

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**ESCOLA DE ENGENHARIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**METODOLOGIA PARA UTILIZAÇÃO DE SIMULAÇÃO**  
**EM PROJETOS DE MANUFATURA ENXUTA**

**CLÊNIO SENRA DE OLIVEIRA**

**BELO HORIZONTE - MG**

**Mai de 2008**

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**ESCOLA DE ENGENHARIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**METODOLOGIA PARA UTILIZAÇÃO DE SIMULAÇÃO**  
**EM PROJETOS DE MANUFATURA ENXUTA**

**CLÊNIO SENRA DE OLIVEIRA**

**Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia de Produção da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, para fins de obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Produção.**

**Área de Concentração: Produção e Logística**  
**Orientador: Prof. Doutor Luiz Ricardo Pinto**

**BELO HORIZONTE - MG**

**Mai de 2008**

## DEDICATÓRIA

À minha esposa Ana Cristina e aos meus filhos Eduardo, Ana Júlia e Mariana, que suportaram a minha ausência nos momentos de dedicação a este trabalho.

## AGRADECIMENTOS

À minha esposa Ana Cristina, que compreendeu, respeitou e me apoiou, fazendo às vezes o papel de pai, quando me concentrava na pesquisa deixando de lado o mundo exterior.

À meu filho Eduardo e minhas filhas Ana Júlia e Mariana, que aceitaram a minha ausência, mas também me ajudavam a superar os momentos difíceis, com seus sorrisos e brincadeiras.

À meus pais Mercês e João Ribeiro, que me ensinaram os valores éticos e morais e a importância do conhecimento, me iluminando e inspirando nos momentos de angústia.

Ao Professor Luiz Ricardo, que acreditou em meu projeto e me orientou durante toda a caminhada.

À todos os professores do Departamento de Engenharia de Produção da UFMG, não podendo deixar de mencionar Samuel, Carlos Roberto, Chico, Cheng, Eduardo, Gilberto, Maurício e Ana Valéria, que me ajudaram na pesquisa em busca do conhecimento, me orientando em suas respectivas disciplinas.

À todos os meus amigos e colegas da UFMG, que dividiram minhas preocupações e ansiedades, me ajudando a encontrar o ponto de equilíbrio necessário.

À Inês e à todos os funcionários da UFMG, que direta ou indiretamente através dos departamentos, deram suporte à minha pesquisa.

Aos membros da banca examinadora, que dedicaram seu precioso tempo para avaliação deste trabalho.

À todos os meus familiares e amigos, pelo incentivo e apoio.

E a Deus, presente em todos os momentos de minha vida.

## RESUMO

A busca pela competitividade no mercado atual tem forçado as empresas de manufatura a buscarem novas formas de administrar a produção, de maneira a se ter produtos com a qualidade desejada pelos clientes e a baixo custo. Os resultados alcançados pela Toyota, uma das maiores montadoras do mundo na atualidade e com rentabilidade e produtividade superiores a seus principais concorrentes, tem chamado a atenção das empresas, que passam a se referenciar no Sistema Toyota de Produção. Desenvolvido no pós-guerra, passou a ser conhecido também como Manufatura Enxuta, pois busca eliminar os desperdícios do sistema de produção. Mas muitas empresas não têm tido sucesso na implementação desta estratégia de produção, talvez por estar copiando para outro negócio, o que foi e é feito na fábrica da Toyota. Este trabalho busca apoiar as organizações na implementação da estratégia da manufatura enxuta, com o foco na simulação dos processos, reduzindo assim os custos relacionados à tentativa e erro, comum a este tipo de projeto. Não objetiva formalizar uma metodologia, mas facilitar aos gestores da produção, o uso da simulação como base para a tomada de decisão.

**Palavras chaves:** Manufatura Enxuta, Sistema Toyota de Produção, Simulação.

## ABSTRACT

The search for the competitiveness in the market has forced the manufacturing enterprises to look for new models to production administration, in a way to produce goods with the customer's quality desire and low cost. The results of Toyota, one of the major automobile industries around the world at the present time, and its profit and productivity higher than its competitors, have attracted the attention of enterprises that make reference at the Toyota Production System. Developed after the Second World War, is also known as Lean Manufacturing, and has the main objective to eliminate waste in the production system. But many of the enterprises do not have had success in this strategy implementation, perhaps the effort to copy the Toyota System to their particularly production process is the reason for the unsuccessful initiative. This paper search a base to support organizations to implementing lean manufacturing, focus on process simulation, reducing costs of trial and error, common in this kind of project. Do not look for formalizing a methodology, but facilitate the production managers, using the simulation as base to their decision process.

**Key words:** Lean Manufacturing, Toyota Production System, Simulation.

## SUMÁRIO

<b>RESUMO.....</b>	<b>iii</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>iv</b>
<b>SUMÁRIO.....</b>	<b>v</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>viii</b>
<b>LISTA DE QUADROS E TABELAS .....</b>	<b>x</b>
<b>LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS .....</b>	<b>xi</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 Problema em Estudo.....	2
1.2 Hipótese.....	2
1.3 Objetivos.....	3
1.4 Metodologia de Pesquisa.....	3
1.5 Técnicas de Coleta de Dados.....	4
1.6 Estrutura do Trabalho .....	4
<b>2 MANUFATURA ENXUTA .....</b>	<b>5</b>
2.1 Histórico da Produção em Massa .....	5
2.2 Toyotismo ou o Sistema Toyota de Produção .....	7
2.3 A Manufatura Enxuta .....	9
2.3.1 Conceitos de Manufatura Enxuta .....	9
2.3.2 Desperdícios no Sistema de Produção.....	10
2.3.3 Princípios <i>Enxutos</i> .....	12
2.3.4 Benefícios <i>Lean</i> .....	20
2.4 Técnicas Aplicadas à Manufatura Enxuta .....	21
2.4.1 <i>Just-in-Time (JIT)</i> .....	21
2.4.2 Automação ( <i>Jidoka</i> ) .....	23
2.4.3 Nivelamento da Produção.....	25
2.4.4 Sistema Puxado.....	26
2.4.5 <i>Kanban</i> .....	28
2.4.6 Controle Visual.....	31
2.4.7 Os 5 Por quês.....	32
2.4.8 Balanceamento das Linhas de Produção .....	33
2.4.9 Gargalos e Limitações de Capacidade.....	35
2.4.10 Troca Rápida de Ferramentas .....	36
2.4.11 Sincronização.....	39
2.4.12 Fluxo de uma Peça Só ( <i>One Piece Flow</i> ).....	40
2.4.13 Manufatura Celular.....	41
2.4.14 Manutenção Produtiva Total .....	43
2.4.15 Métodos a Prova de Falhas .....	44
2.4.16 Trabalhadores com Múltiplas Habilidades (Multifuncionais).....	45

2.4.17	Trabalho Padronizado.....	47
2.4.18	Mapeamento do Fluxo de Valor.....	48
2.4.19	5S.....	50
2.4.20	<i>Kaizen</i> .....	51
2.4.21	Linha de Produção Flexível.....	52
2.4.22	Melhoria de <i>Layout</i> e Sistemas de Transporte.....	53
<b>3</b>	<b>SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL.....</b>	<b>55</b>
3.1	Introdução.....	55
3.2	Aplicabilidade.....	56
3.3	Vantagens e Desvantagens da Simulação.....	57
3.4	Modelos de Simulação.....	58
3.5	Etapas da Simulação.....	59
3.6	Simulação de Eventos Discretos.....	61
3.6.1	Terminologia Utilizada em Simulação.....	62
3.6.2	Diagrama de Ciclo de Atividades.....	66
3.6.3	Método das Três Fases.....	70
3.6.4	Método Baseado em Processos (Abordagem Baseada em Processos).....	74
3.6.5	Aspectos Estatísticos na Simulação de Eventos Discretos.....	78
3.6.6	Softwares Comerciais para Simulações.....	82
<b>4</b>	<b>SIMULAÇÃO EM PROJETOS DE MANUFATURA ENXUTA.....</b>	<b>88</b>
4.1	Introdução.....	88
4.2	Trabalhos Relacionados.....	89
<b>5</b>	<b>METODOLOGIA DE SIMULAÇÃO EM PROJETOS DE MANUFATURA ENXUTA.....</b>	<b>94</b>
5.1	Contextualização do Sistema.....	94
5.1.1	O Apoio da Alta Gerência.....	95
5.1.2	Planejamento do Projeto.....	97
5.1.3	Desenvolvimento da Equipe e outros <i>Stakeholders</i> .....	101
5.1.4	Mapeamento do Fluxo de Valor.....	104
5.1.5	Seleção e Priorização de Projetos.....	107
5.2	Análise do Sistema Via Simulação.....	109
5.2.1	Formulação do Problema.....	109
5.2.2	Definição dos Objetivos.....	110
5.2.3	Construção do Modelo.....	111
5.2.4	Coleta de Dados de Processo.....	112
5.2.5	Análise dos Dados e Determinação das Distribuições de Probabilidades..	113
5.2.6	Construção do Modelo Computacional.....	118
5.2.7	Verificação do Modelo.....	121
5.2.8	Validação do Modelo.....	123
5.2.9	Análise de Cenários a Investigar.....	124
5.2.10	Experimentação das Alternativas.....	126

5.2.11	Análise dos Resultados .....	127
5.2.12	Emissão do Relatório e Arquivo do Projeto .....	130
5.2.13	Implementação.....	131
<b>6</b>	<b>TESTE DE ADERÊNCIA DA METODOLOGIA .....</b>	<b>132</b>
6.1	A Empresa Apoiadora da Pesquisa.....	132
6.2	A Abordagem Inicial .....	132
6.3	Etapas da Pesquisa de Campo .....	133
6.4	O processo de Fundição.....	134
6.5	Contextualização do Sistema.....	135
6.5.1	Confirmação do apoio da direção e divulgação do projeto junto às áreas envolvidas .....	135
6.5.2	Planejamento das atividades, áreas e pessoas envolvidas diretamente no projeto .....	135
6.5.3	Treinamento da equipe através de explanação do projeto em uma reunião de abertura e continuidade <i>on the job</i> .....	137
6.5.4	Elaboração do fluxograma de processo e mapeamento do fluxo de valor, com apoio da área de qualidade e de produção .....	138
6.5.5	Escolha dos processos que seriam simulados, considerando a contribuição que poderia ser dada à empresa .....	140
6.6	Análise do Sistema Via Simulação.....	142
6.6.1	Desenvolvimento do entendimento sobre os processos que seriam simulados e os problemas relacionados, identificados no mapeamento realizado .....	142
6.6.2	Definição das necessidades de coleta de dados e os resultados esperados. ....	142
6.6.3	Construção do Modelo.....	143
6.6.4	Coleta de Dados de Processo.....	146
6.6.5	Análise dos Dados e Determinação da Distribuição de Probabilidades .....	147
6.6.6	Construção do Modelo Computacional utilizando o Arena .....	153
6.6.7	Verificação do Modelo Computacional.....	154
6.6.8	Validação do Modelo Computacional .....	154
6.6.9	Análise de Cenários a Investigar .....	154
6.6.10	Experimentação das Alternativas .....	156
6.6.11	Análise dos Resultados .....	156
6.6.12	Emissão do Relatório e Arquivo do Projeto .....	158
6.6.13	Implementação.....	158
<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA PESQUISAS FUTURAS ...</b>	<b>159</b>
	<b>REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>160</b>
	<b>Anexo 1 – Mapeamento do Fluxo de Valor .....</b>	<b>164</b>
	<b>Anexo 2 – Diagrama de Fluxo de Processo .....</b>	<b>167</b>
	<b>Anexo 3 – Tabelas dos Dados da Simulação .....</b>	<b>168</b>
	<b>Anexo 4 – Cenários Simulados .....</b>	<b>170</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1 - Linha de montagem do Ford Modelo T. Fonte: Wikipedia Assembly Lines.	5
Figura 2-2 - Matriz da qualidade. ....	13
Figura 2-3 - <i>Just in Time</i> numa linha de montagem automotiva. ....	22
Figura 2-4 - Sistema autônomo de tear Tsudakoma. ....	23
Figura 2-5 - Cartão <i>kanban</i> - adaptado de Slack <i>et al.</i> (2002). ....	28
Figura 2-6 - Linha de montagem de automóveis - adaptado de Ohno (1997). ....	30
Figura 2-7 - Tempos de ciclo por peça, em um processo de fundição. ....	33
Figura 2-8 - Estação de trabalho <i>lean</i> . ....	48
Figura 2-9 - Exemplo de mapa de fluxo de valor - adaptado de Rother e Shook (2003). ....	49
Figura 2-10 - Evento <i>kaizen</i> 5S - antes. ....	51
Figura 2-11 - Evento <i>kaizen</i> 5S - depois. ....	51
Figura 3-1 - Etapas de simulação. Adaptado de Banks <i>et al.</i> (2005). ....	60
Figura 3-2 - DCA de um sistema de atendimento telefônico. ....	67
Figura 3-3 - DCA de uma Agência Bancária. ....	68
Figura 3-4 - <i>Bs</i> e <i>Cs</i> em atividades de estado. ....	71
Figura 3-5 - Tabela de simulação - tempos 20,1 e 21,6. ....	73
Figura 3-6 - Processos de uma entidade. ....	75
Figura 3-7 - Lista de eventos futuros e correntes. ....	76
Figura 3-8 - O programa executivo e as listas de eventos futuros e correntes. ....	76
Figura 4-1 - Etapas de simulação de processos de melhoria contínua. ....	91
Figura 5-1 - Estrutura analítica do projeto. ....	98
Figura 5-2 - Cronograma do projeto. ....	99
Figura 5-3 - Cronograma das macro-etapas do projeto. ....	99
Figura 5-4 - Diretório de <i>stakeholders</i> do projeto. ....	100
Figura 5-5 - Planilha de seleção e priorização de projetos. ....	108
Figura 5-6 - Estruturação do problema como exploração. ....	110
Figura 5-7 - Exemplo de gráfico de dados. ....	114
Figura 5-8 - Histograma e ajuste da distribuição de probabilidade. Fonte: Tabela 5-1. ....	115
Figura 5-9 - Diagrama da rede do estudo de Pinto e Saliby (1994). ....	119
Figura 5-10 - Arena: simulação de confiabilidade de redes baseado em Pinto e Saliby (1994). ....	120
Figura 5-11 - Regime transiente e regime permanente. ....	126
Figura 5-12 - Exemplo de simulação - gráfico do <i>lead time</i> . ....	129
Figura 5-13 - Gráfico de valores individuais para o <i>lead time</i> . ....	129

Figura 5-14 - Exemplo de simulação - gráfico <i>dotplot</i> dos cenários estudados.....	130
Figura 5-15 - Exemplo de simulação - gráfico <i>boxplot</i> dos cenários estudados. ....	130
Figura 6-1 - Fluxograma do processo central de uma indústria de fundição. ....	134
Figura 6-2 - Termo de abertura do projeto. ....	136
Figura 6-3 - Diretório de envolvidos no projeto.....	136
Figura 6-4 - Cronograma do projeto.....	137
Figura 6-5 - Gráfico de valores individuais para tempos de vazamento. ....	137
Figura 6-6 - Gráfico de valores individuais para tempos de transporte. ....	138
Figura 6-7 - Fluxograma do processo de fundição. ....	139
Figura 6-8 - Mapa de fluxo de valor atual. ....	141
Figura 6-9 - Fluxograma de processo do sistema em estudo.....	143
Figura 6-10 - Diagrama de ciclo de atividades - DCA. ....	144
Figura 6-11 - Gráfico de valores individuais para tempos de vazamento. ....	148
Figura 6-12 - Histograma dos tempos de vazamento. ....	148
Figura 6-13 - Gráfico de valores individuais para tempos de desmoldagem. ....	149
Figura 6-14 - Histograma dos tempos de desmoldagem. ....	149
Figura 6-15 - Gráfico de valores individuais para tempos de transporte.....	150
Figura 6-16 - Histograma dos tempos de transporte.....	150
Figura 6-17 - Gráfico de valores individuais para tempos de jateamento. ....	151
Figura 6-18 - Histograma dos tempos de jateamento. ....	151
Figura 6-19 - Gráfico de valores individuais para tempos de rebarbação. ....	151
Figura 6-20 - Histograma dos tempos de rebarbação. ....	152
Figura 6-21 - Gráfico <i>boxplot</i> com dados dos processos.....	152
Figura 6-22 - Modelo gerado no Arena. ....	153
Figura 6-23 - Gráfico de produção frente aos cenários simulados.....	156
Figura 6-24 - Gráfico <i>boxplot</i> para estoque intermediário na rebarbação. ....	157
Figura 6-25 - Gráfico de tempos de ciclo. ....	157
Figura A.1.1 - Exemplo de mapa de fluxo de valor. ....	166
Figura A.4.1 - Cenário 1.....	170
Figura A.4.2 - Cenário 2.....	171
Figura A.4.3 - Cenário 3.....	172
Figura A.4.4 - Cenário 4.....	173
Figura A.4.5 - Cenário 5.....	174

## LISTA DE QUADROS E TABELAS

Tabela 2-1 - Comparativo entre a Toyota e a GM. Fonte: Owen (2007) .....	9
Tabela 2-2 - Tempos de ciclo. ....	42
Tabela 3-1 - Simbologia DCA.....	66
Tabela 3-2 - Método das 3 Fases. - números aleatórios. ....	72
Tabela 3-3 - Tabela de simulação - método das 3 Fases. ....	72
Tabela 3-4 - Tabela de simulação - método das 3 Fases. ....	72
Tabela 3-5 - tabela de simulação - método das 3 Fases.....	73
Tabela 5-1 - Dados primários coletados em um processo e sua distribuição de probabilidade. ....	115
Tabela 5-2 - <i>Ssquare error</i> do ajuste de distribuições.....	116
Tabela 5-3 - Ícones básicos de processo do arena. ....	121
Tabela 5-4 - Exemplo de simulação - <i>lead time</i> . ....	128
Tabela 6-1- Dados coletados - parte 1.....	146
Tabela 6-2 - Dados coletados - parte 2. ....	147
Tabela 6-3 - Tempos de vazamento.....	148
Tabela 6-4 - Tempos de resfriamento.....	149
Tabela 6-5 - Tempo de desmoldagem. ....	149
Tabela 6-6 - Tempos de transporte. ....	150
Tabela 6-7- Tempos de jateamento. ....	150
Tabela 6-8 - Tempos de rebarbação. ....	151
Tabela 6-9 – Tempos de retorno e enchimento da panela. ....	152
Tabela 6-10 - Distribuição de probabilidade das durações.....	153
Tabela 6-11 - Comparativo entre os cenários 4 e 5. ....	158
Tabela A3-1 - Tempos de ciclo dos processos simulados.....	168
Tabela A3-2 - Resultados da simulação – estoques na rebarbação.....	168
Tabela A3-3 – Produção total simulada.....	169

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

- BPR – Bussines Process Redesign
- CEL – Current Events List
- DCA – Diagrama de Ciclo de Atividades
- EAP – Estrutura Analítica do Projeto
- FEL – Future Event List
- FIFO – First In, First Out;
- GIGO – Garbage In, Garbage Out
- JIT – Just in Time
- LIFO – Last In, First Out
- LP – Lean Production
- PCP – Planejamento e Controle da Produção
- PMBOK – Project Management Body of Knowledge
- PMI – Project Management Institute
- QFD – Quality Function Deployment
- RRC – Recursos com Restrição de Capacidade
- SMED - Single Minute Exchange of Die
- TOC – Theory of Constraints
- TPC – Tambor-Pulmão-Corda
- TPM – Total Productive Maintaince
- TPS – Toyota Production System – Sistema Toyota de Produção
- TQM – Total Quality Management
- VIMS – Visual Interactive Modeling System
- VSM – Value Stream Mapping
- WCM – World Class Manufacturing

## 1 INTRODUÇÃO

A busca de competitividade no atendimento às necessidades do cliente final tem gerado a necessidade de melhor organizar os processos de produção e logística, tornando mais ágil toda a cadeia do processo produtivo. A pesquisa por um processo produtivo bem estruturado, com baixos níveis de estoques intermediários, maior produtividade e menores prazos de entrega, tem sido o principal desafio imposto às pequenas e médias empresas do setor industrial e de serviços.

A simples consciência sobre a necessidade de mudanças não garante a competitividade desejada. O desenvolvimento e melhoria dos processos produtivos, a partir da ótica da engenharia pura, não têm alcançado os resultados necessários. Neste cenário a Engenharia de Produção vem complementar e agregar, considerando aspectos técnicos, sociais e humanos, no âmbito dos sistemas de produção. Diversos trabalhos vêm sendo desenvolvidos numa relação direta ao paradigma da *manufatura enxuta* e têm uma grande dedicação à questão da importância, ou mesmo influência, dos recursos humanos nos processos de produção, organizando o trabalho humano, desenvolvendo máquinas e *layout*.

O paradigma da *manufatura enxuta* tem sido amplamente utilizado em alguns setores industriais, como o automobilístico que, com suas linhas de montagem de componentes, apresenta maior facilidade para implementar esta estrutura de produção. Mas devido à diferença de produtividade entre seus processos, as indústrias no geral se caracterizam pela manutenção de elevado estoque de matéria prima próxima ao processo produtivo e por um grande volume de produto semi-elaborado dentro do setor de produção, dificultando a movimentação interna e criação de um *layout* que realmente faça fluir a produção. Apresentam também limitações em termos de disponibilidade de recursos financeiros e qualificação de seus profissionais para implantação de melhorias. E as decisões são normalmente tomadas com base na experiência dos gestores dos processos e não especificamente em modelos matemáticos.

Algumas indústrias têm tido a dificuldade em implementar melhorias em seus sistemas logísticos internos e muitas delas não têm conseguido resultados satisfatórios, mesmo com a aplicação dos conceitos da manufatura enxuta. Liker (2005) considera como um dos fatores para o insucesso de algumas iniciativas, é que essas empresas “pensam que

têm de olhar para o fábrica da Toyota e seguir seu modelo. Não é o caso. Eles têm de seguir os princípios, eliminando o desperdício, mas a forma exata de fazer dependerá de seus processos específicos”. Portanto o conhecimento das técnicas, a observação dos processos e muita criatividade, são elementos importantes na implementação da manufatura enxuta.

A utilização de valores médios dos tempos de ciclo dos processos produtivos para o balanceamento de linhas de produção, não assegura uma representação confiável do sistema de produção, pois estes tempos são aleatórios e deveriam ser tratados como tal. A utilização da simulação para desenvolvimento de projetos de melhoria apresenta como vantagens, o tratamento estocástico dessas variáveis de processo e possibilita uma experimentação a baixo custo.

Este trabalho parte do pressuposto que a aplicação dos conceitos de manufatura enxuta nos processos produtivos contribui em muito para o desenvolvimento de processos mais econômicos, garantindo um melhor atendimento aos clientes e tornando as empresas mais competitivas. Tem como objetivo apresentar os termos e conceitos da manufatura enxuta, com base no Sistema Toyota de Produção, facilitando o entendimento de como as empresas poderão trabalhar para melhorar seus processos produtivos, de forma a conseguir a competitividade hoje necessária para a sobrevivência no mercado. A utilização da simulação dos processos, buscando certo número de soluções implementáveis, complementa o apoio que este trabalho busca dar às organizações na implementação da estratégia da manufatura enxuta, contribuindo para a redução dos custos relacionados à tentativa e erro, comuns a este tipo de projeto.

Não objetiva formalizar uma metodologia, mas facilitar aos gestores da produção, utilizar-se da simulação como base para a tomada de decisão.

### **1.1 Problema em Estudo**

Como melhorar os processos logísticos, aplicando o paradigma da manufatura enxuta nos processos de produção?

### **1.2 Hipótese**

Através da modelagem adequada é possível prever com maior precisão os benefícios oriundos da manufatura enxuta em uma empresa.

### 1.3 Objetivos

Desenvolver uma metodologia para utilização de simulação em projetos de manufatura enxuta, definindo etapas a serem seguidas na modelagem dos processos e na experimentação das alternativas de melhoria baseadas nos conceitos da manufatura enxuta, possibilitando uma avaliação da eficiência do sistema como um todo.

Este trabalho buscará avaliar a metodologia desenvolvida em um projeto de balanceamento de linhas de produção, que é uma condição básica para implantação da manufatura enxuta.

Busca também reduzir a distância entre a teoria descrita na literatura e a realidade das organizações.

### 1.4 Metodologia de Pesquisa

Este trabalho de pesquisa buscou desenvolver uma metodologia que facilite o uso da simulação em projetos de manufatura enxuta. Para tanto, após o desenvolvimento da metodologia proposta, foi realizado um teste de aderência, através da modelagem quantitativa de processos e posterior simulação, possibilitando comparar as eficiências conseguidas com a estratégia atual e com a estratégia *enxuta*.

Sendo o volume e a confiabilidade dos dados de processo uma das condições básicas para um trabalho de simulação, buscou-se o apoio de uma empresa de manufatura interessada em contribuir com a pesquisa e, de acordo com os resultados da simulação, poderia também melhorar seus processos produtivos. Em verdade uma troca, onde a empresa se comprometeria a fornecer os dados necessários e a pesquisa contribuiria com a pesquisa operacional utilizando simulação para a melhoria dos processos.

Indústrias com processos ainda dependentes da mão-de-obra humana em algumas partes do processo, com atividades de fabricação e montagem de peças, são adequadas para suportar pesquisas na área da manufatura enxuta. Também é importante que a alta direção da empresa tenha conhecimento dos conceitos e benefícios da manufatura enxuta, o que facilita o comprometimento para com o projeto de pesquisa. Alguns exemplos de empresas: indústria automobilística, autopeças, indústria de fabricação mecânica, caldeiraria e estrutura metálica seriada, montadora de componentes eletrônicos e indústria moveleira.

### **1.5 Técnicas de Coleta de Dados**

Para os dados de processo, após o mapeamento e determinação das variáveis, será elaborado um formulário para coleta, caso não exista um sistema de controle de produção.

Para os dados de produção serão consultados os arquivos do PCP.

### **1.6 Estrutura do Trabalho**

Este trabalho encontra-se estruturado nos conceitos principais: manufatura enxuta, simulação computacional, simulação em projetos de manufatura enxuta e a metodologia de utilização de simulação em projetos de manufatura enxuta. Para aqueles que necessitam de um maior entendimento desta filosofia de produção, inicialmente é apresentado um histórico da manufatura enxuta, numa breve referência ao sistema de produção em massa da Ford, ao Sistema Toyota de Produção e aos conceitos da manufatura enxuta (*lean manufacturing*), apresentando os desperdícios normalmente observados nas organizações, os cinco princípios do pensamento enxuto e os benefícios alcançados pelas organizações bem sucedidas nesta iniciativa. Depois são apresentadas as técnicas aplicáveis à manufatura enxuta, como o nivelamento da produção, manufatura celular, troca rápida de ferramentas, dentre outras.

Na segunda parte deste trabalho são apresentados os conceitos de simulação computacional, as vantagens de seu uso, terminologia, modelos e etapas de simulação e os softwares comerciais hoje disponíveis no mercado.

A terceira parte discute a utilização da simulação em projetos de manufatura enxuta, apresentando os trabalhos já desenvolvidos nessa área.

A quarta parte apresenta a metodologia sugerida para a utilização da simulação em projetos de manufatura enxuta, em todas as suas etapas.

A quinta parte apresenta o teste de aderência da metodologia, realizado em empresa apoiadora da pesquisa. Finalmente são apresentadas as conclusões, sugestões para pesquisas futuras, as referências bibliográficas e os anexos, complementando as informações sobre este trabalho.

## 2 MANUFATURA ENXUTA

### 2.1 Histórico da Produção em Massa

Para se entender o pensamento enxuto, é preciso retornar um pouco no tempo e recordar sobre a produção em massa de automóveis.

Henry Ford deu sua contribuição implementando em 1913, na fábrica de Highland Park, em Michigan, EUA, a montagem de automóveis em uma linha de produção onde os trabalhadores executavam tarefas repetidamente nos veículos que iam passando à frente deles. Esse processo terminava do lado de fora da fábrica, quando as carrocerias, na linha de montagem superior, deslizavam por uma rampa encontrando logo abaixo a linha de montagem do chassi completo com motor, finalizando assim, a fabricação do automóvel.



**Figura 2-1** - Linha de montagem do Ford Modelo T. Fonte: Wikipedia Assembly Lines.

Ford se inspirava no princípio de que quanto mais baixos forem os custos de produção, mais baixos serão os preços e maior será a demanda. Surgiu então o que é conhecido como Fordismo, que é a produção em massa de automóveis baratos em linhas de montagem e com uma remuneração melhor para os trabalhadores.

Segundo Womack e Jones (2004), Henry Ford e seus sócios foram os primeiros a perceber totalmente o potencial de se trabalhar num fluxo contínuo de produção. Ford reduziu em 90% a quantidade de esforço necessária para se montar o modelo T, durante o outono de 1913, simplesmente adotando o fluxo contínuo na montagem final.

O'Brien (1969) apresenta uma síntese dos elementos que compõem a linha de montagem implementada na fábrica de Henry Ford: “*distribuição da mão-de-obra,*

decompondo o processo de produção em tarefas separadas executadas por especialistas (homens, máquinas ou ambos) que não fazem outra coisa; *padronização de peças*, de modos a serem produzidas por operários não-especializados ou semi-especializados; *aparelhagem de precisão*, que torna possível tal padronização com projetos que especificam dimensões de até milésimos de polegada; a própria *linha de montagem*, o método de escoamento em linha para movimentar, uniformemente e em série, o trabalho de um operário ou de uma máquina até os seguintes; e se não existe *demanda em massa*, ou intensa procura por um produto, ninguém vai arriscar-se a montar máquinas para produzi-lo em massa”.

Ford pôs em prática o princípio básico para a linha de montagem, de levar o trabalho ao homem em vez do homem ao trabalho, utilizando dois métodos comuns estudados por Taylor e Gilbreth: nenhum operário jamais terá de dar um passo, se este puder ser evitado; nenhum operário terá jamais de curvar-se. Aplicou a técnica de distribuição de trabalho para acelerar a produção; distribuiu o processo em operações distintas, reduzindo quase pela metade os tempos de montagem; elevou a altura das linhas, facilitando o alcance mais conveniente dos operários. No período 1916-1917, Ford produziu 785.432 carros contra os 78.440 produzidos no período 1911-1913. O preço do Modelo T caiu de 690 para 360 dólares (O'Brien, 1969).

O Ford Modelo T, produzido entre 1908 e 1927, foi considerado como “carro universal” chegando a mais de 15 milhões de unidades produzidas. Para a época a estratégia de Henry Ford foi adequada, pois existia a carência de automóveis baratos, que atendesse à necessidade de locomoção das famílias de classe média. Obteve sucesso, enquanto trabalhava com grandes volumes de produção e produtos padronizados. Ford anunciava à época, que “o Modelo T pode ser adquirido em qualquer cor do arco-íris, contanto que seja preto”.

Para o gerente de produção, produzir um único modelo em grande quantidade seria o ideal. Porém para o gerente de marketing ou comercial, é preciso modelos que atendam à diversidade de clientes. Qualquer indústria que se baseie na produção em massa, sem, contudo, ter a atenção dirigida ao que o cliente realmente deseja, está se excluindo do mercado.

Ohno (1997), engenheiro da Toyota que participou da criação do Sistema Toyota de Produção, faz um reconhecimento a Henry Ford, como sendo o criador do sistema de produção automotiva.

## 2.2 Toyotismo ou o Sistema Toyota de Produção

O Toyotismo, como é também conhecido o Sistema Toyota de Produção, não começou especificamente na fábrica de automóveis da Toyota e sim na fábrica de teares de Sakichi Toyoda. Nascido em 1867, Toyoda conclui em 1924 o desenvolvimento de um dispositivo para automonitoramento de sua produção de teares. Já seu filho, Kiichiro Toyoda, nascido em 1894, se dedicou à manufatura de carros. Com o mesmo espírito de desenvolvimento e pesquisa de seu pai, finalizou o primeiro protótipo em 1935, quando começa então a história da Toyota.

Juntamente com engenheiro Taiichi Ohno, Sakichi Toyoda e seu filho Kiichiro Toyoda desenvolveram, logo após a Segunda Grande Guerra (mas efetivamente notado a partir da crise do petróleo de 1973), o Sistema Toyota de Produção (TPS), com base nos conceitos de qualidade de Edward Deming e nas linhas de montagem do sistema de produção em massa de Henry Ford. Porém, enquanto Ford produzia um grande número de carros de poucos tipos, o Sistema Toyota produz um número maior de opções de carros, em lotes menores. Henry Ford obteve sucesso à sua época. Mas os tempos mudaram. Hoje precisamos atender a cada um dos consumidores, com seus valores, necessidades e quantidades diferentes, no momento que eles precisam.

A base do TPS foi uma observação feita em uma máquina de sucos nos Estados Unidos, com um sistema de reposição automática. É uma filosofia que busca eliminar os desperdícios dentro da cadeia de produção e logística, incluindo a interação com os clientes e fornecedores (Wikipédia. Toyota Production System.). Hoje a Toyota é uma das maiores companhias do mundo e seu Sistema Toyota de Produção, ou mesmo seus princípios, são aplicados até por seus concorrentes norte-americanos (Womack e Jones, 2004).

Segundo Ohno (1997), a base do Sistema Toyota de Produção é aumentar a eficiência da produção pela eliminação consistente e completa de desperdícios, tendo dois pilares necessários à sustentação do sistema:

- *Just-in-Time*: em um processo de fluxo, as partes corretas necessárias à montagem alcançam a linha de montagem no momento em que são necessários, na quantidade necessária e isentas de defeitos. A partir deste conceito, foi testada idéia do sistema puxado, onde o fim da produção é tomado como ponto inicial e o fluxo de materiais é invertido de forma sincronizada, onde então se produz apenas para suprir pelo que vai

sendo retirado pelo processo posterior. A forma de controlar este fluxo é o *Kanban*, que faz a transmissão da informação no processo de produção e que será tratado no item 2.4.5.

- *Autonomação (Jidoka)*: automação com um toque humano. Não é a simples automação, que permite em linhas interligadas, a produção de grandes lotes de produtos com defeitos, devido à falta de um sistema de observação. A idéia da autonomação surgiu com o tear auto-ativado desenvolvido por Sakichi Toyoda, onde um dispositivo instalado parava a máquina sempre que um fio da urdideira ou da trama se rompesse.

A reorganização das máquinas no chão de fábrica, para estabelecer um fluxo de produção, eliminou o desperdício de estocar peças e auxiliou à Toyota atingir o sistema “um operador, muitos processos” e aumentou a eficiência da produção em duas e três vezes (Ohno, 1997).

Ohno (1997) define o Sistema Toyota de Produção:

O primeiro aspecto do Sistema Toyota de Produção é o *método de produção estilo Toyota*, que significa colocar um *fluxo* no processo de manufatura. Antigamente, os tornos localizavam-se na área dos tornos, e as máquinas de fresar na área de fresar. Agora, posicionamos um torno, uma máquina de fresar e uma perfuratriz conforme a verdadeira seqüência do processo de fabricação.

Desta maneira, ao invés de ter um operário por máquina, um operário supervisiona muitas máquinas, ou, mais precisamente, um operário opera vários processos. Isto melhora a produtividade.

A seguir vem o sistema *kanban*, uma ferramenta operacional que realiza o método just-in-time de produção. O *kanban* assegura que as peças corretas estejam disponíveis na hora e quantidade necessárias, funcionando como informação de remoção ou transporte, um pedido por transferência ou entrega de mercadorias e também como um *pedido de trabalho* dentro dos processos de produção.

Ohno (1997) destaca que tanto o sistema de Ford como o Sistema Toyota de Produção estão baseados no sistema de fluxo de trabalho. A diferença principal é que, Charles E. Sorensen, primeiro presidente da Ford Company, preocupou-se com o armazenamento das peças que seriam utilizadas para a montagem dos veículos, enquanto a Toyota eliminou o depósito. Outra diferença entre estes dois sistemas está relacionada ao volume de produção, onde o Sistema Toyota de Produção trabalha com lotes menores, para atender a diversidade do mercado, ajudando a produção a entender as necessidades dos clientes.

Shingo (1996) afirma que “a Toyota tem três características básicas que a distinguem da Ford: tamanhos pequenos de lote, produção de modelos mistos e operação de fluxo de

peças unitárias contínua, desde o processamento até a montagem final. A diferença entre a Ford e a Toyota é o fato da Ford produzir em massa poucos modelos, ao passo que a Toyota produz muitos modelos em pequenas quantidades”. Ele afirma que o Sistema Toyota de Produção realiza melhorias fundamentais no sistema de controle e gerenciamento da produção através das seguintes medidas:

- Redução drástica dos tempos de preparação;
- Uso destes *setups* reduzidos na busca constante da produção em pequenos lotes;
- Execução de operações de fluxos de peças unitárias, do processamento de peças ao processo de montagem;
- Ter como meta produção contra pedido através de um sistema de puxar.

Os resultados apresentados pela Toyota na atualidade, quando comparados com seus maiores concorrentes, são surpreendentes. Owen (2007) apresentou em seu artigo na Revista Exame, números que comprovam a eficácia do Sistema Toyota de Produção. Ele compara a Toyota com sua rival General Motors:

Valor de mercado		Produção		Faturamento em 2006		Resultado em 2006		Empregados	
(em bilhões de dólares)		(1º trimestre de 2007, em milhões de veículos)		(em bilhões de dólares)		(em bilhões de dólares)		Fonte: empresa	
Toyota	219	Toyota	2,35	Toyota	179	Toyota	12	Toyota	296 000
GM	18	GM	2,26	GM	207	GM	-2	GM	284 000

**Tabela 2-1** - Comparativo entre a Toyota e a GM. Fonte: Owen (2007)

Muitas indústrias passaram então a seguir o modelo Toyota, como referência para seus sistemas de produção. Mas não se deve copiá-lo e sim, entender seus principais conceitos e adequá-los à realidade de cada organização.

## 2.3 A Manufatura Enxuta

### 2.3.1 Conceitos de Manufatura Enxuta

James P. Womack, Daniel T. Jones e Daniel Ross, estudaram os processos de produção de diversas organizações ao redor do mundo e relataram o resultado deste estudo de *benchmarking* no livro *A Máquina que Mudou o Mundo* (Womack *et al.*, 1992). Eles encontraram “uma forma melhor de organizar e gerenciar nossos relacionamentos com clientes, cadeia de fornecedores, desenvolvimento de produtos e operações de produção” e utilizaram o termo *produção enxuta* (*lean production*), para denominar esta

abordagem. Despertaram então a atenção do mundo para esta “forma de fazer cada vez mais com cada vez menos”.

Womack e Jones (2004) buscaram complementar o trabalho anterior, provendo um melhor esclarecimento sobre os princípios do pensamento enxuto (*lean thinking*), apresentando como aplicar o pensamento, as técnicas e a organização enxuta.

No Brasil o pensamento enxuto é representado desde 1988 pelo Lean Institute Brasil, que em sua página na internet ([www.lean.org.br](http://www.lean.org.br)) define *Lean Thinking* como: “termo cunhado por James Womack e Daniel Jones para denominar uma filosofia de negócios baseada no Sistema Toyota de Produção, que olha com detalhe para as atividades básicas envolvidas no negócio e identifica o que é o desperdício e o que é o valor, a partir da ótica dos clientes e usuários”.

Hoje o paradigma da manufatura enxuta é discutido amplamente na literatura. É considerado como aplicável à maioria dos processos de produção, trazendo benefícios como melhora da produtividade, maior valor agregado aos produtos, redução de desperdícios e maior satisfação dos clientes. Baseia-se no pioneirismo do Sistema Toyota de Produção (TPS), cujos princípios enxutos podem ser resumidos como *valor* – valor para o cliente, *fluxo de valor* – onde realmente se cria este valor, *fluxo* – fazer com que as etapas que criam valor fluam, *puxar* – produzir apenas o que os clientes ou os processos seguintes solicitam e a *perfeição* – a busca pela melhoria contínua, removendo cada vez mais os desperdícios (Womack e Jones, 2004).

### **2.3.2 Desperdícios no Sistema de Produção**

O pensamento enxuto, em sua essência, busca identificar e eliminar todos os desperdícios existentes na cadeia de produção, concentrando esforços nas atividades que criam valor para o cliente. Por definição, desperdício é o ato ou efeito de desperdiçar, gastar sem proveito; esbanjamento; restos; refugos (Ferreira, 1986). De acordo com Womack e Jones (2004), é “qualquer atividade humana que absorve recursos, mas não cria valor”. Para Ohno (1997), “desperdício se refere a todos os elementos de produção que só aumentam os custos sem agregar valor – por exemplo, excesso de pessoas, de estoques e de equipamentos”.

