linha de produção.
- A linha de inserção manual foi dividida em duas L1 e L2 para contemplação do caso de produção de mais de uma placa ao mesmo tempo.

- Em algumas situações pela similaridade, os dados foram coletados por família e não por tipo de placa.
- Ao passar pelo teste, placas podem ser rejeitadas. Quando isso ocorre, o lote de placas testado continua a percorrer o sistema, enquanto a placa rejeitada segue o seu roteiro natural após aprovação nos testes.

Algumas considerações referentes às limitações do modelo merecem ser destacadas face aos pressupostos do modelo. Essas limitações referem-se a elementos não modelados na simulação em questão, tais como habilidade de funcionários, distâncias e deslocamentos entre estações, ocorrência de horas extras de trabalho e compartilhamento de recursos da planta produtiva entre clientes. Assim, somente a produção de um cliente foi analisada. Isso gera dificuldades na avaliação de resultados, pela possibilidade de observação de pouca utilização de alguns recursos. Outro tipo de limitação presente no modelo refere-se às simplificações como a consideração do SMT como um processo único. Além desses fatores, a animação não foi utilizada para validação do modelo computacional.

4.1.3 Teste de validação do modelo conceitual

Nessa etapa, o modelo conceitual foi validado por ter apresentado coerência e eficiência no tocante à representação dos parâmetros de entrada e à estrutura lógica do modelo.

4.1.4 Programação do modelo

Nessa etapa, foi realizada uma tradução do modelo em uma linguagem de programação através da codificação. O recurso computacional utilizado para essa finalidade, possui a seguinte configuração: Pentium 4 de 2.80 GHz e 512 MB de memória RAM.

A programação do modelo da linha de montagem foi realizada no software de simulação Arena 8.01, através de blocos, presentes nos seguintes *templates*: o *Basic Process*, *Advanced Process* e *Advanced Transfer*.

Os blocos utilizados na modelagem referentes ao *template Basic Process*, encontram-se a seguir:

- **Create:** bloco utilizado para criação das entidades placas e componentes em intervalos de tempo determinados. No caso das placas, o intervalo entre chegada de placas e as entidades por chegada encontram-se no Apêndice B. Quanto às entidades componentes, estas chegam, diariamente.
- **Dispose:** bloco cuja função é eliminar as entidades (componentes e placas) do sistema.
- **Process:** bloco usado com a finalidade de representar a alocação, utilização e liberação dos recursos no modelo. Os tempos que regem os processos, concernentes a esta dissertação, estão no Apêndice B.
- **Decide:** esse bloco permite a realização de testes para desviar entidades de um percurso para outro. Pode ser modelado de duas formas, através de condição ou de probabilidade de ocorrência de um determinado fato.
- **Assign:** utilizado para designação de valores de atributos e variáveis às entidades no modelo.
- **Batch:** utilizado para agrupar as entidades em lotes para circulação entre processos.
- **Separate:** esse bloco foi utilizado para desmembrar os lotes ou duplicar as entidades no modelo.
- **Record:** esse bloco possibilitou a contagem das entidades e de tempo em determinados trechos do modelo. Com isso, a verificação das entradas e saídas do modelo pôde ser feita bem como a comparação do modelo com os dados históricos.

No que se refere, ao *template Advanced Process*, foram utilizados os blocos *Seize*, *Delay* e *Release*: O bloco *Seize* permite a alocação do recurso, o bloco *Delay*, a espera diante da execução de um determinado processo e o bloco *Release* a liberação do recurso após finalização da atividade. Quanto ao *Advanced Transfer*, os blocos utilizados foram *PickStation*, *Station* e *Leave*. O bloco *PickStation* permite também a realização de testes, além da criação de expressões, permite a seleção baseada em número em fila, número em rota para a estação e número de recursos ocupados.

A diferença entre este e o *Decide*, é que após realização do teste, a entidade é enviada diretamente para a estação determinada, ou seja, permite a escolha entre estações de trabalho, conforme a modelagem.

Já o bloco *Station* fornece a informação de ocupação de uma estação e o bloco *Leave*, de que a estação encontra-se liberada. Além dos blocos mencionados, o Arena possui os seguintes módulos de dados utilizados na modelagem, localizados no *Template Basic Process*, a saber: *Entity*, *Resources*, *Queues*, *Variable* e *Schedule*. Além destes, os campos *Failure* e *Expression*, pertencentes ao *Template Advanced Process* também foram utilizados. A utilidade de cada um desses módulos encontra-se descrita, a seguir:

- *Entity*: armazena a relação de todas as entidades do modelo bem como suas características.
- *Schedule*: armazena dados referentes à programação de trabalho para os montadores da linha de montagem em períodos determinados.
- *Resources*: armazena a relação dos recursos do modelo e suas respectivas capacidades ou *schedule* de produção. No caso da modelagem, essas duas formas de entrada de dados foram utilizadas.
- *Queues*: contém as informações referentes à todas as filas dos recursos do modelo.
- *Variable*: apresenta todas as variáveis utilizadas no modelo.
- *Failure*: possui informações concernentes à interrupções na montagem das placas como o de quebra de equipamentos.
- *Expression*: apresenta uma coleção de expressões utilizadas para os tempos de processamento por tipo e família de placa.

Os blocos, acima mencionados, foram inseridos, na área de trabalho do Arena, quando da realização da modelagem, através de conectores, mediante consideração dos dados levantados no modelo conceitual. As entidades, recursos, variáveis, atributos, expressões, falhas dos recursos e programações de trabalho referentes a cada funcionário foram devidamente modelados.

A partir da concepção da lógica do modelo e sua codificação, dados foram inseridos nos campos dos blocos e módulos de dados. Nesse sentido, foram considerados dados de entrada determinísticos como, por exemplo, capacidade de funcionário e estocásticos como intervalo entre quebra de testadores. Os dados estocásticos foram obtidos através de coleta na linha de montagem e posterior tratamento estatístico por meio do programa *Input Analyser*.

Feitas essas considerações, uma descrição do conteúdo do modelo encontra-se disposta a seguir. A lógica do modelo foi construída a partir da compreensão do sistema real e do modelo conceitual. O modelo contemplou a lógica de circulação das entidades, a montagem em cada uma das estações de trabalho e a alocação de recursos. Os atributos das entidades, os tempos de montagem, intervalos de chegadas e expressões utilizados no modelo juntamente com o modelo lógico construído encontram-se em anexo.

4.1.5 Verificação e validação do modelo

Na fase de verificação do modelo, os parâmetros de entrada sofreram variações para que fosse possível avaliar a coerência do modelo e analisar se a lógica do modelo se mostrava condizente com a realidade.

Com o intuito de analisar se o sistema modelado está em conformidade com o modelo representado, foram realizados os seguintes procedimentos para validação: confrontação dos tempos de processamento na inserção manual do sistema real com os coletados no decorrer do tempo e da produtividade do sistema real com o modelado através do modelo com corrida de duração de 6 meses. Os resultados apresentaram uma variação admissível aos objetivos do modelo conforme tabela 4.3.

Nesta tabela constam apenas os dados de validação referente ao tempo de Inserção Manual por placa. A produtividade obtida pelo modelo diferiu em medida em 6% comparado ao sistema real .

Tabela 4.3 - Confrontação dos tempos históricos de inserção manual X tempos resultantes do modelo

	Tempo de inserção manual por placa (minutos)*		
Placas	Histórico	Modelo	Diferença
Tipo 1	0,11167	0,11819	5,5%
Tipo 2	0,11067	0,11762	5,9%
Tipo 3	0,11067	0,11625	4,8%
Tipo 4	0,15578	0,15923	2,2%
Tipo 5	0,13975	0,14354	2,6%
Tipo 6	0,13965	0,14169	1,4%
Tipo 7	0,135	0,14339	5,9%
Tipo 8	0,13867	0,14387	3,6%
Tipo 9	0,07666	0,07708	0,5%
Tipo 10	0,07666	0,07716	0,6%
Tipo 11	0,07666	0,0771	0,6%

* os valores referentes aos tempos de inserção manual por placa presentes nesta tabela estão multiplicados por um fator k por motivo de sigilo.

4.1.6 Projeto experimental

A partir da validação do modelo final, foram analisadas novas possibilidades de configuração no modelo simulado da linha produtiva em termos de variação de parâmetros de entrada para que fossem alcançados os objetivos da simulação e da presente dissertação. Os cenários foram construídos com base na observação dos “gargalos” do sistema apontados pelo modelo final e do fator desconhecido como a quantidade mínima necessária de componentes pré-formatados para execução da inserção manual.

Portanto, os cenários se revelam como propostas de diferentes configurações do sistema na tentativa de promover a minimização do tempo total de montagem com melhoria da utilização de recursos e aumento da produtividade e, por fim, balancear a linha de montagem.

Assim, o tempo de espera em filas foi considerado um importante indicador para decisão de qual cenário seria modelado. O tempo de processamento na pré-formatação é de aproximadamente 24 horas.

Nas tabelas 4.4, 4.5 e 4.6, estão evidenciados os resultados para o tempo médio de espera em fila do modelo final. Conforme indicado nas tabelas 4.4 e 4.5, o tempo médio de espera para as filas na Inspeção registro no SCP, reparo, processos de solda onda na linha 1 (solda 1) e solda onda (solda 2) na linha 2 da Inserção Manual não são elevadas. O tempo médio de espera por alguns testadores, como ICTF3, foi de aproximadamente 5 horas. As filas de espera nos testes, em geral se mostraram elevadas.

Tabela 4.4 - Tempo médio de espera em fila no modelo final (Parte I)

	Tempo médio (horas)
Filas	Modelo final
Inspeção F3	0,08
Inspeção F2	0,48
Inspeção F1	0,1
Registro SCP F3	0,3
Registro SCP F2	1,67
Registro SCP F1	0,49
Reparo	0
<i>Set up</i> FVT F3	10,99
<i>Set up</i> FVT F2	0,17
<i>Set up</i> FVT F4	1,42
<i>Set up</i> ICT F1	7,81
<i>Set up</i> ICT F3	0
<i>Set up</i> ICT F2	0,54
<i>Set up</i> ICT T9T11	0,17
<i>Set up</i> ICT T10	0,28
<i>Set up</i> ICTF3	5,52
<i>Set up</i> ICTT9T11	4,98
<i>Set up</i> SMT L1	0
<i>Set up</i> SMT L2	0
<i>Set up</i> SMT L3	0
<i>Set up</i> FVT F1	2,61
<i>Set up</i> FVT F2	6,45
<i>Set up</i> FVT F3	2,14
<i>Set up</i> FVT F4	0
<i>Set up</i> ICT F1	0,86
SMT 11 F3	1,72

Tabela 4.5 - Tempo médio de espera em fila no modelo final (Parte II)

Filas	Modelo final
SMT 11 F2	2,21
SMT 11 F1	2,38
Solda 1	0,01
Solda 2	0,02
TesteFVT F1	5,99
Teste FVT F2	11,36
TesteFVT F3	10,36
TesteFVT F4	1,87
TesteICT F1	6,53
TesteICT T10	5,97
TesteICT T9T11	6,05
TesteICT F3	6,69
Teste ICT F2	9,72

As entidades (placas e componentes) ficam armazenadas em uma fila (FILA IM) até que a linha 1 (L1) ou linha 2 (L2) e os funcionários da inserção manual estejam desocupadas, conforme visto anteriormente no tópico referente à programação do modelo. Assim, as entidades (placas e componentes) ficam armazenadas na Fila IM, até que as linhas e funcionários estejam disponíveis para a montagem. A tabela 4.6 indica o tempo médio de espera em fila no modelo final. O tempo de espera, nessa fila, apresentou um valor, em média, de 122 horas devido a grande utilização da linha de inserção manual, revelada pelo compartilhamento de recursos entre os tipos de placas. Esse alto valor está diretamente ligado ao grande volume de pedidos de placas que chegaram, para serem montadas, conforme resultado dos contadores na tabela 4.7. Como exemplo, pode-se citar os pedidos da placa do tipo 4 (T4) que totalizaram 76 lotes, no tempo simulado. Cabe mencionar que cada lote de produção da T4, contém 1100 placas que necessitam de 105600 componentes para sua montagem.