Alguns dos desperdícios mais comuns encontrados em um sistema de manufatura são:

- Excesso de estoques de matéria prima;

- Excesso de produção, tanto de produto semi-elaborado como também de produto final;
- Movimentação excessiva, tanto de materiais como também de operadores;
- Fila de espera, aguardando liberação das máquinas para processamento, tanto de materiais como também de operadores; processos posteriores ociosos devido atraso no processo anterior;
- Tempo de transporte de matéria prima, produto semi-elaborado e produto final dentro dos processos;
- Perdas dentro do processo, como exemplo demora no aquecimento de máquinas ou mesmo de processos não necessários;
- Correção de falhas de produção devido à má qualidade ou ao não atendimento aos requisitos do cliente.

Este trabalho tem atenção aos desperdícios acima citados, porém fazendo uma análise nos processos organizacionais, podem-se identificar outros desperdícios, não limitados a:

- Utilização indevida ou prolongada de telefone, e-mails e internet;
- Luzes ligadas em salas e galpões onde não existem pessoas trabalhando;
- Vazamentos em tubulações nas linhas de processo;
- Baixa produtividade devido à falta de treinamento, conversas entre funcionários, ambiente inadequado, problemas ergonômicos;
- Processos de comunicação e aprovação, desde o pedido do cliente, passando pelo planejamento da produção até a expedição do produto final e transporte até o cliente.

A eliminação de todo desperdício existente nos processos das organizações levam a uma maior eficiência. Analisando todas as fontes de desperdícios identificadas anteriormente, não deixam dúvidas sobre os resultados alcançados com a implementação da manufatura enxuta.

Ohno (1997) sugere dois pontos para se ter em mente ao pensar sobre a eliminação total do desperdício:

1. O aumento da eficiência só faz sentido quando está associado à redução de custos. Para obter isso, temos que começar a produzir apenas aquilo que necessitamos usando um mínimo de mão-de-obra;
2. Observe a eficiência de cada operador e de cada linha. Observe então os operadores como um grupo e depois, a eficiência de toda a fábrica (todas as linhas). A eficiência deve ser melhorada em cada estágio e, ao mesmo tempo, para a fábrica como um todo.

O desenvolvimento da compreensão dos gerentes e supervisores em relação ao que é desperdício e as suas causas é fundamental para o sucesso de uma iniciativa *lean*. É preciso observar os processos e enxergar os desperdícios e as oportunidades de melhoria.

### 2.3.3 Princípios *Enxutos*

Womack e Jones (2004) resumem em cinco os princípios do pensamento enxuto: “determinar precisamente o *valor* por produto específico, identificar o *fluxo de valor* para cada produto, fazer o valor *fluir* sem interrupções, deixar que o cliente *puxe* valor do produtor e buscar a *perfeição*”. Os tópicos a seguir definem mais detalhadamente cada um desses princípios.

#### 2.3.3.1 Valor

O conceito de *valor* parte do pressuposto da real necessidade do cliente na utilização do produto. O que realmente é valor para o cliente. É o que o cliente está disposto a pagar.

Quando se fala em valor, é preciso uma perspectiva voltada para fora da organização, ou seja, para o cliente. Esta definição de valor pelo cliente final, leva em consideração sua real necessidade, o preço de produtos similares existentes no mercado e sua disponibilidade de dinheiro no momento da compra.

É como uma indústria de confecção, onde o cliente deseja comprar uma camisa que tenha um bom tecido, bom caimento e boa costura, a um preço considerado adequado a este nível de qualidade. Porém, se lançarmos os custos decorrentes de encargos financeiros dos estoques excessivos de tecidos no almoxarifado, do reprocesso de camisas devido ao corte inadequado das peças ou costura inadequada (provenientes de mão de obra não qualificada ou mesmo equipamentos inadequados), o preço se elevará a um nível não competitivo.



tecnologias existentes e repensar as empresas com base em uma linha de produtos com equipes de produtos fortes e dedicadas”. Mas com a devida atenção de se definir o valor em relação ao produto como um todo, lembrando que partes do processo de criação do produto poderão fluir através de mais de uma organização, que possuem formas diferentes de avaliação de valor.

É como uma viagem aérea, onde se gasta mais tempo em filas de esperas (*check in*, sala de embarque), taxiamento da aeronave na pista do aeroporto e escalas entre aeroportos, do que no tempo de trajeto propriamente dito.

### 2.3.3.2 Fluxo de Valor

Identificado o valor do produto ou família de produtos, do ponto de vista do cliente final, o próximo passo em direção à manufatura enxuta é identificar o fluxo de valor. O mapeamento do processo atual, comparado com o necessário para se criar o valor, normalmente expõe os desperdícios identificados anteriormente no item 2.3.2.

Womack e Jones (2004) definem o fluxo de valor como “o conjunto de todas as ações específicas necessárias para se levar um produto específico a passar pelas três *tarefas gerenciais críticas* em qualquer negócio: a *tarefa de solução de problemas* que vai da concepção até o lançamento do produto, passando pelo projeto detalhado e pela engenharia, a *tarefa do gerenciamento da informação*, que vai do recebimento do pedido até a entrega, seguindo um detalhado cronograma e a *tarefa de transformação física*, que vai da matéria-prima ao produto acabado nas mãos do cliente”. “Aplicamos o termo *fluxo de valor* ao conjunto inteiro de atividades que vai da matéria-prima ao produto acabado para um produto-específico e tentamos otimizar o todo do ponto de vista do cliente final (consumidor final da mercadoria ou serviço)”.

Tomando como exemplo o caso da confecção da camisa e limitando-se aos processos internos desta indústria de confecção, tem-se como fluxo de valor para este produto:

1. Colocação do pedido junto aos fornecedores de tecidos, linhas e botões;
2. Espera chegada dos tecidos, linhas e botões;
3. Recebimento dos tecidos, linhas e botões;
4. Colocação no almoxarifado;
5. Emissão da ordem de produção;
6. Emissão da requisição dos tecidos, linhas e botões pela área de produção;
7. Separação dos tecidos, linhas e botões;
8. Transporte para a área de produção;
9. Distribuição do tecido sobre a mesa de corte;
10. Montagem do plano de corte no computador;
11. Impressão do plano de corte;
12. Posicionamento do plano de corte sobre o tecido na mesa de corte;
13. Corte das peças;
14. Transporte até a área de estocagem intermediária;

- |   |   |
|---|---|
| 15. Estocagem intermediária das peças junto á área de montagem da camisa; | 24. Colocação na caixa;                           |
| 16. Montagem das peças de cada camisa;                                    | 25. Identificação do modelo e numeração na caixa; |
| 17. Transporte para a área de costura;                                    | 26. Transporte para o depósito;                   |
| 18. Costura;  | 27. Estocagem no depósito;                        |
| 19. Transporte até a área de prega dos botões;                            | 28. Emissão ordem de expedição;                   |
| 20. Prega dos botões;   | 29. Emissão da nota fiscal;                       |
| 21. Transporte até a área de passamento a quente;                         | 30. Montagem dos lotes de transporte;             |
| 22. Passamento a quente;  | 31. Carregamento dos veículos de transporte;      |
| 23. Dobra;  | 32. Transporte e distribuição.                    |

No caso da confecção da camisa, podemos identificar as operações que realmente agregam valor:

- |  |                          |
|--|--------------------------|
| 13. Corte das peças;                   | 20. Prega dos botões;    |
| 16. Montagem das peças de cada camisa; | 21. Passamento a quente; |
| 18. Costura;                           |                          |

Todas as demais operações não agregam valor diretamente ao produto, porém podem ser operações sem as quais não se consegue produzir ou mesmo operações desnecessárias a serem eliminadas, normalmente presente nos processos, porém não observadas pelos gerentes ou supervisores. Este tema será tratado mais detalhadamente no item 2.3.3.3.

Após a identificação daquelas atividades que realmente agregam valor, pode-se definir o custo-alvo através do custo de cada uma dessas operações, com base nos recursos e tempo de processamento. E numa reorganização dos processos, alcançando um custo de produção mais enxuto, aumentando a competitividade e as vendas e incrementando a utilização dos recursos, agora com maior produtividade.

A exemplificação do fluxo de valor limitou-se aos processos internos da indústria de confecção, porém o pensamento enxuto precisa ir além da empresa e olhar o todo, ou seja, considerar também os processos de produção e beneficiamento do tecido; até mesmo, se adequado, até o plantio da semente de algodão. É como faz a Toyota, que após se tornar uma empresa enxuta, passou a prover orientação a seus fornecedores, de forma que também eles tivessem uma manufatura enxuta. Womack e Jones (2004) definem como “empreendimento enxuto (*lean enterprise*) a essa reunião contínua de todas as partes envolvidas para criar um canal para o fluxo de valor total, eliminando qualquer desperdício”.

Slack *et al.* (2002) propõem um formulário para elaboração do diagrama de fluxo do processo, que adaptado de forma a incluir os processos de informação, é apresentado no

anexo 2. Utilizando deste formulário, podemos elaborar o diagrama de fluxo de processo do produto escolhido, descrevendo cada elemento do processo e posteriormente desenhando o diagrama através de linhas, conectando cada um dos símbolos que caracteriza este elemento: informação, operação, movimento, inspeção, espera e estocagem. Importante analisar criteriosamente quais etapas criam valor e aquelas que não criam valor.

### 2.3.3.3 Fluxo

Fluxo é fazer com que as etapas que criam valor fluam, ou seja, etapa por etapa vai se criando valor no produto. É eliminar todos os desperdícios existentes entre as etapas. Tomando o exemplo da viagem aérea, seria criar um voo direto, sem escalas, *check in* avançado, mais balcões para despacho de bagagens, sem filas de esperas. Nada que possa se considerar como impossível para a tecnologia disponível atualmente.

Womack e Jones (2004) apresentam como exemplo a postagem de correspondências onde se pode trabalhar por lotes, dobrando primeiro todas as correspondências, depois colocando todas elas nos envelopes e assim por diante; ou trabalhar de forma seriada, ou seja, dobrar, colocar no envelope, fechar, colar o selo. Esta última forma de organizar o trabalho tem sido mais eficiente quando se pensa em manufatura enxuta, pois não existe a espera de grande volume de peças para processamento: “trabalha continuamente no produto, da matéria-prima à mercadoria acabada”. Estes autores sugerem algumas etapas para fazer o valor fluir, num fluxo estável e contínuo, sem movimentos inúteis, sem interrupções, sem lotes e sem filas:

- Focalizar no produto específico, considerando o projeto, o pedido, a produção do produto e entrega ao cliente;
- Ignorar as fronteiras tradicionais que limitam o alcance da empresa enxuta (tarefas atuais, profissionais, funções, equipamentos);
- Repensar as práticas e ferramentas de trabalho para o produto específico, de forma a conseguir o fluxo contínuo.

Existem algumas abordagens para analisar este assunto, como o fizeram Neumann *et al.* (2006), que apresentaram um estudo comparando as estratégias de fluxo em paralelo com fluxo em série, no desenho de sistemas de produção. Eles exploraram as vantagens

e desvantagens na mudança de linhas de montagem baseadas em células paralelas para linhas em série, numa companhia sueca, com o foco em produtividade e ergonomia.

Outro problema frequentemente observado em organizações de produção são as filas de informações aguardando processamento. Por exemplo, o grande número de pedidos de compras no departamento de suprimentos da empresa e que frequentemente também retornam para o departamento solicitante adequar informações sobre os requisitos, o que pode ser considerado como retrabalho.

Para entendimento sobre o fluxo contínuo, alguns conceitos se fazem necessário:

*Lead time*: tempo total de transformação da matéria prima em produto final; tempo do pedido à entrega; tempo de processamento de todas as operações de produção.

*Tempo takt*: palavra alemã que significa o intervalo de tempo na métrica musical; total de tempo disponível para produção dividido pela quantidade de itens a serem produzidos; tempo médio de saída entre duas unidades produzidas. No exemplo da confecção, se deverão ser produzidas 880 camisas para atender a demanda no mês e sabendo-se que temos 176 horas (1 turno de produção) disponíveis por mês, o tempo *takt* será de 12 minutos. Ou seja, a cada 12 minutos 1 camisa deverá ficar pronta.

*Tempo de ciclo*: tempo necessário para se realizar uma determinada operação de produção, antes que o operador passe novamente a realizar a mesma operação em outra peça.

Às vezes se torna difícil deixar de lado os paradigmas da manufatura tradicional, desenvolvidos ao longo de anos e anos de produção, o que impossibilita enxergar os desperdícios no processo. O item 2.4.18 trata justamente de como definir o fluxo de valor e os desperdícios existentes no processo.

#### **2.3.3.4 Puxar**

Womack e Jones (2004) alertam para o risco de aplicar os conceitos de manufatura enxuta, reduzindo-se o *lead time* dos produtos, porém em desacordo com o que o cliente considera como valor. Em resumo: pode ser que “produtos inúteis fluam mais rapidamente”. Para evitar esta possibilidade, é introduzido então o conceito de *puxar*, onde “um processo inicial não deve produzir um bem ou um serviço sem que o cliente de um processo posterior o solicite”.

Para entender melhor este tema, o exemplo do Gol, automóvel mais vendido no Brasil no ano de 2006, com 189.000 unidades. Consultando o site da Volkswagen do Brasil ([www.vw.com.br](http://www.vw.com.br)), encontramos 3 opções de modelo, 3 motorizações diferentes, 8 cores disponíveis e 50 conjuntos opcionais diferentes. Em alguns modelos fabricados no Brasil, a espera por um veículo encomendado de acordo com a customização feita por um cliente frente às opções existentes, pode chegar a mais de 2 meses. O que ocorre normalmente neste caso: ou o cliente compra o que tiver na concessionária, sem todos os opcionais desejados, ou desiste da compra e busca outro modelo de outro fabricante. Segundo Womack e Jones (2004), no Japão a Toyota chega a um *lead time* de uma semana apenas.

Numa visão de atendimento aos desejos do cliente, torna-se praticamente impossível manter um estoque mínimo para cada veículo, atendendo a todas as combinações de motores, cores e acessórios. A fim de garantir as vendas e a satisfação total dos clientes, as montadoras de veículos têm buscado novas formas de trabalho para atender a estes requisitos. Porém não é fácil na prática a implementação de um sistema puxado. Além dos processos serem demorados desde o momento da compra, como por exemplo, cadastro e consulta da situação do cliente e para pôr em programação na linha de montagem, tem-se a complexidade da cadeia total de suprimentos, neste caso, a indústria de autopeças. Womack e Jones (2004) fazem uma crítica ao sistema *Just-in-Time* adotado por algumas montadoras, que com o passar dos anos “tornou-se simplesmente uma transferência completa de estoques enormes da montadora final para o fornecedor da primeira camada e, em seguida, dele para os fornecedores das camadas anteriores no fluxo”.

Lee *et al.* (1977) estudaram outro problema: de como a informação transferida em forma de pedidos, entre companhias de uma mesma cadeia de suprimentos, tende a ser distorcida. Este efeito pode prejudicar as companhias mais a montante desta cadeia de suprimentos, no que se refere à tomada de decisões em relação à produção e estoques. A distorção das informações tende a aumentar cada vez mais à medida que se move para o extremo à montante da cadeia de suprimentos, criando o chamado *Efeito Chicote*. Os autores analisaram quatro fontes principais de distorção: previsão da demanda, jogo de racionamento, pedido por lote e flutuações dos preços e discutiram ainda as formas de mitigar o efeito negativo destas distorções. Outro desafio a ser superado é a volatilidade de mercado e a mudança nos padrões de consumo. Quando se estuda a fundo a demanda

das empresas, observa-se certa estabilidade nas compras feitas pelos clientes. E quando a área de vendas se aproxima dos clientes buscando obter deles a visão da demanda futura, que sendo entendida por toda a cadeia de suprimentos, tem-se como resultado uma demanda consolidada, que beneficiará o planejamento da produção de forma puxada e nivelada, permitindo um tempo de resposta quase instantâneo aos pedidos dos clientes. Isso trará como benefícios uma redução nos espaços requeridos para estocagem de produtos semi-elaborados e acabados, redução no inventário e conseqüente liberação de recursos para investimentos que sejam geradores de receita.

Para se conseguir realmente um sistema puxado, o paradigma de grandes estoques e pedidos em lotes deve ser deixado de lado. Alguns setores têm mais facilidade para compreender esta questão, como por exemplo, produtos perecíveis. Outros setores se tornam mais resistentes. Mas o desafio poderá ser superado, mesmo que de forma não tão imediata, através de uma reorganização interna (processos, *layout*), da determinação precisa da demanda esperada e do lote de segurança e da redução dos tempos de troca de ferramentas, que permitirá uma redução nos tamanhos dos lotes. Isto permitirá uma maior confiabilidade no sistema.

#### **2.3.3.5 Perfeição**

A *Perfeição* se refere à busca contínua pela melhoria dos processos, descobrindo sempre melhores formas de se criar valor. A aplicação dos conceitos e técnicas da manufatura enxuta, mesmo tendo um foco no curto prazo, deve considerar uma visão do longo prazo, para o alcance da perfeição. Pois a conversão de uma empresa com processos tradicionais de produção em lotes e filas, em uma empresa enxuta, com processos baseados no fluxo contínuo puxado pelo cliente, leva-se tempo. Passa por todas as empresas da cadeia de suprimentos, buscando a criação do empreendimento enxuto. É um processo de mudança cultural, como será visto no item 5.1.3.

A *Perfeição* busca também a valorização dos profissionais dedicados a essa melhoria, que recebendo o *feedback* imediato sobre o retorno de seus esforços, como o aumento na satisfação do cliente ou mesmo uma melhor organização do trabalho, se sentem estimulados a participar cada vez mais intensamente e comprometidos com o pensamento *Lean*.

Deixar de lado o paradigma do impossível, do inalcançável. Passar a acreditar e traçar o caminho para se chegar lá. A prática do pensamento enxuto leva a um ciclo de melhoria contínua, um processo incremental, onde sempre encontraremos outras formas de eliminar cada vez mais os desperdícios. E as oportunidades de melhoria são muitas: redução do *setup*, das folgas entre as operações, do tempo de transporte, redução de custos operacionais, defeitos zero e outras mais.

#### **2.3.4 Benefícios *Lean***

Os conceitos e princípios da manufatura enxuta são simples, em sua compreensão como também na aplicabilidade nas organizações. Normalmente não necessita de tecnologias avançadas ou mesmo grandes investimentos em instalações e equipamentos, trazendo retorno em curto espaço de tempo. A seguir alguns benefícios da manufatura enxuta:

- Aumento na segurança do trabalho e melhoria da saúde ocupacional;
- Melhora no nível de moral dos trabalhadores;
- Aumento na produtividade e na capacidade de produção;
- Redução do estoque de produto semi-elaborado entre os processos e de produto final nos depósitos;
- Redução nos espaços requeridos para estocagem de produtos semi-elaborados e acabados;
- Propicia uma visão clara das capacidades do sistema de produção;
- Redução dos custos operacionais de produção;
- Redução no prazo de desenvolvimento de novos produtos;
- Reduz o tempo de troca de ferramentas para mudança do *mix* de produtos na linha de produção e maior flexibilidade dos processos;
- Redução no número de pedidos processados em regime de urgência;
- Redução do *Lead Time*;
- Melhora no relacionamento da área comercial com a área de produção;
- Melhoria da qualidade do produto final;
- Aumento na satisfação dos clientes.

## 2.4 Técnicas Aplicadas à Manufatura Enxuta

Utilizando o *Mapeamento do Fluxo de Valor*, muitos pontos críticos nos processos de produção se tornarão aparentes. Para minimizar ou até mesmo eliminar estes pontos críticos, muitas técnicas foram sendo desenvolvidos.

Porém existe uma compreensão, às vezes errônea, em relação à estratégia da manufatura enxuta. É freqüente sua interpretação como sistema *Just-in-time* ou até mesmo como sistema *Kanban*, que em verdade, são 2 das muitas técnicas aplicadas. Justificada por esta aparente confusão, esta seção se dedica a apresentar as principais técnicas da manufatura enxuta, também conhecidas como Sistema Toyota de Produção. Pode ser que não seja necessária uma grande revolução no sistema de produção, mas é importante conhecer as técnicas e aplicar aquelas mais convenientes ao processo produtivo específico.

### 2.4.1 *Just-in-Time (JIT)*

*Just-in-time* é o primeiro pilar do Sistema Toyota de Produção. No momento certo, as peças necessárias à operação chegam ao posto de trabalho, com a qualidade necessária e sem a formação de estoques intermediários. Segundo Shingo (1996), “muitas pessoas consideram o *just-in-time* a característica proeminente do Sistema Toyota de Produção. Porém o *just-in-time* não é mais que uma estratégia para atingir a produção sem estoque (ou estoque zero). O mais importante é o conceito de produção com estoque zero”.

Segundo Vollmann *et al.* (1997), o *Just-in-time* reúne não só os conceitos e técnicas do planejamento e controle da produção, mas também é uma base filosófica para administração da produção, trazendo benefícios como redução da complexidade do planejamento de materiais, da necessidade de rastreamento no chão de fábrica, dos estoques em processos e da logística de suprimentos.

Ballou (2006) apresenta a utilização da filosofia *just-in-time*, tanto na programação de suprimentos como também na programação da distribuição:

“A programação *just-in-time* (JIT) é uma filosofia operacional que representa alternativa ao uso de estoques para que se possa cumprir a meta de disponibilizar os produtos certos, no lugar certo e no tempo certo”.

“É uma filosofia de planejamento em que todo o canal de suprimentos é sincronizado para reagir às necessidades das operações dos clientes”.

“Os conceitos incorporados na programação de suprimentos *just-in-time* podem ser também aplicados ao canal de distribuição física”.

Ballou também apresenta como principais características do *just-in-time*:

- Relações privilegiadas com poucos fornecedores e transportadores
- Informação compartilhada entre compradores e fornecedores
- Produção/compra e transporte de mercadorias em pequenas quantidades são frequentes e se traduzem em níveis mínimos de estoques
- Eliminação das incertezas sempre que possível ao longo do canal de suprimentos
- Metas de alta qualidade.

A Figura 2-3 ilustra como é o *just in time* numa linha de montagem de automóveis. O operário 1 consulta o cartão *kanban*, no posto de trabalho 27, para saber o modelo das rodas que serão montadas no carro no posto 28. Ele então inspeciona e posiciona um jogo com 4 rodas próximo ao posto 28, no momento necessário. O operário 2 confirma o modelo da roda e monta no veículo. A estante de rodas funciona como um supermercado, onde o ponto de ressuprimento indicado na estante irá determinar o momento de emissão do *kanban de movimentação*. Normalmente o ponto de ressuprimento é determinado considerando alguma política de ressuprimento, como por exemplo, lote econômico e também considerando o *lead time* do fornecimento. Se existe flutuações na demanda, a frequência da emissão do *kanban de movimentação* deverá ser alterada.

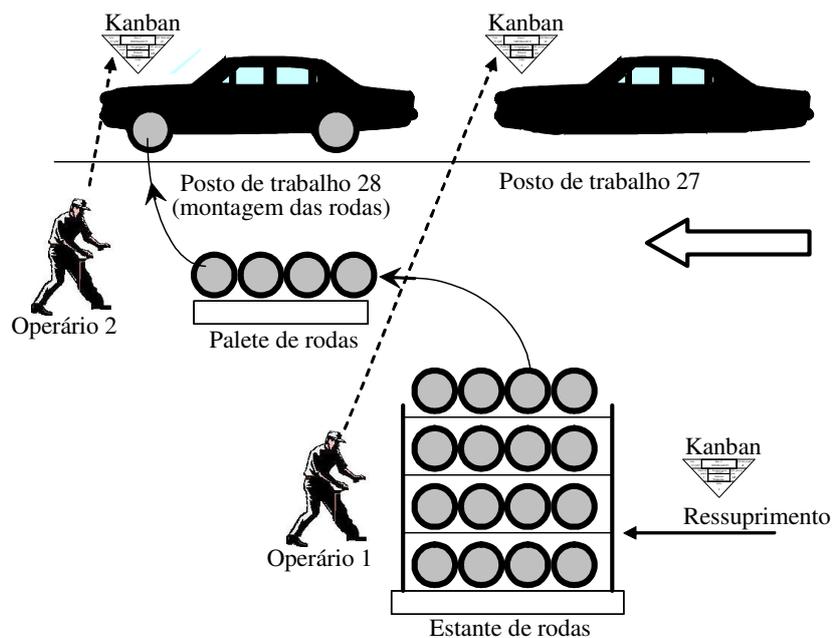


Figura 2-3 - *Just in Time* numa linha de montagem automotiva.

### 2.4.2 Automação (*Jidoka*)

Produtos isentos de defeitos é uma condição primordial quando se trabalha em um sistema *just-in-time*. Portanto, para se garantir que os produtos estarão livres de defeitos, dispositivos de parada automáticos devem ser instalados nas linhas de produção. Se um processo estiver gerando defeitos, ele pára automaticamente. E como os estoques estão baixos, o processo subsequente também pára. E todos ficarão sabendo que existe um problema de qualidade. Na linha de produção tradicional, os estoques intermediários impedem que se enxerguem estes problemas. Slack *et al.* (2002) fazem um comparativo entre os estoques e a água de um rio, que nos impedem de ver as pedras do fundo (os desperdícios de processo). Já Ohno (1997) faz um paralelo entre a fábrica e o corpo humano, que com seu sistema nervoso autonômico nos alerta sobre alguma disfunção, mesmo quando estamos dormindo. O mesmo acontece numa fábrica, que deve possuir sistemas para responder automaticamente quando ocorrem problemas.

O segundo pilar do Sistema Toyota de Produção, a *automação* é a automação com um toque humano. São dispositivos instalados nas máquinas que irão impedir a produção de produtos com defeitos. O sistema de conferência desenvolvido por Sakichi Toyoda no seu tear auto-ativado foi a base do desenvolvimento dos sistemas de automação, como exemplo os dispositivos de parada automática, dispositivos de segurança e dispositivos a prova de erros. Estes dispositivos permitem que a máquina trabalhe sem a supervisão direta do operador, que passa a supervisionar a produção de diversos equipamentos ao mesmo tempo. A Figura 2-4 apresenta um tear, onde pode ser observada no canto superior esquerdo, uma haste com 4 níveis de lâmpadas sinalizadoras de problemas, permitindo que o operador se afaste da máquina em produção normal. Esse sistema permite que em uma sala de tecelagem, apenas 3 operários são necessários para um grupo de aproximadamente 20 máquinas.



**Figura 2-4** - Sistema autônomo de tear Tsudakoma.

A autonomia envolve também desenvolver a capacidade de decisão dos operadores de chão de fábrica, basicamente no sentido de saber o que fazer quando a linha pára por problemas de qualidade ou falta de peças.

Com isto tanto o supervisor da área, como os demais colegas, tomam conhecimento sobre o problema. É quando surgem então as oportunidades de melhoria, com a participação de todos.

Numa associação dos dois pilares do Sistema Toyota de Produção, a autonomia corresponde ao talento e habilidade dos operadores individuais, enquanto o *just-in-time* é o trabalho da equipe de operadores na busca por um determinado objetivo. A liderança é feita pelos gerentes e supervisores de área, que desenvolvem dispositivos automáticos para detecção de problemas e parada da máquina, com sinalizadores e sistemas que facilitem a intervenção humana. São criados procedimentos de trabalho padronizado, quando então são treinados todos os operadores, tanto no desenvolvimento das habilidades individuais, como também para o trabalho em equipe.

O sistema de sinalização citado anteriormente é conhecido como controle visual, gestão pela visão ou gestão à vista. Permite trazer ao conhecimento da equipe como está o desempenho do processo, incluindo o desempenho de operadores e máquinas. Em caso de desempenho insatisfatório, serão adotadas as contramedidas necessárias.

Ohno (1997) declara:

Na Toyota, este conceito é aplicado não somente à maquinaria como também à linha de produção e aos operários. Em outras palavras, se surgir uma situação anormal, exige-se que um operário pare a linha. A autonomia impede a fabricação de produtos defeituosos, elimina a superprodução, e pára automaticamente no caso de anormalidades na linha, permitindo que a situação seja investigada.

Uma linha de produção que não pára pode ser tanto uma linha perfeita como também uma linha com muitos problemas. Quando muitas tarefas estão projetadas para uma linha e o fluxo não pára, isto significa que os problemas não estão aparecendo. Isto é ruim.

É importante dispor a linha de um modo que ela possa ser parada quando necessário:

- para impedir que se gerem produtos com defeitos;
- para aperfeiçoar o trabalho com poucos operários apenas; e finalmente
- para desenvolver uma linha que seja forte e raramente necessite ser parada.

Não há razão alguma para se temer uma parada na linha.

Para Shingo (1996), a autonomia é um dos muitos meios disponíveis para atingir as reduções do custo de mão-de-obra, defendendo-a como meio de atingir este objetivo, não sendo especificamente um fator de distinção do Sistema Toyota de Produção.

### 2.4.3 Nivelamento da Produção

O *nivelamento da produção* busca distribuir a produção de forma homogênea ao longo da jornada de trabalho. Tomando como exemplo uma linha de montagem de automóveis, o número total de carros a serem produzidos no mês será dividido pelo número de dias disponíveis para produção, ou seja, nivelando o número de carros a serem produzidos por dia de trabalho. Numa demanda de 10.000 carros por mês, distribuídos ao longo de 20 dias de trabalho, deverão ser produzidos 500 carros por dia, sendo 200 sedans de 4 portas, 200 modelos *hatch* de 4 portas e 100 modelos *hatch* de 2 portas. É importante o desenvolvimento de uma linha de montagem flexível, que permita produzir qualquer tipo de carroceria (*sedan*, *hatch*, 2 ou 4 portas) e a montagem de qualquer tipo de acessório.

É o que fez a Toyota com seu sistema de produção. Ela procurou adaptar-se à diversidade do mercado, com consumidores exigindo diversas combinações de cores e equipamentos, nos diversos modelos produzidos. Esta diversidade certamente contribuiu para reduzir a eficiência produtiva. Mas a Toyota soube lidar com esta nova realidade, desenvolvendo e flexibilizando seus processos, para produzir diversos tipos de veículos em pequenas quantidades. O Sistema Toyota de Produção tem se mostrado bem mais eficiente que o sistema fordista de produção em massa, que trabalhava com grandes lotes de um mesmo produto (Ohno, 1997).

Porém podemos observar, em alguns sistemas não nivelados, a produção mais apertada em alguns períodos do mês ou mesmo da semana. Normalmente caracterizado por trabalho em horário extraordinário na proximidade da data de entrega do pedido e uma ociosidade após a entrega. Esta flutuação implica na necessidade de aumento na capacidade de produção e dentro dos processos irá implicar num excedente de produção no processo precedente, de forma a atender as retiradas irregulares, tanto no tempo quanto nas quantidades, do processo subsequente.

Ohno (1997) destaca que “estabelecer (1) um fluxo de produção e (2) uma forma de manter um constante suprimento externo de matérias-primas para as peças a serem trabalhadas era o modo pelo qual o Sistema Toyota, ou japonês, de produção deveria ser operado”.

Produzir acima da necessidade é desperdício. Gera estoques, necessidade de mais depósitos, aumentam os custos relacionados a inventário. Portando as quantidades a

serem produzidas devem ser iguais às quantidades demandadas pelos clientes. Por isso a área de vendas e o planejamento da produção devem estar integrados como equipe e não isoladas como departamentos. A previsão da demanda é fator crítico para o nivelamento da produção. E não basta apenas trabalho com os dados históricos do passado, mas também com uma visão do futuro, conseguida através da aproximação com os clientes. Isto se torna mais fácil nas operações de venda a atacado, onde os fornecedores têm uma carteira de clientes razoavelmente identificada e estável.

O nivelamento da produção envolve uma discussão direta com os clientes e fornecedores, a fim de identificar suas reais necessidades, negociando prazos, entregas parciais e outros fatores que influenciam o processo produtivo, buscando uma flutuação na linha de produção próxima de zero.

É necessário evitar a flutuação nos processos iniciais, manter os níveis de estoques de peças o mais baixo possível, a flexibilização da linha de montagem e o desenvolvimento de sistemas de troca rápida de ferramentas. Idéias contrárias às práticas do passado.

Quanto maior a diversificação do mercado, mais difícil será o nivelamento da produção. Portanto, maior será o esforço para sua implementação. Porém os resultados compensam este esforço.

Ohno (1997) complementa:

Numa linha de produção, as flutuações no fluxo do produto fazem aumentar o desperdício. Isto se dá porque equipamento, operários, inventário, e outros elementos exigidos para a produção precisam estar sempre preparados para um pico. Se um processo posterior varia sua retirada das peças em termos de tempo e quantidade, a extensão destas flutuações aumentará conforme elas forem avançando na linha em direção aos processos anteriores.

A fim de evitar flutuações na produção, mesmo nas associadas externas, precisamos tentar manter a flutuação na linha de montagem final em zero. A linha de montagem final da Toyota nunca monta o mesmo modelo de carro em um “volume”. A produção é *nivelada* fazendo-se primeiro um modelo, depois outro e então outro.

#### **2.4.4 Sistema Puxado**

A Toyota trabalha com o conceito de supermercado. Em cada prateleira é mantida uma quantidade de mercadoria, para a venda diária, seguindo uma distribuição de probabilidade de vendas, baseada em vendas passadas. As mercadorias retiradas pelos clientes são repostas diariamente pelo repositor de estoque. Para o armazém do supermercado, local onde são armazenados os estoques de reposição das prateleiras, são

mantidos estoques mínimos, calculados considerando o custo do pedido, o *lead de time* de entrega e o custo unitário dos produtos. Alguns produtos na Toyota têm um controle mais fácil de estoque, como por exemplo, o de motores para o modelo Corolla, que no Brasil segundo a Anfavea (2007) vende mais de 30.000 unidades por ano, com 2 opções de motorização (Toyota, 2007). Porém o veículo final, exceto para os modelos básicos, não permite a manutenção de estoques para venda futura, pois os clientes exigem a customização conforme seus desejos.

No sistema empurrado, o planejamento da produção é feito com base na previsão de demanda e nos estoques disponíveis. Já no sistema *puxado*, o processo final retira as quantidades necessárias do processo precedente num determinado momento e este procedimento é repetido na ordem inversa passando por todos os processos anteriores. O Sistema Toyota de Produção é um sistema puxado.

O sistema de produção puxado, onde o processo subsequente busca os produtos no processo precedente, não sendo este dedicado a apenas um tipo de produto, requererá trocas de ferramentas com maior frequência (Ohno, 1997). O item 2.4.10 aborda este tema.

Sobre o sistema puxado, também conhecido como produção contra pedido, Shingo (1996) destaca:

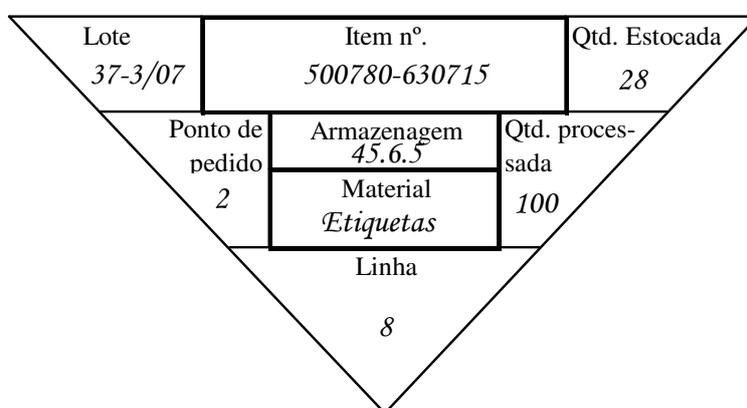
“A programação baseada no pedido da Toyota tem relação com a demanda real. Quando a demanda aumenta, o mercado da empresa amplia-se. Durante esses períodos, a produção antecipada pode acompanhar a demanda real sem perdas. Mas em condições normais de mercado, a demanda real deve determinar a produção”.

De acordo com Shingo (1996), a Toyota trabalha com níveis baixos da capacidade de produção e para suprir as flutuações sazonais da demanda, utiliza-se de horas extras e trabalhadores temporários. Neste último caso, os operadores que supervisionam, por exemplo, 10 máquinas a 50% de capacidade, passam a supervisionar apenas 5, a uma taxa para 100%.

Tornar os processos produtivos puxados, sem estoques, é o grande desafio para os gerentes de produção, principalmente quando se trata de demandas incertas ou com grandes flutuações. O caminho para se conseguir a produção puxada passa pela reorganização do fluxo de produção, troca rápida de ferramentas, eliminação de transportes desnecessários e alcance do menor *lead time* possível, próximo da somatória dos tempos das operações que realmente agregam valor.

### 2.4.5 Kanban

*Kanban* são instruções colocadas num pedaço de papel para comunicar de forma clara e direta, informações necessárias ao operador da estação de trabalho, como por exemplo, quantidade a produzir, quantidade retirada, quantidade recebida, código do item, estoque mínimo, estoque atual, local de armazenagem. O *kanban* funciona como um pedido de produção para os processos anteriores. O *kanban de produção* é um quadro de sinalização que circula por todos os processos para controlar a quantidade produzida, de forma a se produzir apenas o necessário, reduzindo-se assim os desperdícios e estoques de produto semi-elaborado e produto acabado. O *kanban de movimentação* indica que as peças retiradas devem ser substituídas pelas peças compradas. A Figura 2-5 apresenta um exemplo de *kanban*.



**Figura 2-5** - Cartão *kanban* - adaptado de Slack *et al.* (2002).

*Kanban* é a ferramenta para administrar o Sistema Toyota de Produção (que é o método de produção) e foi criado por Taiichi Ohno após observar os supermercados americanos em suas viagens para conhecer fábricas nos Estados Unidos. Num supermercado o cliente pode encontrar o que ele precisa, no momento que ele precisa, na quantidade necessária; uma relação direta com o *just-in-time*. Deve ser implementado com base numa filosofia total. Foi criado para aumentar a eficiência global e melhorar o ambiente de trabalho através do conceito do processo subsequente ir para o precedente buscar os produtos que precisa (Ohno, 1997).

Shingo (1996) apresenta como principal característica do sistema *kanban* o sistema de reabastecimento do estoque somente pela reposição do que foi vendido, chamando isto de “pedido de substituição”. Mas ele também afirma que os sistemas *kanban* “podem ser usados somente em fábricas com produção repetitiva e que a natureza repetitiva da

produção pode não exercer muita influência, contudo, se houver instabilidades temporais ou quantitativas”.

Ohno (1997) aplicou o conceito do supermercado no chão de fábrica, aonde o “cliente vai até o processo inicial (supermercado) para adquirir as peças necessárias (gêneros) no momento e na quantidade que precisa. O processo inicial imediatamente produz a quantidade recém retirada (reabastecimento das prateleiras)”. O problema apenas seria se o processo final tomasse grandes quantidades de uma vez só. Neste caso, voltamos à questão do nivelamento da produção, conforme tratado no item 2.4.3. Ohno declara que quando as peças chegam antes de realmente serem necessárias e não no momento exato, tem-se a formação de estoque e o desperdício não pode ser eliminado.

Algumas vantagens da utilização do sistema *kanban*:

- Organiza a produção de forma a se produzir apenas o necessário (evita a superprodução, que é a maior perda na produção);
- Reduz os estoques intermediários e de matéria prima;
- Reduz o tamanho dos depósitos e das equipes dedicadas a controle e movimentação de estoques;
- Facilita o controle gerencial e de supervisão de processos;
- Possibilita melhores condições no trabalho e nos equipamentos.

Ohno (1997) dá como exemplo os carrinhos de transporte de motores na Toyota, que funcionam como *kanban*. Por ter capacidade limitada, por exemplo, 5 motores, ele não permite a superprodução. Quando o 5º motor é colocado no carrinho, o operador leva os 5 motores para o processo de montagem nos veículos, retornando o carrinho para o processo anterior, o que libera a montagem de mais 5 motores (Ohno, 1997).