Tabela 4.6 - Tempo médio de espera em fila no modelo final (Parte III)

	Tempo médio (horas)
Filas	Modelo final
EMBALAGEM	1,52
FILA ACAB	0
Fila IM	122,13
FILA VIB	0
Pré-formatação	23,87
IM10L1	0
IM10L2	0
IM1L1	10,61
IM1L2	11,03
IM2L1	0,01
IM2L2	0,01
IM3L1	0,01
IM3L2	0,01
IM4L1	0
IM4L2	0
IM5L1	0,01
IM5L2	0,01
IM6L1	0,01
IM6L2	0
IM7L1	0
IM7L2	0
IM8L1	0,01
IM8L2	0,01
IM9L1	0
IM9L2	0

Tabela 4.7- Contadores de pedidos do modelo final

Contadores	Modelo final
Contador de pedidos T1	13
Contador de pedidos T2	20
Contador de pedidos T3	12
Contador de pedidos T4	76
Contador de pedidos T5	10
Contador de pedidos T6	3
Contador de pedidos T7	7
Contador de pedidos T8	12
Contador de pedidos T9	10
Contador de pedidos T10	9
Contador de pedidos T11	9
NEntrada	181
Nsaias	179

Por tudo isso, a fila IM revela que o principal gargalo da linha de montagem está na Pré-Formatação e Inserção Manual, o que gera a necessidade da criação de cenários que possibilitem a minimização desse elevado tempo de espera.

A tabela 4.8 apresenta o tempo médio de processamento por tipo de placa na inserção manual. Através desse tempo foi possível verificar o tempo médio de inserção para cada um dos tipos de placas. O cálculo foi feito através da construção da expressão: tempo médio de processamento (Tipo) *componentes por placa (Tipo) / componentes por lote (Tipo). Esse cálculo permitiu a observação que os tempos de inserção, para cada um dos tipos de placa, não representa um gargalo no sistema. Os tempos médios de inserção variaram de 46 (T9) segundos a 1,5 minutos (T4). Essa faixa de valores é aceitável, uma vez que o processamento é manual e exige rapidez.

Tabela 4.8 - Tempo médio de montagem por tipo de placa na Inserção Manual

Tipo de placa	Tempo médio de processamento (horas)	Componentes por placa	Componentes por lote	Tempo de inserção por placa (horas)
T1	4,9247	61	15250	0,0197
T2	4,9008	64	16000	0,0196
T3	4,8439	64	16000	0,0194
T4	29,1920	96	105600	0,0265
T5	17,9427	45	33750	0,0239
T6	17,7118	58	43500	0,0236
T7	17,9238	69	51750	0,0238
T8	17,9832	58	40600	0,0257
T9	8,9929	23	16100	0,0128
T10	9,0029	23	16100	0,0129
T11	8,9948	23	16100	0,0128

Para melhor compreensão dos resultados referentes à simulação, segue uma descrição das siglas utilizadas na modelagem dos recursos.

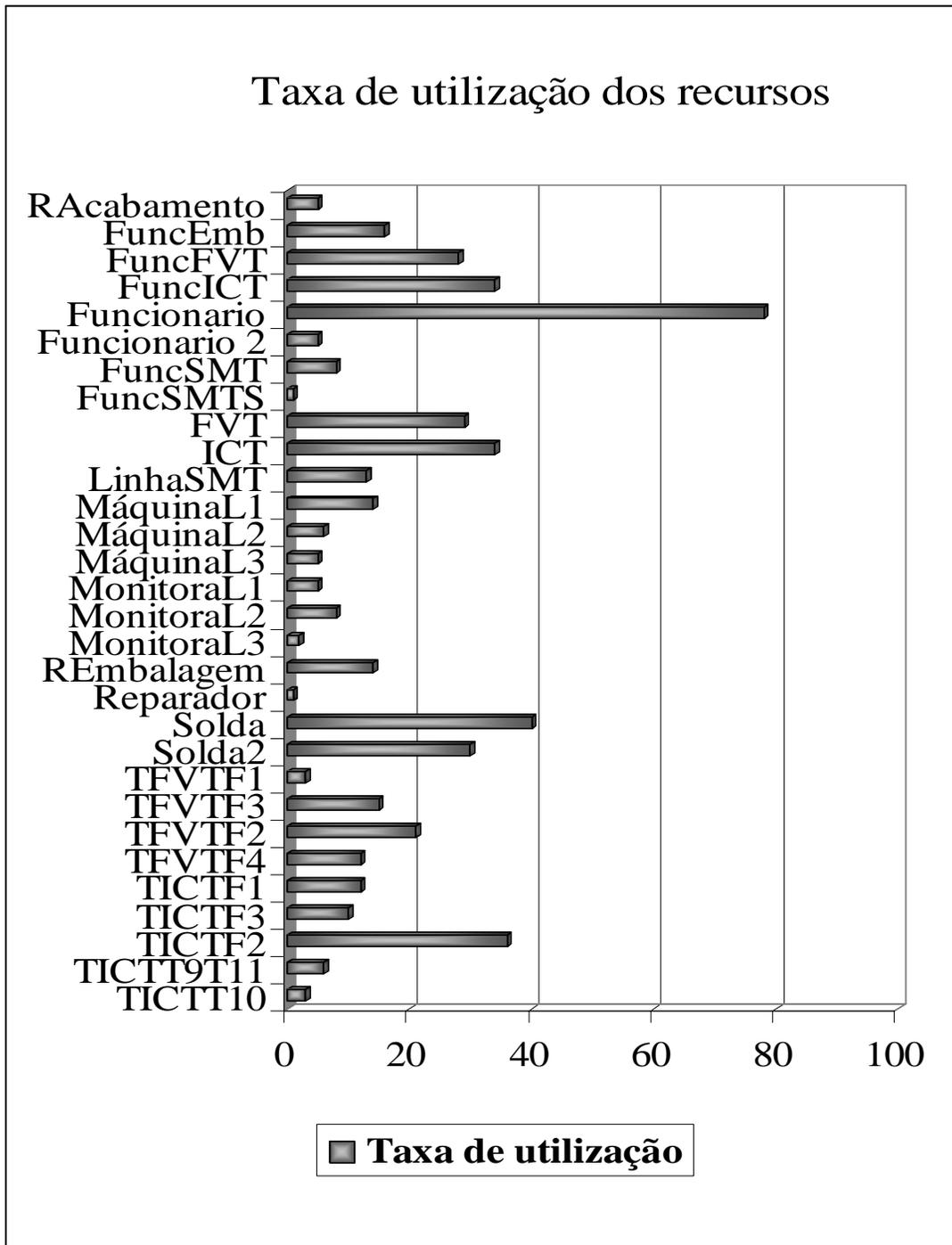
- RAcabamento: Material utilizado para finalizar o produto.
- FuncEmb: funcionário da Embalagem.
- FuncFVT: funcionário do FVT
- FuncICT: funcionário do ICT
- Funcionario: funcionário da Pré-Formatação e Inserção Manual
- Funcionario 2: funcionário do Acabamento
- FuncSMT: funcionário do SMT
- FuncSMTS: funcionário do *set up* do SMT
- FVT: máquina do teste funcional
- ICT: máquina do teste ICT
- MáquinaL1: máquina da linha 1 do SMT
- MáquinaL2: máquina da linha 2 do SMT
- MáquinaL3: máquina da linha 3 do SMT
- MonitoraL1: Monitora da linha 1 do SMT
- MonitoraL2: Monitora da linha 2 do SMT
- MonitoraL3: Monitora da linha 3 do SMT
- REmbalagem: material utilizado para acondicionar as placas
- Reparador: funcionário do Reparo
- Solda 1: máquina de solda onda referente à linha 1
- Solda 2: máquina de solda onda referente à linha 2
- TFVTF1: testador do FVT da família 1 de placas
- TFVTF2: testador do FVT da família 2 de placas
- TFVTF3: testador do FVT da família 3 de placas
- TFVTF4: testador do FVT da família 4 de placas
- TICTF1: testador do ICT da família 1 de placas
- TICTF2: testador do ICT da família 2 de placas
- TICTT9T11: testador do ICT dos tipos 9 e 11 da família 4 de placas
- TICTT10: testador do ICT do tipo 10 da família 4 de placas

Outro importante indicador considerado para análise dos cenários foi a taxa de utilização de recursos. A tabela 4.9 e o gráfico 4.3 trazem a taxa de utilização dos recursos no modelo final. De acordo com o gráfico, a taxa de utilização do recurso funcionário foi em média 78%, uma vez que esse recurso é compartilhado pelos processos de pré-formatação e inserção manual.

Tabela 4.9 - Taxa de utilização dos recursos no modelo final (%)

Recurso	Taxa de utilização	Recurso	Taxa de utilização
RAcabamento	5	MonitoraL2	8
FuncEmb	16	MonitoraL3	2
FuncFVT	28	REmbalagem	14
FuncICT	34	Reparador	1
Funcionário	78	Solda	40
Funcionário 2	5	Solda2	30
FuncSMT	8	TFVTF1	3
FuncSMTS	1	TFVTF3	15
FVT	29	TFVTF2	21
ICT	34	TFVTF4	12
LinhaSMT	13	TICTF1	12
MáquinaL1	14	TICTF3	10
MáquinaL2	6	TICTF2	36
MáquinaL3	5	TICTT9T11	6
MonitoraL1	5	TICTT10	3

Gráfico 4.3 - Taxa de utilização dos recursos no modelo final (%)



A tabela mostra que os funcionários da Embalagem(FuncEmb), ICT (FuncICT), FVT (FuncFVT) estão com utilização média com taxas inferiores a 40% e os funcionários do SMT (FuncSMT), do reparo (Reparador) , funcionário do acabamento (funcionário 2) inferiores a 10%.

A monitora da linha 1 do SMT (MonitoraL1), monitora L2 e monitora L3 , bem como os recursos Linha SMT e máquinas do SMT (Máquina L1, Máquina L2 e Máquina L3) e reparador apresentaram uma baixa utilização. Isso indica ociosidade de recursos, uma vez que o compartilhamento de recursos entre clientes não foi contemplado neste estudo de caso, com a decorrente modelagem do sistema com capacidade inferior a 100%.

O recurso testador do teste ICT da família 2 (TICTF2) e FVT da família 2 (TFVTF2) apresentaram, respectivamente, média de 36 % e 21% de utilização. Isso se confirma pelo fato da família 2, ou seja, o tipo 4 de placas, apresentar uma grande parcela da demanda de produção.

Neste ponto, surge a seguinte questão, o remanejamento de funcionários entre estações ou a contratação de novos funcionários poderia diminuir o tempo de fila, por exemplo, para a inserção manual? Outra pergunta que surge é quais seriam os reflexos dessas diferentes configurações para o balanceamento da linha de montagem?As respostas para essas perguntas puderam ser respondidas com a construção e análise dos cenários expostos a seguir.

Os resultados obtidos através da simulação computacional foram devidamente registrados com elaboração de relatórios. Estes contêm o modelo conceitual em sua íntegra e os resultados de todas as simulações e testes efetuados. Além disso, o modelo computacional final e seus cenários foram armazenados e documentados.

Com base nas análises dos gargalos apontados pelo modelo final e considerações sobre as incertezas referentes à linha de montagem, como quantidade mínima de componentes para pré-formatação, foram construídos os cenários da presente dissertação.

Para construção dos cenários de 1 a 6, foi considerada a chegada de placas e componentes, a pré-formatação e a inserção manual. Os cenários de 1 a 6 foram construídos para avaliação da quantidade mínima de componentes pré-formatados para o início da inserção manual. Este parâmetro não pôde ser definido quando do fechamento do modelo por falta de dados históricos que o revelassem. Assim, foi necessário simular cenários para sua determinação no modelo.

Os cenários de 1 a 6 representam variações no parâmetro do número mínimo de componentes a serem pré-formatados. Esses cenários são especialmente importantes para a verificação do impacto da pré-formatação de componentes na produtividade na inserção manual. Uma vez que o processamento na pré-formatação demanda uma parcela significativa do tempo total de montagem das placas, conforme resultados expressos pelo modelo. Com a determinação desse parâmetro, seu valor foi inserido no modelo. A partir do modelo resultante (final), passou-se à construção dos demais cenários.

Cenário 1- Inserção manual com 50% dos componentes pré-formatados.

Cenário 2- Inserção manual com 60% dos componentes pré-formatados.

Cenário 3- Inserção manual com 70% dos componentes pré-formatados.

Cenário 4- Inserção manual com 80% dos componentes pré-formatados.

Cenário 5- Inserção manual com 90% dos componentes pré-formatados.

Cenário 6- Inserção manual com 100% dos componentes pré-formatados.

Cenário 7- Operações com *set up* zero.

Neste cenário foi observado como o modelo se comportaria diante das seguintes condições:

- tempos de processamento com valor 0 para as operações de *set up* de material, *set up* de máquinas do SMT, de testadores do ICT e FVT;
- pré-formatação de 100% dos componentes dos lotes para a montagem na Inserção Manual.

A importância desse cenário reside no fato de que operações com *set up* zero proporcionam maior flexibilidade ao tomador de decisão, com a conseqüente possibilidade de aumento do tamanho dos lotes, montagem de maior variedade de placas e geração de respostas mais rápidas ao mercado.

Cenário 8- Retirada de seis funcionários do Acabamento e acréscimo na Pré-formatação e Inserção manual. Nesse cenário, foi considerada a retirada de seis funcionários do Acabamento e o acréscimo dos mesmos ao quadro de funcionários da Pré-formatação e da Inserção.