O Sistema Toyota de Produção também se preocupa em não gerar informações desnecessárias. Em suas fábricas, o setor de planejamento e controle de produção recebe as informações sobre quais carros serão produzidos no próximo mês, fazendo o nivelamento da produção diária. Porém os processos não são informados com esta antecedência. Já na linha de montagem, um *kanban* com o modelo e características específicas ou opcionais, é passado para o processo. A Figura 2-6 ilustra este sistema. Podemos observar que as informações sobre o carro 14 são passadas em um cartão *kanban* para o posto de montagem de motores. O carro 10, já com o motor montado, já

teve as informações passadas para o processo de montagem do console (próxima montagem) e já está passando as informações para a estação de montagem dos vidros (Ohno, 1997).

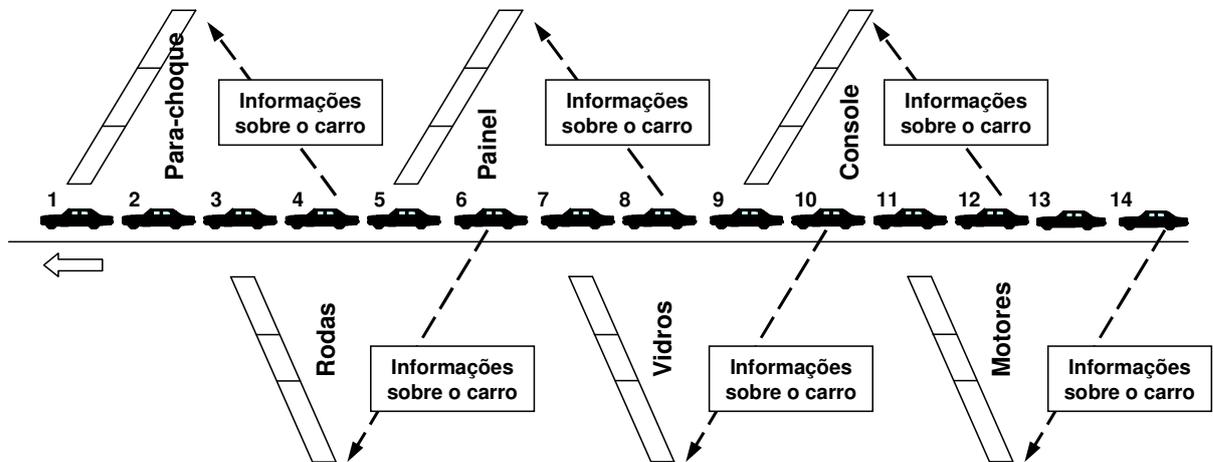


Figura 2-6 - Linha de montagem de automóveis - adaptado de Ohno (1997).

Para implantar o sistema *kanban* em todos os processos, todos devem compreender esta nova forma de trabalho, diferente da forma convencional a que estão habituados. A Toyota levou 10 anos para estabelecer o *kanban* na *Toyota Motor Company* (Ohno,1997). E Shingo (1996) recomenda que o método *kanban* somente deva ser adotado depois que o sistema de produção em si tenha sido racionalizado.

Ohno (1997) define como *Kanban*:

Um *kanban* (“etiqueta”) é um instrumento para o manuseio e garantia da produção *just in time*, o primeiro pilar do Sistema Toyota de Produção. Basicamente um *kanban* é uma forma simples e direta de comunicação localizada sempre no ponto que se faz necessária. Na maioria dos casos um *kanban* é um pequeno pedaço de papel inserido em um envelope retangular de vinil. Neste pedaço de papel está escrito quanto de cada parte tem de ser retirada ou quantas peças têm de ser montadas.

No método do *just-in-time*, um processo posterior vai até um processo anterior para retirar mercadorias necessárias, quando e na quantidade necessária. O processo anterior produz então a quantidade retirada. Neste caso, quando o processo posterior vai até o processo anterior para retiradas, eles estão conectados pela informação de retirada ou de movimentação, chamado *kanban de retirada* e *kanban de movimentação*, respectivamente. Este é um papel importante do *kanban*.

Um outro papel é o *in-process*, ou *kanban de produção*, o qual solicita ao operador produzir a quantidade retirada do processo anterior. Estes dois *kanban* funcionam como um, circulando entre os processos dentro da Toyota Motor Company, entre a empresa e suas associadas, e também entre os processos em cada associada.

Além disso, há o *kanban de sinalização* usado no processo de cunhagem, por exemplo, onde a produção de uma quantidade específica, talvez mais do que a exigida pelo *just-in-time*, não pode ser evitada.

### 2.4.6 Controle Visual

Segundo Shingo (1996) a função do controle visual é informar ocorrências de anormalidades de maneira mais rápida. Mas o mais importante é decidir qual medida deve ser tomada em relação às anormalidades, de maneira que não venha a ocorrer novamente. Ele declara:

“Na Toyota, as máquinas são equipadas para detectar problemas de produção. Quando são detectados problemas, as máquinas param imediatamente, indicando o tipo de problema através de luzes indicadoras. Além disso, é permitido aos trabalhadores parar a linha de produção, quando percebem qualquer problema. Quando a linha é interrompida, um *andon* (painel indicador) acende, informando a todos na área o tipo de problema e onde ele ocorreu”.

Os quadros sinalizadores de parada das linhas de produção são colocados em locais visíveis e devem permitir a fácil localização do problema bem como o tipo de problema. É o exemplo do sinalizador do tear, indicado na seção 2.4.2.

Também as folhas de descrição da operação de trabalho (ver trabalho padronizado, item 2.4.17), afixada na estação de trabalho, é um exemplo de controle visual.

Caixas com os componentes necessários são colocados ao lado do posto de trabalho com seu cartão *kanban* e funciona como uma prateleira de supermercado, onde o repositor vem sempre que o estoque chega a um nível pré-determinado.

Ohno (1997) define os quadros sinalizadores como *Andon*:

*Andon*, o quadro indicador de parada da linha pendurado acima da linha de produção, é um controle visual. A luz indicadora de problema funciona como segue:

Quando as operações estão normais, a luz verde está ligada. Quando um operário deseja ajustar alguma coisa na linha e solicita ajuda, ele acende uma luz amarela. Se uma parada na linha for necessária para corrigir um problema, a luz vermelha é acesa. Para eliminar completamente as anormalidades, os operários não devem ter receio de parar a linha.

Autonomia significa parar a linha de produção ou a máquina sempre que surgir uma situação anormal. Isto esclarece o que é considerado anormal. Em termos de qualidade, quaisquer produtos com defeitos são obrigados a aparecer porque o progresso real do trabalho comparado aos planos de produção diária é sempre tornado visível. Esta idéia se aplica às máquinas e à linha assim como à organização das mercadorias e ferramentas, inventário, circulação do *kanban*, procedimentos de trabalho padrão e assim por diante. Nas linhas de produção em que se usa o Sistema Toyota de Produção, o *controle visual*, ou *gerenciamento pela visão*, é obrigatório.

Outra forma de controlar a necessidade de reposição de estoques é o *kanban* visual, onde são colocados *containers* ou prateleiras junto à estação de trabalho, com indicação do ponto de ressuprimento.

### 2.4.7 Os 5 Por quês

Base científica do Sistema Toyota, é uma técnica que ajuda a descobrir a raiz de um problema e corrigi-lo.

Shingo (1996) declara:

“Na Toyota, a questão mais importante não é com que rapidez o pessoal é alertado do problema, e sim quais soluções serão implementadas. Paliativos ou medidas temporárias, embora façam com que a operação volte ao normal da maneira mais rápida, não são apropriados. Também não é a melhor resposta, quando ocorrem defeitos, trabalhar horas extras para produzir o número programado de unidades. Essas soluções podem ser comparadas ao uso de uma bolsa de gelo para curar a apendicite – ela pode aliviar a dor por algum tempo, mas apenas uma apendicectomia irá evitar a recorrência. Esta é a visão da Toyota – descobrir e implementar soluções que impeçam de forma definitiva a recorrência do problema”.

Segundo Ohno (1997), os cinco por quês é um método adaptado do hábito de observação de Sakichi Toyoda. Ele passava horas e mais horas observando os teares que as mulheres mais velhas tinham em casa para tecer à mão, buscando melhorias que posteriormente foram introduzidas em seus teares. Ohno recomenda: “fique na área de produção durante todo o dia e observe – eventualmente você irá descobrir o que deve ser feito... entendendo o que é desperdício... descobrimos maneiras de transformar movimento em trabalho”.

É este espírito de pesquisa que fez Sakichi Toyoda, o grande inventor japonês, desenvolver o seu tear autônomo. E sua observação do mercado de automóveis sendo abastecido à época pela Ford com seu modelo T, fez com que Kiichiro Toyoda, seu filho, entrasse no negócio de fabricação de carros. Em 1935, na exposição de carros promovida pela Toyota em Tóquio, Kiichiro citou as palavras do pai: “Eu servi o nosso país com o tear. Eu quero que você o sirva com o automóvel” (Ohno, 1997).

Ohno (1997) define como Cinco por quês:

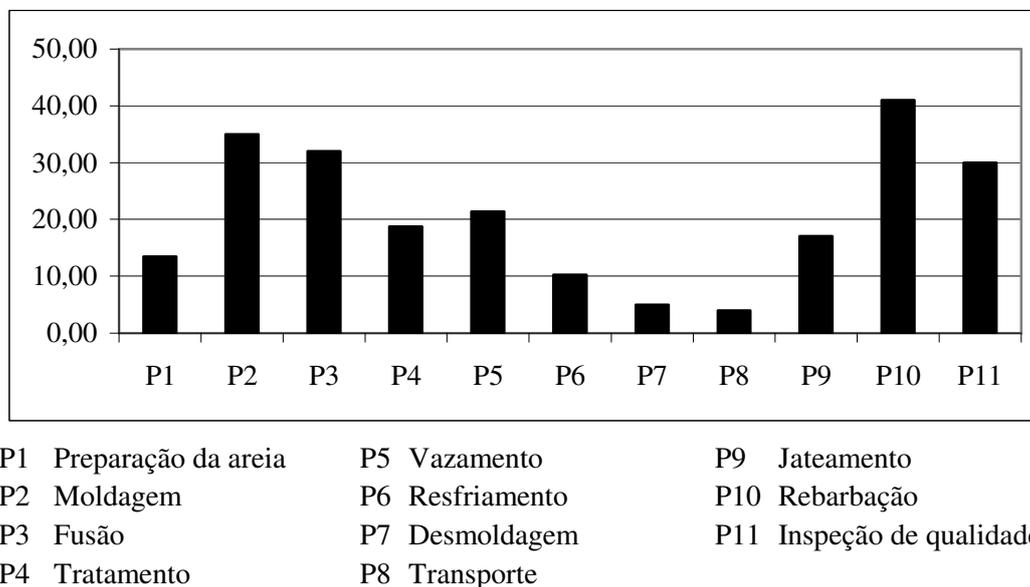
A base da abordagem científica da Toyota é perguntar-se cinco vezes por quê sempre que nos deparamos com um problema. No Sistema Toyota de Produção, “5W” (5P) significa cinco por quês. Repetindo-se por quê cinco vezes, a natureza do problema assim como sua solução tornam-se claros. A solução, ou o como fazer, é designado “como” “1H” (1C). Assim, “cinco por quês é igual a um como fazer”. (5W = 1H; 5P = 1C)

Por baixo da causa de um problema está escondida a *causa real*. Em cada caso, precisamos descobrir a causa real perguntando *por quê, por quê, por quê, por quê, por quê*. Do contrário, as medidas não podem ser tomadas e os problemas não serão verdadeiramente resolvidos.

### 2.4.8 Balanceamento das Linhas de Produção

Uma linha de produção balanceada se refere aos processos com operações que produzem o mesmo número de peças em uma determinada unidade de tempo. Como exemplo: a usinagem consegue trabalhar em cinco motores a cada trinta minutos e a montagem dos motores também possui a mesma capacidade de produção.

Este balanceamento das linhas de produção também poderá ser analisado através dos tempos de ciclo das operações, ou seja, frequência com que uma peça ou produto é completado por um processo, conforme cronometrado por observação (Lean Institute Brasil, 2003). A Figura 2-7 ilustra os tempos de ciclo em operações desbalanceadas em um processo de fundição.



**Figura 2-7** - Tempos de ciclo por peça, em um processo de fundição.

Ohno (1997) destaca o estabelecimento de uma sincronia nos processos de produção como condição básica para o funcionamento do Sistema Toyota de Produção, ou seja, processo por processo atuando de forma balanceada, cadenciada, fazendo fluir toda a produção e permitindo a implantação do sistema *kanban*. Complementam esta condição básica, também com bastante importância, o nivelamento da produção o tanto quanto possível e o trabalho padronizado (itens 2.4.3 e 2.4.17).

Quando se calcula o tempo *takt* necessário para atender a demanda esperada, pode-se observar nos processos de produção que a maioria das operações tem um tempo maior ou menor do que o tempo *takt* e o pior, apresentam grande variação em seus tempos de ciclo. A produção com capacidades não niveladas normalmente leva à fabricação de

lotes maiores de peças antes da troca de ferramentas, aumentando o estoque de produto semi-elaborado, dificultando o controle correto de estoque e também a administração das peças que irão para produção (Womack e Jones, 2004).

Ohno (1997) compara o balanceamento das linhas de produção com a corrida de bastão, onde as peças deveriam ser passadas à frente como se fossem bastões. Se um processo posterior está atrasado, os operadores dos processos anteriores deveriam ajudar ao operador em atraso para colocar a produção no ritmo normal. Devemos lembrar que existem diferenças nos tempos individuais de cada operador, para realizar a mesma operação, em função das diferenças físicas ou mesmo trabalhadores recém contratados que ainda não desenvolveram completamente suas habilidades nas operações específicas.

Mas, quando identificamos as operações que agregam valor e levantamos os seus tempos de ciclo, normalmente se apresentando de forma desbalanceada, deve-se buscar atuar no processo para conseguir um bom balanceamento de toda a linha de produção. O desenvolvimento de um sistema de produção com tempos de ciclo nivelados, condição básica para a manufatura enxuta, poderá exigir a redistribuição da carga de trabalho entre os operários da linha de produção. Movimentação excessiva e ociosidade de máquinas devem ser eliminadas. Um novo *layout* poderá ser necessário.

Shingo (1996) declara que na Toyota, a quantidade a ser produzida é determinada unicamente pelo número de pedidos e quando os processos de mais baixa capacidade (gargalos) podem produzir a quantidade requerida, a operação de processos de maior capacidade se mantém no mesmo nível, através da diminuição da velocidade de processamento ou via operação intermitente. Quando as operações gargalo não conseguem produzir o necessário para atendimento dos pedidos, deverá então ser melhorada a capacidade de produção. Mas sempre focado em balancear as capacidades de produção do processo como um todo, para eliminar acúmulo entre estágios. Shingo afirma que “a presença de máquinas de alta capacidade não deve ser utilizada visando a justificar o processamento em grandes lotes e a estocagem de produtos não processados. O princípio envolvido é simples: a capacidade de processo deve *servir* às necessidades de produção e não *determiná-las*”.

Porém, em processos cujos equipamentos de produção possuem baixa confiabilidade, irá requer a formação de estoques de segurança. Com isto será menor a necessidade de balanceamento da capacidade das operações de produção.

### 2.4.9 Gargalos e Limitações de Capacidade

Em linhas de manufatura, é difícil se conseguir um balanceamento dos tempos de processamento. Os tempos de ciclo desbalanceados, conforme visto no item 2.4.8 irá conduzir à formação de estoques entre os processos. Mas em uma análise dos processos e tempos de ciclo, podemos observar aqueles que realmente ditam o ritmo de produção.

Segundo Souza (2005):

“A Teoria das Restrições (TOC) sugere uma metodologia para planejamento e controle da produção denominada Tambor-Pulmão-Corda (TPC),..., que parte do pressuposto de que existem apenas alguns poucos recursos com restrição de capacidade (RRCs) que irão impor o índice de produção da fábrica inteira (Tambor). Para garantir que a produção do RRC não seja interrompida por falta de peça, cria-se na frente dele um inventário que o protegerá contra as principais interrupções que possam ocorrer dentro de um intervalo predeterminado de tempo (Pulmão de Tempo). Com o objetivo de impedir que haja um aumento desnecessário nos níveis de estoque em processo, o material é liberado para a fábrica no mesmo ritmo com que o recurso restritivo o consome (Corda), mas com uma defasagem no tempo equivalente ao pulmão de tempo estabelecido”.

De acordo com Pegels e Watrous (2005):

“A TOC tem como prescrição identificar e focar nos gargalos de qualquer operação porque eles são a origem da interferência em qualquer tentativa de aumento da produtividade e ganhos pelas vendas. Pela eliminação dos gargalos em qualquer operação, melhorias substanciais seguirão automaticamente”.

Segundo Womack e Jones (2004), “ferramentas de planejamento da capacidade foram subsequentemente acrescentadas a fim de avaliar a capacidade das máquinas a cada etapa do processo de produção e proteger contra o surgimento de gargalos e limitações de capacidade”.

Vollmann *et al.* (1997) declara que Eliyahu Goldratt cunhou o termo Teoria das Restrições para representar sua ideologia sobre os gargalos nas linhas de produção, o que inclui as restrições de mercado. Ainda segundo Vollmann *et al.*, Goldratt argumenta que as restrições devem apenas se relacionar à capacidade de atender ao mercado e não especificamente nos pontos em que a empresa possui controle sobre o processo de produção. A meta é sempre quebrar a restrição (condição gargalo) para solucionar o problema e partir para identificar a próxima restrição, em um processo de melhoria contínua. Goldratt (1997) ilustrou a existência destes gargalos e mostrou “que não é necessário um excepcional poder cerebral para constituir uma nova ciência ou expandir a existente”. Segundo ele “o que é necessário é a coragem de encarar inconsistências e evitar fugir delas só porque é desta maneira que sempre fizemos”.

Rahman (1998) revê toda a filosofia e aplicação da teoria das restrições e apresenta, aqui resumido, os cinco passos que consiste este princípio de trabalho:

- (1) Identifique as restrições do sistema: restrições físicas (materiais, máquinas, pessoas, níveis de demanda) ou gerenciais (políticas, procedimentos, regras ou métodos).
- (2) Decida como explorar as restrições do sistema: restrições físicas devem ser trabalhadas para se tornarem os mais eficientes possíveis; restrições gerenciais devem ser eliminadas ou substituídas por políticas que suportem uma maior rentabilidade.
- (3) Subordinar todos os demais processos à decisão anterior: todo componente do sistema (as não restrições) devem ser ajustadas para suportar o máximo de efetividade da restrição, ou seja, sincronização de todos os processos.
- (4) Avançar em direção às demais restrições de sistema: esforços de melhoria deverão continuar a ser implementados de forma a melhorar a performance.
- (5) Se ainda assim não conseguir melhorar a restrição, voltar ao passo 1. Se a restrição foi adequadamente tratada, partir para a próxima restrição no sistema.

#### **2.4.10 Troca Rápida de Ferramentas**

A produção enxuta, com linhas trabalhando continuamente no produto, da matéria-prima ao produto final, apresenta um grande desafio quando se trata de trabalhar com pequenos lotes ou mesmo sob encomenda. O tempo para troca de produto na linha pode ser extremamente longo, comprometendo a disponibilidade das máquinas para produção. Neste caso a tendência é de se trabalhar com grandes lotes, que aumentará o tamanho das filas e os estoques intermediários.

Segundo Womack e Jones (2004), Taiichi Ohno e seus colaboradores, incluindo Shigeo Shingo, desenvolveram a troca rápida de ferramentas de um produto para o próximo e dimensionando corretamente as máquinas, para que as etapas de processamento de diferentes tipos pudessem ser realizadas imediatamente adjacentes umas das outras, enquanto o objeto em produção era mantido em fluxo contínuo. Esses sistemas de troca rápida permitem reduzir de horas para minutos, uma mudança na linha de produção. Foi Shingo (1996) que formulou a hipótese de que qualquer *setup* poderia ser executado em menos de 10 minutos e denominou seu conceito de “Troca Rápida de Ferramentas”. A

troca de ferramentas em um digito se tornou um elemento principal do Sistema Toyota de Produção.

O sistema de produção em massa de Ford, baseado no princípio de se produzir produtos padronizados em grande volume, ainda hoje apresenta seus seguidores. A principal sustentação do conceito é a redução dos custos de produção. Mas e o cliente, como fica?

O gerente de produção, de forma a facilitar a operação da planta, deseja apenas um modelo de automóvel, sempre da mesma cor e com os mesmos equipamentos. O Sistema Toyota de Produção diferencia do sistema de Ford, neste aspecto do tamanho do lote de produção, justamente por se preocupar com o atendimento à diversidade de clientes e seus desejos e necessidades, buscando assim desenvolver sistemas de troca rápida de ferramentas, permitindo a produção em pequenos lotes. A troca rápida de ferramentas dará suporte ao nivelamento da produção, pois com tempos de ciclo nivelados e os processos sincronizados, permitirá a produção de diversos tipos de produtos ao longo do mês (ou do dia).

Mas devido ao transtorno da parada de produção para a troca de ferramentas, que normalmente levam horas para serem realizadas, a tendência é de se produzir em lotes maiores, para estocar mais antes da parada da máquina. Isto se choca contra o princípio da manufatura enxuta, de se produzir apenas o necessário. Mas é possível reduzir drasticamente este tempo de parada, simplesmente observando o que é trabalho e o que é movimento, durante uma troca de ferramentas. O deslocamento do operador até a ferramentaria para buscar uma matriz ou uma chave de aperto, durante o período em que a máquina já está parada, é um exemplo claro deste desperdício. E vários outros também podem ser observados.

Tomando como exemplo uma parada de *box* durante uma corrida de fórmula 1, para troca de pneus e reabastecimento, podemos observar que as equipes mais bem organizadas e treinadas já estão preparadas para quando o carro parar sobre as marcações pintadas no asfalto. Os pneus já estão posicionados ao lado, o mecânico já está com a aparafusadeira correta, o operador do sistema de abastecimento já está posicionado. Anos atrás, se falássemos que um carro teria seus pneus trocados e o tanque abastecido em menos de 10 segundos, seríamos considerados como loucos.

Após o desenvolvimento dos dispositivos de troca rápida e da elaboração dos procedimentos de trabalho padronizado, os operários deverão ser treinados incansavelmente.

Ohno (1997) define a troca rápida de ferramentas como:

No nivelamento da produção, os volumes produzidos são feitos os menores possíveis, em contraste com a produção em massa tradicional, onde o maior é considerado o melhor. Na Toyota tentamos evitar a montagem do mesmo tipo de carro em volumes. É claro, quando o processo de montagem final realmente produz desta maneira, o processo anterior - tal como a operação da prensa - naturalmente tem de segui-lo. Isto significa que mudanças de matriz precisam ser constantemente feitas. Até agora, a sabedoria convencional tem ditado que cada prensa deve produzir tantas peças quanto possível. Entretanto, no Sistema Toyota de Produção, isto não se aplica. As mudanças de matriz são feitas rapidamente e aperfeiçoadas ainda mais com a prática. Nos anos 40, levava de duas a três horas. Nos anos 50, caiu de uma hora para 15 minutos. Atualmente, as trocas foram encurtadas para três minutos.

Shingo (1996) afirma que é essencial a redução dos tempos de *setup*, obtida com a ajuda do sistema de troca rápida de ferramentas, condição *sine qua non* do Sistema Toyota de Produção, pois dará condições à eliminação da perda por superprodução, à produção em pequenos lotes e tempos de ciclo reduzidos, possibilitando assim a resposta às mudanças na demanda do consumidor. Para se alcançar tempos reduzidos de *setup*, Shingo recomenda então dividir os elementos de troca de ferramentas em:

- *setup interno* – procedimentos que podem ser executados apenas quando a máquina está parada; e
- *setup externo* – procedimentos que podem ser executados enquanto a máquina está em operação.

Shingo orienta a buscar ao máximo a conversão de *setup interno* em *setup externo*, distinguindo o trabalho que pode ser realizado enquanto a máquina está funcionando e aquele que deve ser feito quando a máquina está desligada. Ele cita como exemplo a inclusão de uma mesa auxiliar em uma plaina, para preparar a próxima base de um motor que deverá ser usinada, substituindo todo o conjunto no momento do *setup*.

Em resumo, a troca rápida de ferramentas irá contribuir para o atendimento à demanda de mercado, pois permite trocar tipo de produto na linha de produção com mais rapidez. Além disso, irá aumentar a disponibilidade das máquinas para produção, devido à redução do tempo de *setup*. A seguir os principais passos para se conseguir a troca rápida de ferramentas, adaptado de Shingo (1996):

- (i) Mapeamento do processo de troca de ferramentas na máquina ou operação em estudo;
- (ii) Identificar as atividades que estão sendo realizadas, considerando *setup interno* e *setup externo*;
- (iii) Identificar aquelas atividades do *setup interno* que poderão ser convertidas naturalmente em *setup externo*;
- (iv) Buscar alternativas, incluindo mudanças no projeto da máquina ou mesmo desenvolvimento de dispositivos auxiliares, como gabaritos, padrões de ajuste, sistemas de engate rápido, de forma a se converter ao máximo as atividades de *setup interno* em *setup externo*;
- (v) Identificar as atividades que são realizadas em seqüência, mas que podem ser em paralelo;
- (vi) Adequar bancadas, estruturas auxiliares e *layout*, de forma a facilitar o posicionamento e identificação das peças necessárias à troca de ferramentas, tendo a preocupação ergonômica e operacional;
- (vii) Treinamento constante das equipes de troca de ferramentas, nos procedimentos de troca;
- (viii) Retornar periodicamente ao item (i) para redução constante nos tempos de troca de ferramentas.

#### **2.4.11 Sincronização**

A sincronização do fluxo de produção complementa o balanceamento das linhas e basicamente trata de seqüenciar eficientemente o fluxo do processo. Porém, com as linhas ainda desbalanceadas, se torna impossível conseguir a sincronização.

A sincronização pode ser entendida através daquele conjunto de pessoas que se enfileiram para apagar um incêndio, onde o balde com água é passado de mão em mão até chegar à última operação, ou seja, a última pessoa joga a água no fogo. Isto permite maior agilidade e menor esforço para alcançar o objetivo.

A sincronização em operações que envolvem trabalhos manuais deve ser rigorosamente projetada e deverão levar em consideração:

- o ritmo de trabalho e a habilidade manual entre os diversos operadores diferem entre si; treinamento no desenvolvimento dessas habilidades e no ritmo de trabalho deverá ser requerido;
- o desenvolvimento de um *layout* ergonômico no local de trabalho de cada operador; as operações deverão ser realizadas naturalmente, sem necessitar de um esforço maior para se alcançar as peças e não devem cansar excessivamente os operadores;
- se possível, um operador deverá colocar a peça processada na área de peça a ser processada na próxima operação;
- peças com defeito, problemas de encaixe, substituição de operadores e outras ocorrências irão afetar a sincronização; a implementação de estoques intermediários deverá ser analisada com cuidado, para não se formar grandes estoques entre as operações, o que poderá esconder problemas de sincronização.

Ohno (1997) complementa definindo seu conceito sobre o *Fluxo de Trabalho e Trabalho Forçado a Fluir* como:

*Fluxo de trabalho* significa que o valor é agregado ao produto em cada processo enquanto o produto flui ao longo da linha. Se as mercadorias são conduzidas por correias, isto não é fluxo do trabalho, mas sim trabalho forçado a fluir. O feito básico do Sistema Toyota de Produção é o estabelecimento do fluxo de fabricação. Isto significa naturalmente o estabelecimento de um fluxo de trabalho.

#### **2.4.12 Fluxo de uma Peça Só (*One Piece Flow*)**

No Sistema Toyota de Produção, quando um automóvel entra em produção, as operações de montagem são contínuas, até a saída da linha de produção. A Ford também adotava este sistema, como visto na Figura 1, produzindo em massa os componentes necessários. Porém a diferença está na produção dos componentes em lotes pequenos na Toyota, suprindo apenas as necessidades mais imediatas de produção.

Normalmente quando se trabalha com produção em lotes, as peças a serem processadas ficam aguardando o término do processamento do lote precedente. No fluxo de uma peça só, as operações são projetadas de forma a possibilitar a transferência de uma peça (e não de um lote) entre todas as operações. Por exemplo, a substituição do carro de transporte de 5 motores, do setor de usinagem para a linha de montagem, por um sistema de transporte rápido, com apenas 1 motor por vez; e assim continuamente com todas as peças, até o final da linha de montagem.

A alteração do *layout* possibilitando a aproximação entre as operações e a implementação de sistemas de transporte possibilita reduzir o ciclo de produção em até 1/5 do tempo original (Shingo, 1996).

Shingo (1996) declara:

“A montagem na Ford é feita como fluxo de peças unitárias, mas as peças fornecidas à montagem são todas produzidas em grandes lotes. Na Toyota, a montagem e o processamento de peças são ambos executados como operações de fluxo de peças unitárias como, por exemplo, a soldagem da estrutura ou a usinagem de peças. Além disso, a Toyota utiliza um sistema amplo, no qual várias peças fluem diretamente para a montagem final. Todas as peças, sejam elas processadas nas próprias plantas ou fornecidas por outras fábricas, são produzidas em pequenos lotes e criam um único fluxo contínuo de peças unitárias. Isso é um princípio fundamental do sistema Toyota e uma diferença significativa entre a Ford e a Toyota”.

“O objetivo final da metodologia de produção da Toyota é um sistema ideal no qual tudo – desde a manufatura da matéria-prima (forjamento, fundição, prensagem) até a usinagem, montagem inicial, sub-montagem e montagem final – está encadeado em um fluxo coerente de peças unitárias”.

Shingo também estabelece quatro princípios básicos a serem seguidos para criar o fluxo de uma peça só:

- (1) Balanceamento das capacidades de produção e sincronização dos processos;
- (2) Redução do tamanho do lote de transferência para uma unidade apenas;
- (3) Aperfeiçoamento do *layout* para reduzir os tempos de transporte;
- (4) Reduzir o tamanho do lote (no processamento).

### 2.4.13 Manufatura Celular

A manufatura celular consiste em agrupar os processos de produção que compõem uma determinada família de produtos, numa célula de produção, com distâncias mínimas entre os postos de trabalhos e balanceando-se os tempos de ciclo dos processos, buscando assim, um fluxo de produção próximo do contínuo. Com família de produtos bem definidas, a criação dessas células de produção se mostra mais produtiva que o *layout* tradicional.

Conceição (2005) descreve a formação de células como sendo “uma das principais etapas no projeto de um sistema de manufatura celular. Envolve o agrupamento de peças em famílias de peças e o agrupamento de máquinas em células de manufatura, sendo esse sistema também conhecido como Tecnologia de Grupo”.

Vollmann *et al.* (1997) destacam: “Células são tipicamente no formato de U para aumentar a interação entre os trabalhadores e reduzir o manuseio de materiais.

Trabalhadores treinados podem operar diversas máquinas. A manufatura celular pode tornar a capacidade de produção mais flexível, permitindo mudanças mais ágeis no mix de produção”.

Yauch e Steudel (2002) fazem algumas suposições para a implementação das células de produção:

- 1) A implementação de células de manufatura melhora as operações (reduz o *lead time*, reduz o trabalho em processo, aumenta a qualidade, etc.). As células também podem ser implementadas de forma satisfatória para o gerenciamento e para os empregados.
- 2) Tanto os aspectos técnicos como sociais devem ser considerados.
- 3) Os trabalhadores do chão de fábrica normalmente têm mais expertise não utilizada na maioria dos esforços de redesenho de sistemas de produção. O envolvimento deles irá melhorar em muito os resultados.

As células podem ser formadas considerando uma família de produtos ou considerando processos similares. Shingo (1996) chama a atenção para a necessidade de preocupação, na melhoria das operações, com:

- A clara separação e disposição das peças;
- Alinhamento mais uniforme das peças;
- Permitir que as peças fiquem ao alcance uma de cada vez.

Ribeiro e Meguelati (2002) declaram que “um procedimento iterativo de classificação cruzada de famílias de peças às quais estão associadas famílias de tipos de máquinas, sem estarem estabelecidos o número e a natureza das máquinas necessárias à fabricação das peças. As células de máquinas correspondentes serão constituídas a seguir através de uma atribuição que leva em conta as relações de velocidade das máquinas e as taxas de rendimento”. A tabela abaixo representa uma matriz de produtos e operações, com seus respectivos tempos de ciclo, que permite o projeto das células de produção de acordo com cada família de produtos/operações.

Produto	Produto P 1	Produto P 2	Produto P 3	Produto P 4	Produto P 5	Produto P 6	Produto P 7	Produto P 8	Produto P 9	Produto P 10	Produto P 11	Produto P 12	Produto P 13	Produto P 14
Operação	T (s)	T (s)	T (s)	T (s)	T (s)									
Operação O 1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-	-	-	-	-
Operação O 2	8	8	8	8	8	-	-	-	-	8	8	8	8	8
Operação O 3	4	8	8	8	8	8	7	8	8	8	4	8	8	8
Operação O 4	4	4	4	4	4	4	-	-	-	4	4	4	4	4
Operação O 5	6	9	5	5	9	9	18	9	9	9	6	5	5	9
Operação O 6	-	-	-	-	-	-	-	9	9	-	-	-	-	-
Operação O 7	11	13	-	-	-	-	-	13	13	13	11	-	-	-
Operação O 8	9	3	10	10	3	2	3	21	2	3	9	10	10	3
Takt Time	9	9	5	5	9	9	9	9	9	9	9	5	5	9
Volume mensal (pcs)	3543	893	6.529	165	1165	781	553,2	282	4683	1340	5.314	9.793	247	1748

Tabela 2-2 - Tempos de ciclo.

#### 2.4.14 Manutenção Produtiva Total

Kiichiro Toyoda, em seu artigo publicado em setembro de 1936<sup>1</sup>, sugere o uso de bons equipamentos, destacando a importância de se aprender a manuseá-los corretamente. Ohno (1997) acreditava que nem sempre um novo equipamento, de alta produção, era determinante para maior produtividade. Mesmo uma máquina mais antiga poderia dar condições de atender às necessidades da produção. Por isto a manutenção é parte integrante do Sistema Toyota de Produção e busca impedir problemas nas máquinas, nos processos e na qualidade.

Shingo (1996) enfatiza que

“A instabilidade da produção (criada por quebras e defeitos) gera a necessidade de estoque. Em um sistema de estoque zero, portanto, é de absoluta prioridade a eliminação desses fatores. Uma política firme de interromper uma linha ou máquina, sempre que surja uma situação anormal, deve ser adotada. O sistema *andon* é empregado como uma forma de controle visual para prontamente transmitir a informação acerca de irregularidades de uma maneira facilmente compreensível”.

As máquinas devem estar permanentemente em condições operacionais; isto é conseguido através de um conjunto de técnicas de manutenção, onde todos participam, não só a equipe de manutenção, mas também operadores e demais envolvidos no processo de produção. Vollmann *et al.* (1997) destacam que o foco é aplicar os mesmos cuidados abordados na qualidade do produto para a qualidade dos processos e equipamentos. Ohno (1997) destaca que mesmo uma máquina mais antiga pode dar condições de atender às necessidades da produção. Por isto a manutenção é parte integrante do TPS, evitando problemas nas máquinas, nos processos e na qualidade.

Nakajima (1989) define a manutenção produtiva total como sendo:

“TPM – Total Productive Maintenance – significa Falha Zero e Quebra Zero das máquinas, ao lado do defeito zero nos produtos e perda zero no processo. Representa a mola mestra do desenvolvimento e otimização da performance de uma indústria produtora, através da maximização da eficiência das máquinas”.

“TPM representa uma forma de revolução, pois conclama a integração total do homem x máquina x empresa, onde o trabalho de manutenção dos meios de produção passa a constituir a preocupação e a ação de todos”.

Os objetivos principais do TPM são, segundo Nakajima (1989), a busca pela maximização do rendimento operacional das máquinas e equipamentos, em todo o ciclo de vida útil, onde todo o *staff* participa – produção e manutenção – desde a alta direção até os últimos dos operacionais, numa forma de trabalho em grupo e motivados para a

---

<sup>1</sup> Transcrição parcial em Ohno (1997)

condução de atividades voluntárias. Nakajima apresenta os cinco pilares de sustentação do TPM:

- (1) incorporação de melhorias específicas e individualizadas nas máquinas;
- (2) estruturação para condução da manutenção voluntária ou autônoma;
- (3) estruturação do setor de Manutenção para condução da manutenção planejada;
- (4) capacitação técnica e busca de novas habilidades tanto para os elementos da Produção como Manutenção;
- (5) estruturação para controle dos equipamentos já na fase inicial de funcionamento.

Em um breve resumo, a implementação do TPM se inicia com a decisão da alta direção em adotar o programa, sua divulgação perante a organização, estruturação de um setor de liderança, a incorporação de melhorias nas máquinas e equipamentos, educação e treinamento, tanto do pessoal da produção como também da manutenção e a consolidação do TPM no chão de fábrica.

#### **2.4.15 Métodos a Prova de Falhas**

Shingo (1996) discorre sobre as inspeções de qualidade durante o processo de produção ou mesmo ao final dele, apresentando as opções de *inspeção 100%*, garantindo a qualidade de 100% dos produtos destinados aos clientes e de *inspeção por amostragem aleatória*, com menor esforço e conseqüente menor custo, dentro de um nível de qualidade aceitável. Mas quando o objetivo é zero defeito, esta última forma de inspeção não conseguirá eliminar 100% os defeitos nos produtos.

Então algumas outras formas de inspeção são inseridas nos processos, como a *auto-inspeção*, realizada pelo próprio operador e a *inspeção sucessiva*, onde o operador do processo posterior também inspeciona as peças que chegam para serem processadas no seu posto de trabalho. Mas por si só a auto-inspeção também não garantirá zero defeitos, considerando-se que o operador poderá “ser condescendente na sua avaliação e aceitar itens que deveriam ser rejeitados” como também “cometer erros de inspeção involuntariamente”.

Estas possibilidades de falhas justificam a instalação nos processos da *auto-inspeção reforçada*, utilizando-se de dispositivos de detecção física (*poka-yoke*) que executa uma inspeção 100%, acusando a existência de defeitos, podendo ser de interrupção (parada da máquina ou processo) ou somente de alarme (sinalização da existência dos defeitos). Também conhecidos como *poka-yoke*, estes métodos a prova de falhas são dispositivos

instalados nas operações, de forma a evitar ou mesmo eliminar a geração de produtos defeituosos.

Já Ohno (1997) os define como à prova de bobearias (*baka-yoke*):

A fim de fabricarmos produtos de qualidade 100% do tempo, são necessárias inovações nos instrumentos e equipamentos a fim de se instalar dispositivos para a prevenção de defeitos. Isto é chamado *baka-yoke*, e os seguintes exemplos são de dispositivos *baka-yoke*:

1. Quando há um erro de fabricação, o material não servirá no instrumento.
2. Se há irregularidade no material, a máquina não funcionará.
3. Se há um erro de trabalho, a máquina não iniciará o processo de maquinização.
4. Quando há erros de trabalho ou um passo foi pulado, as correções são feitas automaticamente e a fabricação continua.
5. As irregularidades no processo anterior são barradas no processo posterior a fim de parar os produtos com defeito.
6. Quando algum passo é esquecido, o processo seguinte não será iniciado.

Shingo (1996) esclarece que:

“O dispositivo *Poka-yoke* em si não é um sistema de inspeção, mas um método de detectar defeitos ou erros que pode ser usado para satisfazer uma determinada função de inspeção. A inspeção é o objetivo, o *Poka-yoke* é simplesmente o método. Por exemplo, um gabarito que rejeita uma peça processada incorretamente é um *Poka-yoke* que desempenha a função de inspeção sucessiva”.

E orienta:

“Portanto, o primeiro passo na escolha e adoção de métodos de controle de qualidade efetivos é identificar o sistema de inspeção que melhor satisfaz as necessidades de um determinado processo. O passo seguinte é identificar um método *Poka-yoke*, de controle ou advertência, que seja capaz de satisfazer a função de inspeção desejada”.

#### **2.4.16 Trabalhadores com Múltiplas Habilidades (Multifuncionais)**

A aplicação das técnicas de manufatura enxuta nos processos produtivos, normalmente acarreta mudanças de *layout*, do fluxo de produção, no ritmo *takt* de trabalho, bem como também do número de máquinas por operador. Tudo isso poderá exigir que o operário passe a supervisionar mais de uma máquina, e não apenas trabalhar em um único posto de trabalho em uma determinada máquina. Deverá então ser treinado nas diversas operações que forem necessárias, desenvolvendo assim suas habilidades.

Shingo (1996) argumenta que “desde os anos 40, os trabalhadores da Toyota não estão vinculados a uma única máquina, mas são responsáveis por 5 ou mais máquinas, alimentando uma, enquanto as outras trabalham automaticamente”. E como o Sistema Toyota de Produção não permite a formação de estoques entre os postos de trabalho, irá

requerer que os operadores também saibam operar as estações anteriores e posteriores, de forma a ajudar os companheiros quando um colega, por qualquer motivo, ficar atrasando a produção.

É uma nova forma de trabalho que, mesmo não apresentando um aumento real na carga de trabalho ou de horas trabalhadas, trarão a resistência por parte dos trabalhadores da produção. Este poderá se traduzir no maior desafio na implementação da manufatura enxuta. Porém, quando os trabalhadores estão cientes do processo de manufatura enxuta e não a vêem como uma ameaça, se comprometem e participam ativamente, contribuindo para o projeto como um todo.

Ohno (1997) apresenta o conceito de Sistema de Operação Multiprocessos:

No processo de maquinização, suponhamos, por exemplo, que cinco tornos mecânicos, cinco máquinas de usinagem e cinco perfuradeiras são alinhadas em duas fileiras paralelas. Se um operador manuseia cinco tornos mecânicos, podemos denominar isto um *sistema de operação multiunidades*. O mesmo se dá em relação ao manuseio de cinco máquinas de usinagem ou cinco perfuradeiras.

Entretanto, se um operador usa um torno mecânico, uma máquina de usinagem e uma perfuradeira (isto é, vários processos), este processo é denominado *sistema de operação multiprocessos*. No Sistema Toyota de Produção, o estabelecimento de um fluxo de produção é de vital importância. Portanto tentamos alcançar um sistema de operação multiprocessos que reduz diretamente o número de operários. Para o operário na linha de produção, isto significa passar de *monofuncional* para *multifuncional*.

Quando se propõe a um operador cuidar de mais de uma máquina, corre-se o risco de uma máquina parar em um determinado momento em que o operador estará alimentando outra máquina, reduzindo assim a taxa de operação do equipamento. Shingo (1996) declara que na Toyota isto é considerado normal, pois é preferível uma máquina ficar ociosa e não um trabalhador. Isto se deve principalmente ao fato de que “a depreciação contábil do equipamento posteriormente propiciará à empresa o uso gratuito de uma máquina, mas os homens têm de receber salário indefinidamente – e os salários tendem a subir com o tempo”.

Mas este conceito deve ser analisado criteriosamente em relação à empresa e seus processos de produção, para saber, por exemplo, a composição de custos operacionais e de produção, quanto é a participação da mão de obra e o valor das máquinas e estágio de depreciação, nesta composição de custos. Talvez naquelas indústrias onde mão de obra represente pouco no custo final do produto, e não esteja conseguindo atender à demanda de mercado, seja melhor buscar taxas de operação mais altas, reduzindo o número de máquinas por operador.

### 2.4.17 Trabalho Padronizado

Womack e Jones (2004) definem o trabalho-padrão: “cada aspecto da tarefa é analisado, otimizado e então executado sempre exatamente da mesma forma, de acordo com um padrão de trabalho”.

Sabemos que as pessoas passam, mas a fábrica fica. Então devemos considerar este aspecto natural dos processos produtivos, tendo procedimentos que estabeleçam as formas de trabalho, independente das pessoas que os operam.

O procedimento de trabalho padronizado combina os elementos essenciais para produção, ou seja, homem, máquina e materiais, buscando a obtenção de uma maior eficiência. Existem três elementos principais no descritivo operacional:

- *Tempo de ciclo*: tempo alocado para fazer cada peça ou unidade em processamento na estação de trabalho. É obtido pelo número de peças produzidas no tempo utilizado para produzi-las. Exemplo: 40 camisas por 8 horas de trabalho; tempo de ciclo será igual a 12 minutos. Importante destacar que existem diferenças nos tempos individuais de cada operador, para realizar a mesma operação, em função das diferenças físicas entre eles.
- *Seqüência do trabalho*: seqüência das operações realizadas pelo operador no posto de trabalho. Exemplo em uma mesa de corte de moldes de peças de roupas em uma confecção: inserir o eixo suporte dentro do rolo de tecido; colocar o rolo de tecido no suporte desenrolador, apoiando o eixo nos mancais laterais; fixar o tecido na borda longitudinal; desenrolar...
- *Estoque padrão*: refere-se ao mínimo de peças necessárias para manter a operação contínua da estação de trabalho.

Para a criação de um procedimento de trabalho padronizado, é importante a vivência de seu criador no chão de fábrica, como observador participante. O procedimento deverá ser de fácil entendimento, devendo ser testado e revisado várias vezes antes da emissão final e treinamento dos operadores. Ohno (1997) destaca que a padronização do trabalho não deve ser estabelecida de cima para baixo, mas pelos próprios operários da produção. Isto reduzirá o risco de se padronizar operações erradas.

Quando se envolve o operário na discussão do trabalho padrão de seu posto de trabalho, contribuindo para o seu desenvolvimento, ele se sentirá orgulhoso ao ver sua

contribuição formalizada em um procedimento padrão, que será seguido por todos os outros operários que executam a mesma operação. Porém o comprometimento não será o mesmo, quando este receber a determinação de um procedimento elaborado sem a sua contribuição, por pessoas que não conhecem a realidade da operação.

O treinamento dos operadores, sempre que possível, deverá ser realizado pelo próprio supervisor de área, o que trará uma maior confiança entre supervisor e operador. É notória a necessidade de treinar e praticar.

Ohno (1997) também destaca que

“O instrutor deve literalmente pegar as mãos dos trabalhadores e ensiná-los. Isso gera confiança no supervisor. Ao mesmo tempo, os trabalhadores devem ser ensinados a ajudar um ao outro. Por serem pessoas executando o trabalho, em vez de máquinas, haverá diferenças nos tempos de trabalho, derivadas de condições físicas de cada um. Essas diferenças serão absorvidas pelo primeiro trabalhador no processo, assim como a zona de troca do bastão, em uma corrida de revezamento. A execução dos métodos de trabalho padronizados no tempo de ciclo ajuda a desenvolver a regularidade do trabalhador”.

A Figura 2-8 apresenta uma estação de trabalho com os procedimentos operacionais do trabalho padronizado afixados na bancada e as caixas do estoque posicionadas ao lado.



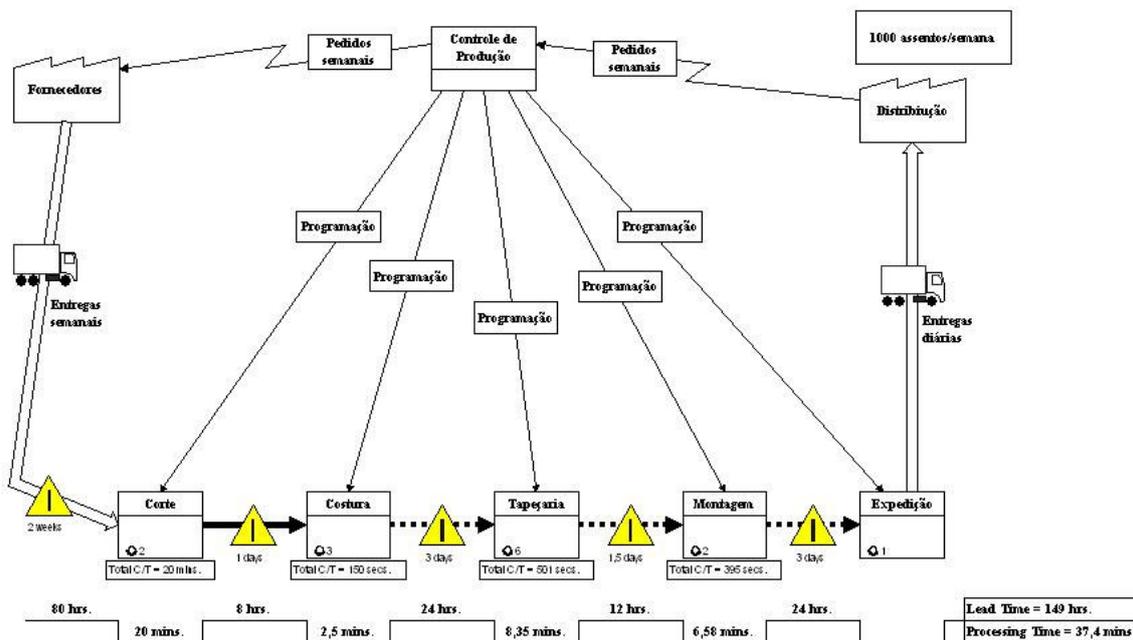
**Figura 2-8** - Estação de trabalho *lean*.

#### **2.4.18 Mapeamento do Fluxo de Valor**

Normalmente é difícil para gerentes, supervisores ou mesmo operadores de chão de fábrica enxergar e compreenderem o fluxo de valor. E sem enxergar os desperdícios existentes, se torna uma tarefa quase impossível aplicar as técnicas da manufatura enxuta. Portanto é necessário saber observar os processos como um todo, globalmente, e saber chegar ao ponto central da questão, como também propor mudanças que irão melhorar o desempenho do sistema de produção.

Rother e Shook (2003) desenvolveram uma metodologia para facilitar o mapeamento do fluxo de valor, conhecida também como *VSM – Value Stream Mapping*, focando no fluxo de produção, desde a demanda do consumidor até a matéria-prima, focando nos processos como um todo e não somente nos processos individuais. Isto possibilitará a eliminação dos desperdícios, com conseqüente criação de valor. E é incrível, mas quando realmente se passa a enxergar os processos com base no pensamento enxuto, observa-se que quase metade do tempo gasto ou mesmo recursos alocados nas operações se traduzem em desperdícios, sem criar valor para o cliente.

A Figura 2-9 apresenta um mapeamento do fluxo de valor de um processo de produção, a partir do pedido até a entrega no cliente.



**Figura 2-9** - Exemplo de mapa de fluxo de valor - adaptado de Rother e Shook (2003).

São tomados os tempos de ciclo de cada operação e levantados os estoques, intermediário, em processo e final. Estes estoques são convertidos em tempos, ou seja, estoque para um determinado número de dias de produção. Calcula-se então o *lead time*, que é a soma dos tempos de ciclo e de estoques. O ideal é que o *lead time* esteja próximo ao valor da somatória dos tempos de ciclo. Caso contrário serão propostas mudanças no processo de forma a melhorar o desempenho do sistema de produção. Estas mudanças propostas são traçadas no *mapa do estado futuro* e irão gerar projetos relacionados a células de produção, mudança de *layout*, mudança de tecnologias, implantação de sistema *kanban* e todas as opções que surgirem no estudo do *mapa atual*.

### 2.4.19 5S

A organização das áreas de produção é fundamental para se alcançar índices satisfatórios de eficiência e o programa 5S se mostra eficiente no atendimento a este quesito. Sujeiras e itens desnecessários são eliminados e todas as ferramentas e componentes têm um local para armazenamento identificado e organizado.

Ho e Cicmil (1996) definem a prática do 5S como uma técnica usada para estabelecer e manter o ambiente de qualidade em uma organização. O programa se baseia em 5 termos japoneses, que começam com a letra *S* e relacionados pelo Lean Institute Brasil (2003) como:

- *Seiri* (senso de utilização): separar os itens necessários dos desnecessários, descartando estes últimos;
- *Seiton* (senso de organização): organizar o que sobrou, um lugar para cada coisa e cada coisa em seu lugar;
- *Seiso* (senso de limpeza): limpeza;
- *Seiketsu* (senso de padronização): padronização resultante do bom desempenho nos três primeiros Ss;
- *Shitsuke* (senso de autodisciplina): disciplina para manter em andamento os quatro primeiros Ss.

Segundo Silva (1996), o *Senso de Utilização* busca “utilizar os recursos disponíveis, com bom senso e equilíbrio, evitando ociosidades e carências”; e complementa: “manter no ambiente considerado, somente os recursos necessários”. O *Senso de Ordenação* (organização) “facilita a utilização, diminuindo o tempo de busca; dispor os recursos de forma sistemática e estabelecer um excelente sistema de comunicação visual para rápido acesso a eles”. O *Senso de Limpeza* “equivale a praticar a limpeza de maneira habitual e rotineira e, sobretudo, não sujar”, que consiste em “eliminar o pó e a sujeira do ambiente e dos equipamentos”. Silva descreve o quarto senso como *Senso de Saúde*, que significa “manter as condições de trabalho, físicas e mentais, favoráveis à saúde”. O *Senso de Autodisciplina* significa “ter todas as pessoas comprometidas com o cumprimento dos padrões técnicos e éticos e com a melhoria contínua em nível pessoal e organizacional”.

As figuras 2.10 e 2.11 a seguir ilustram um evento *kaizen* de suporte ao programa 5 S, realizado em um indústria.



**Figura 2-10** - Evento *kaizen* 5S - antes.



**Figura 2-11** - Evento *kaizen* 5S - depois.

Ho e Cicmil (1996) sugerem cinco etapas para implementação:

- 1) Conseguir o comprometimento dos executivos seniores para com o programa 5S, entendendo sua importância e apoiando o treinamento dos empregados;
- 2) Estabelecer uma campanha de promoção do programa 5S dentro da organização através de cartazes, workshops e outras atividades complementares;
- 3) Manter o registro de tudo que for feito e decidido, bem como fotografias, vídeos, cartões 5S indicando problemas que precisam de atenção;
- 4) Treinamento de todos os empregados nos conceitos de 5S, eliminando desperdícios e buscando melhorias no local de trabalho.
- 5) Avaliação da implementação e busca pela rotina da prática 5S.

#### **2.4.20 Kaizen**

Termo japonês que significa “melhoria incremental contínua” (Womack e Jones, 2004). Imai (1986) define *kaizen* como “melhoria contínua envolvendo todos – gerentes e trabalhadores”.

São atividades normalmente realizadas por grupos de funcionários da organização, que atuam no sentido de eliminar os desperdícios ou problemas de produção identificados nos processos. A forma de atuação nos processos pode variar de empresa para empresa, mas a equipe normalmente é composta por funcionários de diversas áreas, treinados nos conceitos *kaizen* e irão atuar nos pontos críticos determinados por um plano gerencial.

A estrutura normalmente é composta por um escritório central, onde o coordenador irá liderar os eventos *kaizen*, com duração de uma semana. A equipe se reúne na primeira hora de trabalho da segunda-feira, discutem o problema central do evento, vão para a

área de trabalho e buscam soluções e melhorias de processo. Se necessário adquirir produtos ou serviços fora da área do evento *kaizen*, a organização apoiará de imediato, como por exemplo, a área de suprimentos, que fará as devidas contratações. No final da tarde de sexta-feira, a equipe se reúne com os gerentes e supervisores para apresentar os resultados, que normalmente tomam a forma do “antes” e “depois” da semana *kaizen*.

Brunet e New (2003) conceituam *kaizen* como a mobilização da força de trabalho, provendo o principal canal de contribuição dos empregados para com o desenvolvimento da companhia. Eles estudaram a aplicação do *kaizen* em diversas empresas japonesas, resumindo-o em três elementos chaves:

- (1) *kaizen* é contínuo – a prática continuada da busca pela qualidade e eficiência;
- (2) prática incremental por natureza, em contraste com as iniciativas de inovação tecnológica; e
- (3) é participativo, requerendo o envolvimento e inteligência da força de trabalho.

A utilização da técnica de mapeamento do fluxo de valor (item 2.4.18) normalmente expõe problemas que necessitam de intervenções, ou seja, os pontos onde um evento *kaizen* seria apropriado. Neste caso, as equipes vão para as áreas de produção e buscam identificar melhores formas de trabalho, através do desenvolvimento de um novo *layout*, equipamentos de transporte, sistema de estocagem, porém de forma criativa, tentando aproveitar ao máximo os recursos existentes na organização.

#### **2.4.21 Linha de Produção Flexível**

Por anos a produção em massa, com instalações e equipamentos dedicados, contribuiu para a redução dos custos de produção. Porém a produção em massa para atender à demanda é uma característica do mercado e nem sempre as empresas podem escolher produzir em massa ou em pequenos lotes. Atualmente o mercado se apresenta cada vez mais diversificado, com os clientes exigindo muitas opções de compra.

Shingo (1996) chama a atenção para a realidade dos sistemas de produção, onde as programações de produção são baseadas no histórico das vendas anteriores e em pesquisas de mercado, que não conseguem dar um índice elevado de assertividade em relação à demanda real. Então a empresa pode optar por trabalhar com pequenos ou grandes lotes. Neste último caso então, poderá estar sujeita a trabalhar com elevados níveis de estoque. Ele afirma:

“A decisão de adotar produção em massa ou produção em quantidades pequenas de uma grande variedade de modelos, não é feita ao acaso; pelo contrário, é uma resposta às condições do mercado e às demandas do usuário. Da mesma forma, períodos de grande ou pequeno crescimento resultam de circunstâncias sociais mutáveis que estão além do controle da empresa. Em um período de grande crescimento, é fácil criar um mercado comprador; mas durante um período de crescimento baixo, são os compradores que decidem o mercado. As empresas devem ser flexíveis e prontas para responder a novas e diferentes demandas”.

A produção para formação de estoques, além do custo de manutenção deste estoque, poderá não atender à demanda real, onde as necessidades e desejos dos clientes são dinâmicos. O desenvolvimento de linhas de produção flexíveis, que permitem o nivelamento da produção e o atendimento dos pedidos dos clientes em menor prazo, se torna fundamental para uma maior eficiência dos sistemas de produção.

É como uma loja de sanduíches MacDonalD's, com uma linha enorme de produtos visando atender a todo tipo de gosto dos clientes. Estruturada de forma a se ter um tempo reduzido entre o pedido até a entrega ao cliente, é um exemplo de produção flexível.

Empresas de ponta estão então começando a entender os requerimentos necessários para a flexibilidade, em relação ao tipo e volume de produto a produzir (Vollmann *et al.* 1997). E esta flexibilização das linhas de produção exige processos enxutos, menor *lead time* e conseqüentemente sistemas de troca rápida de ferramentas, assunto tratado no item 2.4.10.

#### **2.4.22 Melhoria de *Layout* e Sistemas de Transporte**

É comum às indústrias de manufatura o crescimento no mercado. Para atendimento da demanda de mercado, passam então a necessitar de um aumento na capacidade de produção, implementando projetos de expansão. Estes projetos, como o próprio nome já indica, tratam de ampliar as plantas de produção através da aquisição de novos equipamentos ou mesmo ampliação da capacidade dos existentes. Normalmente o *layout* inicial não prevê um aumento de mercado; porém, mesmo inserindo previsões de expansão, nem sempre elas ocorrem conforme o previsto anteriormente, em função das mudanças na demanda, considerando tipos de produtos, como também a mudança na tecnologia de produção, considerando máquinas e equipamentos. E o *layout* então passa a não estar devidamente projetado para as máquinas, equipamentos e produtos atuais da linha de produção, dificultando a movimentação de produtos acabados ou semi-elaborados, bem como o posicionamento de estoques intermediários.

É certo que as operações de transporte de peças semi-elaboradas não agregam valor ao produto final. E Shingo (1996) destaca que o transporte apenas aumenta os custos de produção, sem agregar valor, sendo o custo geral de um processo produtivo distribuído em 45% no processamento, 5% na inspeção, 5% em espera e os 45% restantes em operações de transporte. Portanto se faz necessário eliminar ao máximo a movimentação desnecessária. Isto é conseguido através:

- da melhoria do *layout*, reduzindo-se as distâncias entre as operações;
- utilizando-se equipamentos de movimentação adequados, como transportadores de correia, empilhadeiras e pontes rolantes, que irão melhorar o trabalho de transporte.

Normalmente o *layout* seguirá o fluxo do processo do produto, tomando formas variadas, em função da área disponibilizada. É comum o *layout* em forma de U como também em forma de L, que também considera a afluência das pessoas aos processos de produção. Mas é a realidade de cada indústria de manufatura, frente à sua diversidade de produtos irá determinar a forma como as operações serão posicionadas. A produção de produtos únicos facilita a montagem das linhas e aproximação das operações. Produtos não únicos, mas com algumas operações em comuns poderão ser produzidos em linhas com equipamentos e operações flexíveis, por exemplo, posicionados sobre trilhos para remoção ou inserção de operações específicas.

Um estudo minucioso dos processos de produção, suas operações, distâncias entre elas, a movimentação das peças e os equipamentos utilizados, aliado a um bom estudo de viabilidade técnica e econômica e posteriormente um estudo de simulação avaliando as alternativas propostas, garantirá a base necessária ao tomador de decisão, antes da implementação física das mudanças propostas.

A melhoria do *layout* e dos sistemas de transporte trás então, como benefícios:

- Aumento na produtividade;
- Redução de espaço da planta, com conseqüente liberação de área para novos equipamentos e processos;
- Redução do *lead time*;
- Melhor sincronização entre as operações;
- Melhor visualização do processo produtivo.

### 3 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

#### 3.1 Introdução

Simulação computacional é uma bem estabelecida ferramenta de suporte à decisão na indústria de manufatura (Perera e Lyanage, 2000). Provê aos gestores a base de informação necessária para a tomada de decisão, como por exemplo, em relação a grandes investimentos em expansão ou mudanças nas plantas de produção.

*Simulação* é a representação, normalmente em computador, de um sistema real, com o objetivo de análise do comportamento deste sistema. De acordo com Banks *et al.* (2005), *simulação* é a imitação de uma operação de um processo real ou sistema. É utilizada para testar alternativas de mudanças sem, contudo, alterar o sistema real, como também para identificação de gargalos nos processos produtivos. Pode também ser utilizada para simular novos sistemas, antes de suas implementações. Como exemplo, saber como a alteração no comprimento da mesa de corte ou mesmo a contratação de mais um funcionário na indústria de confecção, irá aumentar a produtividade.

É uma experimentação simples, que pode tomar a forma de questões do tipo “E se fizéssemos esta mudança, qual seria do impacto no sistema?”. Por exemplo, em um projeto de mineração, podemos questionar o resultado esperado do negócio caso o dólar esteja em um determinado valor frente ao real.

Pidd (1998) declara:

“Os métodos de simulação computacional têm se desenvolvido deste o início da década de 60 e pode ser uma das mais comumente ferramentas analíticas usadas na ciência do gerenciamento. Os princípios básicos são suficientemente simples. O analista constrói um modelo do sistema de interesse, cria os programas computacionais que incorporam o modelo e usa um computador para imitar o comportamento do sistema quando sujeito a uma variedade de políticas operacionais. Desta maneira, a política mais desejável poderá ser selecionada”.

A simulação é utilizada especialmente para sistemas mais complexos, onde métodos algébricos, teorias de probabilidade e cálculo diferencial não são suficientes para solucionar problemas matematicamente (Banks *et al.*, 2005). O projeto de sistemas de manufatura se torna uma tarefa complexa e cara para as pequenas e médias empresas como também para as grandes organizações. Muitos dos problemas relacionados ao projeto e operação de sistemas de manufatura são também complexos para permitir um tratamento matemático. Como resultado tem-se um crescente reconhecimento da aplicabilidade da simulação no ambiente de manufatura (Badwin *et al.*, 2000).

### 3.2 Aplicabilidade

Estudos de simulação têm sido aplicados em diversos setores como na simulação de processos da indústria de manufatura, simulação de sistemas públicos (bancos), sistemas de transporte (logística, transporte de passageiros), na mineração e siderurgia.

Gupta *et al.* (2001) justificam a utilização da simulação como aceleradora do desenvolvimento de novos produtos, reduzindo o ciclo do desenvolvimento, necessidade imposta pela intensa competição na economia global, que pressiona as companhias a conceberem, projetarem e produzirem novos produtos de forma rápida e barata. O desenvolvimento de ambientes de simulação com suas ferramentas de visualização de processos, permite detectar possíveis problemas que poderiam ocorrer nas montagens dos produtos.

Duffuaa *et al.* (2001) desenvolveram um modelo de simulação para o complexo processo de manutenção, normalmente iniciado com a quebra de máquinas e equipamentos ou mesmo de manutenções preventivas, o que envolve alocação de recursos e programação de serviços. Os estudos de simulação nesses casos permitem um maior conhecimento sobre os processos, as necessidades de mão de obra e de peças reservas, bem como o impacto das prioridades adotadas para o sistema de manutenção.

A simulação computacional é uma poderosa ferramenta de suporte aos processos de melhoria contínua, como mostra Adams *et al.* (1999), nos estudos de mudança de *layout* e de número de funcionários em duas empresas americanas. É também utilizada para avaliar a confiabilidade de sistemas, como apresentado por Pinto e Saliby (1994) em seu artigo sobre a confiabilidade de redes em um sistema de comunicação.

A utilização da simulação também se expande a outros horizontes. Modelos de simulação têm tido grande importância, na pesquisa relacionada ao desenvolvimento sustentável do planeta, sendo uma ferramenta de estudo, aprendizado e comunicação. A experimentação direta, neste caso, é demorada, deve ser feita em larga escala e requer orçamento elevado. É o exemplo do famoso experimento ecológico, Biosfera 2, com orçamento acima de US\$ 200 milhões. Portanto a utilização da simulação computacional vem tomando mais importância no estudo de sistemas ecológicos complexos e tem sido utilizada, por exemplo, para simular o crescimento habitacional do planeta, o consumo mundial de água potável, a utilização do solo para plantio de grandes áreas e os efeitos da emissão de CO<sub>2</sub> na atmosfera (Chi, 2000).

### 3.3 Vantagens e Desvantagens da Simulação

Hoje vivenciamos um processo constante de desenvolvimento dos softwares de simulação, que estão cada vez mais fáceis de usar, permitindo uma modelagem e simulação em menor prazo e uma visualização dos resultados dos sistemas estudados, se uma ou outra alternativa de mudança fosse adotada. O estudo de processos através da simulação computacional apresenta como principais vantagens:

- A simulação de um sistema de produção que ainda está em fase de projeto, antes de sua construção, buscando observar seu comportamento operacional, como por exemplo, avaliação de sua eficiência quando estiver em operação;
- Suporte à análise econômico-financeira de investimentos;
- Teste de novas políticas e procedimentos operacionais, sem a interrupção do sistema real;
- Teste de condições de segurança associadas às mudanças a serem implementadas;
- Visualização mais rápida do comportamento do sistema frente a alterações de processo, se comparado com outras formas de implementação de mudanças, especialmente do tipo tentativa e erro;
- Determinação e estudos de gargalos existentes no sistema;
- Conhecimento de como o sistema funciona verdadeiramente, ao contrário de se basear no funcionamento descrito pelas pessoas que o operam;
- Em consequência dos pontos acima tratados, tem-se um menor custo da simulação se comparado com o custo de experimentações diretas, que envolvem grandes somas de dinheiro e de pessoas, nem sempre alcançando os resultados desejados.

Como desvantagens têm-se:

- Construção de modelos exige treinamento especial;
- Dificuldade na interpretação dos resultados;
- Modelagem pode consumir tempo e ter custos altos.

Porém as desvantagens citadas anteriormente são amenizadas através do uso de simuladores e *templates*, que facilitam a utilização, sem necessidade de treinamentos especiais, pelo aumento constante na capacidade de análise dos softwares, que facilitam a interpretação dos resultados e pelo aumento na capacidade de construção de modelos dos softwares, que tem facilitado a modelagem.

### 3.4 Modelos de Simulação

Os sistemas reais de produção se apresentam normalmente como *sistema discreto*, onde as variáveis do processo mudam somente num conjunto discreto de pontos no tempo (por exemplo, o nº. de pedidos muda somente na chegada de um novo pedido) ou como *sistema contínuo*, onde as variáveis de estado mudam continuamente no tempo (por exemplo, o nível de um tanque de um produto químico utilizado no processamento).

Os modelos de simulação são tipificados como: *matemático*, que utiliza notações simbólicas e equações matemáticas para representar um sistema, ou *físico*, como uma maquete ou estação reduzida de uma fábrica; *estático*, que representa um sistema num momento particular no tempo ou *dinâmico*, representando sistemas que mudam com o passar do tempo (por exemplo, a simulação de um setor de recebimento de pedidos na indústria de confecção, das 7h00min às 17h00min); *determinístico*, quando contém um conjunto de entradas conhecidas que irão resultar em saídas conhecidas e não contém variáveis aleatórias (por exemplo, chegada de clientes no consultório médico, respeitando os horários marcados com a secretária) ou *estocásticos*, quando possui uma ou mais variáveis aleatórias.

O manuseio do tempo (*time handling*) em simulação pode ser feito através do avanço do relógio (*time-slicing*) em intervalos regulares de tempo, como por exemplo, avançar a cada 1 minuto, ou 1 hora, dependendo do estudo que estiver sendo realizado e observar o comportamento do sistema. Existe a dificuldade em se determinar qual o tamanho deste intervalo de tempo, pois o que ocorre dentro do intervalo não pode ser observado.

Para resolver o problema do manuseio do tempo e simulações de sistemas complexos, com intervalos não regulares entre os eventos, é utilizada a técnica do próximo evento, onde o sistema só é observado quando houver uma mudança de estado, ou seja, quando iniciar ou terminar um evento. Como exemplos, a chegada (ou saída) de um cliente do banco, o início (ou término) de um atendimento do cliente pelo bancário. Pidd (1998) destaca como vantagens do uso da técnica do próximo evento, o incremento automático no tempo de acordo com os eventos, o que evita a checagem desnecessária do sistema e deixa claro quando um evento significativo ocorre. Este trabalho considera modelos de simulação que representam sistemas de eventos discretos, dinâmicos e estocásticos.

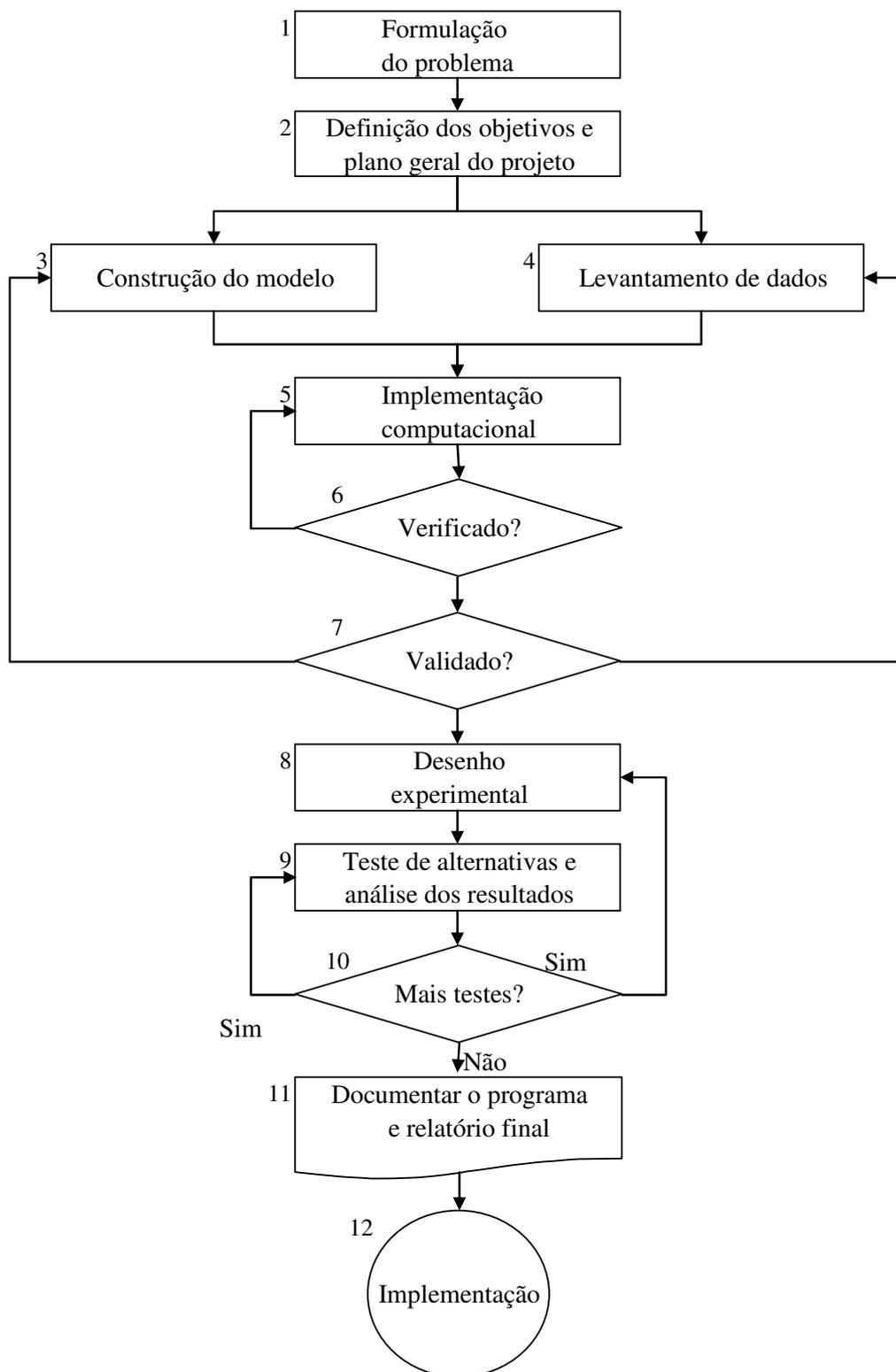
### 3.5 Etapas da Simulação

Pidd (1998) recomenda que o analista, antes de construir o modelo de simulação e o programa computacional, identifique:

- A natureza do sistema que está sendo estudado;
- A natureza do estudo;
- Objetivos do estudo;
- Resultados esperados;
- Nível de detalhe e precisão requerida para a simulação.

Num âmbito geral, a simulação de um sistema envolve as etapas a seguir descritas, adaptadas de Banks *et al.* (2005) e apresentadas na Figura 3-1:

1. Formulação do problema: enunciado do problema; deverá ser facilmente entendido por todos os envolvidos; normalmente reformulado com o andamento do estudo.
2. Definição dos objetivos e plano geral do projeto: os objetivos indicam as questões a serem respondidas pela simulação; o plano geral do projeto descreve as alternativas de estudo; inclui as pessoas e custos envolvidos, o tempo necessário e os resultados esperados para cada fase do trabalho, além do software de suporte, as variáveis de processo e o sistema de coleta de dados.
3. Construção do modelo: requer a habilidade de extrair as principais características de um sistema, selecionar e modificar as principais hipóteses que caracterizam o sistema e então melhorar o modelo até conseguir resultados aproximados ao sistema real; em sistemas mais complexos, pode-se iniciar o modelo com menos elementos e depois ir agregando os demais elementos, até que o modelo atenda os propósitos do estudo (e não mais que isso).
4. Levantamento dos dados: durante a construção do modelo se faz necessário o levantamento de dados de processo, de forma a facilitar ou mesmo permitir uma aproximação ao sistema real; quanto mais complexo for o sistema em modelagem, maior será esta inter-relação entre a construção do modelo e o levantamento de dados; os dados a serem levantados, definidos inicialmente nos objetivos do projeto, serão mais bem identificados durante a construção do modelo.



**Figura 3-1** - Etapas de simulação. Adaptado de Banks *et al.* (2005).

5. Implementação computacional (codificação): o programador deverá decidir qual programa ou linguagem será utilizada para rodar a simulação e de acordo com os levantamentos, construir o modelo.

6. Verificação do modelo computacional: após a construção do modelo computacional, são realizados testes gerais para saber se o modelo está rodando satisfatoriamente.
7. Validação do modelo computacional: é a confirmação de que o modelo está representando satisfatoriamente o sistema real; dados mais recentes são utilizados para comparar o sistema real com o modelo gerado no computador; modificações são feitas no modelo até que ele represente, a um nível aceitável, o sistema real em estudo.
8. Desenho experimental: consiste na definição das alternativas propostas e alterações relacionadas no modelo construído.
9. Teste das alternativas e análise dos resultados: o modelo é rodado segundo os novos parâmetros em estudo e a desempenho do sistema, resultante destas alterações, é então analisado.
10. Novos testes: se necessário, o modelo deverá ser rodado quantas vezes necessárias para complementar as análises.
11. Documentar o programa e relatório final: documentar o programa consiste em registrar como o programa foi gerado, de forma a permitir a interpretação dos resultados e a reutilização do modelo em novos estudos; as formas como foram realizadas as análises e seus resultados, deverão ser documentadas de forma clara em relatório próprio, permitindo a tomada de decisão em relação ao sistema.
12. Implementação: consiste na alteração do sistema real, baseadas nos resultados do modelo de simulação.

### 3.6 Simulação de Eventos Discretos

A simulação de eventos discretos se baseia nos conceitos de fila e tempos de serviço, observável em qualquer processo de manufatura: as *filas* são os estoques de peças aguardando para serem processados nas máquinas num determinado *tempo de serviço*. Independente da linguagem utilizada, o uso da simulação se apresenta aplicável e, considerando a necessidade de uma base para a tomada de decisões, justificável e necessária.

Para realização de um estudo de simulação, algumas abordagens são consideradas, a saber:

- A forma de manipulação do tempo;
- Se as durações são determinísticas ou estocásticas;
- Se as trocas de estado são discretas ou contínuas.

Sobre a *manipulação do tempo*, uma das vantagens da simulação é a possibilidade de controlar a velocidade com que as alterações no estado do modelo se processam. O *estado de um sistema* é definido por Banks *et al.* (2005) como sendo a coleção de variáveis necessárias para descrever o sistema em um determinado momento, relativas aos objetivos do estudo. No estudo de uma agência bancária, as possíveis variáveis de estado podem ser os caixas que estão atendendo, o número de clientes que estão na fila aguardando atendimento ou que estão sendo atendidos e o tempo de chegada do próximo cliente à agência. Um *evento* é definido como uma ocorrência instantânea que pode mudar o estado do sistema, por exemplo, a chegada de um novo cliente ou o final de um atendimento. A essência da simulação é que as trocas de estado do sistema são modeladas através do tempo. Assim, é importante considerar como o fluxo de tempo deve ser manuseado ao longo da simulação. Conforme apresentado no item 3.4, as formas de manipulação do tempo em uma simulação podem ser através:

- da divisão do tempo em intervalos regulares (“*time-slicing*”).
- da técnica do próximo evento.

Exemplos: instante 52 = começa o atendimento  
instante 54 = termina o atendimento  
instante 54,7 = chegará um novo cliente no sistema  
Do instante 52 ao 54 não existe mudança de estado no sistema.

### 3.6.1 Terminologia Utilizada em Simulação

Existem alguns termos comuns que são utilizados pelos desenvolvedores nos estudos de simulação, descrevendo os principais elementos que os compõem.

Banks *et al.* (2004) apresentam um descritivo desta terminologia, complementada por termos de uso geral em simulação:

- *Sistema*: coleção de entidades (exemplo: pessoas e máquinas) que interagem entre si durante algum tempo, para realizar uma ou mais metas.
- *Modelo*: representação abstrata de um sistema, usualmente contendo o relacionamento estrutural, lógico ou matemático, que descreve um sistema em

termos de estado, entidades e seus atributos, conjuntos, processos, eventos, atividades e atrasos.

- *Estado de sistema*: coleção de variáveis que contêm todas as informações necessárias para descrever o sistema a qualquer momento.
- *Entidade*: qualquer objeto ou componente no sistema que requer uma representação explícita no modelo (ex.: um servidor, um cliente, uma máquina).
- *Atributos*: propriedades de uma determinada entidade (exemplo, a prioridade de um cliente esperando, a rota de uma tarefa através de um sistema “*job shop*”). Os atributos são itens que informam determinadas características de uma entidade e servem para dois propósitos: distinguir membros de uma mesma classe de entidades; caracterizar cada entidade; e controlar o comportamento das entidades, ou seja, controlar o fluxo do atributo (se idoso vai para fila 1, se não fila 2). Pertencem às entidades, as diferenciando entre si. Por exemplo, o peso ou sexo de cada aluno, que pode também ser transformado em um atributo numérico, onde se do sexo masculino recebe o valor 1; se do sexo feminino recebe o valor 2.
- *Lista*: coleção de entidades (permanentes ou temporárias) associadas, ordenadas em alguma forma lógica (como todos os clientes esperando numa fila, ordenados por “primeiro que chega, primeiro a ser atendido” ou por prioridade).
- *Evento*: ocorrência instantânea que muda o estado de um sistema (ex.: a chegada de um novo cliente).
- *Sinal de Evento*: anotação de que um evento está para ocorrer no momento atual ou futuro próximo, junto com algum dado associado necessário para execução do evento; no mínimo, as informações incluem o tipo de evento e a duração do evento.
- *Lista de Eventos*: lista de informações de futuros eventos, ordenados por momento de ocorrência; também conhecida como lista de eventos futuros (*FEL – Future Event List*).
- *Atividade*: duração de tempo de dimensão especificada, conhecida quando ela começa. Por exemplo, o tempo de atendimento ou tempo entre chegadas. Pode ser definida em termos de uma distribuição de probabilidade. Uma duração de atividade pode ser especificada de forma determinística (por exemplo, o tempo de atendimento que sempre é 5 minutos), estatística (por exemplo, gerada

aleatoriamente a partir de uma distribuição de probabilidades: 2, 5, 7), ou como função dependente de variável do sistema e/ou atributos da atividade (por exemplo, o tempo de carregamento de um navio com minério de ferro dependerá da capacidade do navio e da capacidade de carregamento por hora). Complementado: são as operações e procedimentos que são iniciados em cada evento. Representa todas as ações que demandam tempo. Precisa de pelo menos uma entidade para ocorrer.