Cenário 9- Retirada de dois funcionários do Acabamento, de dois do SMT e acréscimo desses quatro funcionários na Pré-formatação e Inserção Manual. Assim, o número de funcionários do Acabamento passaria para 12, do SMT para 7 e da Inserção Manual para 16.

Cenário 10- Retirada de funcionários do Reparo e acréscimo destes na Pré-formatação e Inserção Manual. Nesse cenário, foi modelada a configuração de 12 funcionários no Reparo e 14 na Pré-formatação e Inserção Manual.

A modelagem dos cenários 8, 9 e 10 foi possível mediante a alteração dos valores mencionados em *scheduling* criado para controle do fluxo de funcionários. Esses cenários se justificam pela necessidade de avaliação do impacto da variação dos funcionários na produtividade da inserção manual e no resultado expresso pelo tempo total de produção. e se essas alterações acarretariam maior rapidez na inserção manual, diminuição de filas e do estoque em processo e, por fim, minimização do tempo total de montagem. Além disso, através desses cenários torna-se possível verificar se, as estações de acabamento e reparo não são causas do desbalanceamento da linha de produção. A escolha da retirada de funcionários do acabamento e reparo e conseqüente alocação na Inserção Manual se baseou nas suas baixas taxas de utilização e pequenas filas de espera para esses processos.

Vários cenários foram testados, empregando a alocação desses funcionários, sendo que os que apresentaram melhores resultados, serão discutidos no presente capítulo. O quadro 4.1 traz a relação dos recursos (funcionários) utilizados e os processos em que estão inseridos na modelagem. A tabela 4.10 indica a capacidade desses recursos no sistema real (modelo final) e a capacidade nos cenários, indicando assim, a variação desses recursos por cenário.

Quadro 4.1 - Recursos dos processos da modelagem

Processos	Recursos
Acabamento	funcionário2
Embalagem	FuncEmb
Reparo	Reparador
SMT	funcSMT
Set up do SMT	funcSMTS
Pré-formatação / Inserção Manual	funcionário
ICT	FuncICT
FVT	FuncFVT

Tabela 4.10 - Variação de recursos por cenário

Modelos	Recursos							
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
Modelo final	16	16	12	8	1	2	2	2
Cenário 7*	16	16	12	8	1	2	2	2
Cenário 8	10	16	18	8	1	2	2	2
Cenário 9	14	16	16	6	1	2	2	2
Cenário 10	16	12	14	8	1	2	2	2

(1) funcionário 2

(2) Reparador

(3) funcionário

(4) FuncSMT

(5) FuncSMT

(6) FuncEmb

(7) FuncICT

(8) FuncFVT

*No cenário 7, não foram consideradas mudanças na alocação de funcionários.

4.1.7 Análise de resultados, elaboração de relatórios e documentação do programa

De posse dos resultados obtidos através do modelo final, observações e análises foram realizadas com o intuito de verificar os pontos de desbalanceamento da linha de montagem (gargalos).

A simulação possibilita a criação de modelos, a partir de um sistema real, gerando resultados que poderão trazer indicações sobre o comportamento do sistema. Feita essa consideração, é iniciada a explanação acerca da análise dos cenários. Essa análise no que se refere aos cenários 1, 2, 3, 4, 5 e 6 foi feita conjuntamente, uma vez que os mesmos representam variações com mesmo objetivo, o de avaliar o impacto da pré-formatação no tempo total de produção e conseqüentemente o problema de balanceamento de linha de montagem. Sendo assim, uma discussão concernente à esses cenários encontra-se a seguir. A relação da porcentagem de componentes por tipo de placa considerando 50% no cenário 1, 60% no cenário 2, 70% no cenário 3, 80% no cenário 4, 90% no cenário 5 e 100% no cenário 6 está exposto na tabela 4.11.

O total de componentes por lote foi obtido a partir da formula exposta a seguir. seguinte fórmula: $\text{Total (Tipo)} = \text{Componentes (Tipo)} * \text{Tamanho do Lote (Tipo)}$. Com isso o número de componentes de cada um dos cenários pôde ser calculado:

- Número de componentes do Cenário 1 = $0.5 * \text{Total (Tipo)}$.
- Número de componentes do Cenário 2 = $0.6 * \text{Total (Tipo)}$.
- Número de componentes do Cenário 3 = $0.7 * \text{Total (Tipo)}$.
- Número de componentes do Cenário 4 = $0.8 * \text{Total (Tipo)}$.
- Número de componentes do Cenário 5 = $0.9 * \text{Total (Tipo)}$.
- Número de componentes do Cenário 6 = $1 * \text{Total (Tipo)}$.

A decisão da quantidade mínima de componentes a serem pré-formatados por lote de cada placa é baseada na experiência dos montadores, não existindo um valor pré-determinado, conforme observações e entrevistas realizadas através do estudo de caso. O conhecimento do número mínimo de componentes a ser pré-formatado é crucial para o balanceamento da linha de montagem, uma vez que um lote das placas é composto por centenas de placas, possuindo cada uma destas dezenas de componentes que necessitam de montagem na Inserção Manual.

Tabela 4.11 - Número de componentes considerados por cenário

Parâmetros do modelo				Número de componentes					
Tipo	Componentes	Lote	Total (Tipo)	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5	Cenário 6
1	61	250	15250	7625	9150	10675	12200	13725	15250
2	64	250	16000	8000	9600	11200	12800	14400	16000
3	64	250	16000	8000	9600	11200	12800	14400	16000
4	96	1100	105600	52800	63360	73920	84480	95040	105600
5	45	750	33750	16875	20250	23625	27000	30375	33750
6	58	750	43500	21750	26100	30450	34800	39150	43500
7	69	750	51750	25875	31050	36225	41400	46575	51750
8	58	700	40600	20300	24360	28420	32480	36540	40600
9	23	700	16100	8050	9660	11270	12880	14490	16100
10	23	700	16100	8050	9660	11270	12880	14490	16100
11	23	700	16100	8050	9660	11270	12880	14490	16100

(1) Número de componentes por tipo de placa

(2) Lote considerado por tipo de placa

(3) Total de componentes por lote e por tipo de placa =componentes*lote

O valor mínimo e máximo bem como a média dos tempos de inserção manual na linha 1 e na linha 2 (TempIML1 e TempIML2) se encontram na tabela 4.12. De acordo com a tabela, pode-se observar que os cenários 3 e 4 apresentaram o tempo de inserção manual na linha 1, em média, de aproximadamente 7,9 horas, sendo estes os menores valores obtidos entre os cenários de pré-formatação (cenários 1, 2, 3, 4, 5 e 6). Para a linha 2, os cenários 3 e 4 apresentaram um tempo de inserção, respectivamente, de 34,12 horas e 26,16 horas. O resultado referente ao tempo médio de inserção nas linhas 1 e 2 do cenário 2 apresentou uma melhoria com relação ao cenário 1.

Tabela 4.12 - Tempos de Inserção Manual nas linhas 1 e 2 (horas)

	Cenário 1			Cenário 2			Cenário 3		
	Média	Mínimo	Máximo	Média	Mínimo	Máximo	Média	Mínimo	Máximo
TempIML1	46,0182	4,1834	120,71	9,4321	4,2712	14,5929	7,9250	4,2237	11,6264
TempIML2	46,5102	4,1575	85,5834	34,6287	4,1407	72,2955	34,1195	4,1225	61,5533
	Cenário 4			Cenário 5			Cenário 6		
	Média	Mínimo	Máximo	Média	Mínimo	Máximo	Média	Mínimo	Máximo
TempIML1	7,9250	4,2237	11,6264	65,8681	4,1930	135,8900	64,9550	4,1081	133,5500
TempIML2	26,1572	4,1777	49,9222	20,9212	4,1411	37,6326	18,5756	4,1709	28,7460

Os cenários 5 e 6 apresentaram um melhor desempenho com relação aos cenários anteriores no que se refere à inserção na linha 2, apresentando médias de, aproximadamente, 21 horas e 19 horas. Os cenários 1 e 2 apresentaram os piores resultados para a linha 2, aproximadamente 47 horas e 35 horas. O cenário 1 apresentou o pior desempenho com relação ao tempo de inserção manual em ambas as linhas.

Os resultados da tabela 4.13 indicam que o cenário 1 apresentou a maior quantidade de placas estocadas durante o processo (1015). O cenário 4 apresentou o melhor resultado, no tocante a estoque em processo, 605 placas. Conforme dito anteriormente, este cenário apresentou um tempo de inserção manual para a linha 1 reduzido. Sendo assim, o cenário 4 continua sendo o melhor resultado encontrado.

Tabela 4.13 - Estoque de placas em processo dos cenários 1-6

Cenários	WIP (placas)
Cenário 1	1015
Cenário 2	844
Cenário 3	773
Cenário 4	605
Cenário 5	620
Cenário 6	949

Considerando os indicadores de estoque em processo de placas e tempo de Inserção Manual (TempIML1 e TempIML2), o cenário 4 com 80% dos componentes pré-formatados para o início da Inserção Manual foi considerado como o que obteve o melhor resultado de modo geral. Assim, com 80% dos componentes pré-formatados, ocorre menor quantidade de estoque em processo e menos paradas de linha.

Na análise dos cenários restantes, foi considerado, inicialmente, o indicador estoque de produtos em processo (*wip*) de placas. Cabe ressaltar, que os valores referentes a número de placas e componentes foram arredondados a título de contemplação de números inteiros. A tabela 4.14 fornece os dados referentes ao estoque de placas em processo. No modelo final, o estoque em processo foi de, aproximadamente, 3013 placas. Isso demonstra a necessidade de ações para minimização dos valores para esse indicador.

O cenário 7 apresentou uma diminuição de 502 placas no estoque em processo. Isto ocorreu, provavelmente porque com o *set up* zero, a montagem foi feita com maior rapidez em estações como o ICT e o FVT. O cenário 8 apresentou aumento no *wip* de placas. O resultado do cenário 9 indica que o mesmo quadruplicou o *wip* de placas. Isso o torna inviável, pois o estoque em processo das placas representa um investimento de capital empatado muito alto. Além disso, as placas de circuito impresso possuem alto grau de obsolescência. Por fim, o cenário 10 apresentou grande melhoria, uma vez que houve uma diminuição de, aproximadamente, 241 placas no estoque em processo.

Tabela 4.14- Estoque de placas em processo no modelo final e cenários 7-10

Modelos	<i>Wip</i> de placas
Modelo final	3.013
Cenário 7	2.511
Cenário 8	4.257
Cenário 9	12.245
Cenário 10	2.772

O indicador tempo médio de fila de espera revelou-se como de grande valia para a análise dos cenários, mais precisamente no que se refere à Fila IM. No cenário 7 (tabela 4.15), a fila IM que armazena as entidades até que as linhas da Inserção Manual estejam desocupadas, aumentou em 9,5 horas. Uma das causas desse resultado é que a falta de *set up* do SMT ocasionou um aumento do fluxo de placas encaminhadas à inserção manual em um tempo menor. Outra causa possível, a pré-formatação de 100% dos componentes, concomitantemente à situação anterior. Conforme análise anterior dos resultados do cenário 6, a pré-formatação de todos os componentes do lote antes do início da Inserção Manual não se mostra como uma configuração interessante para a capacidade do sistema retratada.

Tabela 4.15 - Tempo médio de espera em filas no modelo final e cenários 7-8 (I)

Filas	Tempo médio de espera em fila (horas)		
	Modelo final	Cenário 7	Cenário 8
EMBALAGEM	1,52	1,62	2,25
FILA ACAB	0	0	0
Fila IM	122,13	131,63	68,16
FILA VIB	0	0	0
Pré-formatação	23,87	25,17	26,66
Reparo	0	0,01	0

No cenário 8, o aumento no número de funcionários na IM resultou em uma diminuição de, aproximadamente, 54 horas na Fila IM.

A tabela 4.16 evidencia o tempo médio de espera em fila do modelo final comparado aos cenários 9 e 10. O cenário 9 gerou um aumento de aproximadamente 40 horas comparado ao modelo final. No cenário 10, a retirada de funcionários do reparo, contemplada por esse cenário, trouxe pequeno aumento na fila de espera para esse processo. O acréscimo destes funcionários na Inserção Manual trouxe alterações significativas na Fila IM, com diminuição de aproximadamente 29 horas.