- *Demora*: duração de tempo de dimensão não especificada, que não é conhecida até seu término, como por exemplo, a demora do cliente na fila no sistema último a chegar, primeiro a sair – LIFO, no qual seu atendimento dependerá das chegadas futuras.
- *Relógio da simulação*: variável representando o tempo da simulação; representa o instante corrente da simulação.

Complementando a terminologia da simulação de eventos discretos, temos:

- *Conjuntos*: são também conhecidos como listas, filas ou correntes. Uma coleção de entidades associadas (permanentes ou temporárias), organizadas de alguma forma lógica (como todos os clientes que estão numa fila de espera, ordenados pelo primeiro nome, primeiro a ser servido ou por prioridade).
- *Classes*: grupos permanentes de entidades idênticas ou similares. A entidade não é representada isoladamente e sim por classe.
- *Entidades Permanentes*: permanecem no sistema durante toda a simulação. São criadas antes da simulação. Ficam no sistema todo o tempo de simulação; por exemplo, o caixa do banco.
- *Entidades Temporárias*: permanecem no sistema apenas parte da simulação. São criadas e posteriormente destruídas para não explodir a memória do sistema, ao longo da simulação; por exemplo, os clientes do banco.
- *Variável*: característica que pertence ao sistema. Exemplo: navio, trens; podem alterar a variável estoque de minério de ferro.
- *Processo*: às vezes, é usual agrupar uma seqüência de eventos na ordem cronológica que eles acontecem. Tal seqüência é conhecida como processo e é utilizada para representar parte ou toda a “vida” de uma entidade dentro do sistema. Representa

uma classe de entidades. É um conjunto de atividades pelas quais uma classe de entidades passa durante a simulação. Um processo é uma lista de eventos, atividades ou atrasos, seqüenciados no tempo, incluindo demanda por recursos, que define o ciclo de vida de uma entidade quando ela passa através de um sistema.

- *Operações*: ações efetuadas sobre o material pelos trabalhadores e máquinas (Shingo, 1996).
- *Filas*: podem ser geradas por uma atividade que requer mais de uma entidade; estado de passividade (como exemplos, o cliente esperando para ser atendido ou o caixa do banco ocioso). Só ocorrem antes de atividades que requerem mais de uma entidade para poderem ser processadas. As *disciplinas* da fila são: FIFO - *First In, First Out*; LIFO - *Last In, First Out*; Prioridade: depende da leitura do valor de um determinado atributo; e aleatório, que é raramente utilizada.
- *Modelo de simulação*: representação do processo de todas as entidades. Todos os processos devem estar conectados diretamente (quando existem atividades comuns) ou indiretamente (uso das mesmas variáveis).

Pidd (1998) faz uma complementação da terminologia, diferenciando os objetos do sistema e as entidades como sendo:

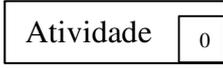
- *Entidades*: elementos individuais do sistema cujo comportamento se deseja analisar. Representa os elementos físicos do sistema (exemplo o cliente de um banco) que vamos estudar o comportamento; que se movimentam ao longo do sistema.
- *Recursos*: elementos individuais do sistema que não são modelados separadamente. Um recurso consiste em itens idênticos e o programa mantém um controle sobre quantos itens estão disponíveis a cada momento. Entidades que estão associadas a determinadas atividades (como exemplo o caixa do banco). Os softwares de simulação ARENA e PROMODEL utilizam este conceito. Num lava jato de carros, temos o carro como *entidade* e o lavador do carro como *recurso*.
- *Entidades Ativas*: trabalham em conjunto com outras atividades e as “retêm” durante algumas operações do sistema. Por exemplo, o cliente do banco.
- *Entidades Passivas*: trabalham em conjunto com outras atividades e são “retidas” por elas durante algumas operações do sistema. Por exemplo o caixa do banco.

### 3.6.2 Diagrama de Ciclo de Atividades

O Diagrama de Ciclo de Atividades - DCA é uma representação gráfica de modelos de simulação, que auxilia na construção do modelo. Ele mostra as interações entre as diversas entidades de um sistema. De acordo com Pidd (1998):

“Diagramas de ciclo de atividades são formas de modelar as interações das entidades e são particularmente convenientes para modelar sistemas com uma forte estrutura de filas”.

O DCA possibilita um melhor entendimento de todo o sistema que será estudado, facilitando a modelagem computacional. Para desenhar um Diagrama de Ciclo de Atividades são utilizados símbolos gráficos, apresentados na Tabela 3-1. A Figura 3.2 apresenta um exemplo de um DCA.

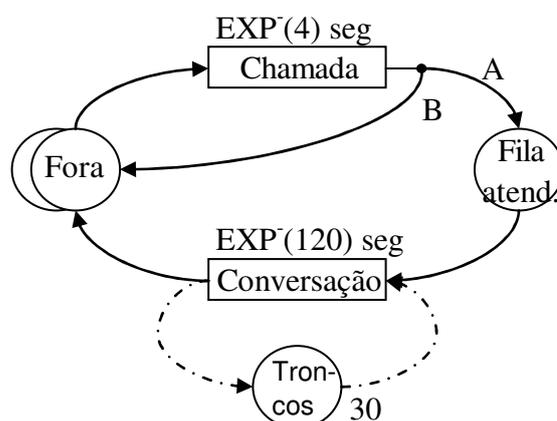
<b>Elemento</b>	<b>Descrição</b>	<b>Representação</b>
Entidades (classes)	Elementos individuais do sistema que estão sendo simulados, de forma a analisar seu comportamento.	 (linhas)
Atividades	Operações e procedimentos realizados no sistema e que demandam tempo.	 (retângulo)
Filas	Estado de passividade, de espera, das entidades.	 (círculos)
Fontes (Nascedouros e Sumidouros)	Representam o ambiente externo ao sistema que está sendo estudado. É como uma fila de capacidade infinita.	 (círculos sobrepostos)
Prioridade de execução da atividade	Definição de qual atividade deverá ser realizada quando houver disputa entre atividades que utilizam o mesmo recurso.	 Menor valor representa maior prioridade
Desvios condicionais	Regras definidas para quando houver mais de uma opção de direcionamento das entidades após a execução de determinada atividade.	Indicado ao lado da linha de movimento da entidade
Disciplinas de Filas	FIFO, LIFO, Por prioridade.	Indicado ao lado do círculo da fila. Se não tiver indicação, é FIFO.
Duração das atividades	Tempo necessário para execução de uma determinada atividade.	Indicado na parte superior do retângulo da atividade.

**Tabela 3-1** - Simbologia DCA.

A representação de um sistema de atendimento telefônico, com chamadas atendidas e perdas devido ocupação do tronco é representado na Figura 3-2.

Entidades: Clientes                      Atividades: Chamada  
                   Atendente/troncos                      Conversação

Regras de Desvio:  
 Se FILAATEN > 0, então B, se não A



**Figura 3-2** - DCA de um sistema de atendimento telefônico.

As *entidades* são representadas por linhas e para uma melhor diferenciação entre elas, utilizam-se diferentes espessuras e formas. As *atividades* são representadas por retângulos, aonde chegam e saem as entidades. Quando no estado passivo, ou seja, em espera, as entidades permanecem nas *filas* aguardando o momento de sair para participar da execução de alguma atividade. As *filas* são representadas por círculos; não representam especificamente uma fila “indiana”, mas a chegada de alguma entidade para alguma atividade, podendo ter tempo zero de permanência. As *disciplinas das filas* (FIFO, LIFO, por prioridade) são indicadas ao lado do círculo representativo da fila. Se não houver indicação da disciplina da fila, por convenção será considerada como FIFO. As *fontes*, representadas por 2 círculos sobrepostos, representam o ambiente externo ao sistema; nascedouros e sumidouros de entidades que entrarão e sairão do sistema. Este “nascimento” ou criação de entidades irá ocupar memória de processamento; por isto a entidade deve sair após seu processamento para não ficar consumindo memória. Para atividades simultâneas que utilizam um mesmo recurso, será necessário definir a *prioridade de execução da atividade*, que irá identificar a atividade que será executada primeiro; é representada por um número colocado no canto inferior direito do retângulo da atividade; quanto menor este número maior será a prioridade daquela atividade.

Em muitos sistemas, ao finalizar uma atividade, a entidade pode ser direcionada a uma determinada fila ou a outra. Por exemplo, o recepcionista do restaurante executa a atividade de perguntar se o cliente é fumante ou não fumante, para direcioná-lo para a área específica do restaurante. Este *desvio condicional* deverá ser indicado junto à linha representativa do movimento da entidade, indicando qual a regra a ser seguida. Existem dois grupos de desvios: baseado em valores históricos (exemplo: um determinado percentual) e baseado em condições específicas (exemplo: se num determinado valor de atributo, segue tal caminho, se não outro).

E finalmente as *durações das atividades*, que deverão ser representadas sobre (ou sob) o retângulo da atividade, indicando sua distribuição de probabilidade e a unidade de tempo (dias, horas, etc.). As distribuições de probabilidades normalmente usadas na simulação computacional são (ver item 3.6.5, aspectos estatísticos na simulação de eventos discretos): Normal, Exponencial, Gama, LogNormal, Weibull e Triangular. Distribuições menos utilizadas: Beta e Poisson.

Como exemplo, podemos considerar uma agência bancária que precisa definir o número ideal de caixas de atendimento, cujo DCA está representado na Figura 3-3.

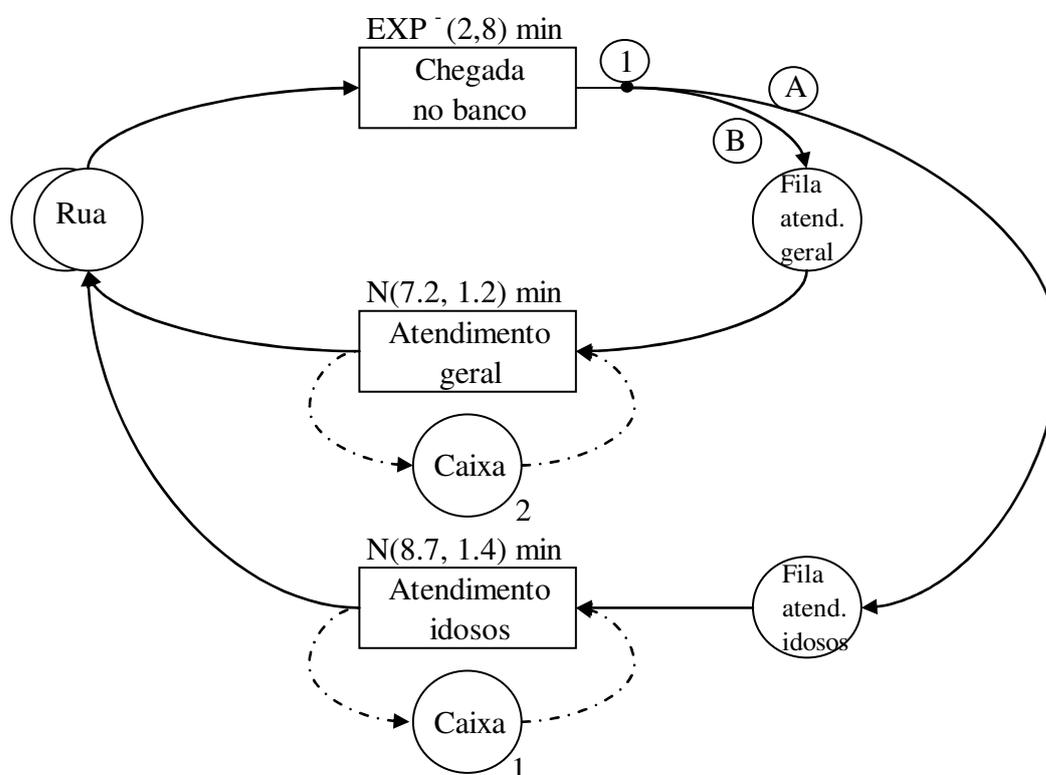


Figura 3-3 - DCA de uma agência bancária.

Os clientes chegam à agência segundo uma distribuição de probabilidade exponencial negativa com média de 2,8 minutos. Atualmente ela opera com três caixas, sendo dois caixas para atendimento geral com tempo de atendimento seguindo uma distribuição normal com média 7,2 minutos e desvio padrão de 1,2 minutos e um caixa de atendimento de idosos com tempo de atendimento seguindo uma distribuição normal com média 8,7 minutos e desvio padrão de 1,4 minutos. Atualmente, 37% dos clientes são idosos. A Figura 3-3, anteriormente apresentada, representa o diagrama de ciclo de atividades do sistema, cujas entidades, atributos e regras de desvio podem ser apresentadas como:

**Entidades:**

— Clientes                      - - - - - Caixas de atendimento

**Atributos:**

① Atributo                      Tipo ← ∅ 37%;    Tipo ← 1 63%

**Regra de desvios:**

① Se tipo = ∅ então (A) ; se não (B)  
     Se tipo = ∅ e TAMFILA Atend. idosos > 0 e  
         TAMFILA Atend. Geral = 0 então (B) ; se não (A)  
     SE Tipo = 1 e TAMFILA Atend. Geral > 0 e  
         TAMFILA Atend. idosos = 0 então (A) ; se não (B)

Algumas regras básicas devem ser observadas para a montagem de um diagrama de ciclo de atividades:

- Sempre, antes e depois de uma atividade deverá ter uma fila, mesmo que a permanência da entidade nesta fila tenha duração zero. Ou seja, é obrigatória a alternância entre estados de atividade e passividade no ciclo de cada entidade.
- Todas as atividades têm duração maior que zero, portanto em toda a atividade deverá estar indicada a duração, sua distribuição de probabilidade e sua unidade de tempo.
- As prioridades deverão estar explicitadas sempre que um recurso for ser utilizado por atividades concorrentes.
- As entidades temporárias devem “nascer” e “morrer” na mesma fonte. Como já mencionado anteriormente, criar a entidade e ela entrar no sistema implica na ocupação de memória. Morrer significa sair do sistema, liberando assim a memória ocupada.

- As atividades permanentes deverão estar claramente indicadas em suas respectivas filas, incluindo a quantidade.
- Filas são exclusivas de uma única classe de entidades.
- Todos os desvios condicionais devem ter suas regras explicitadas.
- Todos os pontos de atribuição devem explicar como serão passados os valores aos atributos.
- A disciplina das filas deve ser explicitada, a menos da disciplina FIFO.
- Cada classe de entidade tem seu próprio ciclo de vida, que por sua vez, deve estar relacionado com o ciclo de vida de pelo menos outra atividade.

A lógica de um diagrama de ciclo de atividades considera a existência de pelo menos uma entidade em cada fila que antecede a atividade para a realização da mesma. No início da atividade, as entidades são retiradas das filas antecedentes e ficam indisponíveis por um tempo previamente amostrado. Ao término da atividade, as entidades são liberadas para as suas respectivas filas subseqüentes à atividade da qual estava participando.

A indicação dos *pontos de atribuição* normalmente é feita após o término de uma atividade; exemplo de regra de atribuição: 80% atributo tipo 1; 20% atributo tipo 2. Os *desvios condicionais* são regras definidas para quando houver mais de uma opção de direcionamento das entidades após a execução de determinada atividade; ou seja, quando existir mais de um caminho possível, deve-se indicar qual a regra a seguir.

### 3.6.3 Método das Três Fases

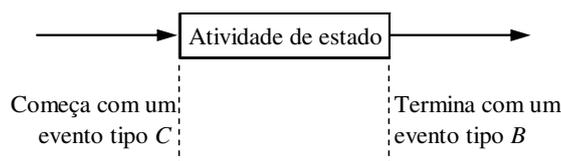
O *método das três fases* considera os eventos como atividades de duração zero, como exemplos, o momento exato da chegada de um cliente no banco ou de término de um serviço. Diante deste conceito, os eventos são divididos em duas categorias (*Banks et al.*, 2004):

Evento do tipo *B* – atividades (eventos) próximas de ocorrer ou independentes de condições; *B* = *Bound*. Por exemplo, após o início do atendimento de um cliente, pode-se prever o término a partir da duração do atendimento; se determinístico pelo valor previsto e se estocástico através da geração de um tempo aleatório, com base na distribuição de probabilidades.

Evento do tipo *C* – atividades (eventos) dependentes de certas condições, como disponibilidade de alguma entidade ou recurso; *C* = *Conditional*. Por exemplo, para realizar o atendimento, o atendente e o cliente devem estar disponíveis.

Pidd (1998) apresenta como regra geral:

“Atividades de estado começam com um evento *C* e terminam com um evento *B*, como representado na Figura 3-4”.



**Figura 3-4** - Bs e Cs em atividades de estado.

No método das três fases, a simulação acontece repetindo a execução de três fases, sendo:

Fase *A* – Avança o relógio da simulação até o instante de tempo do próximo término de atividade (próxima mudança de estado).

Fase *B* – O término de atividades no instante de tempo da fase *A* irá liberar as entidades que delas participaram, para suas respectivas filas subsequentes. Ou seja, termina os eventos do tipo *B*.

Fase *C* – O sistema verifica aquelas atividades que podem iniciar naquele instante. Ou seja, o sistema faz uma varredura nas condições que permitem o início de eventos do tipo *C*.

Desta forma o sistema roda a simulação, verificando as atividades que podem começar, retirando as entidades das filas antecedentes, amostrando a duração das atividades e “preendendo” as entidades durante este tempo. Avança então o relógio para o próximo término de atividade (fase *A*) e entra em ciclo até o término da simulação (tempo pré-definido ou outra condição predeterminada).

### **Exemplo:**

Como exemplo do método das três fases, podemos considerar uma pequena agência bancária que deseja simular o atendimento aos clientes. Os clientes chegam à agência segundo uma distribuição de probabilidade exponencial negativa com média de 7,5 minutos. Atualmente ela opera com 2 caixas para atendimento geral, com tempo de atendimento seguindo uma distribuição normal de média 13,2 minutos e desvio padrão

de 3,4 minutos. Com base nas distribuições de probabilidades da chegada dos clientes e tempos de atendimento, foram gerados números aleatórios conforme Tabela 3-2.

Números aleatórios								
Cliente	Instante da chegada	Tempo de atendimento	Cliente	Instante da chegada	Tempo de atendimento	Cliente	Instante da chegada	Tempo de atendimento
1	10,5	9,6	11	100,1	14,8	21	164,3	10,3
2	11,5	10,1	12	101,1	13,1	22	168,3	8,0
3	14,9	14,0	13	103,3	14,0	23	173,9	17,3
4	15,2	7,8	14	104,5	14,6	24	187,9	14,7
5	28,3	11,2	15	107,1	12,4	25	197,1	13,8
6	35,3	5,8	16	108,1	12,4	26	225,5	7,7
7	42,0	13,8	17	114,0	14,7	27	231,1	19,2
8	49,4	11,1	18	115,0	13,6	28	237,6	18,3
9	51,1	11,3	19	133,9	11,8	29	269,3	10,7
10	96,3	21,4	20	140,2	14,6	30	273,7	17,3

**Tabela 3-2** - Método das 3 Fases. - números aleatórios.

Na abertura da agência (tempo 0) nenhum cliente havia chegada, portanto os caixas se encontram ociosos. Move-se o relógio da simulação para o próximo evento, que é a chegada do cliente 1, no instante 10,5. Como não existe fila formada, o cliente 1 se dirige diretamente ao caixa 1, que começa o atendimento, com duração de 9,6. Portanto, início 10,5, duração de 9,6, término 20,1. Ver Tabela 3-3.

A	B		C		$\Delta t$	Término	Observações
Relógio	Término da atividade	Liberação entidade	Início da atividade	Retenção da entidade			
Ø							Caixa 1 ocioso Caixa 2 ocioso
10,5	Chegada	Cliente 1	Atendimento	Caixa 1 Cliente 1	9,6	20,1	Caixa 2 ocioso

**Tabela 3-3** - Tabela de simulação - Método das 3 Fases.

Move-se o relógio da simulação para o próximo evento, observando a tabela dos números aleatórios (instante de chegada do próximo cliente) e a tabela da simulação (instante de término). Neste momento temos como próximo evento a chegada do cliente 2 no instante 11,5. Como o caixa 2 está ocioso, o atendimento é imediato e tem a duração de 10,1. Ver tabela 3.4 a seguir.

A	B		C		$\Delta t$	Término	Observações
Relógio	Término da atividade	Liberação entidade	Início da atividade	Retenção da entidade			
Ø							Caixa 1 ocioso Caixa 2 ocioso
10,5	Chegada	Cliente 1	Atendimento	Caixa 1 Cliente 1	9,6	20,1	Caixa 2 ocioso
11,5	Chegada	Cliente 2	Atendimento	Caixa 2 Cliente 2	10,1	21,6	

**Tabela 3-4** - Tabela de simulação - Método das 3 Fases.

Observando que os instantes dos próximos eventos na tabela de simulação são 20,1 e 21,6, teremos a chegada dos clientes 3 e 4 antes da finalização dos atendimentos dos clientes 1 e 2. Portanto teremos o início da formação da fila na agência. E assim, observando-se o término de atividades e a liberação de recursos vai-se simulando o comportamento do sistema nesta agência bancária.

20,1	Atendimento	Caixa 1 Cliente 1	Atendimento	Caixa 1 Cliente 3	14,0	34,1	
21,6	Atendimento	Caixa 2 Cliente 2	Atendimento	Caixa 2 Cliente 4	7,8	29,4	Acaba a fila

**Figura 3-5** - Tabela de simulação - tempos 20,1 e 21,6.

A Relógio	B		C		$\Delta t$	Término	Observações
	Término da atividade	Liberação entidade	Início da atividade	Retenção da entidade			
∅							Caixa 1 ocioso Caixa 2 ocioso
10,5	Chegada	Cliente 1	Atendimento	Caixa 1 Cliente 1	9,6	20,1	Caixa 2 ocioso
11,5	Chegada	Cliente 2	Atendimento	Caixa 2 Cliente 2	10,1	21,6	
14,9	Chegada	Cliente 3					Formação de fila
15,2	Chegada	Cliente 4					Vai para a fila
20,1	Atendimento	Caixa 1 Cliente 1	Atendimento	Caixa 1 Cliente 3	14,0	34,1	
21,6	Atendimento	Caixa 2 Cliente 2	Atendimento	Caixa 2 Cliente 4	7,8	29,4	Acaba a fila
28,3	Chegada	Cliente 5					Formação de fila
29,4	Atendimento	Caixa 2 Cliente 4	Atendimento	Caixa 2 Cliente 5	11,2	40,6	Acaba a fila
34,1	Atendimento	Caixa 1 Cliente 3					Caixa 1 ocioso
35,3	Chegada	Cliente 6	Atendimento	Caixa 1 Cliente 6	5,8	41,1	
40,6	Atendimento	Caixa 2 Cliente 5					Caixa 2 ocioso
41,1	Atendimento	Caixa 1 Cliente 6					Caixa 1 ocioso
42,0	Chegada	Cliente 7	Atendimento	Caixa 2 Cliente 7	13,8	55,8	
49,4	Chegada	Cliente 8	Atendimento	Caixa 1 Cliente 8	11,1	60,5	
51,1	Chegada	Cliente 9					Formação de fila
⋮							
⋮							
⋮							

**Tabela 3-5** - Tabela de simulação - Método das 3 Fases

### 3.6.4 Método Baseado em Processos (Abordagem Baseada em Processos)

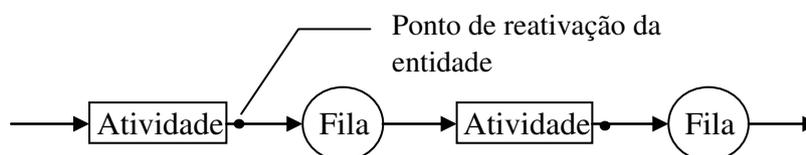
Segundo Pidd, muitos sistemas podem ser modelados por simulação de eventos discretos, usando ferramentas como o diagrama de ciclo de atividades, bem como dividir a simulação em três fases, considerando atividades e eventos (atividades com duração zero). Outras três formas de simulação também podem ser consideradas: a abordagem baseada em eventos, a abordagem baseada em atividades e a mais comum delas, a abordagem por processos.

Segundo Pidd (1998), a *abordagem baseada em eventos* foi utilizada de 1960 a 1980, devido à linguagem comum à época, SIMSCRIPT, que, em versões posteriores, passou a encorajar os modeladores a usar a abordagem por processos. No modelo baseado em eventos, as partes principais são conhecidas como rotinas de eventos. Uma rotina de evento é um conjunto de expressões, em alguma linguagem de programação, que captura o conjunto total de conseqüências lógicas que podem fluir de um evento. Lembrando que um evento é uma mudança de estado que ocorre em um determinado momento. Na abordagem baseada em eventos, o programa executivo é normalmente mais simples que o método das três fases, pois se preocupa apenas com a rotina dos eventos, sem se concentrar no seqüenciamento. Dessa forma torna seu processamento mais rápido que no método das três fases, pois considera apenas os eventos, sem ficar escaneando as atividades durante a fase C. Porém esta abordagem torna os programas mais complexos de serem elaborados.

Na *abordagem baseada em atividades*, o programa executivo ficará escaneando, a cada avanço do relógio da simulação, todas as atividades que estiverem próximas de se iniciar ou de terminar. Apesar de simples, seu processamento se torna mais lento que o método baseado em eventos, em função de escanear repetidamente as atividades que podem ocorrer naquele momento. Este método foi a base para o desenvolvimento do método das três fases, que separa os eventos *Bs* e *Cs* e escaneia apenas as atividades do tipo *Cs* (lembrar que a abordagem baseada em atividades escaneia todas as atividades).

Já as *abordagens baseadas em processos* são as mais utilizadas na simulação de eventos discretos. As simulações baseadas em processos se diferem das simulações baseadas em eventos ou atividades, por considerar, na modelagem computacional, todos os processos que envolvem uma entidade.

Um *processo* é definido por Pidd (1998) como sendo “a seqüência de operações através da qual uma entidade deve passar durante sua vida no sistema”. Para cada classe de entidade existe pelo menos um processo. Durante a simulação, as entidades são criadas como membros dessas classes (Pidd, 1998). Cada entidade caminha ao longo do seu processo (em atividades ou filas), conforme mostra a figura a seguir:



**Figura 3-6** - Processos de uma entidade.

O programa executivo tem a atribuição de mover as entidades através de seus processos (em atividades ou em filas). O progresso no movimento da entidade pode ser suspenso por duas condições:

- *Retardos incondicionais*: depende da duração de uma atividade; a entidade ficará retida (*delay*) até o final do tempo previamente definido; por exemplo, se o tempo de atendimento num banco é de 6 minutos, o cliente ficará retido nesta atividade até o final deste tempo.
- *Retardos condicionais*: depende de um recurso; a entidade ficará parada (por exemplo, em uma fila) até que alguma condição específica seja satisfeita; considerando novamente o caso do banco, o cliente permanece na fila até que o atendente tenha disponibilidade de atendê-lo.
- *Ponto de reativação*: onde a entidade vai reaparecer.

Pidd (1998) declara:

Embora, em teoria, um processo é simplesmente uma lista de operações cronologicamente ordenadas, deve estar claro que as coisas não são tão simples assim. O programa executivo precisa saber em quais pontos uma entidade pode ficar parada em seu processo por retardos condicionais ou incondicionais. Deste modo cada processo deve conter os pontos de reativação nos quais eles podem controlar o retorno de uma entidade. Um programa executivo baseado em processo deve manter um registro para cada entidade e que contém dois campos como descrito a seguir:

- (1) seu momento de reativação (se conhecido);
- (2) seu próximo ponto de reativação (onde em seu processo)

O programa executivo mantém então duas listas com estes registros

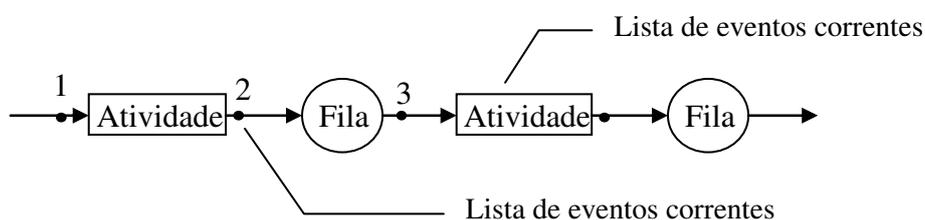
(1) *Lista de Eventos Futuros (FEL - Future Event List)*: lista seqüenciada de forma cronológica, dos registros daquelas entidades cujo progresso é retardado incondicionalmente. Deste modo, esta lista é seqüenciada pelo momento de

reativação das entidades registradas nesta lista. Somente aquelas entidades cujo o momento de reativação está próximo de ocorrer aparecem nesta fila. *Exemplo: o cliente acaba o atendimento daqui a 3 minutos.*

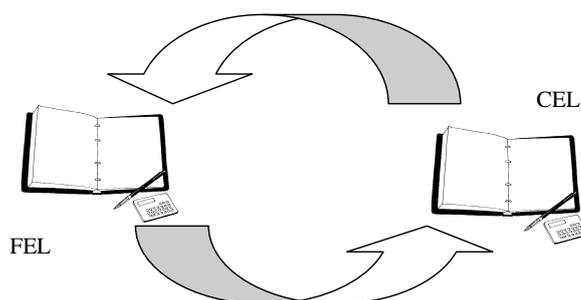
(2) *Lista de Eventos Correntes (CEL – Current Events List)*: a qualquer momento na simulação, esta lista contém o registro de dois tipos de entidades. As primeiras, aquelas que têm sido retardadas incondicionalmente e aquelas cuja reativação ocorre neste instante no relógio da simulação. Exemplo: o cliente acaba de ser atendido. As segundas, a lista inclui os registros daquelas entidades que são objetos de retardos condicionais.

Estas duas listas permitem ao programa executivo operar com um ciclo de três fases em cada momento do relógio da simulação como a seguir descrito.

- (1) Escaneamento de eventos futuros: a lista de eventos futuros é usada para determinar o momento do próximo evento. É facilmente realizada quando a lista está organizada de forma cronológica. O relógio da simulação avança até este momento.
- (2) Move entre as listas: as entidades da lista de eventos futuros cujo momento de reativação é o mesmo do relógio da simulação se movem para a lista de eventos correntes.
- (3) Escaneamento dos eventos correntes: o programa executivo deve agora fazer com que cada entidade da lista de eventos correntes se mova através de seus processos, se as condições permitirem. Por exemplo: a primeira pessoa da fila pode ser atendida pelo atendente que está disponível neste momento. As entidades que estão sendo movidas completarão seus processos ou serão retardadas condicional ou incondicionalmente. Se o retardo é incondicional, então os registros são movidos para a lista de eventos futuros. O executivo aponta seu próximo ponto de reativação nos registros desta entidade.



**Figura 3-7** - Lista de eventos futuros e correntes.



**Figura 3-8** - O programa executivo e as listas de eventos futuros e correntes.

Conforme apresentado na Figura 3-7 e Figura 3-8, o programa executivo fica consultando e movimentando as entidades entre as duas listas. A lista de eventos correntes recebe as entidades reativadas.

Quando o sistema possui muitas atividades e poucas entidades presentes simultaneamente no sistema, o método de processos tende a ser mais rápido do que o método das três fases. Porém quando o sistema possui poucas atividades e muitas entidades, o método das três fases tende a ser mais rápido. O método por processo é a abordagem mais comum nos softwares atuais.

Em resumo: na simulação baseada em *eventos*, o processo é dividido em rotinas de eventos independentes, cada qual definindo as possíveis conseqüências lógicas de um evento. Na simulação baseada em *atividades*, o analista deve definir a lista de atividades únicas e o programa executivo escolhe as inter-relações dinâmicas entre elas. A simulação baseada em *processo* toma como referência o processo total de uma entidade como base do modelo lógico da simulação.

Pidd (1998) estabelece algumas semelhanças e diferenças básicas entre a abordagem por processos e o método das três fases, conforme apresentado a seguir:

Semelhanças:

- A abordagem por processos distingue os eventos por condicionais e incondicionais; o método das três fases utiliza os *Bs* e os *Cs* para esta distinção.

Vantagens:

- Procuram ser mais rápidos do que os programas que escaneiam constantemente todas as atividades;
- Evitam a necessidade de análise das conseqüências lógicas de um evento, facilitando a montagem inicial do programa de simulação.

Diferenças:

- No método das três fases, a fase *B* é realizada somente para as entidades que estão por finalizar uma atividade, enquanto que a fase *C* é realizada para qualquer entidade. Isto é para evitar o conflito entre processos que requerem o mesmo recurso. Os *Bs* liberam estas entidades e recursos.
- Na abordagem por processos, cada entidade passa por seus processos sempre que possível, ou seja, até encontrar um retardo incondicional ou até encontrar um retardo condicional com condições não satisfeitas. A entidade pode chegar a terminar uma atividade e iniciar outra imediatamente, que não permitiria deixar explicitado o que seria uma fase *B* ou *C*.

- Na abordagem por processos o programa executivo fica parado até que é questionado sobre o que fazer com uma entidade, enquanto que no método das três fases o programa executivo mantém um maior controle sobre cada entidade.

Uma observação sobre a abordagem por processos: o modelador tem mais facilidade de entender o sistema se ele se imagina como sendo uma das entidades.

A abordagem dependerá do software que estiver sendo usado.

### **3.6.5 Aspectos Estatísticos na Simulação de Eventos Discretos**

Na modelagem de fenômenos do mundo real, existem poucas situações em que as ações das entidades dentro do sistema em estudo podem ser previstas completamente. O mundo que o modelador enxerga é mais probabilístico que determinístico, pois existem diversas causas de variação (Banks *et al.*, 2005). Tomando como exemplo o consultório médico, a chegada dos clientes ao consultório, precisamente no horário marcado para a consulta, pode ser considerada como determinística; porém, a consulta médica terá uma duração variável, de acordo com o tipo de sintoma de doença, a idade do paciente, o tipo de exame e a disposição dos pacientes para conversar com o médico. Estes fatores, causadores da variação do tempo de consulta, irão traduzir o comportamento imprevisível do sistema, forçando um tratamento estocástico do processo, por parte do modelador. Nestas condições, a utilização de um modelo estatístico do fenômeno em estudo permitirá uma aproximação à realidade do sistema.

Para a utilização de softwares de simulação, será necessário conhecer o comportamento desse sistema, entendendo como, estatisticamente, estas variações se comportam na linha de tempo. O levantamento de dados numa amostragem representativa e confiável irá permitir saber a probabilidade de ocorrência de uma determinada duração. Os diferentes tempos serão traduzidos então, em uma distribuição de probabilidade, que é o que interessa ao modelador. A seguir são apresentados conceitos básicos de probabilidade e estatística, normalmente considerados em estudos de simulação, baseados em Magalhães e Lima (2005) e complementados com Banks *et al.* (2005) e Kelton *et al.* (2007).

#### **Terminologia**

- *Fenômeno aleatório*: situação ou acontecimento cujos resultados não podem ser previstos com certeza.

- *Espaço amostral*: conjunto de todos os resultados possíveis, de certo fenômeno aleatório.
- *Evento*: subconjunto do espaço amostral.
- *Experimento*: qualquer atividade que será empreendida e cujo resultado é incerto (até realizá-la e ver o que acontece).
- *Probabilidade*: possibilidade de ocorrência de um determinado evento, quando se realiza um experimento.
- *Frequência de ocorrência*: número de ocorrências de um evento em um experimento.
- *Variável*: cada uma das características de uma determinada entidade.

### **Técnicas de amostragem:**

- *Amostragem aleatória simples*. Para “sortear” aleatoriamente o resultado de um lançamento de uma moeda e chegar à probabilidade de um determinado resultado: para saber a probabilidade de sair coroa simulam-se 10.000 lançamentos de uma moeda. É possível prever 50%. Porém, pode ser que nestes 10.000 lançamentos dê 5.003 coroas, fazendo a probabilidade subir para 50,03%. Ou seja, apresentará uma variabilidade nos resultados de cada conjunto de 10.000 lançamentos. Portanto, a Amostragem Aleatória Simples pode apresentar uma variabilidade no conjunto amostrado aleatoriamente e na seqüência aleatória em que os resultados se apresentam: amostra → conjunto aleatório + seqüência aleatória.
- *Amostragem descritiva*. Saliby (1990) discute a manutenção do mesmo conjunto de resultados (conjunto determinístico) deixando a variabilidade apenas na seqüência com que os resultados se apresentam (seqüência aleatória). É como colocar 10.000 bolas coloridas (5000 azuis e 5000 vermelhas) em uma caixa, e ir retirando-as aleatoriamente. Com certeza o resultado final será  $P_{\text{azul}} = 50\%$  e  $P_{\text{vermelha}} = 50\%$ . Porém a seqüência será aleatória. Até o momento, nenhum software comercial utiliza esta abordagem; apenas a Amostragem Aleatória Simples (Pidd, 1998)

### **Distribuições estatísticas mais comuns**

- *Distribuições discretas*. As variáveis aleatórias discretas que irão compor este tipo de distribuição têm seus possíveis valores finitos ou contáveis de forma infinita, como por exemplo, o número de alunos em uma sala de aula ou a demanda por um

determinado item de estoque. Quatro distribuições são apresentadas por Banks *et al.* (2005):

- *Distribuição de Bernoulli*: ensaios do tipo “passa-não passa” o número de ensaios  $n$  é chamado de Bernoulli, se são independentes e cada um possui apenas 2 possíveis resultados (passou, não passou).
- *Distribuição Binominal*: o número de ensaios em que a peça “passou” no teste, em  $n$  tentativas Bernoulli, normalmente terá uma distribuição binominal.
- *Distribuição Binominal Geométrica e Negativa*: o número de tentativas necessárias para se ter a primeira peça aprovada no ensaio de Bernoulli do tipo passa-não passa normalmente terá uma distribuição binominal geométrica; o número de tentativas até se alcançar um determinado número de peças aprovadas normalmente terá uma distribuição binominal negativa.
- *Distribuição de Poisson*: o número de ocorrências de um fenômeno em determinado período de tempo terá comumente uma distribuição de Poisson, como por exemplo, o número de clientes por hora, que chegam a uma agência bancária.
- *Distribuições contínuas*. As variáveis aleatórias contínuas que irão compor este tipo de distribuição terão seus possíveis valores em algum intervalo, como por exemplo, a altura dos alunos em uma sala de aula ou o tempo entre as “quebras” de um equipamento produtivo. Nove distribuições são apresentadas por Banks *et al.* (2005) e complementos de definições de Kelton *et al.* (2007):
  - *Distribuição Uniforme*: os valores da variável aleatória em estudo se distribuem uniformemente em intervalo  $(a, b)$ ; por exemplo, 50 carros modelos A, 50 modelos B e 50 modelos C foram produzidos no período anterior.
  - *Distribuição Exponencial*: normalmente descreve os intervalos de tempo entre chegadas com comportamento completamente aleatório, como por exemplo, o tempo entre as chegadas de pedidos ao departamento de vendas, ou mesmo o tempo de atendimento de cada cliente.
  - *Distribuição Gama*: freqüentemente utilizada para representar o tempo requerido para completar alguma tarefa (por exemplo, um tempo de máquina ou tempo de reparo da máquina).