Tabela 4.16 - Tempo médio de espera em filas no modelo final e cenários 9-10 (II)

	Tempo médio de espera em fila (horas)		
Filas	Modelo final	Cenário 9	Cenário 10
EMBALAGEM	1,52	1,12	1,57
FILA ACAB	0,00	0,00	0,00
Fila IM	122,13	162,38	93,35
Pré-formatação	23,87	27,4	22,63
Reparo	0,00	0,00	0,54

A tabela 4.17 destaca a comparação do tempo médio de espera na fila de Inserção Manual entre cenários e o modelo final. Por fim, a tabela 4.18 traz o tempo total de montagem dos lotes no modelo final e cenários 7, 8, 9 e 10. Este tempo total de montagem foi expresso através do Contador TempTot.

O cenário 9, apresentou o valor de 197, 17 horas para o tempo total de montagem, ou seja, um aumento em torno de 25 horas comparado ao modelo final. O cenário 10 indicou uma melhoria de, aproximadamente, 29 horas na Inserção Manual e de 10 horas no tempo total de montagem dos lotes.

Tabela 4.17 - Tempo médio de espera na fila IM

	Tempo médio de espera em fila (horas)				
Fila	Modelo final	Cenário 7	Cenário 8	Cenário 9	Cenário 10
Fila IM	122,13	131,63	68,16	162,38	93,35

Tabela 4.18 - Tempo médio total de montagem dos lotes nos cenários 7-10

	Tempo total médio de montagem dos lotes (horas)				
Contador	Modelo final	Cenário 7	Cenário 8	Cenário 9	Cenário 10
TempTot	172,54	182,16	118,57	197,17	162,47

A partir das interpretações dos dados extraídos dos resultados da modelagem, respostas para as perguntas da dissertação puderam ser obtidas, estando as mesmas dispostas a seguir.

A causa principal do desbalanceamento da linha de montagem encontra-se na Pré-Formatação e na Inserção Manual. Uma das evidências disso é que o tempo médio de espera em fila para liberação das linhas da Inserção Manual foi de aproximadamente 122 horas, ou seja, 5 dias. Outra indicação desse fato foi a realização dos cenários de 1 a 6. Os cenários 1, 2, 3, 4, 5 e 6 focaram no mínimo de componentes da Pré-Formatação para a Inserção Manual.

Além desses fatos, a modelagem do cenário 7 trouxe a indicação de que o *set up* zero e a Pré-formatação 100% não resultaram, em minimização do tempo total de montagem. Isso pode ser explicado, também, pela espera pela liberação de linha de montagem na Inserção Manual pelo grande acúmulo de placas associado à alta utilização do recurso funcionário.

Através da consideração dos resultados obtidos com o indicador de desempenho estoque em processo, o cenário 5 (90% dos componentes pré-formatados) foi o que obteve melhor resultado, mas indicou um tempo de inserção manual para a linha 2 elevado. Os cenários 1 (50% dos componentes pré-formatados) e 6 (100% dos componentes pré-formatados) apresentaram o menor tempo de inserção manual na linha 2, mas altos tempos de inserção manual para a linha 1, em torno de 186 horas. Além disso, o cenário 1 apresentou um elevado estoque de placas em processo (1015).

O resultado do cenário 4, ou seja, 80% dos componentes pré-formatados, trouxe uma indicação para o mínimo de componentes deveria ser pré-formatado antes do início da Inserção Manual de modo a minimizar o tempo total de montagem. Esse resultado foi, posteriormente utilizado para modelagem do modelo final.

Pelo exposto anteriormente, percebe-se que os cenários apresentaram diferentes configurações na tentativa de buscar a solução ou a minimização para o problema de balanceamento, considerando funcionários com mesmas habilidades. Os cenários 4, 8 e 10 apresentaram os melhores resultados no que se refere à análise conjunta dos indicadores de desempenho.

Cabem as ressalvas a seguir, ao final desse capítulo da presente dissertação. Um estudo de simulação possibilita várias interpretações diante de um mesmo fenômeno. As observações e conclusões expostas representam apenas uma parte das análises que poderiam ser feitas a partir de um objeto de estudo complexo como a linha de montagem em questão.

Além disso, a escolha dos indicadores de desempenho e cenários a serem modelados foi feita mediante observações, análises do sistema real, do modelo final e consulta à literatura especializada.

5 CONCLUSÕES, RECOMENDAÇÕES E TRABALHOS FUTUROS

As ferramentas de apoio a tomada de decisão, como a simulação computacional, são imprescindíveis para o auxílio em linhas de montagem complexas que demandem variabilidade e aleatoriedade e que possuem produtos e equipamentos com alto valor agregado como é o caso da manufatura eletrônica.

Essa dissertação propiciou uma discussão do problema de balanceamento de linha de montagem e apresentou uma proposta de sua solução através da utilização da simulação computacional. A revisão de literatura revelou algumas características da produção de placas e apontou possíveis causas para o problema de balanceamento de linha em empresas de serviços de manufatura, além de métodos para sua solução.

Essas características foram confirmadas quando da construção do diagrama espinha de peixe utilizado para apontamento de evidências no ambiente de uma linha de montagem acerca do problema de balanceamento de linha e para busca de evidências que justificassem o estudo de caso e a utilização da simulação computacional.

O modelo de simulação apresentado pode ser utilizado como ferramenta de apoio à decisão para analisar e avaliar o desempenho de uma linha de montagem de placas de circuito impresso.

Após análises do modelo final, observou-se que o tempo médio de fila de espera para liberação das linhas da Inserção Manual estava elevado em torno de 122 horas e que o tempo de fila para alguns processos de *set up* poderia ser diminuído. Percebeu-se que o tempo total de montagem das placas poderia ser minimizado. Além disto, como a modelagem não contemplou a utilização da capacidade total instalada para montagem, pela consideração de somente um cliente da EMS, portanto, alguns recursos apresentaram ociosidade.

Através dessas análises, concluiu-se que os pontos de gargalo na modelagem são a Pré-Formatação e a Inserção Manual. Alterações foram realizadas em algumas entradas do modelo de modo a estudar diferentes configurações da linha de montagem, na tentativa de minimizar o tempo de espera para a Inserção Manual e do tempo total de montagem, ou seja, balancear a linha de produção. Os cenários contemplaram variações do mínimo de componentes a serem pré-formatados antes da Inserção Manual, bem como o remanejamento de recursos (funcionários) entre estações de trabalho, diminuição de recurso (funcionário), além da consideração de operações com *set up* zero e a 100% dos componentes pré-formatados para a Inserção Manual. .

Uma ressalva interessante a ser feita é que para construção do modelo final, o número mínimo de componentes a ser pré-formatado era, até então, um parâmetro desconhecido. Assim, após sua construção, os cenários de 1 a 6 foram modelados e testados. Do resultado dessa análise, obteve-se o valor desse parâmetro para cada tipo de placa a ser considerado como entrada do modelo final. Este modelo foi testado e os demais cenários foram construídos a partir de sua análise com o parâmetro anterior. Portanto, os resultados dos cenários de 1-6 foram comparados entre si para obtenção do parâmetro, não sendo comparado com os resultados dos cenários restantes, nem tampouco com o modelo final. As outras comparações foram realizadas entre modelo final e dos demais cenários (7-10).

Os indicadores de desempenho utilizados foram tempo médio de inserção manual, estoque médio em processo, taxa média de utilização de recursos e tempo médio de fila de espera. Esses indicadores foram considerados conjuntamente na análise das alterações no comportamento do modelo do sistema.

Assim, considerando os indicadores estoque em processo de placas e tempo de Inserção Manual (TempIML1 e TempIML2), o cenário 4 com 80% dos componentes pré-formatados antes do início da montagem na inserção manual foi considerado como o que obteve o melhor resultado de modo geral, fornecendo esse parâmetro como entrada para o modelo final.

O cenário 8 apresentou um tempo total médio de montagem em torno de 119 horas e 68 horas para a fila de Inserção Manual, trazendo um ganho, respectivamente de 31% e 45%. O cenário 10 apresentou uma diminuição de, aproximadamente, 240 placas e uma melhoria de, aproximadamente, 29 horas na fila da Inserção Manual. Assim, o cenário 10 possibilitou a minimização do tempo de montagem pela melhoria da utilização de recursos na Inserção com economia de dois funcionários do SMT, retirados do reparo.

Pelo exposto anteriormente, percebe-se que os cenários apresentaram diferentes configurações na tentativa de buscar a solução ou a minimização para o problema de balanceamento, considerando funcionários com mesmas habilidades. Os cenários 4, 8 e 10 apresentaram os melhores resultados no que se refere à análise conjunta dos indicadores de desempenho.

Outra conclusão que pôde ser extraída da modelagem da linha de montagem foi a de que nem sempre, a contratação de novos funcionários ou a aquisição de novos equipamentos é a solução para os problemas operacionais. Por vezes, a verificação da ociosidade de recursos e o remanejamento de funcionários, pode trazer resultados também significativos.

A simulação pode ser utilizada como ferramenta de apoio à decisão para uma solução eficiente do problema de balanceamento de linha de montagem em uma EMS. Para que a simulação seja ainda mais aplicável, o modelo deve ser modificado com frequência de acordo com as constantes alterações vivenciadas na linha de montagem de empresas de serviço de manufatura eletrônica.

Além disso, a entrada de dados de modo a facilitar a contemplação desse ambiente variável e flexível deveria ser feita através do teclado ou arquivo de modo a facilitar a execução do processo de simulação. Isso possibilitaria que cenários fossem estudados através do modelo sem que seja necessário modificá-lo diretamente.

Cabem as ressalvas a seguir, ao final desse capítulo da presente dissertação. Um estudo de simulação possibilita várias interpretações diante de um mesmo fenômeno. As observações e conclusões expostas representam apenas uma parte das análises que poderiam ser feitas a partir de um objeto de estudo complexo como a linha de montagem em questão. Além disso, a escolha dos indicadores de desempenho e cenários a serem modelados foi feita mediante observações, análises do sistema real, do modelo final e consulta à literatura especializada.

5.1 Sugestões de trabalhos futuros

A partir da presente pesquisa, vários trabalhos poderiam ser realizados com o intuito de enriquecimento da teoria e da prática, tais como:

- a consideração de inserção de novos produtos;
- inserção de novas linhas;
- estudo de habilidade de funcionários;
- utilização de um maior número de clientes para contemplação do compartilhamento de recursos;
- utilização da animação dos modelos construídos para efeito de validação dos resultados;
- agregação ou desagregação de operações;
- estudo comparativo da eficiência da modelagem por simulação computacional com relação à modelos heurísticos, exatos e analíticos.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDERSSON, M.; OLSSON, G. *A Simulation based decision support approach for operational capacity planning in a customer order driven assembly line*. Proceedings of the 1998 Winter Simulation Conference, D.J. Medeiros, E.F. Watson, J.S. Carson, M.S. Manivannan (eds), 1998, pp. 935-941.

BANKS, J. *Introduction to Simulation*. Proceedings of the 1999 Winter Simulation Conference, P. A. Farrington, H. B. Nembhard, D. T. Sturrock, G. W. Evans (eds), 1999.

BAYBARS, I. *A survey of exact algorithms for the simple assembly line balancing problem*. Management Science, 1986, 32(8):909–932.

BECKER, C.; SCHOLL, A. *A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing*. European Journal of Operational Research, 2004, 22p.: no prelo.

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

BOUDEVIN, C.; GOURGAND, M. ; NORRE, S. *Methodes D'optimisation Pour Le Probleme De L'equilibrage De Lignes D'assemblage*. 4^a Conférence Francophone de MODélisation et SIMulation “Organisation et Conduite d’Activités dans l’Industrie et les Services”. MOSIM’03 , Toulouse (France), 23 a 25 abril 2003.

CARSON, J. S. *Introduction to modeling and simulation*. In: *Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference*, S. Chick, P. J. Sánchez, D. Ferrin, D. J. Morrice (eds), 2003, pp. 7-13.

CENTENO, M. A. An introduction to simulation modeling. In: *Proceedings of the 1996 Winter Simulation Conference*, J. M. Charnes, D. J. Morrice, D. T. Brunner, J. J. Swan (eds.), 1996, pp.15-22.

CENTENO, M. A.; CARRILLO, M. Challenges of introducing simulation as a decision making tool. In: *Proceedings of the 2001 Winter Simulation Conference*, B. A. Peters, J. S. Smith, D. J. Medeiros, M. W. Rohrer (eds), 2001, pp. 17-21.

CHAKRAVARTY, A. K. *Line Balancing With Task Learning Effects*. IIE Transactions; 1998, 20, 2, pp. 186-193.

CLARK, G. M. *Introduction to manufacturing applications*. In: *Proceedings of the 1995 Winter Simulation Conference*, 1995.

DECKRO, R. F. *Balancing Cycle Time and Workstations*. IIE Transactions, 1989, vol. 21, n.2, pp. 106-111.

DEMERCI, E. *Simulation Modeling and Analysis of a Port Investment*. Simulation, 2003, vol. 79, issue 2, pp. 94-105.