- *Distribuição de Erlang*: descreve o comportamento de um sistema com diversas estações de trabalho que possuem tempos de operações discretas em distribuições exponenciais.
- *Distribuição Normal*: usada para representar processos que são a somatória de um determinado número de operações componentes desses processos; por exemplo, o tempo de montagem de um produto será a soma dos tempos requeridos para cada operação de montagem de seus componentes.
- *Distribuição de Weibull*: usada em modelos de confiabilidade para representar a vida útil de um dispositivo, peça ou equipamento.
- *Distribuição Triangular*: utilizada quando são conhecidos apenas os valores mínimo, mais provável e máximo, da distribuição; por exemplo, os valores mínimo, mais provável e máximo para testar um produto.
- *Distribuição Lognormal*: modela a distribuição de um processo que pode ser entendido como o produto (significando multiplicá-los) de um número de processos componentes; por exemplo, a taxa sobre um investimento, quando os juros são compostos, é o produto do retorno pelo número de períodos.
- *Distribuição Beta*: normalmente utilizada para representar proporções aleatórias, como por exemplo, a proporção de peças defeituosas em um lote produzido.

As distribuições mais comumente utilizadas na simulação de eventos discretos são:

Normal	$N(\text{média}, \text{desvpad})$	Log Normal	$LOG N(\text{média}, \text{desvpad})$
Exponencial	$EXP(\text{média})$	Wiebull	$W(\beta, \alpha)$
Gama	$G(\beta, \alpha)$	Triangular	$T(\text{min}, \text{moda}, \text{max})$

E as menos utilizadas:

Beta	$\beta (\beta, \alpha)$	Poisson	$P(\text{média}, \text{desvpad})$
------	-------------------------	---------	-----------------------------------

Uma simulação que possui aspectos aleatórios deverá envolver amostragem, ou geração de variáveis aleatórias a partir de distribuições de probabilidade. Estas distribuições são freqüentemente especificadas como resultado de ajustamento de uma forma de distribuição aos dados observados, como por exemplo, exponencial, gama ou Poisson. Utiliza-se então esta distribuição para se gerar variáveis aleatórias para rodar o modelo de simulação (Law e Kelton, 1991).

### 3.6.6 Softwares Comerciais para Simulações

O aumento na oferta de softwares de simulação, desenvolvidos ao longo dos anos, não garante uma aderência perfeita a muitos sistemas de manufatura. A dinâmica dos sistemas de simulação, com suas características específicas em cada caso, requer o conhecimento sobre o que estas ferramentas de simulação pode oferecer aos usuários.

Pidd (1998) apresenta a forma geral de um programa de simulação de eventos discretos, com três partes, que também se assemelha aos programas comerciais: o *programa executivo*, que tem o controle da simulação e sua tarefa é assegurar que as entidades e recursos do modelo engajem na atividade certa no momento certo da simulação e é fornecido pelo provedor do sistema; o *modelo lógico*, construído pelo modelador; descreve como as entidades e recursos se interagem durante a simulação; e as *ferramentas gerais*, conjunto de ferramentas como, por exemplo, funções de amostragem aleatória e de apresentação gráfica; podem ser usadas tanto pelo programa executivo como pelo modelo lógico e são fornecidas pelo provedor do sistema.

Pidd (1998) discorre sobre as mudanças nos métodos computacionais:

“Quando os métodos de simulação discreta foram inicialmente desenvolvidos, os processos de programação computacional e de obtenção dos resultados do programa eram trabalhosos e altamente especializados. Até meados da década de 70, os computadores eram grandes e caros e operados em forma de lotes. Deste modo quem escrevia o programa de simulação teria de desenvolver o programa na forma de códigos, ter o programa perfurado em cartões, alguém inseria os cartões no computador e então esperava pelos resultados. Frequentemente levava-se um dia inteiro para correr duas simulações nos computadores comerciais. Os resultados, quando apareciam, eram normalmente impressos em uma impressora de linha.”

“Hoje em dia, a maioria das simulações é desenvolvida em diversos ambientes computacionais. Usuários têm como certo que programas e dados podem ser diretamente alimentados em um computador através do teclado ou com a ajuda de algum dispositivo como, por exemplo, o próprio mouse. Eles também assumem que podem ter um controle direto sobre o computador através de um sistema multiusuário, estações de trabalho em rede ou computadores pessoais. Eles também estão acostumados a ver os resultados dos programas de computador apresentados e manipulados na tela do monitor ao contrário de ter que lidar com pilhas de papel impresso. Inevitavelmente, estas mudanças tecnológicas têm alterado os métodos da simulação discreta e eles afetam o analista como também o usuário”.

Computadores de uso pessoal têm sido utilizados para rodar os programas de simulação, sem, contudo necessitar de tempos exorbitantes para isso. Os softwares atualmente comercializados não requerem grandes e poderosos computadores e podem ser utilizados pelo próprio pessoal do processo, sem necessitar de analistas especializados ou mesmo do desenvolvimento de um programa computacional. A interface do usuário

com o software de simulação é feita através de itens gráficos que representam as diversas entidades (ou processos) do sistema que está sendo simulado bem como suas interações. É como fazer um filme do processo e observar o que ocorre quando alterações são realizadas. É também fazer com que o relógio ande mais rápido, para simular períodos longos de tempo.

Banks *et al.* (2005) divide os softwares usados para desenvolver modelos de simulação em três categorias:

1) Linguagens de programação de propósito geral, como exemplos:

- C++
- Java

(2) Linguagens de programação de simulação, como exemplos:

- GPSS/H<sup>TM</sup>
- SIMAN V<sup>®</sup>
- SLAN II<sup>®</sup>

(3) Ambientes de simulação, como exemplos:

- Arena
- Flexsim
- Quest
- AutoMod
- Micro Saint
- Simul8
- Extend
- ProModel
- Witness

Pidd (1998) complementa as linguagens de programação de propósito geral, como exemplos:

- Basic
- C
- Visual Basic
- Turbo Pascal

Algumas considerações sobre as linguagens e softwares de simulação:

- As linguagens de programação de propósito geral necessitam de programadores experientes, tanto no desenvolvimento do programa, o que inclui entendimento do processo e sua modelagem, como também na análise dos resultados da simulação;
- As linguagens de simulação possuem sub-rotinas, procedimentos e outras funções pré-programadas em sua biblioteca, facilitando a modelagem computacional;
- Nos ambientes de simulação ou softwares comerciais já vêm agregados *templates* de acordo com as áreas de aplicação, que facilitam a programação. Isto permite que o cliente, com um conhecimento razoável sobre o processo, modelagem e simulação, simular e analisar os resultados.

Os softwares de simulação podem rodar normalmente em ambientes Microsoft Windows, podendo diferir em alguns pontos, como apresentado por Banks *et al.* (2005):

- *Arena*: comercializado pela Systems Modeling Corporation, foca na modelagem de processos organizacionais, representando processos dinâmicos num *flowchart* hierárquico e armazena as informações do sistema em planilha de dados. Construído baseado em atividades, é amigável com o Visio (software de estruturação de fluxo de processos). Emprega recursos de modelagem gráfica, com módulos (objetos) para representar o sistema lógico e ícones que fazem a representação de máquinas, operadores e atendentes, associados a janelas de diálogo para entrada de dados. Estes ícones são conectados para representar o fluxo das entidades e são organizados em coleções chamadas de *templates*. Possui módulos focados em aspectos específicos de sistemas de manufatura e movimentação de materiais, bem como recursos de animação. O sistema é baseado na linguagem de simulação SIMAN. Possui também uma ferramenta para análise de dados, *Analysér*, que auxilia, por exemplo, na identificação da distribuição de probabilidade de dados coletados no processo e na comparação das diferentes alternativas estudadas.
- *AutoMod*: comercializado pela Brooks Automation, tem foco na simulação de sistemas de manufatura e movimentação de materiais e inclui, além do pacote de simulação, módulos para experimentação e análise e para geração de vídeos em 3 dimensões (AVI) para animação. Possui *templates* para os sistemas mais comuns de movimentação de materiais, como empilhadeiras e correias transportadoras, além do módulo de tanques e tubulações, para modelagem de fluidos. Os *templates* de movimentação estão baseados em desenhos em 3 dimensões, gerados ou importados do CAD. Seus *templates* permitem simular movimentos de peças, motores em operação, com diferentes velocidades e sensores fotocélulas para representar a real operação do sistema. Permite visualizar o sistema em diversos ângulos, fazendo aproximações (zoom) em pontos de maior interesse.
- *Extend*: comercializado pela Imagine That, Inc., é usado para simular sistemas discretos e mistos. Combina uma abordagem por diagrama de blocos padrões com um ambiente de desenvolvimento de novos blocos para aplicações específicas, como sistemas de manufatura, processos organizacionais e processos de alta velocidade. Complementam estas aplicações, bibliotecas para modelagem da dinâmica da cadeia de suprimentos, engenharia de confiabilidade e processos de polpa e papel. Os

modelos são criados através do posicionamento e conexão dos blocos, com janelas para entrada de dados. As entidades são criadas em um determinado bloco e circulam bloco a bloco, de acordo com as conexões entre eles. Permite o cálculo de parâmetros de processo e a recuperação de informações estatísticas para emissão de relatórios. Permite também a animação do fluxo de processo. Os resultados da simulação são apresentados em forma de tabelas e gráficos.

- *Flexsim*: comercializado pela Flexsim Software Products, Inc. of Orem, é um software desenvolvido em C<sup>++</sup>. Animações podem ser vistas em 2 e 3 dimensões e realidade virtual, que podem ser mostradas simultaneamente durante a simulação. Trabalha integrado com o Visual C<sup>++</sup> IDE da Microsoft. Usado para melhorar a eficiência da produção e redução de custos operacionais através da simulação, experimentação e otimização de sistemas de fluxo dinâmico. Permite introduzir e simular novas condições operacionais e analisa seus efeitos e resultados, gráfica e estatisticamente, de forma a melhorar o sistema em estudo.
- *Micro Saint*: comercializado pela Micro Analysis and Design, Inc., é um software de simulação de propósito geral, eventos discretos e desenho de redes. Utilizado para construir modelos que simulam processos da vida real. Não utiliza terminologia ou representações gráficas de uma indústria específica. Pode ser usado para representar qualquer processo que possa ser traduzido em um diagrama de fluxo. Os termos utilizados são definidos pelo usuário. Os ícones e pano de fundo para animação podem ser customizados. Permite a visualização do sistema através do diagrama de fluxo e da animação em 2 dimensões. Suporta o desenvolvimento de modelos de várias complexidades, de acordo com a necessidade do usuário. Os modelos funcionais podem ser construídos de forma simples, desenhando o diagrama e rede e preenchendo com informações sobre as tarefas. Modelos mais complexos podem ser construídos para representar variáveis com mudanças dinâmicas, comportamento probabilístico, formação de filas, animação, otimização e coleta extensiva de dados.
- *ProModel*: comercializado pela Promodel Corporation, é uma ferramenta para simulação e animação de modelos de sistemas de manufatura. Possui módulos específicos para sistemas de saúde e de serviços. Oferece animação em 2 dimensões com uma visão perspectiva em 3 dimensões. A animação é gerada automaticamente enquanto o modelo é desenvolvido. Possui elementos orientados para a modelagem de sistemas de manufatura, como partes de processo, locações, recursos (pessoas,

ferramentas, veículos de transporte), rotas, lógica de processamento e chegadas e sua linguagem de programação permite modelar situações especiais. Os recursos podem trafegar pelos caminhos do diagrama com velocidades e acelerações diversas. Inclui lógica para gerar automaticamente dados de custo, associados com dados de processos. Os resultados são apresentados em gráficos e diagramas, permitindo analisar os múltiplos cenários experimentados.

- *Quest*: comercializado pela Delmia Corporation Quest (Queuing Event Simulation Toll), é um pacote de simulação orientado à manufatura. Combina um ambiente de simulação em 3 dimensões com uma interface gráfica e módulos de fluxo de material, para a modelagem do trabalho, correias transportadoras, veículos guiados automaticamente, dispositivos cinemáticos, guindastes e sistemas de armazenagem automáticos. Incorpora recursos de CAD de 2 e 3 dimensões, para criar um ambiente virtual de fábrica. Possui módulos que permitem a análise ergonômica de estações de trabalho e robotização. Um modelo neste software consiste de elementos de diversas classes (transportadores, trabalhadores), que associados a dados geométricos e parâmetros definem seu comportamento. As diversas partes têm uma rota e regras de controle para governar seu fluxo no sistema. A arquitetura aberta deste software permite simular a produção por lotes, buscando a otimização do sistema em estudo. Os resultados são apresentados de forma numérica com mecanismos de relatórios estatísticos e de forma visual, através de gráficos, podem ainda criar animações para visualizar a experimentação.
- *Simul8*: comercializado pela Simul8 Corporation, este software foi criado para projetar o fluxo de trabalho com um mouse de computador, usando uma série de ícones e setas para representar os recursos e filas no sistema. Permite a visualização (animação) já em estágios iniciais do processo de modelagem. O foco principal deste software é a simulação de processos em indústrias de serviço, onde as pessoas são objetos de transações. Possui *templates* e componentes com simulações pré-concebidas, facilitando a parametrização do processo em estudo. Os componentes permitem a criação de ícones específicos para serem utilizados em outras simulações. Estes recursos reduzem o tempo para criação dos modelos de simulação, padronizando algumas situações comuns dentro de uma organização, reduzindo a necessidade de coleta de dados em alguns casos. Os dados da simulação podem ser salvos no formato XML, para ser transportados para outras aplicações.

- *Witness*: comercializado pela Lanner Group, possui versões separadas para simulação de manufatura e serviços, com elementos que permitem a simulação discreta e de processos contínuos, como o fluxo de fluidos através de processadores, tanques e tubulações. Os modelos são baseados em *templates*, que podem ser customizados para reutilização, incluindo elementos de produção e montagem, como correias transportadoras, trilhos, veículos, trabalhadores e carregadores, sendo o comportamento de cada elemento tabulado em um formulário apropriado. Os modelos são apresentados em 2 dimensões, com animação e janelas para entrada de dados de processo e podem ser alterados a qualquer momento ou salvos em algum ponto para reuso posterior. Opcionalmente existe um módulo para realidade virtual, onde o mouse possui o controle sobre uma câmera voadora sobre o sistema. Permite a interface de dados diretos com outros softwares, como Microsoft Excel e Minitab e os dados podem ser salvos no formato XML.

Os ambientes de simulação ou softwares comerciais apresentados anteriormente, têm tido mudanças ao longo dos anos, agregando ferramentas que facilitam a programação e análise de resultados, bem como corrigindo problemas de versões anteriores. O site da *Winter Simulation Conference* (<http://www.wintersim.org>) tem um espaço reservado aos produtores desses softwares comerciais, para que eles divulguem o produto e suas especificações. Importante conhecer a aplicação para poder identificar qual linguagem ou pacote de software é mais adequado.

Independente da linguagem ou software utilizado na simulação, esta deverá ser uma representação fiel da realidade do sistema em estudo e permitir a análise dos resultados da simulação.

A utilização desses softwares comerciais pode ser vista no trabalho desenvolvido por Baldwin *et al.* (2000), que apresentaram o resultado de uma pesquisa sobre o uso de softwares de simulação, desenvolvida por especialistas europeus em simulação, que trabalhavam tanto na indústria como também em ambientes acadêmicos.

## 4 SIMULAÇÃO EM PROJETOS DE MANUFATURA ENXUTA

### 4.1 Introdução

A manufatura enxuta é considerada a razão do sucesso das companhias de manufatura japonesas. Muitas empresas brasileiras têm tido a iniciativa de mudança de seus processos, com base nesta filosofia. Porém não se tem conseguido de forma imediata, os resultados esperados. E num processo de tentativa e erro, vão aos poucos melhorando seus processos de produção.

Em projetos de manufatura enxuta, é comum realizar o mapeamento do fluxo de valor, tendo como resultado o mapa do estado atual, que depois de analisado pela equipe de projetos, será redesenhado, apresentando o mapa do estado futuro. São então programados os eventos *kaizen*, para implementação das melhorias.

Porém, essa forma de analisar, propor e implementar melhorias entra normalmente no ciclo de tentativa e erro da experimentação direta, onde se pode identificar como principais falhas:

- As equipes *kaizen* nem sempre são conhecedoras do processo em estudo ou estão preparadas para análise de processos;
- O mapeamento do fluxo de valor é focado no momento, ou seja, são dados instantâneos e, quando trabalhando com dados históricos, utilizam a média, que não representa o comportamento estocástico do sistema;
- Os eventos *kaizen* são normalmente caracterizados por um envolvimento de grande número de pessoas de diversas áreas e por aquisições imediatas de equipamentos e serviços, alterando os processos, *layout*, criando sistemas à prova de erros.

Como resultado de tudo isso, tem-se a implementação de projetos que custam caro e não trazem o retorno visualizado no mapa do estado futuro.

Pidd (1998) declara: “Simulação por computador envolve a experimentação em um modelo computacional de algum sistema. O modelo é usado como veículo para experimentação, freqüentemente numa forma de tentativa e erro para demonstrar os efeitos de várias políticas desejadas. Desta maneira, aquelas que produzem os melhores resultados no modelo, poderiam ser implementadas no sistema real”.

Este trabalho parte de duas fortes premissas:

- A aplicação dos conceitos da manufatura enxuta nos processos produtivos torna as empresas mais organizadas e competitivas;
- A simulação permite a visualização, a baixo custo, das implicações de mudanças nos processos.

Portanto, a utilização de simulação em projetos de manufatura enxuta, dará à alta e média gerência, a base para a tomada de decisão consciente e consistente, eliminando as insatisfações e os altos custos associados aos projetos implementados através da tentativa e erro da experimentação direta.

## 4.2 Trabalhos Relacionados

Se baseando no alto custo associado ao erro, alguns pesquisadores têm buscado contribuir com as organizações utilizando simulação computacional, para apoiar o tomador de decisão.

Shin e Min (1995) simularam a parada de linhas de produção pelos operários, quando observavam problemas de qualidade. Através de programação em BASIC, compararam a automação (item 2.4.2) com o sistema tradicional, que enfatiza a utilização máxima da capacidade de produção (máquinas e operadores), evitando tanto quanto possível a parada da linha de montagem. Consideraram em seus estudos três cenários:

- sem paradas ou atrasos da linha de produção e sem problemas de qualidade;
- retirada rápida da peça defeituosa (reparando-a fora da máquina) e continuando a produção de outra peça;
- reparo da peça defeituosa na linha de produção.

Simulando problemas de diferentes tipos na linha de produção e introduzindo modelos de custo total esperado, demonstraram as vantagens da estratégia da parada da linha sobre a estratégia tradicional de reparar a peça defeituosa na linha de produção.

Welgama e Mills (1995) estudaram a importância do uso da simulação na fase de projeto de um sistema de produção *just-in-time*, envolvendo a mudança de *layout* em forma de células, a identificação de gargalos, as operações se tornando multidisciplinares, as revisões dos postos de trabalho e dos sistemas de controle através do uso de *kanbans*. A simulação, utilizando a linguagem de simulação SIMAN, se apresentou eficiente não só para o estudo envolvendo os tópicos anteriormente

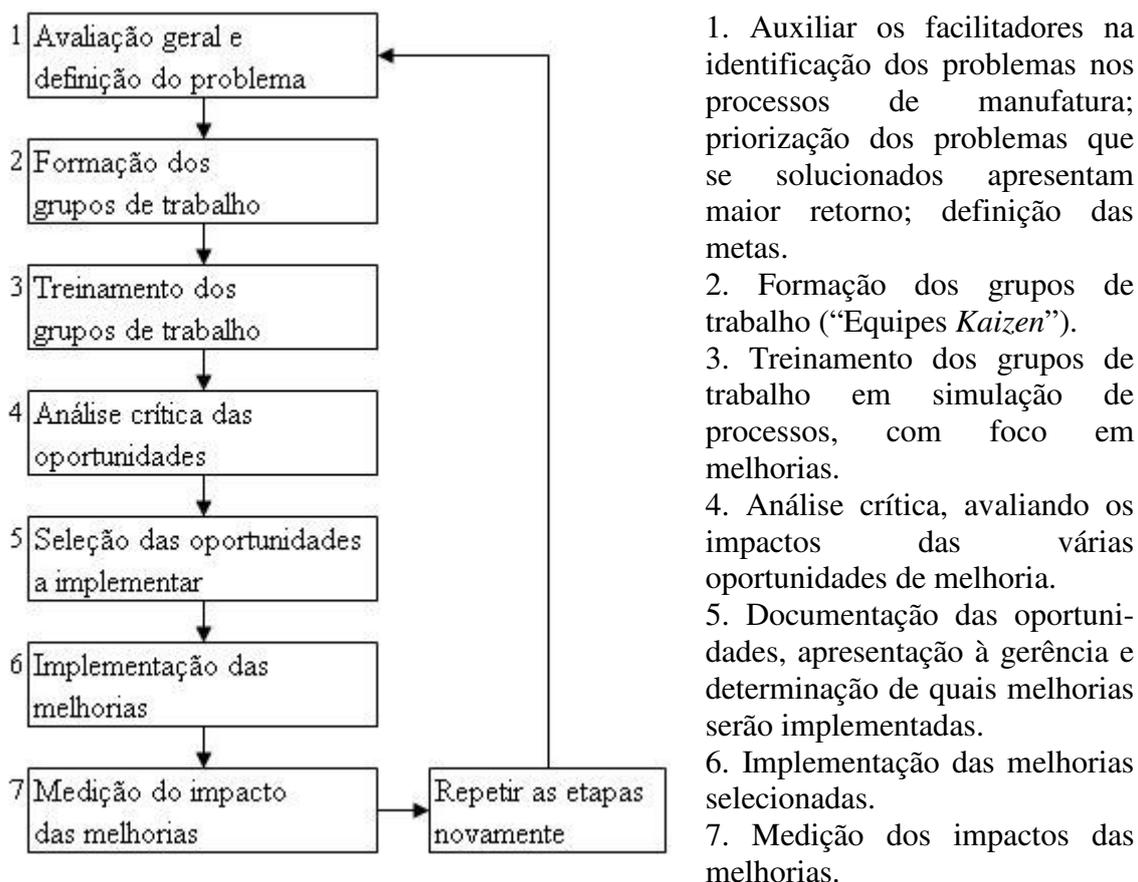
relacionados, mas também facilitando o entendimento por parte dos grupos de trabalho de chão de fábrica, que normalmente se opõem às mudanças.

Muitos autores dedicaram seus estudos para comparar as várias estratégias de manufatura e comprovar a melhoria, tanto na produtividade como também no funcionamento do sistema de produção. Chakravorty e Atwater (1995) compararam através de simulação, a performance entre linhas de produção com balanceamento baseado nos conceitos ocidentais e com balanceamento baseado no conceito *Just-in-Time*. Nos conceitos ocidentais, o tempo total de produção de um determinado número de peças a fabricar será dividido pelo tempo de ciclo desejado, determinando o número de estações de trabalho. O conceito *Just-in-Time* se baseia na filosofia de melhoria contínua através da eliminação do desperdício e sistema puxado de produção. Eles desenvolveram um modelo de simulação para ambas as formas de desenho de linhas. O resultado da simulação apresentou menor tempo de ciclo para linhas balanceadas tradicionalmente quando os estoques no sistema estão baixos. Porém, quando os estoques no sistema estão altos, as linhas de produção *Just-in-Time* têm melhor desempenho. Chakravorty e Atwater (1996) estenderam sua pesquisa para uma terceira opção filosófica e compararam o balanceamento de linhas tradicional com a linha baseada no sistema puxado usando a filosofia *JIT* e uma linha desenhada e operada usando a teoria das restrições (*TOC*). Este trabalho apresentou como resultado após simulação, que as linhas *JIT* têm melhor desempenho quando a variabilidade no sistema é baixa e com um nível maior de inventário, apresentando maior volume de produção. Quando a variabilidade é alta, é melhor utilizar as linhas *TOC*, que são menos afetadas pela variabilidade dentro de sistema.

Haslett e Osborne (2000) investigaram através de simulação, a utilização de regras adotadas por gerentes na operação de sistema *kanban* (item 2.4.5), buscando testar a ruptura de estoque frente a diferentes políticas praticadas em indústrias de manufatura de alta tecnologia na Austrália. O problema estudado buscava avaliar a estabilidade e previsibilidade de estoques intermediários entre as operações de produção e montagem e as intervenções dos gerentes para evitar a parada das linhas nos processos de montagem, identificando as regras que produziam uma maior eficiência em termos econômicos, para o negócio das organizações pesquisadas. Chegaram à conclusão que as intervenções dos gerentes no processo de produção, adotando políticas baseadas em julgamento pessoal, se mostravam eficientes no sentido de evitar a falta de estoque

intermediário e a conseqüente parada das linhas, favorecendo à performance do sistema como um todo.

Adams *et al.* (1999) apresentaram dois estudos de caso de utilização da simulação computacional como ferramenta de suporte aos processos de melhoria contínua (*kaizen*, item 2.4.20), se baseando nas técnicas da manufatura enxuta. Eles apresentaram 7 etapas para este tipo de simulação, adaptadas conforme a seguir.



**Figura 4-1** - Etapas de simulação de processos de melhoria contínua.

Eles desenvolveram o modelo de simulação utilizando o software comercial PROMODEL e estudaram problemas como excesso de peças em processamento e em espera (*palletes*), baixa utilização de operadores em estações de trabalho e tempos de ciclo elevados em outras estações de trabalho. Os resultados da simulação foram então utilizados para o planejamento dos eventos *kaizen*, que obtiveram como resultado dos estudos realizados: uma redução no tempo de desenvolvimento de produtos, redução das distâncias e tempos de transporte entre diversos postos de trabalho, redução do número de operários e máquinas além de possibilitar aos gestores uma melhor forma de alcançar os resultados desejados em seus processos.

Lee e Alwood (2003) propuseram uma resposta enxuta para os problemas encontrados em interrupções de processos dependentes de temperatura, como forjarias, cozinhas de alimento e processos químicos. Neste estudo, eles atentaram para a verificação do conceito de parar a linha de produção quando ocorre uma interrupção, de forma a encontrar a causa raiz do problema. Eles criaram um roteiro, implementado através de simulação de eventos discretos, que provê uma maneira de estabelecer práticas padronizadas para processos dependentes de temperatura, onde os operadores participam diretamente do processo de tomada de decisão.

Greasley (2004) estudou o caso de uma empresa britânica que precisava competir a nível mundial e, portanto, necessitava rever seus processos de produção com ênfase no aumento de produção, redução do *lead time* e aumento da flexibilidade. Para tanto seria necessário uma substancial soma de dinheiro em investimentos. Utilizando-se do SIMAN CINEMA, modelou o sistema, focando na melhoria de *layout* e observando a desempenho do sistema de manufatura como um todo, teve como meta a redução do tempo de ciclo a um determinado nível, que garantiria o volume de produção desejado. A simulação estudou as opções de *layout*. O objetivo foi obter uma linha de produção balanceada (tempos de ciclos iguais), que facilitaria a introdução do sistema de produção puxado (item 2.4.4). As diversas opções sugeridas rodavam na simulação e o comportamento do sistema era observado. Os estudos revelaram os gargalos da linha de produção e curiosamente, a maior perda de tempo estava nos tempos de *setup*. Após rodar diversas vezes, a simulação apresentou os pontos que requeriam atenção especial e investimentos em melhorias, provendo uma base mais consolidada e reduzindo o risco na tomada de decisão.

Rajakumar *et al.* (2005) propuseram um modelo para resolver o problema de planejamento de operações paralelas de montagem, com relações de precedência, numa indústria de maquinaria têxtil. O objetivo era determinar estratégias de seqüenciamento (aleatório, pelo menor tempo de processamento ou pelo maior tempo) para alocar operações de montagem aos operadores, de forma a obter o melhor balanceamento de suas cargas de trabalho. Uma vez que o tamanho do problema torna-o computacionalmente intratável por programação linear inteira mista, a simulação apresentou resultados satisfatórios em termos de balanceamento e num tempo computacional aceitável.

Grimard *et al.* (2005), apresentaram a validação de um projeto de uma célula de trabalho através da simulação, utilizando ambiente de simulação AUTOMOD. Eles apresentaram os resultados que seriam alcançados em um projeto de um sistema de montagem e calibração de injetores. Standridge e Marvel (2006) apresentaram as deficiências observadas na implementação da filosofia *lean* e como a simulação ajuda a superar tais deficiências. Justificaram a utilização de simulação à necessidade de tratamento estocástico das variáveis de processo, a necessidade de analisar profundamente os dados de processo para melhor entender o comportamento do sistema e a interação entre seus diversos elementos, como também idealizar um “estado futuro” dos processos em relação à manufatura enxuta, simulando de forma a validar as mudanças antes de sua implementação.

Inúmeros outros trabalhos continuam a ser desenvolvidos, buscando analisar a aplicabilidade da simulação em projetos de manufatura enxuta. Isso tem feito com que os pacotes de simulação (softwares comerciais) apresentem cada vez mais facilidades, como também uma redução no seu custo de aquisição, incentivando seu uso pelos gestores, em seus processos de tomada de decisão.

Mas mesmo com os trabalhos que vêm sendo desenvolvidos e com o desenvolvimento dos softwares de simulação, que em muito facilitaram sua utilização, não se tem observado o uso da simulação, de forma sistêmica, como instrumento de apoio à decisão. Greasley (2004) estudou o uso da simulação nas organizações e aponta como fator da baixa utilização, a falta de conhecimento, por parte dos gestores, dos benefícios que a simulação oferece, como também o desconhecimento dos processos e suas necessidades por parte dos desenvolvedores da simulação. Foi observado também a falta de habilidade técnica e entendimento para aplicar a simulação e interpretar os resultados.

E acreditando nos benefícios provenientes da implementação da filosofia da manufatura enxuta nos processos de produção, como por exemplo, a redução dos custos dos estoques de produto semi-elaborado e final, redução do *lead time*, aumento da qualidade e da flexibilidade da produção, bem como a grande utilidade da simulação computacional para este fim, que o presente trabalho foi desenvolvido, buscando suprir a carência de uma metodologia que facilite seu uso.

## 5 METODOLOGIA DE SIMULAÇÃO EM PROJETOS DE MANUFATURA ENXUTA

### 5.1 Contextualização do Sistema

Embora os problemas da pesquisa operacional possam ser resolvidos tecnicamente, muitos dos problemas na área de produção requerem também uma abordagem organizacional. Como exemplo pode ser citado o projeto de redução do *lead time*. Na aplicação dos conceitos de manufatura enxuta esta abordagem se torna mais ampla e normalmente o número de projetos ultrapassa a capacidade de implementação das organizações. Portanto esta metodologia busca abordar não só a questão do uso da simulação, como também a forma de gerenciar esses projetos na organização.

Em projetos de manufatura enxuta, é comum realizar o mapeamento do fluxo de valor, tendo como resultado o mapa do estado atual, que depois de analisado pela equipe de projetos, será redesenhado, apresentando o mapa do estado futuro (conforme descrito no item 2.4.18). São então programados os eventos *kaizen* para implementação das melhorias (conforme descrito no item 2.4.20).

Porém, essa forma de analisar, propor e implementar melhorias, entra normalmente num ciclo de tentativa e erro, onde podemos identificar como principais falhas:

- As equipes *Kaizen* nem sempre são conhecedoras do processo em estudo ou estão preparadas em análise de processos;
- O mapeamento do fluxo de valor é focado no momento, ou seja, são dados instantâneos e quando trabalhando com dados históricos, utilizam a média, que não representa o comportamento estocástico do sistema;
- Os eventos *Kaizen* são normalmente caracterizados por um envolvimento de grande número de pessoas de diversas áreas e aquisições imediatas, alterando os processos, *layout*, criando sistemas à prova de erros.

Como resultado de tudo isso, temos a implementação de projetos que custam caro e não trazem o retorno visualizado no mapa do estado futuro.

Pidd (1998) declara:

“Simulação por computador envolve a experimentação em um modelo computacional de algum sistema. O modelo é usado como veículo para experimentação, freqüentemente numa forma de tentativa e erro para demonstrar os

efeitos de várias políticas desejadas. Desta maneira, aquelas que produzem os melhores resultados no modelo, poderiam ser implementadas no sistema real”.

Este trabalho parte de duas fortes premissas:

- A aplicação dos conceitos da manufatura enxuta nos processos produtivos torna as empresas mais organizadas e competitivas;
- A simulação permite a visualização, a baixo custo, das implicações de mudanças nos processos.

Portando, o desenvolvimento de uma metodologia que facilite a utilização de simulação em projetos de manufatura enxuta, dará à alta e média gerência, a base para a tomada de decisão consciente e consistente, eliminando as insatisfações e os altos custos associados aos projetos implementados através da tentativa e erro.

E como a maioria dos processos industriais tem um comportamento estocástico, foi desenvolvida uma metodologia direcionada a modelos de simulação com elementos estocásticos e utilização de distribuições de probabilidades dos eventos, envolvendo a coleta de dados, em quantidade e confiabilidade mínimas para as corridas de simulação.

### **5.1.1 O Apoio da Alta Gerência**

Um dos principais fatores de sucesso na implantação de projetos em indústrias de manufatura é o apoio declarado da alta gerência. Diretores e gerentes (*top management*) deverão estar motivados e comprometidos com o projeto, dando o apoio necessário aos líderes da implementação. Isto facilitará a superação dos desafios e o trabalho de todos os envolvidos. Porém, devido ao insucesso de projetos anteriores em alcançar seus resultados, estes gestores passam a duvidar, mesmo que de forma não declarada, da capacidade dos novos projetos em suportar a estratégia organizacional.

- ***Workshop* Alta Gerência**

Buscando o apoio da alta gerência para a implantação da estratégia da manufatura enxuta, o primeiro passo é a realização de um *workshop*, uma reunião recheada de conceitos, com diretores, gerentes e supervisores de produção. Deverá ser conduzido por um facilitador experiente e conhecedor do tema, que estruturará este evento de um dia de duração, em um local apropriado que permita a atenção constante aos temas que devam ser tratados, alinhando a discussão a trabalhos de valoração do negócio. Basicamente a estrutura deste *workshop* abordará os seguintes tópicos:

- *Necessidade do negócio*: indica a motivação para a implementação da estratégia enxuta. Deverá estar alinhada com o planejamento estratégico da organização, a visão de onde a empresa deseja chegar, sua missão como empresa. É o alinhamento da organização com o ambiente externo, focando nas oportunidades e ameaças do mercado.
- *Análise de forças e fraquezas*: complementando o alinhamento estratégico, uma discussão acerca das possibilidades da organização em alcançar os resultados esperados para o futuro, baseando-se em seus recursos e capacidades internas. Neste momento deverão ser apontados os principais desafios a serem superados, como eliminação de gargalos, menores tempos de *setup*, nivelamento da produção.
- *Introdução aos conceitos da manufatura enxuta*: uma exposição do que é a manufatura enxuta, suas principais técnicas aplicadas, os resultados que podem ser alcançados.
- *Casos de sucesso*: apresentação de casos de sucesso na implantação da manufatura enxuta, começando pela Toyota e apresentando outros casos de empresas internacionais e principalmente locais e se possível do mesmo segmento.
- *Discussão sobre os ganhos financeiros*: é certo, o idioma da alta gerência é dinheiro. Quais os ganhos financeiros que esta iniciativa irá trazer para a empresa? É a tradução do esforço de implementação em uma unidade única (reais, dólares, euros), sempre tomando uma base anual.
- *Reflexão sobre a implementação*: a alta gerência deverá ter um tempo para refletir e discutir sobre a implementação e seus ganhos e decidir se irá ou não implementar a estratégia enxuta na organização. Momento decisivo para o projeto. É a etapa *go - no go* (vamos – não vamos). Se necessitar de mais tempo, mais discussão e mais informação, a decisão poderá ser adiada. Mas é imprescindível que a alta gerência compreenda e acredite nessa iniciativa.
- *Identificação do líder do projeto, lideranças internas e formadores de opinião*: a alta gerência decidindo pela implementação estratégica da manufatura enxuta, irá designar um líder para o projeto, que dentre outras qualificações, deverá ter o perfil de liderança, motivação, comunicação e solucionador de problemas. O líder deverá ser suportado por membros da organização, com função de liderança (supervisores de área) e outros de participação marcante, os formadores de opinião.

- **Termo de Abertura do Projeto (*Project Charter*)**

Resultado final do *Workshop* Alta Gerência, é o documento que autoriza formalmente um projeto e concede ao líder do projeto a autoridade para aplicar os recursos organizacionais nas atividades do projeto. É assinado por um iniciador ou um patrocinador do projeto, externo à equipe do projeto, em um nível adequado para financiar e apoiar o projeto. Diretamente ou referenciando outros documentos, deve abordar as seguintes informações (Project Management Institute, 2004):

- Requisitos que satisfazem as necessidades, desejos e expectativas do cliente, do patrocinador e de outras partes interessadas;
- Necessidade do negócio, descrição de alto nível do projeto ou requisitos do produto para o qual o projeto é realizado;
- Objetivo ou justificativa do projeto;
- Gerente de projetos designado e nível de autoridade atribuída;
- Cronograma de marcos sumarizado;
- Influência das partes interessadas;
- Organizações funcionais e sua participação;
- Premissas organizacionais, ambientais e externas;
- Restrições organizacionais, ambientais e externas;
- Caso de negócios justificando o projeto, incluindo o retorno sobre o investimento;
- Orçamento sumarizado.

A forma de apresentação do termo de abertura poderá ser uma carta enviada a todos os colaboradores da organização, impressa ou através de e-mail, uma exposição (apresentação formal) pelo financiador do projeto, ou outra forma que a empresa já adote para comunicar o início de projetos.

### **5.1.2 Planejamento do Projeto**

Após a formalização da existência do projeto na organização, declarada no Termo de Abertura do Projeto, o Líder do Projeto assumirá sua posição, montando a equipe de apoio. Esta equipe, a partir de um entendimento inicial sobre o projeto e os resultados esperados, desenvolverá uma estrutura do trabalho a ser desenvolvido.

### • Estrutura Analítica do Projeto

O Project Management Institute (2004) em seu Guia do Conjunto de Conhecimentos em Gerenciamento de Projetos, *PMBOK® Guide*, define a estrutura analítica do projeto como sendo “uma decomposição hierárquica orientada à entrega do trabalho a ser executado pela equipe do projeto, para atingir os objetivos do projeto e criar as entregas necessárias. A EAP organiza e define o escopo total do projeto. Subdivide o trabalho do projeto em partes menores e mais facilmente gerenciáveis, em que cada nível descendente da EAP representa uma definição cada vez mais detalhada do trabalho do projeto. É possível agendar, estimar custos, monitorar e controlar o trabalho planejado contido nos componentes de nível mais baixo da EAP, os pacotes de trabalho”.

Para implantação de um projeto de manufatura enxuta, algumas etapas macro podem ser identificadas:

- Estruturação inicial do projeto;
- Treinamentos;
- Mapeamento do Fluxo de Valor (*Value Stream Mapping*);
- Simulação
- Eventos Kaizen de implementação das mudanças.

A decomposição destas entregas é a subdivisão em componentes menores e mais facilmente gerenciáveis, até o nível de pacotes de trabalho, ponto no qual o custo e o cronograma podem ser estimados de forma confiável. O nível de detalhe irá variar de acordo com o tamanho e complexidade (Project Management Institute, 2004). A Figura 5-1 apresenta um exemplo de estrutura analítica de um projeto.

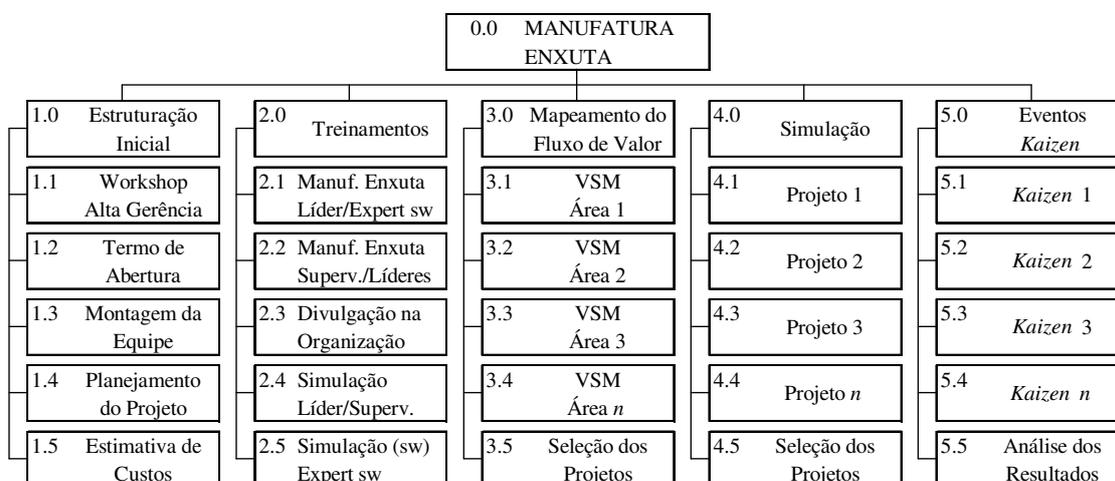


Figura 5-1 - Estrutura analítica do projeto.

### • Cronograma do Projeto

O desenvolvimento do cronograma do projeto, um processo iterativo, determina as datas de início e término planejadas das atividades do projeto. O desenvolvimento do cronograma pode exigir que as estimativas de duração e as estimativas de recursos sejam reexaminadas e revisadas para criar um cronograma do projeto aprovado, que possa servir como uma linha de base, em relação à qual o progresso pode ser acompanhado. O desenvolvimento do cronograma continua durante todo o projeto conforme o trabalho se desenvolve (Project Management Institute, 2004).

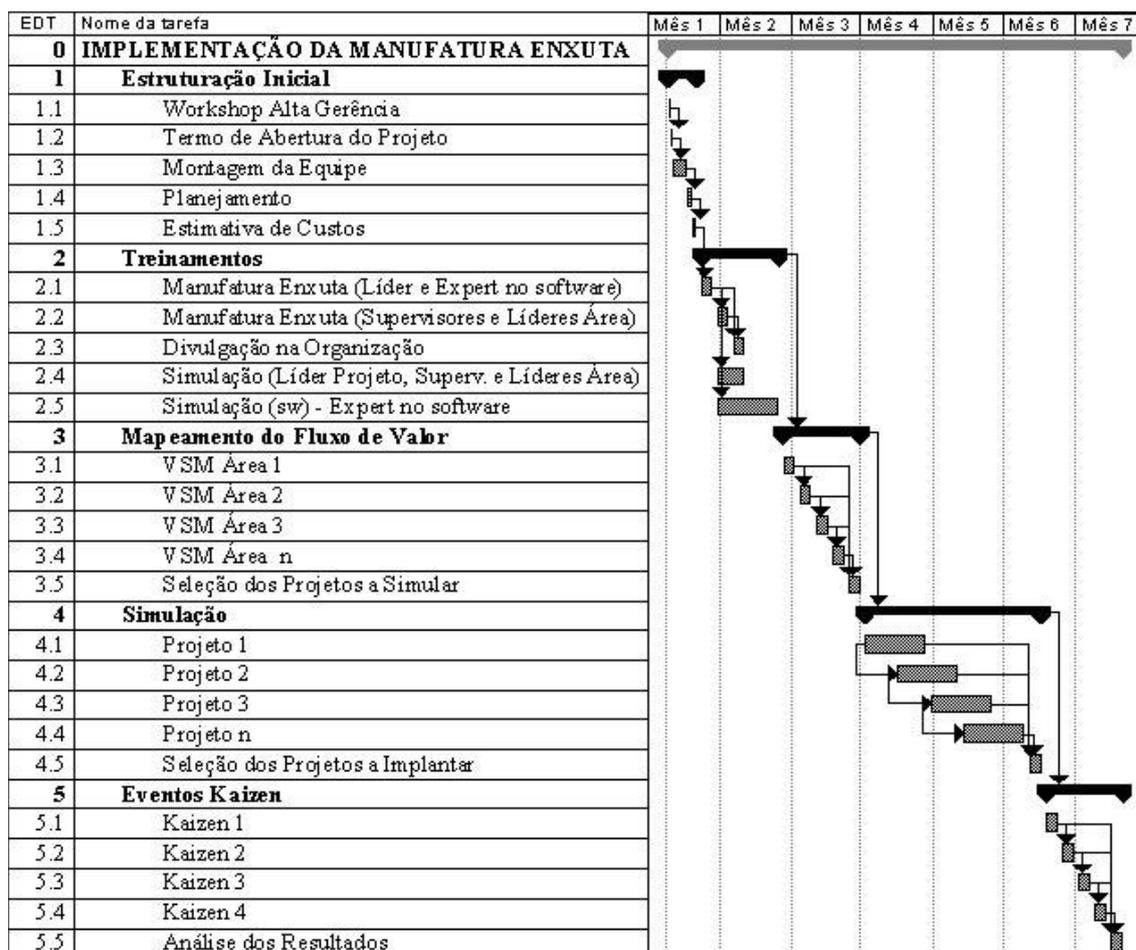


Figura 5-2 - Cronograma do projeto.

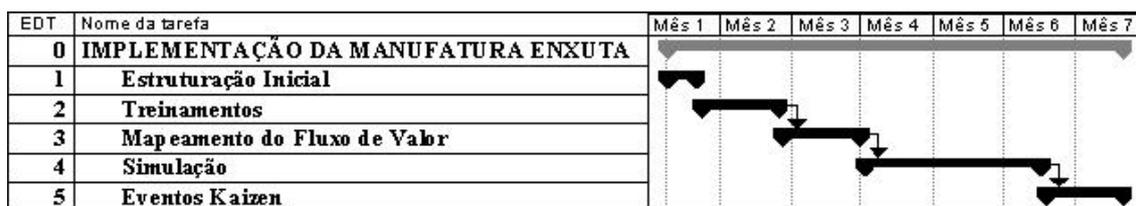


Figura 5-3 - Cronograma das macro-etapas do projeto.

O cronograma do projeto pode ser detalhado (Figura 5-2) ou resumido (Figura 5-3).

- **Identificação das Partes Envolvidas no Projeto**

A identificação preliminar, pela equipe do projeto, de todas as pessoas envolvidas diretamente no projeto, ou mesmo aquelas que terão uma participação indireta, é fundamental para o início do entendimento e comprometimento para com o projeto.

Este grupo de pessoas recebe normalmente a denominação de *stakeholders* do projeto e deverão ter um tratamento especial, pois poderão exercer influência sobre o projeto, determinando seu sucesso ou insucesso. Compõem este grupo, além da equipe do projeto e do patrocinador, todos os gerentes, supervisores e operários do chão de fábrica, bem como funcionários de áreas de apoio, fornecedores e até mesmo clientes.

O gerenciamento ativo das partes interessadas aumenta a probabilidade de o projeto não se desviar do curso por causa de problemas não resolvidos pelas partes, aumenta a capacidade das pessoas operarem em sinergia e limita as interrupções durante o projeto. Em geral, o líder do projeto é o responsável pelo gerenciamento dos *stakeholders*. Os requisitos e expectativas dos *stakeholders* propiciam um entendimento das metas, objetivos e nível de comunicação durante o projeto. As necessidades e expectativas são identificadas, analisadas e documentadas. As reuniões presenciais dos membros são os meios mais eficazes de comunicação e resolução de problemas com os *stakeholders* (Project Management Institute, 2004).

Os *stakeholders* podem ser identificados e listados em uma planilha eletrônica, conforme mostrado na Figura 5-4, onde constarão os dados de contato, para facilitar o processo de comunicação, como por exemplo, envio de e-mails ou mesmo convocação para reuniões.

		<b>DIRETÓRIO DE STAKEHOLDERS DO PROJETO</b>		Versão Nº:	
				Elaborado em / /	
				Página ___ de ___	
Projeto:		<b>IMPLEMENTAÇÃO DA MANUFATURA ENXUTA</b>		Aprovação em: / /	
				Gerente da Área	
Nome	Função no projeto	Instituição	E-mail	Fone	Celular

Figura 5-4 - Diretório de Stakeholders do Projeto.

- **A Declaração do Escopo do Projeto**

É o registro de todas as informações sobre o projeto, elaborado nas fases iniciais, com a participação dos principais *stakeholders* e contempla, além das informações do termo de abertura, as principais etapas e metas do projeto, restrições e premissas iniciais.

### 5.1.3 Desenvolvimento da Equipe e outros *Stakeholders*

Para a implementação da estratégia da manufatura enxuta em uma organização manufatora, todos devem estar preparados de forma adequada. A Alta Gerência, conforme apresentado anteriormente (item 5.1.1), deverá conhecer os conceitos e benefícios resultantes de uma implementação de sucesso, o que deverá ser tratado no *workshop* específico. Para os demais envolvidos no projeto, deverão ser planejados não só os treinamentos relacionados com os conceitos da manufatura enxuta, mas também treinamentos em simulação de processos. Porém existirão diferentes níveis de conhecimento esperado.

- **Manufatura enxuta**

- *Nível 1 - Líder do projeto e Especialista no software de simulação*: estes profissionais deverão ter um conhecimento aprofundado de todas as técnicas aplicadas à manufatura enxuta.
- *Nível 2 - Supervisores, Líderes de Áreas e Equipes de Coleta de Dados*: deverão ter um conhecimento geral a cerca das técnicas aplicadas à manufatura enxuta.

- **Simulação Computacional**

- *Nível 1 – Especialista no software de simulação*: treinamento aprofundado no software de simulação que será utilizado no projeto; será também necessário o conhecimento aprofundado de estatística, em especial distribuições de probabilidades e análise de dados.
- *Nível 2 - Líder do Projeto, Supervisores, Líderes de Áreas e Equipes de Coleta de Dados*: neste desenvolvimento de competências, estes profissionais deverão ter um conhecimento geral do que é uma simulação computacional de processos, incluindo a manipulação do software de simulação que será utilizado no projeto; deverá contemplar um treinamento básico em estatística aplicada, com demonstração de análise e confiabilidade de dados de processo.

- **Divulgação na Organização - Preparando para a Mudança**

A dinâmica do mercado, provocando grandes flutuações na demanda, é uma realidade presente no mundo empresarial. O sistema de produção recebe impacto direto, tendo constantemente que mudar a programação. Por isto é importante que as pessoas estejam

capacitadas para lidar com mudanças. Nunca será alcançado um sistema flexível se as pessoas forem inflexíveis.

A alta administração precisa compreender (e muito bem) a filosofia da manufatura enxuta, mudando inclusive a forma de pensar sobre os processos produtivos. A esta mudança vem sempre associada uma resistência que deverá ser superada. Por isso o comprometimento deverá ser grande (Ohno, 1997).

As teorias ou mesmo os conceitos da manufatura por si só não garantem a melhoria dos processos, melhorando a qualidade e a produtividade. É importante que todos estejam conscientes e participantes desta iniciativa como diretores, gerentes, coordenadores, supervisores e operadores do chão de fábrica. Com criatividade e imaginação, os conceitos do Sistema Toyota de Produção podem ser facilmente aplicados a qualquer tipo de negócio (Muramatsu Rintaro; In: Ohno, 1997). Todos os funcionários participando do processo de criação, se envolvem e se comprometem, se sentindo mais valorizados e valorizando mais o seu trabalho na empresa.

A liderança da manufatura enxuta, portanto não deverá estar distanciada do chão de fábrica. Aqueles profissionais dedicados à implementação *lean*, deverão tomar a posição do observador participante, de forma a buscar uma maior compreensão dos processos produtivos bem como a contribuição fundamental dos operadores de processo.

Ohno (1997) destaca a importância do trabalho em equipe para alcançar os objetivos do negócio, tomando como exemplo as competições de remo. Se não houver a harmonia entre os remadores, seria o caos total. Remos se batendo, o barco ziguezagueando. “A harmonia entre as pessoas de um grupo, como no trabalho em equipe, está em maior demanda do que a arte do artesão individual”.

Não é apenas a equipe *lean* a ser treinada nos conceitos da manufatura enxuta, mas também diretores, gerentes, coordenadores e supervisores de todas as áreas da empresa. Leva-se tempo para quebrar as resistências e conseguir os frutos deste esforço. Por isso deve-se o quanto antes, inclinar o corpo para frente para dar os primeiros passos.

A abordagem a nível organizacional deverá ser cuidadosa, escolhendo as justificativas e os termos adequados a cada nível. Utilizar termos em inglês para o chão de fábrica, por exemplo, *lean manufacturing*, poderá dificultar o entendimento do projeto. Por outro lado, usar o termo da manufatura enxuta, poderá ser associado a reestruturações anteriores na organização, quando ocorreram *enxugamentos* nas estruturas (demissões).

### **Desafios a serem superados**

Shingo (1996) adverte sobre o fato de que “as pessoas acostumam-se a certos problemas e tornam-se reféns da rotina, abandonando a prática da solução de problemas. Voltar às raízes do problema, expondo o seu significado real e propondo melhorias fundamentais, pode ser considerado o eixo central do TPS”.

Alguns autores pesquisaram não só os benefícios como também as dificuldades na implementação, criticando os efeitos sobre a organização do trabalho e sobre os trabalhadores. Forza (1996) estudou a diferenciação da produção enxuta e produção em plantas tradicionais, com uma visão mais crítica sobre práticas de organização do trabalho em relação à produção enxuta. Ele propõe uma estrutura que poderia ser útil para pesquisas sobre o relacionamento entre organização do trabalho e práticas de produção enxuta, enfatizando a importância dos recursos humanos.

Lee e Oakes (1996) discutiram alguns modelos para mudança em pequenos fornecedores de componentes, como manufatura de classe mundial (WCM), produção enxuta (LP), gerenciamento da qualidade total (TQM) e reengenharia/redesenho de processos de negócio (BPR). Eles declararam que “as pequenas empresas do primeiro e segundo nível da cadeia de suprimentos se apresentam mais conscientes da necessidade de se tornarem mais competitivas implementando novos métodos de uma forma ou de outra”.

Barker (1996) apresenta um resumo dos problemas que ocorrem na implementação de melhorias na cadeia de valor. Em seu estudo de caso, ele foca na cadeia de valor de transformação de materiais e nos problemas relacionados ao ambiente organizacional.

Uma crítica sobre os impactos nos aspectos sociais da produção pode ser claramente verificada no estudo de Harrison e Storey (1996), que fizeram uma crítica profunda sobre a implementação de novas estratégias de manufatura, como *Just in Time* (JIT), *Total Quality Management* (TQM), *Lean Production* (LP) e *World Class Manufacturing* (WCM). Exploram o tema através do que chamaram de *New Wave Manufacturing* (NWM), abordando os fatores de insucesso na implementação destes métodos de manufatura bem como suas implicações no campo social da produção.

Conti *et al.* (2006) publicaram um artigo sobre a implementação da manufatura enxuta e seu possível stress sobre os trabalhadores. Em atenção aos estoques intermediários e

controle do ritmo de trabalho, eles declararam não ser tão provocadores de *stress*, mas a redução do tempo de ciclo pode aumentar o nível de *stress* dos trabalhadores.

A equipe deverá estar muito bem preparada para enfrentar os desafios de um projeto de implantação da manufatura enxuta. Em resumo pode-se declarar como os principais desafios a serem superados pela equipe:

- Falta de apoio da alta gerência;
- Resistência da gerência intermediária;
- Resistência dos supervisores de chão de fábrica;
- Resistência dos operadores;
- Falta de recursos financeiros que dêem suporte ao programa de implementação da manufatura enxuta;
- Falta de conhecimento em como implementar os conceitos *lean*;
- Produção apertada, não permitindo mudanças (mesmo que para melhorar);
- *Lean* ser interpretado como sendo “uma nova onda”;
- Dificuldade em se “enxergar” os benefícios e o retorno financeiro com a implementação da manufatura enxuta;
- Consideração de que “em time que está ganhando não se mexe”;
- Incapacidade em sobrepor as resistências daqueles que se opõem às mudanças;
- A imagem negativa dos projetos que falharam no passado.

#### **5.1.4 Mapeamento do Fluxo de Valor**

Com a equipe treinada nas técnicas de manufatura enxuta, o próximo passo será o mapeamento do fluxo de valor (item 2.4.18). O mapeamento do fluxo de valor tem o objetivo de documentar o processo, de forma a analisá-lo posteriormente, dando condições de elaborar um plano de melhoria. Consiste em mapear todo o processo de manufatura, identificando os processos que agregam valor ao produto final (foco no cliente) e registrando os estoques intermediários e de produto acabado, tanto nas linhas de produção como também nos depósitos da empresa. Escolhem-se famílias de produtos para o mapeamento. Rother e Shook (2003) recomendam desenhar sempre a mão e a lápis, utilizando-se de uma folha em branco e à medida que ocorre o levantamento das

informações, enquanto se está no chão de fábrica, estas vão sendo registradas nesta folha. Os tempos de processamento vão sendo anotados e posteriormente é feita uma análise, traçando o *mapa do estado atual*. O software iGrafx<sup>®</sup>, comercializado pela Corel Corporation ([www.iGrafx.com](http://www.iGrafx.com)) permite desenhar com maior precisão, os mapas de fluxo de valor, mas permanece a recomendação de desenhar primeiro à mão, pois facilita a identificação no chão de fábrica, das informações adicionais necessárias e posteriormente passando a limpo utilizando este software.

O objetivo deste mapeamento inicial é identificar os desperdícios existentes no processo de produção, já citados anteriormente no item 2.3.2, e aqui resumidos nos sete desperdícios identificados por Ohno (1997):

- Excesso de estoques de matéria prima;
- Excesso de produção, tanto de produto semi-elaborado como também de produto final;
- Movimentação excessiva, tanto de materiais como também de operadores;
- Fila de espera, aguardando liberação das máquinas para processamento, tanto de materiais como também de operadores; processos posteriores ociosos devido atraso no processo anterior;
- Tempo de transporte de matéria prima, produto semi-elaborado e produto final dentro dos processos;
- Perdas dentro do processo, como exemplo demora no aquecimento de máquinas ou mesmo de processos não necessários;
- Correção de falhas de produção devido à má qualidade ou ao não atendimento aos requisitos do cliente.

Após a identificação dos desperdícios existentes, a equipe se reúne para analisar a forma de melhorar os processos. Ohno (1997) possui o seguinte refrão: “Criatividade diante da necessidade”. É importante que os funcionários não aceitem passivamente tudo o que está escrito no “Manual”, aquilo que deu certo em outros lugares, em outras circunstâncias. Ele recomenda que “o pessoal da fábrica sinta a necessidade”, pois “a necessidade é a mãe da invenção”. Traça-se então o *mapa do estado futuro*, a condição desejada para os processos de produção. Este mapa irá permitir à equipe do projeto listar os projetos de melhoria que deverão ser simulados.

A abordagem do mapeamento pode ser traduzida nos seguintes passos:

- 1) Escolher as famílias de produtos com mais representatividade no negócio. Nesta etapa é importante o envolvimento da área comercial na decisão da escolha.
- 2) Conhecer os processos de produção, desenhando um fluxograma de cada processo.
- 3) Planejar o mapeamento do fluxo de valor, identificando a equipe que participará, o local do ponto de apoio e informar aos supervisores da área a data programada.
- 4) Realizar o mapeamento do fluxo de valor em cada área, cada processo escolhido. Um bom guia para o mapeamento é o proposto por Rother e Shook (2003) em seu livro *Aprendendo a Enxergar*, cuja simbologia é apresentada no anexo 1.
- 5) Análise dos resultados do mapeamento, comparando o *lead time* com a somatória dos tempos de processamento; *lead time* superiores deverão ser estudados mais cuidadosamente. Os tempos de ciclo são também comparados com o *takt time*.
- 6) Proposição de melhorias: identificação das oportunidades de melhoria, traçando o *mapa do estado futuro*, com base nas técnicas aplicadas à manufatura enxuta.

Shingo (1996) recomenda:

“Toda produção, executada tanto na fábrica como no escritório, deve ser entendida como uma rede funcional de processos e operações. Processos transformam matérias-primas em produtos. Operações são as ações que executam essas transformações. Esses conceitos fundamentais e sua relação devem ser entendidos para alcançar melhorias efetivas na produção. Para maximizar a eficiência da produção, analise profundamente e melhore o processo antes de tentar melhorar as operações”.

Primeiro conhecer o processo como um todo, tempos de ciclo, gargalos, estoques intermediários decorrentes do desbalanceamento da linha de produção e identificar oportunidades de melhoria. Quando se tratar de reduzir o tempo de *setup*, observar a operação de trocas de ferramentas como também um processo. Observar as operações que são realizadas com a máquina parada e que não necessariamente deveriam ser.

O mapeamento do fluxo de valor é um método simples para ser usado diretamente no chão de fábrica, para observar os processos que realmente criam valor para o cliente e os desperdícios existentes no processo, buscando o envolvimento e comprometimento dos supervisores e gerentes de linha. Porém se baseia numa situação pontual, onde os estoques e tempos de processamento são tomados no momento do desenho do mapa do estado atual, sem considerar as variações ao longo dos ciclos de produção, sendo recomendado trabalhar com médias. Portanto deverá ser utilizado apenas no início do estudo, para selecionar as áreas e processos que serão simulados posteriormente.

### 5.1.5 Seleção e Priorização de Projetos

Quando os gerentes, supervisores e funcionários da produção desenvolvem as habilidades de enxergar os desperdícios, muitas oportunidades aparecem e devem então ser traduzidas como projetos a implementar. Normalmente o *portfólio* de projetos gerado pelo mapeamento do fluxo de valor, que traduz as oportunidades de melhorias no mapa do estado futuro, é maior que a capacidade de implementação a curto prazo das organizações (recursos financeiros e humanos). Portanto faz-se necessário a instituição de um procedimento de seleção e priorização de projetos, considerando fatores como redução de custo, facilidade de implementação e recursos disponíveis, dentre outros.

“Com pesar, vimos empresas cheias de visão, energia e grandes esperanças, mas que fizeram pouco progresso porque buscaram a perfeição em milhares de direções e nunca tiveram os recursos suficientes para ir muito longe. É preciso formar uma visão, selecionar as duas ou três etapas mais importantes que podem levá-lo até lá e deixar as outras etapas para depois” (Womack e Jones, 2004).

Para selecionar os projetos é preciso envolver os funcionários. É motivador. Eles querem participar de projetos de sucesso. Com isto ganhamos uma importante contribuição, além de garantirmos um fator determinante de sucesso em projetos: o comprometimento de todos. Na produção em massa os trabalhadores eram posicionados na linha de produção de forma a executarem as tarefas programadas e não tinham a necessidade de conversarem entre si. Charles Chaplin retratou fielmente esta condição em seu filme “Tempos Modernos”. No conceito de manufatura enxuta, o poder decisório dos operadores do chão de fábrica se faz presente e necessário, para solucionar os problemas imediatos de produção e qualidade, bem como participar dos projetos de melhoria (Womack e Jones, 2004). Outro aspecto a considerar na seleção dos projetos é a busca pelo menor esforço e não a busca pura e simples da redução do número de operários. Como declara Womack e Jones (2004), “proteger seus empregados encontrando outras tarefas produtivas é parte essencial de qualquer transição enxuta bem sucedida”.

O processo de avaliação, seleção e priorização dos projetos deverá ser feito se baseando na disponibilidade dos recursos e deverá ter a concordância de todos. É uma atribuição da equipe do projeto. Um membro da equipe deverá compilar todos os projetos sugeridos, para uma reunião de seleção dos projetos. Uma forma de avaliação, seleção e priorização, é a utilização de uma planilha, como apresentado na Figura 5-5, com

critérios específicos para avaliação, como alinhamento com a estratégia organizacional, facilidade de implementação, menor custo e disponibilidade de profissionais.

	Nome do Projeto	Projeto 1	Projeto 2	Projeto 3	Projeto 4	Projeto 5	Projeto 6	Projeto 7	Projeto 8	Projeto 9	Projeto 10
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO E SELEÇÃO DE PROJETOS</b>	<b>Peso</b>	<b>Baixo = 0; Médio = 5; Alto = 10</b>									
1	O projeto melhora a satisfação do cliente										
2	O projeto soluciona reclamações										
3	O projeto melhora as condições de trabalho										
4	O projeto melhora a satisfação pessoal da empresa										
5	O projeto necessita de poucos recursos										
6	Os recursos necessários estão disponíveis para o projeto										
7	O projeto é de baixo custo										
8	O projeto é de fácil implementação										
9	O projeto é realizado em curto espaço de tempo										
10	O projeto define e implanta práticas de segurança										
<b>Total geral</b>											

**Figura 5-5** - Planilha de seleção e priorização de projetos.

A utilização da planilha apresentada anteriormente se dará através dos passos:

- 1º) Definir quais os critérios de avaliação e seleção dos projetos.
- 2º) Atribuir um peso para cada critério, preenchendo a coluna correspondente.
- 3º) Preencher nas células superiores da matriz, o nome ou referência de cada projeto.
- 4º) Avaliar cada projeto em relação a cada um dos critérios, atribuindo-se notas 10 para alta correlação com o critério, 5 para média e 0 para nenhuma correlação.

A planilha calcula os resultados de cada projeto, somando o resultado da multiplicação do peso pela “nota” de alinhamento com cada critério e, aqueles com maior pontuação são os candidatos à aprovação pelo comitê de seleção de projetos. A planilha pode ser ampliada de acordo com o número de projetos a serem avaliados e o número de critérios desejados. O resultado também poderá ser apresentado em um gráfico de Pareto.

Para a avaliação dos projetos é importante lembrar Shingo (1996), que reforça o conceito de que não se deve simplesmente copiar as características externas do Sistema Toyota de Produção, pois ele “não pode ser aplicado corretamente sem uma compreensão geral dos princípios sobre os quais está embasado” e “é importante empreender a sua implementação somente após um claro entendimento de como as técnicas individuais se encaixam no quadro geral. Todos, do alto executivo ao trabalhador do chão de fábrica, devem entender perfeitamente os conceitos por trás dessas técnicas”.

## 5.2 Análise do Sistema Via Simulação

Pidd (1998) declara que problemas de pesquisa operacional muitas vezes podem ser solucionados num senso técnico, mas nem sempre num senso organizacional.

A primeira parte desta metodologia aborda questões organizacionais e de gerência de projetos, também de fundamental importância para a implementação de projetos de manufatura enxuta. O comprometimento de todos os envolvidos e o desenvolvimento das competências individuais nos conceitos de manufatura enxuta e simulação computacional complementarão as questões técnicas envolvidas na simulação de projetos de manufatura enxuta.

Esta segunda parte do trabalho está focada nos aspectos técnicos da simulação computacional.

### 5.2.1 Formulação do Problema

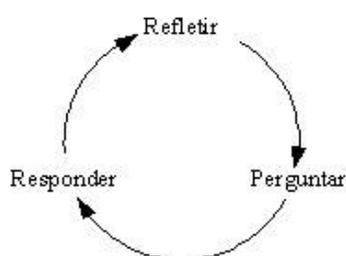
A realização do mapeamento do fluxo de valor permite entender um pouco de como o sistema funciona, apresentando os pontos críticos que comprometem o desempenho como um todo. A simulação buscará, num primeiro momento, confirmar o comportamento desse sistema e, num segundo momento, testar as melhorias propostas pela equipe e pelos demais envolvidos.

O primeiro passo em qualquer tarefa de solução de problemas é definir e formular o problema. No mundo real, raramente se manuseia folhas de papel que definem completamente o problema a ser resolvido (Kelton *et al.*, 2007). É como dizia John Dewey (citado em Pidd, 1998): “um problema bem formulado já está metade resolvido”. Um problema mal entendido ou insuficientemente definido será difícil, se não impossível, de ser solucionado. Por esta razão, é melhor despender um pouco de tempo a mais na estruturação do problema, o que poderá economizar muito sofrimento posterior (Pidd, 1998).

A formulação do problema envolve entender qual realmente é o problema a ser estudado, entendendo suas variáveis e como elas interagem entre si. Envolve a coleta de dados e informações preliminares, que após analisadas, permitirão conhecer melhor o sistema. Pidd (1998) destaca a negociação e concordância com os envolvidos, tendo como visão estabelecer os objetivos do projeto. Kelton *et al.* (2007) recomendam a abertura de um diálogo com os principais envolvidos, como supervisores de área e

operadores, que responderão a uma série de perguntas a serem formuladas, que permitirão definir o problema completamente. O analista deve assegurar que o problema que está sendo descrito está claramente entendido pelos gestores e por aqueles que têm o problema, tendo a concordância destes (Banks *et al.*, 2005).

Nesta etapa, um bom exercício é a utilização da técnica dos 5 por quês, descrito em 2.4.7, para se chegar à raiz do problema. Outra abordagem para a formulação do problema é o processo de aprendizado e exploração, conforme apresentado por Pidd (1998) e representado na ilustração da Figura 5-6. O aprendizado é cíclico, onde a exploração continua à medida que o analista se vê cada vez mais confortável em relação ao problema.



**Figura 5-6** - Estruturação do problema como exploração.

### 5.2.2 Definição dos Objetivos

Formulado e acordado o problema, o próximo passo será definir os objetivos da simulação. Segundo Banks *et al.* (2005), os objetivos indicam as questões a serem respondidas pela simulação, quando esta é a metodologia apropriada para o problema e objetivos definidos. As alternativas que serão estudadas deverão também estar em concordância com os objetivos declarados e é adequado indicar o método para avaliação da efetividade das alternativas, ou seja, as métricas de desempenho. Mas é importante ter em mente que, mais do que números, a simulação irá prover uma visão de como o sistema trabalha e passará a trabalhar se uma determinada alternativa for adotada (Kelton *et al.*, 2007).

Normalmente, projetos de manufatura enxuta lidam com sistemas já existentes, o que facilitará o entendimento dos problemas e das possíveis alternativas a serem estudadas, tanto pelo analista, como também pelos demais envolvidos. Em plantas que estão sendo projetadas, o esforço poderá ser maior, pois dependerá de informações de fabricantes de máquinas e equipamentos.

Neste momento, você deve-se ter um bom entendimento do sistema (e seu tamanho) as métricas de desempenho e as expectativas do cliente (Banks *et al.*, 2005).

### 5.2.3 Construção do Modelo

Já formulado o problema e definidos os objetivos, o próximo passo é detalhar o estudo de simulação. Um bom local para iniciar é com o próprio sistema. Se o sistema existe, visite o *site* e caminhe por ele. O melhor conselho é veja, toque e faça perguntas. Você quer entender o que está acontecendo e por que está acontecendo, portanto não tenha receio de perguntar, mesmo que sejam perguntas insignificantes. À medida que vai aprendendo mais sobre o sistema, inicie o pensamento em como poderá modelar as atividades, registrando as recomendações observadas para melhorar o sistema (Kelton *et al.*, 2007).

Antes de modelar o sistema, é recomendado desenhar o fluxograma de processo, contemplando todas as operações, com o cliente/supervisor de área verificando e validando este fluxograma.

Kelton *et al.* (2007) recomendam apresentar em uma conferência com a presença de todos os envolvidos no estudo de simulação, o sistema que será modelado, tendo os seguintes elementos:

- Objetivos da simulação
- Descrição do sistema e abordagem da modelagem
- Exatidão da animação
- Entradas e saídas do modelo
- Resultados esperados

Após esta discussão com os envolvidos, será possível definir completamente o estudo e iniciar a construção do modelo atual.

O modelo, segundo Pidd (1998), deve ser desenvolvido gradualmente, começando com aspectos simples que estão bem entendidos e movendo-se passo a passo em direção a uma mais completa representação. A cada estágio, o analista estará conduzindo uma validação parcial do modelo.

Na modelagem do sistema (considerando-se a simulação de eventos discretos) o principal objetivo será identificar as principais entidades e recursos. Desenvolver o

diagrama de ciclo de atividades (DCA, apresentado em 3.6.2) permitirá mapear as interações e comportamento das principais entidades do sistema que está sendo estudado. Este esforço para capturar os elementos essenciais do sistema é conhecido como construção do modelo conceitual e o modelo resultante é às vezes chamado de modelo conceitual (Pidd, 1998).

Em sistemas com forte presença de filas, como é o caso de projetos de manufatura enxuta, onde as filas são os estoques intermediários de peças aguardando processamento, o DCA se torna uma ferramenta importante na modelagem e representação das interações entre as entidades e recursos. Irá facilitar o entendimento de como o sistema funciona, preparando para o levantamento de dados. Mas deve se ter o cuidado de, num primeiro momento, não necessariamente representar elementos mais complexos do sistema, como por exemplo, trabalhadores multifuncionais que atuem como substitutos de faltas e férias.

#### **5.2.4 Coleta de Dados de Processo**

Um dos passos preliminares no planejamento do projeto de simulação deve ser a identificação de quais dados serão necessários para suportar o modelo. Fazer o levantamento dos dados e prepará-los para uso no modelo pode consumir muito tempo, custar caro e talvez até frustrar. A disponibilidade e a qualidade dos dados poderão influenciar na forma de abordar a modelagem e no nível de detalhamento do modelo (Banks *et al.*, 2005).

Após a construção do modelo e desenho do DCA, recomenda-se enumerar os dados que serão necessários na simulação. Como exemplo:

- Tempo de montagem do componente A
- Tempo de transporte do posto de trabalho A até o posto de trabalho B
- Tempo de montagem do componente B

O planilhamento destes dados coletados facilitará a análise posterior (ver item 5.2.5).

Pode ser que exista no banco de dados da empresa, os dados necessários para a simulação. Porém, como é comum em projetos de manufatura enxuta, poderá ser necessário o levantamento de informações e dados de processo diretamente na área de produção. Neste caso algumas recomendações são necessárias, tais como:

- Treinar os profissionais de coleta de dados em simulação de processos, no processo em estudo, na importância do levantamento de dados e na consequência negativa de um levantamento displicente;
- Instrumentos de medição deverão ser adequados à coleta de dados; como exemplo, cronômetros para medição de tempos de processo,
- O número de medições deve ser maior quanto mais instável for o processo;
- Preparar os trabalhadores das áreas para o levantamento de dados do estudo de simulação, não se tratando de uma auditoria de processos; muitos trabalhadores têm um comportamento e produtividade diferente quando estão sendo observados;
- Procurar não misturar dados de turnos diurnos com noturnos; observar a sazonalidade da produção, vésperas de feriados ou férias coletivas;
- Quando durante as medições forem detectadas grandes variações em relação à média, pesquisar o motivo destas variações e registrar de forma apropriada, o que irá facilitar a análise posterior dos dados;
- Registrar horários da coleta de dados, especialmente quando os processos forem dependentes de aquecimento (normalmente em início de turnos).

Importante reconhecer a possibilidade da existência da fórmula GIGO – Garbage In, Garbage Out (lixo que entra, lixo que sai), citado por Kelton *et al.* (2007); se a qualidade dos dados de processo não for satisfatória, certamente o estudo de simulação não fará sentido, ou seja, os resultados da simulação não serão confiáveis, não servindo como base para a tomada de decisão. Portanto é fundamental o reconhecimento por parte dos coletores de dados, da importância de se registrar fielmente os dados de processo, que envolve, por exemplo, o tempo de uma determinada operação.

#### **5.2.5 Análise dos Dados e Determinação das Distribuições de Probabilidades**

A coleta e preparação dos dados para serem usados na simulação poderá realmente ser um trabalho bastante desgastante e oneroso. Mas é fundamental para um bom estudo de simulação.

Tanto na utilização de dados históricos ou novos dados coletados diretamente nos processos, uma análise de sensibilidade irá possibilitar avaliar a qualidade dos dados coletados. Segundo Kelton *et al.* (2007), “se você não pode facilmente obter bons dados

sobre algum aspecto do seu sistema, rode o modelo com uma faixa de dados para ver se o desempenho do sistema muda significativamente. Se não se alterar, você não precisará investir na coleta de dados e ainda poderá ter uma boa confiança nas suas conclusões. Se o sistema se alterar, você precisará encontrar uma forma de obter dados confiáveis ou os resultados e recomendações serão grosseiros”.

Uma análise preliminar dos dados poderá ser feita através do gráfico *run chart*, onde valores que saiam fora dos limites de controle, tendo causas especiais como por exemplo, a falta de energia elétrica do sistema concessionário (se considerado como uma ocorrência raríssima), poderão ser expurgados antes da utilização na simulação. O software Minitab<sup>®</sup>, comercializado pela Minitab Inc ([www.minitab.com](http://www.minitab.com)) facilita esta análise, conforme apresentado na Figura 5-7.

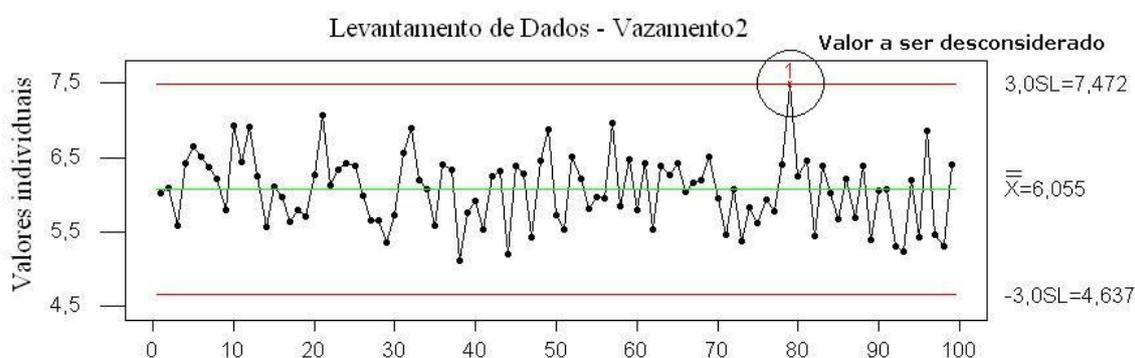


Figura 5-7 - Exemplo de gráfico de dados.

Muitos softwares de simulação trabalham diretamente com os dados coletados, acessando uma planilha que contenha estes dados. Outra forma de se trabalhar é através da análise da distribuição de probabilidades que melhor se ajusta aos dados coletados. Kelton *et al.* (2007) declaram que “se você usa dados históricos diretamente, nenhum outro valor além do que estão gravados serão usados na experimentação; mas se você faz a amostragem a partir de uma distribuição de probabilidade ajustada, é possível que se utilize valores que não sejam possíveis (por exemplo, dados da cauda das distribuições) ou perder características importantes (por exemplo, padrões de seqüenciamento dos dados)”. E complementam que “a leitura de muitos dados a partir de um arquivo que contenha os dados é tipicamente mais lento que pela amostragem a partir de uma distribuição de probabilidade”.

Um ferramenta conveniente para se identificar a forma da distribuição dos dados é através de um *histograma* de distribuição de frequência. O histograma é construído dividindo os valores dos dados coletados em intervalos e plotando um gráfico onde o

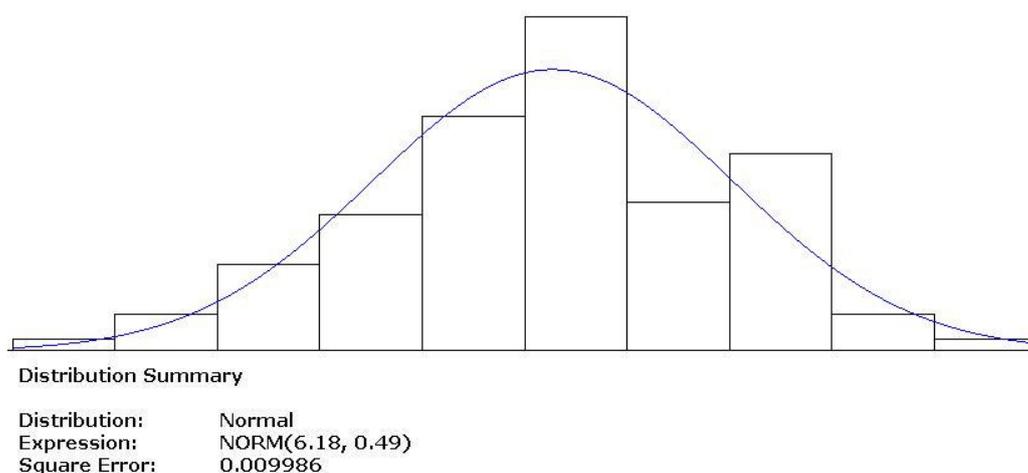
eixo horizontal receberá os intervalos de dados e o eixo vertical o total de ocorrências em cada intervalo. Uma *família de distribuição* é selecionada com base na que poderia representar o contexto que está sendo investigado, ao longo da forma do histograma (Banks *et al.*, 2005). A Figura 5-8 apresenta um exemplo de um histograma, com a curva de distribuição sobreposta.

O ajuste da distribuição de probabilidade dos dados coletados poderá ser feito com a utilização de softwares como o ExpertFit<sup>®</sup>, o StatFit<sup>®</sup> e o BestFit<sup>®</sup> ou os integrados a softwares de simulação, como o Input Analyser<sup>®</sup> (do Arena<sup>®</sup>), que facilitam este processo, provendo uma expressão que poderá ser usada diretamente no modelo computacional. Neste caso, quanto maior o volume (e confiabilidade) dos dados coletados, melhor será o ajuste da distribuição. A Tabela 5-1 e a Figura 5-8 apresentam um exemplo com os dados primários coletados em um processo e os parâmetros da distribuição de probabilidade melhor ajustada no Input Analyser<sup>®</sup> do Arena.