DRISCOLL, J.; THILAKAWARDANA, D. *The definition of assembly line balancing difficulty and evaluation of balance solution quality*. Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 2001, v. 17, pp. 81-86.

FLESZAR, K. ; HINDI, K. S. *An enumerative heuristic and reduction methods for the assembly line balancing problem*. European Journal of Operational Research, 2003, pp. 606-620.

GOGG, T.J.; MOTT, J. R. A. Introduction to Simulation. In: *Proceedings of the 1993 Winter Simulation Conference*, G. W. Evans, Mollaghasemi, E.C. Russell, W.E. Biles (eds.), 1993.

GONÇALVES, J. F.; ALMEIDA, J. R. *A Hybrid Genetic Algorithm for Assembly Line Balancing*. Journal of Heuristics, 2002, 8: 629–642.

GHOSH S; GAGNON, R. J. *A comprehensive literature review and analysis of the design, balancing and scheduling of assembly systems*. International Journal of Production Research, 1989, 27(4):637–670.

HABCHI, G.; LABRUNE, Ch. *Study of lot sizes on job shop systems performance using simulation*. Simulation Practice and Theory 2, 1995, pp. 277-289.

HABERLE, K. R; GRAVES, R. J. *Cycle Time Estimation for Printed Circuit Board Assemblies*. IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing, 2001, vol. 24, n. 3, pp. 188.

HOFFMANN, T. R. *Assembly line balancing with a precedence matrix*. Management Science, vol. 9, 1963, pp. 551-562.

HOFFMANN, T. R. *Eureka: A Hybrid System for Assembly Line Balancing*. Management Science; 1992; 38, 1; pp. 39-47

HUNT, I.; JONES, R. *Winning new product business in the contract electronics industry*. International Journal of Operations & Production Management, 1998, vol. 18, iss. 2, pp. 130-142.

INGALLS, R. G. Introduction to Simulation. In: *Proceedings of the 2001 Winter Simulation Conference*, B. A. Peters, J. S. Smith, D. J. Medeiros, M. W. Rohrer (eds.), 2001, pp. 7-16.

JOHNSON, R.V. *Assembly Line Balancing: a branch and bound algorithm and computational comparisons*. International Journal of Production Research, 1981, v.19, n.3.

JOSEPH, L.A.; WATT, J. T.; WIGGLESWORTH, N. Modeling and analysis of a new product development in electronic sub-assembly manufacturing. In: *Proceedings of the 1990 Winter Simulation Conference*, pp. 899-903.

KELTON, W. D. Simulation Analysis. In: *Proceedings of the 1983 Winter Simulation Conference*, 1983, pp. 159-168.

KUNG; H-K, CHANGCHIT, C. *A just-in-time simulation model of a PCB assembly line: a modified Jit approach*. *Computers Ind. Engng*, 1989, v. 20, n. 1, p. 17-26.

LAW, A. M.; McCOMAS, M. G. *Pitfalls in The Simulation of Manufacturing Systems*. In: *Proceedings of the 1986 Winter Simulation Conference*, J. Wilson, J. Henriksen, S. Roberts (eds.), 1986, pp. 539-542.

LAW, A. M.; McCOMAS, M. G. *Simulation of Manufacturing Systems*. In: *Proceedings of the 1998 Winter Simulation Conference*, p. D.J. Medeiros, E.F. Watson, J.S. Carson and M.S. Manivannan (eds.), 1998.

LAW, A. M.; McCOMAS, M. G. *How to Build Valid and Credible Simulation Models*. In: *Proceedings of the 2001 Winter Simulation Conference*, B. A. Peters, J. S. Smith, D. J. Medeiros, and M. W. Rohrer (eds.), 2001, pp. 22-29.

LAW, A. M. ; KELTON, W. D. *Simulation Modeling & Analysis*. McGraw-Hill Books Co., NY, Second Edition, 1991.

MACÍAS, E. J. ; DE LA PARTE, M. P. (2004). *Simulation and Optimization of Logistic and Production Systems Using Discrete and Continuous Petri Nets*. *Simulation*, v. 80, issue 3, p- 143-152.

MARCONI, M. A; LAKATOS, E. M. *Fundamentos da Metodologia Científica*. São Paulo: Atlas, 2003, 5ed.

MARKOVITCH, N. A.; PROFOZICH, D. M. *Arena Software Tutorial*. In: Proceedings of the 1996 Winter Simulation, Conference, 1996, pp. 437-440.

MILTENBURG, G. J.;WIJNGAARD, J. *The U-Line Problem*. Management Science, 1994, v. 40, n. 10, pp. 1378-1388.

MUSSELMAN, K. J. *Guidelines for Simulation Project Success*. In: Proceedings of the 1994 Winter Simulation Conference, J. D. Tew, S. Manivannan, D. A. Sadowski, A. F. Seila. (eds.), 1994, pp. 88-95.

NANCE, R. E. *A Tutorial View of Simulation Model Development*. In: Proceedings of the 1983 Winter Simulation Conference, S. Roberts, J. Banks, B. Schmeiser (eds.),1983, pp. 325-329.

NANCE, R. E. *A history of discrete event simulation programming languagens*. ACM SIGPLAN Notices, 1993, v. 28, n.3.

NANCE, R. E.; SARGENT, R. G. *Perspectives on the evolution of simulation*. Operations Research, 2002, v. 50, n.1, pp. 161-172.

PAUL, R. J. *Activity Cycle Diagrams and the Three Phase Method*. In: Proceedings of the 1993 Winter Simulation Conference, G. W. Evans, M. Mollaghasemi, E.C. Russell, W.E. Biles (eds.), 1993, pp. 123-131.

PETERSON, J. L. . *Petri Nets*. Computing Surveys, 1977, v. 9, n. 3, pp. 223-252.

PIDD, M. *Object orientation and three phase simulation*. In: Proceedings of the 1992 Winter Simulation Conference, J. J. Swain, D. Goldman, R. C. Crain, J. R. Wilson (eds.), 1992.

PIDD, M. An Introduction to Computer Simulation. In: *Proceedings of the 1994 Winter Simulation Conference*, J. D. Tew, S. Manivannan, D. A. Sadowski, A. F. Seila (eds.), 1994, pp. 7-14.

PIDD, M. *Modelagem Empresarial: Ferramentas para Tomada de Decisão*. Porto Alegre: Artes Médicas Sul Ltda-Bookman, 1998.

PONNAMBALAM. S. G.; ARAVINDAM, P.; NAIDU, G. M. *A comparative evaluation of assembly line heuristics*. Int. J. Adv. Manuf. Technol, 1999, v. 15, pp. 577-586.

RACHAMADUGU, R. *Assembly Line Design with Incompatible Task Assignments*. Journal of Operations Management, 1991, v. 10, No. 4, pp. 469-487.

RAO, S. S.; GUNASEKARAN, A.; GOYAL, S.K.; MARTIKAINEN, T. *Waiting line model applications in manufacturing*. Int. J. Production Economics, 1998, 54, 1-28.

REKIEK, B; DOLGUI, A.; DELCHAMBRE, A.; BRATCU. A. *State of art of optimization methods for assembly line design*. Annual Reviews in Control, 2002, vol. 26, p. 163-174.

ROWLEY, J. *Using Case Studies in Research*. Management Research News, 2002, vol 25, n. 1.

SALVESON, M.E. *The assembly line balancing problem*. J. Ind. Engng., 1995, 6 (3), pp. 18-25.

SARGENT, R. G. *A Tutorial on Validation and Verification of Simulation Models*. In: Proceedings of the 1988 Winter Simulation Conference. M. Abrams, P. Haigh, and J. Comfort (eds.), 1988.

SAVSAR, M. *Simulation analysis of a pull-push system for an electronic assembly line*. International Journal Production Economics, 1997, 51, 205-214.

SCHMIDT, J. W. *Introduction Systems Analysis, Modeling And Simulation*. In: Proceedings of the 1985 Winter Simulation Conference. D. Cantz, C. Blais, S. Solomon (eds.), 1985, pp 3-14.

SCHOLL, A.; BECKER, C. *State-of-the-art exact and heuristic solution procedures for simple assembly line balancing*. European Journal of Operational Research, 2004, 28p: no prelo.

SHANNON, R. E. *Introduction To The Art And Science Of Simulation*. In: Proceedings of the 1998 Winter Simulation Conference, D.J. Medeiros, E.F. Watson, J.S. Carson, M.S. Manivannan (eds), 1998, pp. 7-14.

SEILA, A. F. *Introduction To Simulation*. In: Proceedings of the 1995 Winter Simulation Conference, C. Alexopoulos, K. Kang, W. R. Lilegdon, D. Goldsman (eds.), 1995, pp 7-15.

SHEVELL, S. F. *Simulation and analysis of a circuit board manufacturing facility*. In: Proceedings of the 1985 Winter Simulation Conference, 1985, pp. 686-693.

SHEVELL, S. F.; BUZACOTT, J. A., MAGAZINE, M. J. *Simulation and analysis of a circuit board manufacturing facility*. In: Proceedings of the 1986 Winter Simulation Conference, 1986.

SÜER, G. A. *Designing parallel assembly lines*. Computers Industrial Engineering, 1998, v. 35, n. 34, pp. 467-470.

SON, S-Y; OLSEN, T. L.; YIP-HOI, D. *An approach to scalability and line balancing for reconfigurable manufacturing systems*. Integrated Manufacturing Systems, 2001, v. 12, n. 7, pp. 500-511.

SOUZA, M. C. F.; YAMADA, M. C.; PORTO, A.J. V.; GONÇALVES FILHO, E.V. *Análise de alocação de mão de obra em linhas de multimodelos de produtos de demanda variável através do uso da simulação: um estudo de caso*. Revista Produção, 2003, v. 13, n.3.

THOMOPOULOS, N.T. *Line balancing sequencing for mixed-model assembly*. Management Science, 1967, v. 14, n. 2, pp. B59-B79.

VAIDYANATHAN, B. S.; MILLER, D. M.; PARK, Y. H. Application of discrete event simulation in production scheduling. In: Proceedings of the 1998 Winter Simulation Conference, D.J. Medeiros, E.F. Watson, J.S. Carson e M.S. Manivannan (eds.) , 1998, pp. 965-971.

VOSS, C.; TSIKRIKTSIS, N.; FROHLICH M. *Case research in operations management*. International Journal of Operations & Production Management, 2002, vol. 22, n. 2, p. 195-219.

WEE, T.S.; MAGAZINE, M. J. *Assembly line balancing as generalized bin packing*. Operations Research Letters, 1982,1, 56-58.

WELGAMA, P.S.; MILLS, R. G. J. *Use of Simulation in the Design of a JIT System*. International Journal of Operations & Production Management, 1995, v. 15, n.09, pp. 245-260.

YIN, R. K. *Estudo de caso: Planejamento e métodos*. 2ed. Porto Alegre: Bookman, 2001.

APÊNDICE

APÊNDICE A – Atributos das entidades

Tabela A.1– Atributos das entidades placas

ATRIBUTOS DAS PLACAS					
	Tipo de placa	Ncomp ⁽¹⁾	Npostos ⁽²⁾	Nplacas ⁽³⁾	Topback ⁽⁴⁾
Família 11	1	61	10	250	2
	2	64	10	250	2
	3	64	10	250	2
Família 21	4	96	9	1100	2
Família 31	5	45	8	750	1
	6	58	8	750	1
	7	69	8	750	1
	8	58	8	750	1
Família 41	9	23	8	700	1
	10	23	8	700	1
	11	23	8	700	1

(1) Ncomp: Número de componentes por tipo de placa

(2) Npostos: número de postos requerido por tipo de placa para montagem na inserção manual

(3) Nplacas: tamanho do lote

(4) Topback: 1 - placa que requer somente a montagem na parte *top* da placa

2 - placa que requer a montagem na parte *back* da placa

APÊNDICE B- Tempos do sistema modelado

Para realização da simulação proposta na presente dissertação, em torno de 100 observações dos eventos de interesse foram realizadas. Esses dados foram coletados e adicionados à arquivos do Bloco de Notas, que por sua vez foram importados para arquivos do *Input Analyser* que realizou o tratamento estatístico desses dados de entrada. Com isso, uma lista de distribuições estatísticas foi gerada e a que melhor se ajustou à cada um dos eventos considerados foi escolhida. Estas distribuições escolhidas foram utilizadas como entradas nos modelos de simulação, estando expostas no presente apêndice.

Devido à existência de poucos dados disponíveis de intervalo entre chegada por pedidos e entidades (pedidos) por chegada, a distribuição discreta foi utilizada para ajustar esses tempos. Nesse caso, os dados de número de lotes e data da chegada dos pedidos de cada tipo de placa foram listados e agrupados para posterior ajuste das distribuições no *Input Analyser*, com os resultados exibidos a seguir.

Tabela B.1- Intervalo entre chegada de pedidos (horas)

Tipo de placa	Intervalo entre chegada de pedidos
1	DISC (0.036, 4.00, 0.107, 5.00, 0.179, 6.00, 0.214, 7.00, 0.214, 8.00, 0.286, 9.00, 0.393, 10.500, 0.464, 11.00, 0.500, 13.00, 0.571, 14.00, 0.643, 15.00, 0.750, 17.00, 0.786, 20.00, 0.857, 21.00, 0.893, 35.00, 0.929, 44.00, 0.964, 65.00, 1.000, 68.00)
2	DISC (0.086, 1.00, 0.257, 2.00, 0.343, 3.00, 0.371, 5.00, 0.400, 6.00, 0.457, 9.00, 0.486, 13.00, 0.514, 14.00, 0.543, 15.00, 0.629, 17.00, 0.714, 20.00, 0.771, 24.00, 0.800, 27.00, 0.829, 31.00, 0.886, 34.00, 0.914, 36.00, 0.943, 39.00, 0.971, 61.00, 1.000, 62.00)
3	DISC (0.036, 4.00, 0.107, 5.00, 0.179, 6.00, 0.214, 7.00, 0.214, 8.00, 0.286, 9.00, 0.393, 10.500, 0.464, 11.00, 0.500, 13.00, 0.571, 14.00, 0.643, 15.00, 0.750, 17.00, 0.786, 20.00, 0.857, 21.00, 0.893, 35.00, 0.929, 44.00, 0.964, 65.00, 1.000, 68.00)
4	DISC (0.143, 2.00, 0.286, 3.00, 0.429, 6.00, 0.571, 8.00, 0.857, 10.00, 1.000, 26.00)
5	DISC (0.111, 5.00, 0.222, 10.00, 0.333, 20.00, 0.444, 26.00, 0.556, 27.00, 0.667, 36.00, 0.778, 37.00, 0.889, 38.00, 1.000, 64.00)
6	DISC (0.333, 63.00,0.667, 89.00,1.000, 90.00)
7	DISC (0.250, 6.00,0.500, 36.00, 0.750, 38.00,1.000, 63.00)
8	DISC (0.083, 3.00,0.167, 5.00,0.333, 7.00,0.500, 8.00,0.583, 12.00,0.667, 16.00, 0.750, 30.00,0.833, 31.00,0.917, 45.00,1.000, 67.00)
9	DISC (0.083, 7.00,0.167, 8.00,0.250, 14.00,0.333, 15.00, 0.417, 17.00,0.500, 18.00,0.583, 25.00,0.667, 28.00,0.833, 41.00,0.917, 52.00,1.000, 100.00)
10	DISC (0.091, 5.00,0.182, 7.00, 0.273, 15.00, 0.364, 17.00,0.455, 26.00,0.545, 33.00,0.636, 38.00, 0.727, 41.00,0.818, 48.00,0.909, 52.00,0.909, 73.00,1.000, 74.00)
11	DISC (0.067, 2.500, 0.133, 5.500, 0.200, 7.500,0.267, 10.500, 0.333, 11.500, 0.467, 12.500, 0.600, 16.500, 0.667, 34.500, 0.733, 38.500, 0.733, 39.500, 0.800, 42.500, 0.867, 50.500, 0.933, 78.500, 1.000, 82.500)

Tabela B.2 – Entidades (Pedidos) por chegada

Tipo de placa	Entidades por chegada
1	DISC(0.690, 1.00, 0.931, 2.00, 1.000, 3.00)
2	DISC (0.964, 1.00, 1.000, 2.00)
3	DISC (0.786, 1.00, 0.964, 2.00, 1.000, 3.00)
4	DISC (0.154, 1.00, 0.538, 2.00, 0.538, 3.00, 0.692, 4.00, 0.692, 5.00, 0.769, 6.00, 0.846, 7.00, 0.923, 8.00, 1.000, 9.00)
5	DISC (0.769, 1.500, 0.923, 2.500, 1.000, 3.500)
6	1
7	DISC (0.923, 1.00, 1.000, 2.00)
8	DISC (0.692, 1.00, 0.846, 2.00, 0.923, 3.00, 1.000, 4.00)
9	DISC (0.923, 1.00, 1.000, 2.00)
10	1
11	1

Tabela B.3 – Tempo de reparo das placas por origem (horas)

Tipo de placa	TempoReparo		
	ICT ⁽¹⁾	FVT ⁽²⁾	Acabamento ⁽³⁾
1	88+Weib(425,1.64)	88+Weib(425,1.64)	88+Weib(425,1.64)
2	88+Weib(425,1.64)	88+Weib(425,1.64)	88+Weib(425,1.64)
3	88+Weib(425,1.64)	88+Weib(425,1.64)	88+Weib(425,1.64)
4	88+Weib(425,1.64)	88+Weib(425,1.64)	88+Weib(425,1.64)
5	Triang(100,367,1.16e0,003)	280+1,21e0,03*Beta(11,1.73)	-
6	Triang(100,367,1.16e0,003)	280+1,21e0,03*Beta(11,1.73)	-
7	Triang(100,367,1.16e0,003)	280+1,21e0,03*Beta(11,1.73)	-
8	Triang(100,367,1.16e0,003)	280+1,21e0,03*Beta(11,1.73)	-
9	Triang(100,367,1.16e0,003)	280+1,21e0,03*Beta(11,1.73)	88+Weib(425,1.64)
10	Triang(100,367,1.16e0,003)	280+1,21e0,03*Beta(11,1.73)	88+Weib(425,1.64)
11	Triang(100,367,1.16e0,003)	280+1,21e0,03*Beta(11,1.73)	88+Weib(425,1.64)

(1) (2) (3) - Processo de origem da placa

Tabela B.4– Tempo de processamento na Pré-Formatação (horas)

Operação	TempoPré-Formatação
1	9.5+16*Beta(1.31,2.88)
2	16.5+Gamm(1.83,3.06)
3	12.5+14*Beta(1.38,2.36)
4	17.5+Weib(8.92,1.99)

Tabela B.5 - Tempos de processamento do Acabamento e da Embalagem (horas)

Tipo de placa	Tempos de processamento		
	TSoldaAcabamento	TInspAcabamento	TempoEmbalagem
1	89+Weib(114,1.71)	95+Weib(101,1.24)	210+Expo(69)
2	89+Weib(114,1.71)	95+Weib(101,1.24)	210+Expo(69)
3	89+Weib(114,1.71)	95+Weib(101,1.24)	210+Expo(69)
4	100+Weib(151,1.32)	11.5+Erla(4.77,2)	197+Weib(99,5,0.526)
5	0	0	210+Expo(69)
6	0	0	210+Expo(69)
7	0	0	210+Expo(69)
8	0	0	210+Expo(69)
9	0	48+Erla (12.2,2)	210+Expo(69)
10	0	48+Erla (12.2,2)	210+Expo(69)
11	0	48+Erla (12.2,2)	210+Expo(69)

Tabela B.6 – Tempo de montagem na inserção manual Postos 1-3 (horas)

Família da placa	Tipo de placa	Inserção Manual		
		IM 1	IM 2	IM 3
Família 11	1	NORM(58.1, 11.5)	NORM(54.4, 10.3)	TRIA(34.5, 43, 83.5)
	2	NORM(58.1, 11.5)	NORM(54.4, 10.3)	TRIA(34.5, 43, 83.5)
	3	NORM(58.1, 11.5)	NORM(54.4, 10.3)	TRIA(34.5, 43, 83.5)
Família 21	4	NORM(92.5, 15.2)	NORM(83, 14.3)	NORM(83, 14.3)
Família 31	5	56.5 + WEIB(30.4, 1.93)	30.5 + WEIB(13.9, 1.41)	34.5 + WEIB(15.7, 1.65)
	6	56.5 + WEIB(30.4, 1.93)	30.5 + WEIB(13.9, 1.41)	34.5 + WEIB(15.7, 1.65)
	7	56.5 + WEIB(30.4, 1.93)	30.5 + WEIB(13.9, 1.41)	34.5 + WEIB(15.7, 1.65)
Família 41	8	POIS(45)	14.5 + ERLA(2.46, 3)	15.5 + WEIB(9.92, 1.52)
	9	POIS(45)	14.5 + ERLA(2.46, 3)	15.5 + WEIB(9.92, 1.52)
	10	POIS(45)	14.5 + ERLA(2.46, 3)	15.5 + WEIB(9.92, 1.52)
	11	POIS(45)	14.5 + ERLA(2.46, 3)	15.5 + WEIB(9.92, 1.52)

Tabela B.7 – Tempo de montagem na inserção manual Postos 4-6 (horas)

Família da placa	Tipo de placa	Inserção Manual		
		IM 4	IM 5	IM 6
Família 11	1	26.5 + ERLA(5.99, 3)	NORM(56, 11.4)	NORM(56, 11.4)
	2	26.5 + ERLA(5.99, 3)	NORM(56, 11.4)	NORM(56, 11.4)
	3	26.5 + ERLA(5.99, 3)	NORM(56, 11.4)	NORM(56, 11.4)
Família 21	4	58.5 + WEIB(17.3, 1.74)	POIS(77.8)	52.5 + 54 * BETA(1.24, 2.64)
Família 31	5	TRIA(31.5, 42, 80.5)	31.5 + WEIB(18.1, 1.52)	33.5 + LOGN(16.1, 12.2)
	6	TRIA(31.5, 42, 80.5)	31.5 + WEIB(18.1, 1.52)	33.5 + LOGN(16.1, 12.2)
	7	TRIA(31.5, 42, 80.5)	31.5 + WEIB(18.1, 1.52)	33.5 + LOGN(16.1, 12.2)
Família 41	8	15.5 + GAMM(3.65, 2.44)	POIS(23)	18.5 + LOGN(8.55, 8.1)
	9	15.5 + GAMM(3.65, 2.44)	POIS(23)	18.5 + LOGN(8.55, 8.1)
	10	15.5 + GAMM(3.65, 2.44)	POIS(23)	18.5 + LOGN(8.55, 8.1)
	11	15.5 + GAMM(3.65, 2.44)	POIS(23)	18.5 + LOGN(8.55, 8.1)

Tabela B.8 - Tempos de montagem na inserção manual Postos 7-8 (horas)

Família da placa	Tipo de placa	Inserção Manual	
		IM 7	IM 8
Família 11	1	NORM(52, 9.61)	30.5 + 59 * BETA(1.64, 4.05)
	2	NORM(52, 9.61)	30.5 + 59 * BETA(1.64, 4.05)
	3	NORM(52, 9.61)	30.5 + 59 * BETA(1.64, 4.05)
Família 21	4	52.5 + 54 * BETA(1.24, 2.64)	NORM(81.3, 12.6)
Família 31	5	33.5 + 62 * BETA(1.07, 1.76)	22.5 + WEIB(21.3, 1.51)
	6	33.5 + 62 * BETA(1.07, 1.76)	22.5 + WEIB(21.3, 1.51)
	7	33.5 + 62 * BETA(1.07, 1.76)	22.5 + WEIB(21.3, 1.51)
Família 41	8	15.5 + WEIB(11.5, 1.38)	12.5 + WEIB(4.9, 1.53)
	9	15.5 + WEIB(11.5, 1.38)	12.5 + WEIB(4.9, 1.53)
	10	15.5 + WEIB(11.5, 1.38)	12.5 + WEIB(4.9, 1.53)
	11	15.5 + WEIB(11.5, 1.38)	12.5 + WEIB(4.9, 1.53)

Tabela B.9 - Tempos de montagem na inserção manual Postos 9-10 (horas)

Família da placa	Tipo de placa	Inserção Manual	
		IM 9	IM 10
Família 11	1	33.5 + WEIB(17.7, 1.57)	15.5 + GAMM(9.59, 2.68)
	2	33.5 + WEIB(17.7, 1.57)	15.5 + GAMM(9.59, 2.68)
	3	33.5 + WEIB(17.7, 1.57)	15.5 + GAMM(9.59, 2.68)
Família 21	4	20.5 + WEIB(30.3, 1.66)	-
Família 31	5	-	-
	6	-	-
	7	-	-
Família 41	8	-	-
	9	-	-
	10	-	-
	11	-	-

Tabela B.10 - Intervalo entre paradas e tempo de parada dos testadores (horas)

Testadores					
Estação	Família	Tipo de placa	Testador	Intervalo entre Paradas	Tempo de Parada
ICT	11	1	111	-0.5 + LOGN(3.03, 4.66)	10 + WEIB(101, 0.427)
		2	111	-0.5 + LOGN(3.03, 4.66)	10 + WEIB(101, 0.427)
		3	111	-0.5 + LOGN(3.03, 4.66)	10 + WEIB(101, 0.427)
	21	4	214	-0.5 + LOGN(4.23, 6.13)	-0.001 + EXPO(81.1)
	31	5	315	-0.5 + LOGN(15.7, 40.5)	15 + WEIB(31.9, 0.377)
		6	315	-0.5 + LOGN(15.7, 40.5)	15 + WEIB(31.9, 0.377)
		7	315	-0.5 + LOGN(15.7, 40.5)	15 + WEIB(31.9, 0.377)
		8	315	-0.5 + LOGN(15.7, 40.5)	15 + WEIB(31.9, 0.377)
	41	9	419	-0.5 + LOGN(15.7, 40.5)	-0.001 + EXPO(42.3)
		10	410	-0.5 + 94 * BETA(0.218, 1.05)	10 + WEIB(36.8, 0.697)
		11	419	-0.5 + LOGN(15.7, 40.5)	-0.001 + EXPO(42.3)
FVT	11	1	113	-0.001 + WEIB(4.59, 0.361)	8 + WEIB(56.2, 0.611)
			114	-0.001 + WEIB(4.59, 0.361)	-0.001 + EXPO(142)
		2	113	-0.001 + WEIB(4.59, 0.361)	8 + WEIB(56.2, 0.611)
			114	-0.001 + WEIB(4.59, 0.361)	-0.001 + EXPO(142)
		3	113	-0.001 + WEIB(4.59, 0.361)	8 + WEIB(56.2, 0.611)
			114	-0.001 + WEIB(4.59, 0.361)	-0.001 + EXPO(142)
	21	4	215	-0.5 + LOGN(6.93, 8.74)	10 + WEIB(65.9, 0.495)
	31	5	316	-0.5 + LOGN(9.87, 36.4)	30 + EXPO(372)
		6	316	-0.5 + LOGN(9.87, 36.4)	30 + EXPO(372)
		7	316	-0.5 + LOGN(9.87, 36.4)	30 + EXPO(372)
		8	316	-0.5 + LOGN(9.87, 36.4)	30 + EXPO(372)
	41	9	420	-0.5 + LOGN(6.93, 8.74)	10 + WEIB(65.9, 0.495)
		10	420	-0.5 + LOGN(6.93, 8.74)	10 + WEIB(65.9, 0.495)
		11	420	-0.5 + LOGN(6.93, 8.74)	10 + WEIB(65.9, 0.495)

APÊNDICE C –Rendimento das placas por origem

Tabela C.1 –Rendimento das placas por origem (%)

Tipo de placa	Rendimento (%)		
	ICT ⁽¹⁾	FVT ⁽²⁾	Acabamento ⁽³⁾
1	99,93	99,71	98,6
2	99,94	100	97,7
3	97,59	99,45	99,8
4	99,31	99,41	98,74
5	99,54	-	-
6	99,54	-	-
7	99,54	-	-
8	99,54	-	-
9	98,78	-	99,3
10	100	-	100
11	99,62	-	100

(1) (2) (3) - Processo de origem da placa

APÊNDICE D –Lógica do modelo

Antes de dar início à explicação do modelo, cabe reforçar o fato de que o modelo trata das entidades componentes e placas. Acrescido a esse fato, convém mencionar novamente que as entidades se unem em lotes quando finalizado um processo e se separam em unidades quando do processamento em alguma estação. O modelo lógico se encontra dividido nas seguintes partes:

- Chegada e separação de pedidos
- *Set up* do SMT
- SMT
- Reparo do SMT
- Inspeção do SMT
- Formação de lotes no SMT
- Pré-formatação
- Inserção Manual
- Solda Onda
- ICT
- FVT
- Acabamento
- Reparo
- Embalagem

Na parte Chegada e separação de pedidos, ocorre a criação das entidades pedidos (*Create*) para cada tipo de placa. O intervalo de chegadas e entidades por chegada de cada pedido foi devidamente incluso nesses blocos. A cada um desses blocos foi associado um contador de chegadas para efeito de levantamento do número de pedidos de cada placa. A cada pedido de um determinado tipo de placa foi associado o número de componentes necessário para sua montagem: Ncomp (número de componentes), Npostos (número de postos), Nplacas (tamanho do lote), Tipo de placa, Topback (tecnologia de fabricação). A seguir, um contador de NEntradas é adicionado ao modelo para contagem do total de pedidos da EMS.

A cada pedido circulante no modelo, foram adicionados os atributos estação defeituosa (EstDef), chegada (T_{now}), operação (número da OP). As placas, então, são encaminhadas para o processo de *set up* de material.

No processo de *set up* de material, é alocado o recurso FuncSMT . Esse processo é regido por uma expressão de tempo de processamento, tendo em vista o número de *feeders* (alimentadores) necessários por placa. Posteriormente, a variável Pcomp recebe o valor da expressão $N_{comp} * N_{placas} / 3$ através de um bloco *assign*. O numerador $N_{placas} * N_{comp}$ é o número de componentes que devem ser pré-formatados para a produção de um lote de placas (cujo tamanho é N_{placas}). Essa divisão pelo valor 3 se refere ao fato do levantamento de tempo ter sido feito de três em três componentes. Ao final do *set up* do material, um sinal de término de *set up* de material é dado com o valor 1.

Feito isso, o recurso LinhaSMT é alocado através de um bloco *seize*. A seguir, a entidade passa em um bloco *PickStation* para determinação de qual linha SMT deverá ser utilizada para sua montagem.

Para cada entidade que passa por esse bloco, é realizado um teste de condição. É escolhido o menor valor entre o número de entidades em rota na estação e o número de recursos ocupados. A expressão para cada linha do SMT é dada pela soma da fila no SMT, da fila no *set up* e da fila para o registro no SCP (sistema de controle da produção). O quadro D.1 indica as expressões das linhas do SMT utilizadas na modelagem.

Quadro D.1 - Expressões das linhas de SMT

Linha de SMT	Expressão
SMT Linha 1	$NQ(SMT111.Queue) + NQ(Set\ up1.Queue) + NQ(Registro\ SCP11.Queue)$
SMT Linha 2	$NQ(SMT112.Queue) + NQ(Set\ up\ 2.Queue) + NQ(Registro\ SCP12.Queue)$
SMT Linha 3	$NQ(SMT113.Queue) + NQ(Set\ up3.Queue) + NQ(Registro\ SCP13.Queue)$

Os processos *Set up* Linha1, *Set up* Linha 2 e *Set up* Linha3 seguiram uma mesma lógica para sua construção. Para efeito de simplificação, a explicação dessa etapa e das posteriores concernentes ao SMT será feita somente para a Linha 1. Para o processo *Set up* Linha 1 foram alocados os recursos FuncSMT (funcionário do SMT) e SMT Linha1. Depois de concluído esse processo, o lote de placas é separado por um bloco *separate* em unidades (placas). Feito isso, as placas são enviadas ao processo SMT Linha1 com disponibilidade de oito máquinas para montagem, regida por expressões referentes à cadência da produção.

Em seguida, as placas são enviadas à Inspeção Linha 1, tendo como recurso alocado para a montagem a Monitora Linha 1. A partir disso, é utilizado um bloco *Decide* para avaliação do rendimento de cada placa processada em termos de tipo e superfície de montagem. Caso seja reprovada, a placa receberá o atributo nomeado *supdef* com valor igual a *sup*. Ainda com relação a este último caso, a placa receberá uma variável nomeada *NRL1* com valor *NRL1+1* e um atributo *defeituosa* igual a 1. As placas aprovadas, no teste, passarão por um *assign* onde receberá uma variável *NPL1* com decréscimo de uma unidade e um atributo *defeituosa* igual a 0. Feito isso, as placas são unidas através do bloco *batch*.

A montagem em superfície de cada uma das placas é finalizada quando o valor do atributo *Topback* se torna 0. Isso foi feito com a criação de uma condição em um bloco *Decide* Caso seja verdadeira a resposta para essa condição (*Topback==0*), o lote é encaminhado para o registro de informações no SCP (registro SCP1 Linha 1), ocorrendo liberação dos recursos FuncSMT e da linha 1 SMT. O registro é realizado pela monitora da Linha 1. Caso contrário o lote é enviado para o processo *Set up back1* Linha 1. O processo *Set up back* Linha 1 envolve o set up das máquinas do SMT para realização de placas cujo atributo *sup* (superfície) tenha o valor 2, ou seja, que necessitam de montagem *top* (parte superior da placa) e *back* (parte inferior da placa). Deve ser considerado o fato de que, a cada operação de montagem *top* e *back* realizada, o valor do atributo *Topback*, definido quando da chegada de cada pedido, diminui de uma unidade.

Caso seja detectado defeito na placa após teste no *Decide*, as placas defeituosas irão para a estação Reparo SMT onde receberão os devidos ajustes. Caso as placas não tenham defeito, ou seja, o atributo estação defeituosa (EstDef) tenha valor igual a zero, serão encaminhadas à etapa de formação de lotes do SMT. Nessa etapa, as placas serão unidas por critérios referentes à ordem de produção mencionados, anteriormente, na parte Chegada e separação de pedidos. Um contador foi adicionado para efeito de contagem do tempo de montagem de cada lote na linha.

Na estação Reparo SMT, pequenos ajustes são realizados. Após a finalização desse processo, ocorre a decisão de para qual linha a placa reparada deverá ser encaminhada. Se o valor do atributo da placa for PL igual a 0, a placa irá para a inspeção 2 (Insp 2) linha 1, se for 1 irá para a Insp2 Linha 2 e caso seja 2 será enviada à Insp 2 linha 3 do SMT. Após essas inspeções, o destino das placas desse processo segue a mesma lógica da inspeção anteriormente mencionada, respeitada a consideração da origem dessas placas, ou seja, de qual linha de SMT a placa seria proveniente.

Quanto aos componentes a serem inseridos nas placas, estes são criados no processo de pré-formatação de componentes. Conforme mencionado anteriormente, vale ressaltar que o processamento das entidades no SMT e na pré-formatação ocorre em paralelo. Os componentes são representados no modelo pelas entidades Res. Nesse processo, a chegada de componentes é feita concomitantemente com sua respectiva ordem de produção.

A partir disso, um bloco de decisão utilizado para desviar o componente de acordo com o tipo de operação a ser realizada na pré-formatação em blocos *assign* que designam quatro tipos de operação que se distinguem pelo tipo de componente e ajuste realizado. O desvio é baseado na proporção de componentes que são trabalhados em cada uma das operações. Para realização do processo de pré-formatação, foi alocado o recurso funcionário. O processamento é referente à pré-formatação de três componentes e o tempo de operação depende de seu tipo.

Na pré-formatação para implementação da lógica de controle de componentes em estoque e componentes a serem pré-formatados, foram criados atributos constituintes de um *assign*, estando seus valores explicitados a seguir. A variável *Vcomp* é acrescida de uma unidade, toda vez que o lote de componentes passa pela pré-formatação, até o momento em que se iguala ao valor do atributo nomeado *Vcomp1* (número de pequenos lotes de componentes a serem pré-formatados).

A variável nomeada *NcompEst* (número de componentes em estoque) é acrescida de 3 unidades quando o lote de componentes passa pela pré-formatação. Este valor 3 se refere ao fato de que os tempos de Pré-formatação foram coletados a cada passagem de três componentes, após esta atribuição o lote de componentes é liberado.

Os lotes de placas oriundos do SMT são enviados para Inserção Manual, onde uma lógica foi criada para controle do fluxo de entrada das entidades. Para dar início à Inserção manual, é necessário que existam componentes e placas em quantidade suficiente para a montagem dos lotes. A inserção ocorre de acordo com as características atribuídas à cada tipo de placa no processo de chegada e separação de pedidos. A partir de uma quantidade de componentes pré-formatados e de placas, as linhas de Inserção Manual e funcionários são liberados para montagem. Para tanto, é realizado um controle do número de componentes disponível em estoque e número de componentes na linha de Inserção Manual.

As entidades ficam armazenadas em uma fila (Fila IM) até que a linha 1 (L1) ou linha 2 (L2) da inserção manual estivessem desocupadas ($L1=0$) ou ($L2=0$) através de um bloco *hold*. Caso essa condição seja validada, as entidades passarão por um teste para verificar se a linha 1 está ociosa (*decide*). Se esse teste for falso, a variável L2 receberá o valor 1 indicando que esta linha está sendo utilizada, caso contrário, a variável L1 receberá esse valor.

A seguir, na linha 1, as entidades aguardarão que os componentes sejam pré-formatados, uma vez que existem 80% de componentes já pré-formatados (parâmetro modificado pelos cenários) o lote é liberado para o início da inserção manual.

Os recursos, funcionário referente ao número de postos (Npostos) e linha 1 necessários para a montagem são alocados. Em um *assign*, um atributo correspondente à atualização da chegada das entidades na inserção manual e uma variável de atualização do número de componentes em estoque (NcompEst, $NcompEst - Ncomp * Nplacas$) foram criadas. A explicação referente a linha 1 é a mesma para a linha 2. Depois dessas atribuições, é realizado o teste para verificar se existem componentes em estoque ($NcompEst \geq 0$). Se for verdadeiro o resultado desse teste, o controle de componentes, será dado pelo assign (Controlecomp1), senão pelo assign (Controlecomp2). As variáveis utilizadas em cada um desses blocos do Arena e seus valores estão destacados nos quadros a seguir (quadros D.2 e D.3).

Quadro D.2 - Atualização de dados no *Assign* Controlecomp1 na linha 1

<i>Assign</i> Controlecomp1	
Variável	Valor
Nplacas1	Nplacas
NCFL1	0

Quadro D.3 - Atualização de dados no *Assign* Controlecomp2 na linha 1

<i>Assign</i> Controlecomp2	
Variável	Valor
Nplacas1	Nplacas
NCFL1	$-1 * CompEst$
NCompEst	0

Posteriormente, as placas passam por um *separate*, sendo duplicadas. Parte das placas é direcionada para um bloco *hold*, que tem como finalidade controlar o fluxo de placas na Inserção Manual, caso a variável *paradaL1* (variável binária que recebe o valor 1 quando a linha 1 esta parada por falta de componentes) possua o valor um as placas ficam no *hold* aguardando a Pre-formatação é de novos componentes, com essa retenção das placas, são liberados os funcionário para montagem. Caso a variável *ParadaL1* possua valor 0, as placas seguem o fluxo pelos postos de inserção. O número de funcionários dependerá do atributo *Npostos* definido na parte *Chegada e separação de pedidos*.

A variável *vsolda1* é criada com valor 1 para controle da passagem do fluxo das placas na solda onda. A variável *L1* recebe o valor 0, significando que está desocupada. A seguir, as placas são separadas e novamente duplicadas para efeito de contagem na inserção manual (contador *RECIM*) e para contagem do tempo de processamento na inserção manual (contador *TEMPIML1*). Ocorre também a atualização das seguintes variáveis: número de componentes em estoque na linha 1 (*NCEL1*), número de componentes faltantes na linha 1 (*NCFL1*), número de componentes em estoque (*NcompEst*) e parada da linha 1 (*Parada L1*).

A variável *Parada L1* recebe o valor 0, ou seja, a linha pára quando o número de componentes em estoque é menor que o número de componentes faltantes na linha 1 ($NcompEst < NCFL1$).

Para cada posto da *Inserção Manual*, foram criadas expressões para que o processamento das placas nos postos fosse contemplado. Para esse processamento, foi considerada a inserção de todos os componentes no posto e o encaminhamento ao próximo posto e assim por diante até que todos os componentes tenham sido inseridos em todas as placas do lote. Isso ocorre mediante a observação do atributo *Npostos* para cada tipo de placa. Para tanto, é feita a atualização de dados das *Nplacas* através do decréscimo de uma unidade.

Na modelagem, foi considerado o compartilhamento de funcionários pré-formatação e da inserção manual. Os funcionários (12) alocados para esses processos permanecem na pré-formatação até que exista uma quantidade suficiente de componentes pré-formatados para o início da inserção manual. Quando da ocorrência de parada de linha, os funcionários são deslocados para a pré-formatação.

O próximo processo a ser realizado é a solda onda cujo tempo de processamento é regido pela expressão $\text{TempoSolda}(\text{Tipo})$ com utilização dos recursos solda e funcionário. Esse processo ocorre até que a última placa seja soldada ($\text{vsolda}=0$). As placas são duplicadas (*separate*) para efeito de contagem do número de placas processadas na solda onda (RecSolda) e do tempo de solda (TempSolda).

Os próximos caminhos para as placas no modelo dependem da prévia junção da produção nas linhas 1 (L1) e 2 (L2) da Inserção Manual. Essas placas são testadas (*decide*) para determinação das próximas etapas a serem seguidas. Isso foi feito da seguinte forma:

1. Tipo ≤ 4

O Acabamento é composto dos seguintes processos: acabamento solda e inserção, com tempos respectivamente expressos pelas expressões $\text{Tsoldaacabamento}(\text{Tipo})$ e $\text{TInspAcabamento}(\text{Tipo})$. Os recursos acabamento e funcionário 2 são alocados para esse processo. Caso seja detectado defeito na inspeção, as placas são enviadas ao reparo. Uma variável, EstDef (estação defeituosa), é criada para definição da origem da placa defeituosa no reparo, recebendo no caso do acabamento o valor 3. Caso contrário, se as placas forem aprovadas, terão seus tempos de processamento no acabamento considerados no contador TempAcab (tempo do acabamento). Um teste (*decide*) é realizado para determinação do fluxo das placas:

- $\text{Tipo} < 4$: Envio das placas para o ICTF1 (Teste ICT da família 1 de placas)
- $\text{Tipo} = 4$: Envio das placas para o ICTF2 (Teste ICT da família 4 de placas)

2. Tipo > 4 e Tipo < 9

Neste caso, as placas são enviadas ao Teste V. O recurso Teste V é criado e a variável Nplacas é atribuída a nova variável NPV. Esse processo é feito pelo recurso funcionário 2, sendo regido pela expressão TInspAcabamento (Tipo) com decréscimo no lote de placas que passam pelo teste de uma unidade para atualização dos dados. O número de placas é atualizado mediante a seguinte expressão (Nplacas-perdasICT). Caso a placa seja reprovada, é enviada à estação de reparo. Caso contrário, o tempo de processamento no Teste V (TempV) é atualizado. As placas são novamente testadas e de acordo com seu tipo são encaminhadas conforme a seguir:

- Tipo 11 ou Tipo 9: envio das placas para o Teste ICTT9T11 (Teste ICT dos tipos de placa 9 e 11).
- Tipo 10: envio das placas para o Teste ICTT10 (Teste ICT da placa de tipo 10).

Após realização do processo, os recursos funcionário 2 e Teste V são liberados.

3. Tipo > 8 e tipo < 12

Caso as placas sejam dos tipos 9, 10 e 11, são enviadas para o Teste ICTF3 (Teste ICT da família 3)

O próximo passo é o ICT, realizado de acordo com o tipo de placa. Antes de dar início à montagem no ICT, as placas passam pelo *set up* do ICT. O processo de ICT é realizado mediante a utilização dos recursos testadores do ICT e FuncICT (funcionário do ICT). O número de placas é atualizado mediante a seguinte expressão (Nplacas-perdasICT). As placas são enviadas numa porcentagem de 1% para o reparo. A variável EstDef recebe, nesse caso, o valor 1. As placas aprovadas são enviadas ao FVT, após terem passado pelos contadores do ICT, criados para cada tipo de placa. O processo FVT é realizado assim como o ICT de acordo com o tipo de placa e posteriormente ao *set up* do FVT. Os recursos utilizados para esse processo são FuncFVT (funcionário do FVT) e TestadorFVT. O número de placas é atualizado mediante a seguinte expressão (Nplacas-perdasFVT). As placas aprovadas na Inspeção do FVT são enviadas à embalagem, após terem tido seus tempos de processamento contabilizados no contador TEMPFVT.

O reparo é realizado mediante a consideração da origem das placas, evidenciada no modelo pela variável EstDef. A partir dessa variável, cada placa retorna à sua estação de origem para continuarem suas montagens. O tempo de embalagem é regido pela expressão TempEmbalagem(tipo), tendo como recursos, a embalagem e o recurso FuncEmb. Três contadores foram utilizados ao final desse processo para que fossem contabilizados o tempo total de montagem (TempoTot), número de placas que saíram do sistema (Nsaídas) e tempo de embalagem (TempEmb). O resultado do contador Nsaídas é utilizado para comparação com o resultado do contador Nentradas com o intuito de verificar o modelo computacional.

Para a modelagem, as seguintes filas foram utilizadas para armazenamento das entidades:

- EMBALAGEM: fila da Embalagem
- FILA ACAB: fila do Acabamento
- Fila IM: fila de espera para liberação de recursos na Inserção Manual
- FILA VIB: fila para o teste VÍbora
- Pré-formatação: fila para a Pré-Formatação
- IM10L1: fila do posto 10 da linha 1 da Inserção Manual
- IM10L2: fila do posto 10 da linha 2 da Inserção Manual
- IM1L1: fila do posto 1 da linha 1 da Inserção Manual
- IM1L2: fila do posto 1 da linha 2 da Inserção Manual
- IM2L1: fila do posto 2 da linha 1 da Inserção Manual
- IM2L2: fila do posto 2 da linha 2 da Inserção Manual
- IM3L1: fila do posto 3 da linha 1 da Inserção Manual
- IM3L2: fila do posto 3 da linha 2 da Inserção Manual
- IM4L1: fila do posto 4 da linha 1 da Inserção Manual
- IM4L2: fila do posto 4 da linha 2 da Inserção Manual
- IM5L1: fila do posto 5 da linha 1 da Inserção Manual
- IM5L2: fila do posto 5 da linha 2 da Inserção Manual
- IM6L1: fila do posto 6 da linha 1 da Inserção Manual
- IM6L2: fila do posto 6 da linha 2 da Inserção Manual
- IM7L1: fila do posto 7 da linha 1 da Inserção Manual

- Inspeção L1: fila da Inspeção da linha L1 do SMT
- Inspeção L2: fila da Inspeção da linha L2 do SMT
- Inspeção L3: fila da Inspeção da linha L3 do SMT
- Registro SCP F1: fila de espera no Registro do SCP da linha 1 do SMT
- Registro SCP F2: fila de espera no Registro do SCP da linha 2 do SMT
- Registro SCP F3: fila de espera no Registro do SCP da linha 3 do SMT
- Reparo: fila de espera no Reparo das placas
- *Set up* FVT F1: fila de espera da família 1 de placas no *set up* da máquina de FVT
- *Set up* FVT F2: fila de espera da família 2 de placas no *set up* da máquina de FVT
- *Set up* FVT F3: fila de espera da família 3 de placas no *set up* da máquina de FVT
- *Set up* FVT F4: fila de espera da família 4 de placas no *set up* da máquina de FVT
- *Set up* FVT F1: fila de espera da família 1 de placas no *set up* do testador de FVT
- *Set up* FVT F2: fila de espera da família 2 no *set up* do testador de FVT
- *Set up* FVT F3: fila de espera da família 3 no *set up* do testador de FVT
- *Set up* FVT F4: fila de espera da família 4 no *set up* do testador de FVT
- *Set up* ICT F1: fila de espera da família 1 de placas no *set up* da máquina de ICT
- *Set up* ICT F2: fila de espera da família 2 de placas no *set up* da máquina de ICT
- *Set up* ICT F3: fila de espera da família 3 de placas no *set up* da máquina de ICT
- *Set up* ICT F4: fila de espera da família 4 de placas no *set up* da máquina de ICT
- *Set up* ICT F1: fila de espera da família 1 de placas no *set up* do testador do ICT

- *Set up* ICT F2: fila de espera da família 2 de placas no *set up* de testador de ICT
- *Set up* ICTF3: fila de espera da família 3 no *set up* de testador do ICT
- *Set up* ICTT9T11: fila de espera das placas de tipo 9 e 11 da família 4 no *set up* do testador de ICT
- *Set up* ICT T10: fila de espera das placas de tipo 10 da família 4 no *set up* de testador do ICT
- *Set up* SMT L1: fila de espera no *set up* do SMT na linha 1
- *Set up* SMT L2: fila de espera no *set up* do SMT na linha 2
- *Set up* SMT L3: fila de espera no *set up* do SMT na linha 3
- SMT 11 L1: fila de espera na linha 1 do SMT
- SMT 11 L2: fila de espera na linha 2 do SMT
- SMT 11 L3: fila de espera na linha 3 do SMT
- Solda 1: fila de espera na solda onda das placas da linha 1 da Inserção Manual
- Solda 2: fila de espera na solda onda das placas da linha 2 da Inserção Manual
- TesteICT F1: fila de espera da família 1 no teste ICT
- Teste ICT F2: fila de espera da família 2 no teste ICT
- TesteICT F3: fila de espera da família 3 no teste ICT
- TesteICT T10: fila de espera da família 4 no teste ICT
- TesteICT T9T11: fila de espera da família 4 no teste ICT
- TesteFVT F1: fila de espera da família 1 no teste ICT
- TesteFVT F2: fila de espera da família 2 no teste FVT
- TesteFVT F3: fila de espera da família 3 no teste FVT
- Teste FVT F4: fila de espera da família 4 no teste FVT

Cabe ressaltar que o modelo contempla o fluxo de produção estabelecido pelas placas unitárias que circulam separadas de seus lotes durante a montagem. Essa situação ocorre no Acabamento, Inspeção do acabamento, ICT e FVT. Além disso, ao final de cada processo, foi adicionado um contador para contabilizar o número de entidades que passaram pelo mesmo para efeito de comparação com os dados históricos.