6,72	6,76	6,65	6,91	6,32	6,77	6,25	5,81	5,12	6,58
6,35	6,11	6,09	5,50	6,16	4,95	5,51	6,26	6,45	6,62
6,71	5,79	6,03	5,93	5,60	7,06	5,64	6,41	5,55	5,84
6,02	6,30	6,33	6,17	6,24	6,71	6,78	5,91	5,41	5,43
6,15	6,70	6,16	5,90	5,28	6,37	6,02	5,84	5,52	6,00
6,69	6,47	6,48	6,27	5,87	6,69	5,86	7,00	6,39	5,82
6,23	6,16	5,09	6,85	6,58	6,41	5,88	6,84	5,71	6,87
6,60	6,01	6,81	6,15	6,87	5,77	6,37	5,08	5,98	6,77
6,16	6,28	6,28	7,27	6,60	5,62	5,82	7,19	6,14	6,31
6,25	5,41	5,90	6,32	6,15	5,56	6,08	6,00	6,31	6,61

$N(6,185, 0,493)$

**Tabela 5-1** - Dados primários coletados em um processo e sua distribuição de probabilidade.



**Figura 5-8** - Histograma e ajuste da distribuição de probabilidade. **Fonte:** Tabela 5-1.

O software ajusta a curva da distribuição de probabilidade ao histograma, escolhendo a que melhor representa a distribuição dos dados. Mas pode-se escolher, com certo erro em relação ao melhor ajuste, outra família de distribuição desejada. O software de análise normalmente é uma ferramenta padrão, desenvolvida especificamente para ajustar uma distribuição de dados observados. Para a utilização, por exemplo, do Input Anayser<sup>®</sup>, Kelton *et al.* (2007) sugerem quatro passos para ajustar a distribuição de probabilidade de dados observados, para uso no modelo de simulação:

1. Criar um arquivo *.txt* (ASCII) contendo os valores dos dados. Os dados devem estar separados por um espaço em branco; o número de dados por linha ou número de linhas não importa.
2. Ajustar uma ou mais distribuições para os dados.
3. Selecionar a que se deseja utilizar.
4. Copiar a expressão gerada, no campo apropriado do modelo de simulação.

A Tabela 5-2 apresenta os erros quadráticos do exemplo da Figura 5-8.

Function	Sq Error
Normal	0.00999
Weibull	0.0104
Beta	0.0106
Triangular	0.0137
Erlang	0.0186
Gamma	0.0187
Lognormal	0.0275
Uniform	0.068
Exponential	0.113

**Tabela 5-2** - *Square Error* do ajuste de distribuições.

Vale lembrar que distribuições contínuas como a exponencial, triangular, Weibull, beta, Erlang, gama, lognormal, uniforme e normal, são usadas para representar durações (tempos) em um modelo de simulação. A distribuição de Poisson (discreta) é usada para descrever o número de eventos que ocorrem em um intervalo de tempo, como por exemplo, o número de pedidos que chegam em uma semana (Kelton *et al.*, 2007). Essas distribuições estão apresentadas no item 3.6.5, Aspectos Estatísticos na Simulação de Eventos Discretos.

Outras medidas de ajuste de distribuição para os dados são apresentadas nos testes estatísticos *chi-square* e Kolmogorov-Sminov, usados para verificar se a curva de uma distribuição está bem ajustada para dos dados, comparando a curva com o histograma dos dados (ver Figura 5-8). O valor de interesse é o *p-value* correspondente que sempre estará no intervalo entre 0 e 1. Valores maiores (acima de 0,10) indicam ajustes melhores. Valores abaixo de 0,05 sugerem que a distribuição não apresenta um bom ajuste e dados, quando gerados a partir da expressão da distribuição ajustada, poderão estar inconsistentes em relação aos dados coletados (Kelton *et al.*, 2007). O *p-value* pode ser visto como uma medida de ajuste, com valores maiores sendo melhor (Banks *et al.*, 2005). Como exemplo, os dados da Tabela 5-1 e a Figura 5-8, apresentaram um melhor ajuste para uma distribuição normal e os testes apresentaram os seguintes resultados:

Chi Square Test - Corresponding p-value = 0.0245

Kolmogorov-Smirnov Test - Corresponding p-value > 0.15

Isto sugere que se pode ajustar toda distribuição que for desejada, testar computacionalmente cada ajuste e então escolher aquela que apresentar o maior *p-value*. Normalmente os pacotes de análise incluem a opção “*best-fit*” (melhor ajuste), no qual o software recomendará a distribuição que melhor se ajustará, ou seja, quão bem a curva se ajusta ao histograma dos dados coletados. Banks *et al.* (2005) recomendam selecionar automaticamente a distribuição que será usada e complementar com o método gráfico, conforme apresentado no exemplo da Figura 5-8.

Segundo Banks *et al.* (2005), “definir as distribuições de probabilidade para os dados de entrada é a maior tarefa que será executada no estudo de simulação, considerando as necessidades de tempo e recursos; falhar na modelagem dos dados de entrada levará a resultados cuja a interpretação poderá levar a recomendações errôneas”. Eles apresentam quatro passos para o desenvolvimento de modelos de dados de entrada que serão realmente úteis e confiáveis:

1. Coletar os dados a partir do sistema real de interesse. Frequentemente requererá uma substancial quantidade de tempo e de recursos. Quando o tempo para coletar os dados é limitado, ou quando os processos ainda não existem, a opinião de especialistas e o conhecimento do processo devem ser utilizados para fazer suposições mais adequadas.

2. Identificar a distribuição de probabilidade que melhor represente os dados de processo. Envolve normalmente o desenvolvimento de uma distribuição de frequência ou histograma dos dados. A utilização de distribuições já conhecidas poderá facilitar este trabalho.
3. Escolher os parâmetros que determinam uma ocorrência específica de distribuição de probabilidade. Quando os dados existem, estes parâmetros podem ser obtidos diretamente a partir dos dados, como por exemplo, a média e o desvio padrão.
4. Avaliar a distribuição e parâmetros associados escolhidos que apresentem um melhor ajuste; poderá ser feito de forma gráfica ou através de testes estatísticos, como os testes *chi-square* e Kolmogorov-Smirnov. Quando os testes estatísticos não satisfizerem a distribuição escolhida, o analista deve retornar ao segundo passo, escolhendo uma família de distribuição diferente da anteriormente escolhida, repetindo o procedimento.

Após a definição das expressões de distribuição de probabilidade que caracterizam todas as operações que serão utilizadas no modelo de simulação, o próximo passo é complementar o Diagrama de Ciclo de Atividades (DCA, item 5.2.3) com estas informações.

### **5.2.6 Construção do Modelo Computacional**

Depois de observar o sistema real e as interações entre seus vários componentes, coletar e analisar os dados sobre o comportamento deles e construir o modelo conceitual, o próximo passo é a implementação de um modelo computacional, usualmente desenvolvido através da utilização de um software de simulação, com a incorporação das premissas do modelo conceitual no modelo computacional. Será um processo não linear, ou seja, o modelador estará retornando freqüentemente às etapas anteriores, à medida que for construindo, verificando e validando o modelo, comparando-o com o sistema real e fazendo as modificações necessárias, de forma a melhorar sua exatidão (Banks *et al.*, 2005).

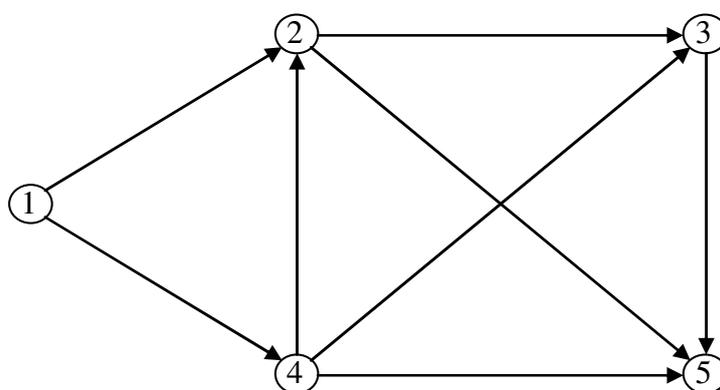
Os pacotes de simulação apresentados no item 3.6.6 permitem ao modelador desenvolver o modelo computacional selecionando ícones de um campo na tela e fazendo a interligação entre eles, de forma a mostrar as interações lógicas do modelo. Esta forma de desenvolvimento é conhecida como sistema visual de modelagem interativa (VIMS – *Visual Interactive Modeling System*) e permite que um modelo

computacional seja desenvolvido sem a necessidade do uso de programação com código de linha. O detalhamento lógico e os parâmetros do sistema são desenvolvidos usando uma lista de opções e arrastados para a tela (Pidd, 1998).

O modelador deverá decidir qual programa será utilizado para rodar a simulação, considerando aquele que se aplica melhor ao tipo de projeto e, de acordo com os levantamentos, construir o modelo. A habilidade e desenvoltura do modelador em relação ao programa utilizado e seu conhecimento dos recursos disponíveis, será determinante para o bom desenvolvimento do modelo. Em simulação de projetos de manufatura enxuta, alguns softwares são mais recomendados, como por exemplo, o ProModel e o Arena.

Kelton *et al.* (2007) defendem uma abordagem *top-down* para o desenvolvimento do modelo, onde a construção do modelo começa com os processos básicos e depois vai-se agregando os processos mais complexos. Se o modelo a ser desenvolvido é pequeno, pode-se testar todos os componentes e interações ao final do desenvolvimento, para verificar se estão trabalhando corretamente. Se o sistema é complexo, a recomendação é fazer uma partição do modelo em fases, testando separadamente uma primeira fase, que, operando corretamente, permitirá acrescentar a próxima fase. Continuando desta maneira até que todo o modelo tenha sido criado. Isto facilitará em muito, o processo de verificação do modelo.

A Figura 5-9 apresenta uma rede de transmissão de dados, cuja confiabilidade foi o tema de um estudo de simulação desenvolvido por Pinto e Saliby (1994). A Figura 5-10 apresenta o modelo gerado no Arena e a Tabela 5-3, os ícones básicos de processo.



**Figura 5-9** - Diagrama da rede do estudo de Pinto e Saliby (1994).

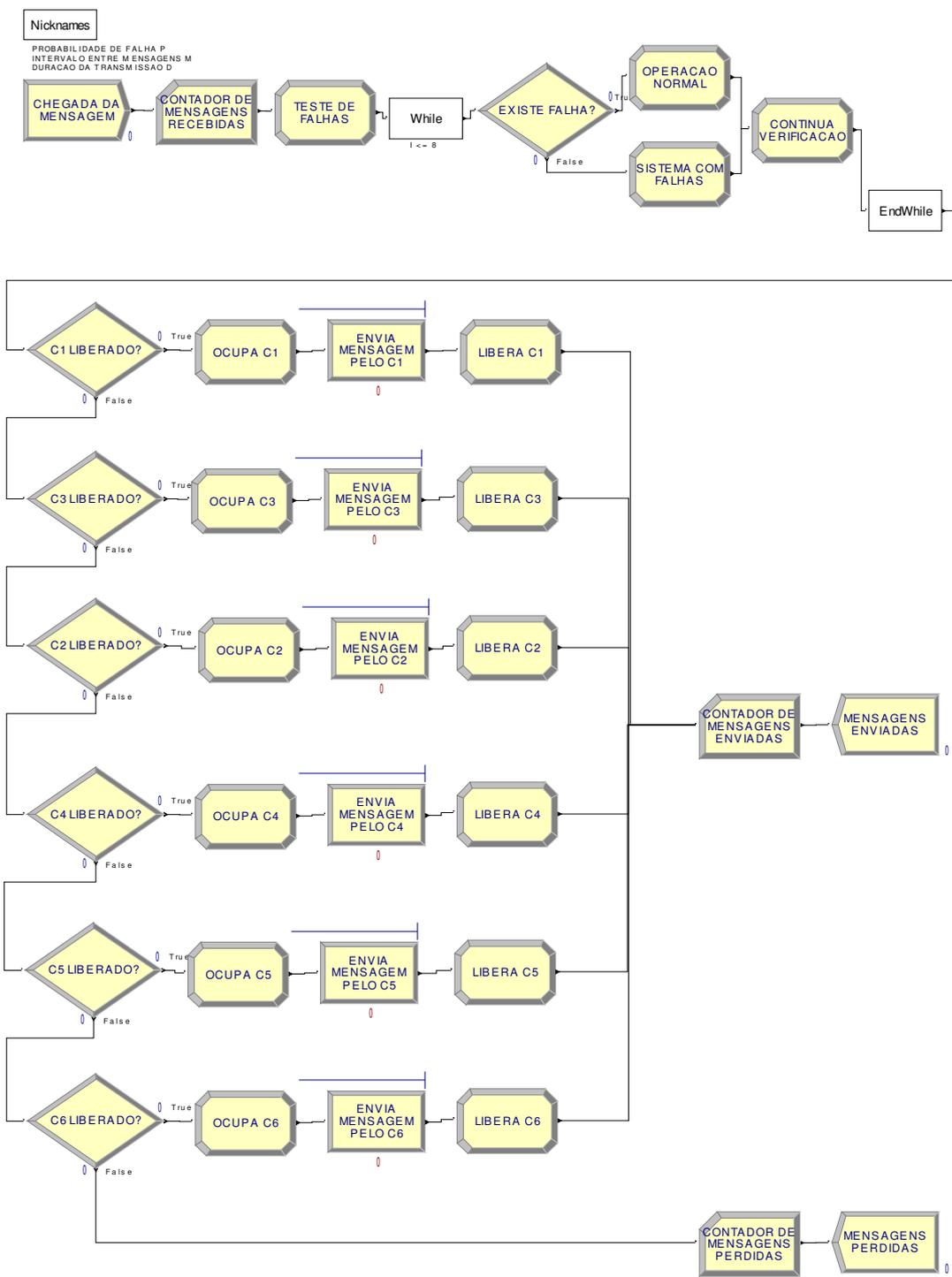


Figura 5-10 - Arena: simulação de confiabilidade de redes baseado em Pinto e Saliby (1994).

Abrir a janela de um novo modelo no software de simulação e começar a construção do modelo é provavelmente a parte mais divertida do estudo de simulação.

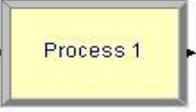
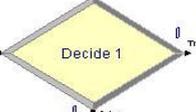
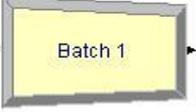
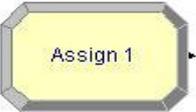
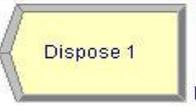
Módulo	Para que serve
 Create	Ponto de chegada das entidades no modelo de simulação. As entidades são criadas usando uma programação de chegada ou baseado no intervalo de tempo entre as chegadas. Elas deixam este módulo para começar o processamento através do sistema.
 Process	Método de processamento na simulação. Possui opções de reter ( <i>seize</i> ) recursos e entidades durante o tempo de processamento e liberação ( <i>release</i> ) após este tempo; os custos associados aos recursos e entidades serão adicionados conforme apropriado.
 Decide	Processo de tomada de decisão no sistema, baseado em uma ou mais condições (exemplo, número de peças > que 50) ou em probabilidades (exemplo, 75% <i>true</i> ; 25% <i>false</i> ).
 Batch	Mecanismo de agrupamento dentro do modelo de simulação. Agrupa entidades de forma permanente ou temporária (por exemplo, um motor e seu carrinho de transporte; que fica aguardando numa fila até a liberação do motor para agrupamento).
 Separate	Utilizado para separar as entidades agrupadas no módulo <i>Batch</i> (exemplo, o motor fica na estação de trabalho, liberando o carrinho para retornar à estação anterior).
 Assign	Atribui valores às variáveis, atributos das entidades, tipos de entidades, figuras das entidades ou outras variáveis do sistema.
 Record	Coleta e registra as estatísticas do modelo de simulação (por exemplo, tempo de processamento, <i>lead time</i> , custos, número de processamentos, quantidade de entidades em filas).
 Dispose	Ponto final das entidades no modelo de simulação. As estatísticas sobre as entidades poderão ser gravadas antes da entidade ser eliminada.

Tabela 5-3 - Ícones básicos de processo do Arena.

### 5.2.7 Verificação do Modelo

Uma das mais importantes e difíceis tarefas de um modelador é a verificação e validação do modelo de simulação (Banks *et al.*, 2005). Estas tarefas estão relacionadas basicamente a rodar satisfatoriamente o programa computacional, sem falhas (*bugs*) e utilizando-se de dados reais dos processos atuais, rodar o programa e validar se os resultados estão próximos dos resultados reais do sistema (por exemplo, *lead time*, produção mensal, estoques intermediários). Gerentes, engenheiros de processos e outras

pessoas relacionadas com o sistema estudado, só darão credibilidade ao trabalho de simulação se os resultados forem próximos de sua realidade.

Para se conseguir isso é fundamental que o modelador, ao desenvolver o modelo computacional, consulte constantemente aqueles especialistas nos processos, indo constantemente às áreas de produção, observando o comportamento real do sistema.

Segundo Kelton *et al.* (2007), *verificação* é “a tarefa de assegurar que o modelo se comporta como pretendido; processo conhecido como *debugging* do modelo (retirar as falhas que fazem o modelo ser executado incorretamente).

Para Banks *et al.* (2005), *verificação* diz respeito ao programa computacional preparado para o modelo de simulação, que pode ser traduzida em uma simples pergunta: o programa computacional é executado de forma adequada? Eles afirmam que “em modelos complexos é difícil, se não impossível, traduzir totalmente um modelo de forma perfeita, sem a ocorrência de falhas; se os parâmetros de entrada e a estrutura lógica do modelo estão representados corretamente, a verificação estará completada”.

Banks *et al.* (2005) apresentam algumas sugestões de aceitação geral, para serem usadas no processo de verificação, que são as mesmas considerações feitas por qualquer engenheiro de software:

1. O modelo computacional deve ser checado por outra pessoa além do desenvolvedor, preferencialmente um especialista no software de simulação que estiver sendo usado.
2. Elaborar um diagrama de fluxo que inclua cada ação lógica possível que o sistema possa tomar quando um evento ocorrer e seguir o modelo lógico para cada ação de cada tipo de evento.
3. Examinar criteriosamente se os resultados do modelo são razoáveis sob uma variedade de ajustes nos parâmetros de entrada; utilizar os dados estatísticos de saída para examinar estes resultados.
4. Imprimir os parâmetros de entrada ao final da simulação, para confirmar se eles não tiveram seus valores alterados inadvertidamente.
5. Fazer com que o modelo computacional faça registros automaticamente tanto quanto possível. Dar uma definição precisa de cada variável usada e uma descrição geral do

propósito de cada sub-modelo, procedimento, componente, ou outra subdivisão do modelo.

6. Se o modelo computacional é animado, verificar se o que é visto na animação imita o sistema atual. Alguns erros podem ser observados através da animação, como por exemplo, o sumiço inadvertido de algumas entidades ou interações, durante a simulação.
7. O controlador interativo da corrida de simulação (*debugger*) é um componente essencial para o sucesso da construção do modelo. Mesmo os desenvolvedores mais experientes cometem erros e estes mecanismos auxiliam na detecção e correção destes erros.
8. Utilizar a representação gráfica do modelo para entendê-lo melhor.

### 5.2.8 Validação do Modelo

Segundo Kelton *et al.* (2007), *validação* é a tarefa de assegurar que o modelo se comporta da mesma maneira que o sistema real.

Para Banks *et al.* (2005), a validação é alcançada através da calibração do modelo, um processo iterativo de comparação do modelo com o comportamento do sistema atual e, existindo discrepâncias entre eles e sendo bem identificadas, melhorar o modelo repetidamente até que a sua exatidão seja considerada aceitável. A pergunta chave é: o modelo de simulação replica as medidas do sistema real? Se sim, a validação estará completada. Para estes autores, o processo de validação pode ser descrito de duas formas:

1. Produzir um modelo que represente verdadeiramente o comportamento do sistema, permitindo substituir o sistema atual pelo modelo computacional, para fins de experimentação, analisando o comportamento do sistema e predizendo seu desempenho.
2. Aumentar a um nível aceitável, a credibilidade do modelo, de forma que o modelo passará a ser usado pelos gerentes e tomadores de decisão.

A comparação do modelo com a realidade é feita através de uma variedade de testes. Alguns testes são subjetivos, envolvendo pessoas conhecedoras de aspectos do sistema, que fazem julgamentos sobre o modelo e seus resultados. Outros testes são objetivos, requerendo dados sobre o comportamento do sistema, mais os dados correspondentes

produzidos pelo modelo, podendo envolver análise estatísticas destes dados. É um processo interativo de comparação entre o modelo e o sistema real, contínuo, que será realizado até que o modelo seja considerado suficientemente preciso. Porém, em última análise, nenhum modelo conseguirá representar fielmente o sistema em estudo. E como as revisões para atingir a precisão envolve custo, tempo e esforço, o modelador deverá considerar o custo-benefício do esforço de validação (Banks *et al.*, 2005).

Banks *et al.* (2005) citam Van Horn (1969, 1971) que recomenda em seu trabalho, 5 técnicas para melhorar a razão custo-benefício da validação:

1. Desenvolva modelos que sugerem alta validade, através da consulta a conhecedores do comportamento do sistema e também da estrutura do modelo, dados de entrada e de saída. Use o conhecimento adquirido em pesquisas, estudos, observações e experiências anteriores.
2. Conduza testes estatísticos simples dos dados de entrada, para avaliar a homogeneidade e aleatoriedade dos dados e para avaliar o ajuste assumido para as formas das distribuições.
3. Busque pessoas conhecedoras (gerentes, engenheiros) para ajudarem na comparação dos resultados do modelo com os resultados do sistema real, tendo a atenção na detecção de diferenças entre eles.
4. Compare os resultados do modelo com os resultados do sistema real por meio de testes estatísticos.
5. Após o desenvolvimento do modelo, colete novos dados do sistema e repita as técnicas 2 a 4.

Se os resultados da execução da simulação utilizando dados de entrada coletados no sistema real estão muito próximos do desempenho real deste sistema, então nós temos grande convicção da precisão do nosso modelo lógico (Kelton *et al.*, 2007).

### **5.2.9 Análise de Cenários a Investigar**

Um dos grandes desafios da implementação de projetos de manufatura enxuta é se desvincular da tentativa de copiar o Sistema Toyota de Produção. As contingências que envolvem as organizações implicam em diferenças substanciais que irão influenciar o sucesso da iniciativa enxuta. No desenho das alternativas a serem simuladas é fundamental um aprofundamento nos processos do sistema de produção em estudo,

buscando o conhecimento acerca do funcionamento real deste sistema. Shingo (1996) destaca que os métodos tradicionais devem ser questionados e estudados, abrindo espaço para a criação de novos métodos, mais efetivos que os atuais. Ou seja, devemos acreditar na possibilidade de melhoria dos processos, liberando a criatividade. E entendendo a base das técnicas de manufatura enxuta bem como a realidade do sistema de produção, são então desenhadas as alternativas para o trabalho de simulação.

Muitos estudos de simulação são executados para comparar configurações de sistemas ou políticas para operar um sistema. Os dados de entrada que são controláveis e que podem afetar os resultados do sistema são conhecidos como fatores. Estes fatores podem ser quantitativos, como por exemplo, o número de operadores ou de estações de trabalho. Podem também ser qualitativos, como por exemplo, as regras de prioridades. Um dos objetivos da simulação poderá ser, portanto, determinar quantos operadores e estações de trabalho e qual regra de prioridade produzirão o melhor resultado. Fatores não controláveis também poderão ser simulados, como por exemplo, o número de pedidos mensais de um determinado produto (adaptado de Pidd, 1998).

A definição das alternativas que serão estudadas deverá levar em consideração o tempo de inicialização e da corrida de simulação, bem como o número de replicações a serem feitas em cada corrida. O experimento deve ser planejado de forma que os vários fatores que podem influenciar os resultados possam ser desemaranhados. Desta forma o experimentador poderá determinar estatisticamente quais fatores produzem quais efeitos e podem ser capazes de traçar conclusões apropriadas sobre o efeito no sistema de políticas que está sendo investigado. O objetivo é assegurar que qualquer experimento é conduzido de maneira que as comparações feitas sejam justas e que a variação da amostragem é adequadamente computada, para quando forem tiradas as conclusões sobre os resultados dos experimentos. O desenho cuidadoso das alternativas a serem experimentadas leva tempo, mas reduz os problemas e o tempo de simulação (Pidd, 1998).

Em simulação de projetos de manufatura enxuta, o ponto de partida pode ser o mapa do estado futuro (ver item 5.1.4) e os projetos selecionados (ver item 5.1.5). Alguns exemplos de cenários a serem simulados, inicialmente de forma independente e posteriormente em conjunto, para avaliar o resultado como um todo:

- Cenário 1: grupo definido de operários em um determinado posto de trabalho, desenvolvimento de suas habilidades nas operações realizadas neste posto,

desenvolvimento de sistemas a prova de erros e padronização do trabalho com procedimentos bem estudados e definidos; alteração no tempo médio de operações manuais e da variabilidade deste tempo.

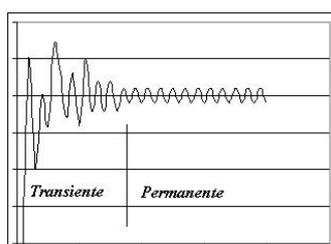
- Cenário 2: redução do estoque intermediário de peças para serem processadas em postos de trabalhos, implementando mais 2 horas extraordinárias de trabalho neste posto de trabalho.
- Cenário 3: aquisição de mais um equipamento de movimentação de materiais buscando reduzir a ociosidade de postos de trabalho pela falta de peças não transportadas em tempo.
- Cenário 4: a mudança no *layout* proporcionará menor distância entre as estações de trabalho, reduzindo ou até mesmo eliminando operações de transporte de peças.

A participação de gerentes e supervisores na escolha das alternativas e participação na simulação computacional será de grande ajuda ao analista e facilitará, posteriormente, o entendimento dos resultados.

Os diferentes cenários poderão sofrer alterações à medida que se roda a simulação e os resultados parciais vão sendo observados, pois como declara Banks *et al.* (2005), “a proposta da simulação é a compreensão, não números”. Mas é importante manter o registro de todas as alterações, para não se perder o caminho que foi seguido até se chegar ao resultado final.

### 5.2.10 Experimentação das Alternativas

Alguns sistemas já implantados podem estar em condições já estabilizadas, como por exemplo, um alto forno que produz continuamente, 24 horas por dia, 365 dias por ano. Em simulação de projetos de manufatura enxuta, essa condição não é freqüente, pois existem momentos de partida do sistema, quando ocorrerá um período de transição (*regime transiente*), do momento zero até o sistema se estabilizar (*regime permanente*), como por exemplo, operações de produção que só ocorrem em período diurno e que dependem do aquecimento de máquinas. A Figura 5-11 ilustra a variação existente nos processos durante o regime transiente.



**Figura 5-11** - Regime transiente e regime permanente.

O *regime transiente* se refere àquele período de tempo em que o sistema opera de forma não uniforme. É o tempo de aquecimento do sistema (*warm up*), onde o seu comportamento não pode ser muito bem interpretado. Neste regime descartam-se os dados estatísticos. Depois do aquecimento, o sistema já se torna mais uniforme, com sua variabilidade dentro de uma “certa” normalidade. Este período é chamado de *regime permanente*. É quando se podem utilizar os dados estatísticos de processo na simulação.

A maioria dos softwares de simulação permite ao usuário especificar o tempo no qual a coleta de dados iniciará. A pergunta é quanto tempo deverá ser este período de aquecimento? Se for muito longo se desperdiçará tempo computacional. Se muito pequeno, os efeitos transientes poderão ser incluídos erroneamente e os resultados poderão conter erros sistemáticos.

Não existe uma forma mais adequada para se determinar o tamanho do período transiente. Uma forma é através da análise do gráfico, conforme apresentado na Figura 5-11, verificando o momento em que o sistema se torna mais estável ou analisando os dados coletados em um software estatístico (Pidd, 1998), como por exemplo, o Minitab.

Outro aspecto importante a se considerar durante a simulação é o número de vezes que o sistema será reiniciado, ou seja, o número de corridas independentes que serão executadas. Os *tempos de replicação* são definidos, ou seja, de quanto em quanto tempo a simulação termina um ciclo começando um novo ciclo. A cada replicação (ou corrida) pode-se zerar o sistema, o que implica em um tempo de aquecimento para cada replicação, ou simplesmente zerar as estatísticas. Diferentes parâmetros serão utilizados, porém baseados nas distribuições de probabilidades definidas (visto em 5.2.5). Os resultados deverão ser computados a cada corrida.

### **5.2.11 Análise dos Resultados**

A análise dos resultados é a investigação dos dados gerados em uma simulação. Seu propósito é prever o desempenho de um sistema, ou comparar o desempenho de duas ou mais alternativas de projeto de um sistema. O desempenho do sistema, sendo medido por um parâmetro pré-definido, irá variar de forma aleatória, devido à aleatoriedade dos dados de entrada, justificando a necessidade de uma análise estatística dos resultados (Banks *et al.*, 2005).

Na construção do modelo computacional, é importante já definir quais os dados de saída serão considerados para análise, como exemplos, o tempo de ciclo ou tamanho de fila

em uma determinada estação de trabalho e o *lead time* dos pedidos colocados. Isto fará com que o programa registre as informações, formando a base de dados para análise estatística ao final da simulação. Normalmente os softwares comerciais provêm um resumo das principais medidas estatísticas, como média, variância e intervalos de confiança (medida do erro proveniente da média geral das replicações; este erro tende a ser menor quanto maior for o número de replicações fazendo com que o intervalo de confiança seja maior, por exemplo, 95%). Banks *et al.* (2005) enfatizam que a realização de replicações independentes irá gerar observações estatísticas independentes, o que permitirá empregar métodos estatísticos padrões para a análise dos dados.

Um exemplo de análise estatística simples, a partir de replicações independentes, pode ser verificado no gráfico da Figura 5-12 e cujos dados de origem, tanto do processo atual como dos cenários simulados, se encontram na Tabela 5-4.

Lead Time	Atual	Cenário 1	Cenário 2
Replicação 1	797	691	751
Replicação 2	856	657	732
Replicação 3	761	686	718
Replicação 4	822	727	740
Replicação 5	774	706	735
Replicação 6	788	712	713
Replicação 7	797	674	723
Replicação 8	772	717	744
Replicação 9	776	707	706
Replicação 10	772	673	735
Replicação 11	806	718	736
Replicação 12	816	720	729
Replicação 13	863	732	741
Replicação 14	793	712	740
Replicação 15	811	703	733
Replicação 16	809	702	722
Replicação 17	780	643	739
Replicação 18	731	698	741
Replicação 19	717	714	747
Replicação 20	779	697	730
Média	790,9	699,5	732,8
Desvio Padrão	35,27	23,07	11,53
Mínimo	716,6	643,0	705,8
Máximo	863,3	732	750,6

**Tabela 5-4** - Exemplo de simulação - *lead time*.

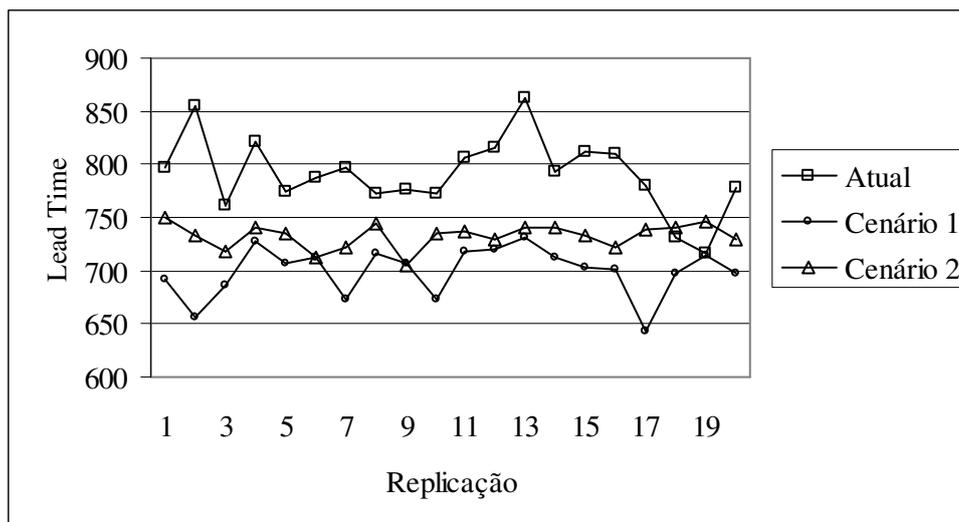


Figura 5-12 - Exemplo de simulação - gráfico do *lead time*.

O objetivo do estudo exemplificado era simular as alterações nos processos de produção, de forma a avaliar as possíveis reduções no *lead time*. Analisando o gráfico Figura 5-12, podemos observar que o cenário 1, apresentou o menor valor médio. Se este for o objetivo do projeto de simulação, provavelmente será o cenário escolhido para implementação.

Uma análise estatística mais aprofundada poderá ser feita utilizando-se de um software específico, como por exemplo, o Minitab<sup>®</sup>. A Figura 5-13 a seguir apresenta o gráfico de valores individuais para os resultados da simulação do *lead time*, onde os diferentes cenários são apresentados em seqüência. A média encontrada bem como os limites de controle superior e inferior (linhas horizontais) são apresentados. Analisando o gráfico se pode observar uma menor média para o cenário 1, porém com maior variabilidade em relação ao cenário 2. Se o objetivo for alterado para um melhor nivelamento da produção, talvez o cenário 2 fosse escolhido para implementação.

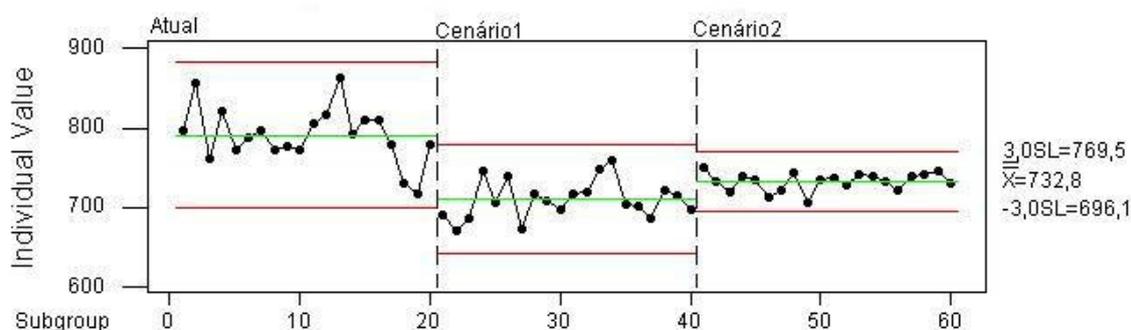
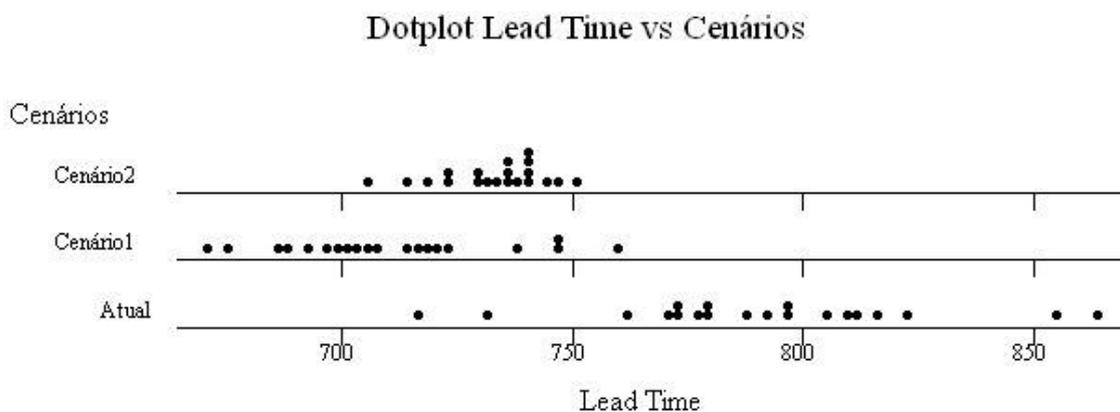


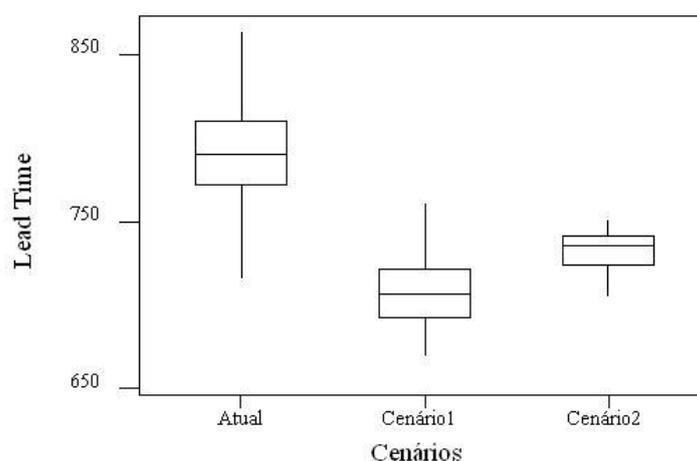
Figura 5-13 - Gráfico de valores individuais para o *lead time*.

O gráfico *Dotplot*, apresentado na Figura 5-14, permite analisar os resultados da simulação. Cada resultado de cada replicação independente, em cada cenário simulado, é plotado sobre uma linha horizontal.



**Figura 5-14** - Exemplo de simulação - gráfico *Dotplot* dos cenários estudados.

O gráfico *Boxplot* (Figura 5-15) apresenta os resultados em caixas; a altura representa os valores mínimo e máximo e a linha central horizontal a média de cada cenário simulado.



**Figura 5-15** - Exemplo de simulação - gráfico *Boxplot* dos cenários estudados.

### 5.2.12 Emissão do Relatório e Arquivo do Projeto

A final do processo de análise dos resultados da simulação, é expedido um relatório que deverá conter, de forma clara e objetiva, pelo menos:

- Nome do projeto
- Líder, Modelador/Analista
- Objetivo
- Processos abordados
- Premissas
- Alternativas simuladas
- Resultados e análise estatística
- Conclusões e recomendações

Antes da emissão final, este relatório deverá ser validado pelas principais pessoas que estiveram envolvidas diretamente no trabalho de simulação.

E também muito importante num estudo de simulação é a manutenção de um arquivo organizado, com as informações principais do projeto. Mas não é um trabalho a ser desenvolvido ao final do estudo, pois o volume de informações é tão grande, que se torna impossível organizá-lo apenas no final do projeto. É um trabalho que se inicia na formalização do projeto. A organização em pastas eletrônicas, numeradas seqüencialmente, é considerada como uma boa prática. Como exemplo temos:

- 01 - Documentos iniciais do projeto (termo de abertura, diretório de *stakeholders*)
- 02 - Documentos de planejamento (EAP, cronograma, previsão de custo, plano de treinamento)
- 03 - Documentos de processo (fluxogramas de processo, dados iniciais, DCA)
- 04 - Mapas de fluxo de valor
- 05 - Planilhas de dados de processo
- 06 - Arquivos da simulação (software e descritivo das alternativas simuladas)
- 07 - Análise dos resultados
- 08 - Relatórios Parciais e Final

### **5.2.13 Implementação**

Após a análise dos resultados e emissão do relatório, agenda-se uma reunião com os principais envolvidos para formalizar a aceitação em relação às alternativas simuladas e que serão implementadas. A partir do momento em que todos concordem que o estudo de simulação foi consistente, provendo uma base de decisão confiável, parte-se para a implementação das mudanças nos processos. Como este item extrapola aos limites desta pesquisa, indo em direção à gestão de projetos em geral, fica a recomendação para consulta ao *PMBok® Guide* (Project Management Institute, 2004), que provê uma boa orientação para implementação de projetos.

## **6 TESTE DE ADERÊNCIA DA METODOLOGIA**

A simulação de eventos discretos se baseia nos conceitos de fila e tempos de serviço. Em qualquer processo de manufatura, tem-se claramente o problema de filas e tempos de serviço: as filas são os estoques de peças aguardando para serem processados nas máquinas (serviço). Portanto, o uso da simulação se torna aplicável à maioria dos processos industriais. A seguir são apresentados os detalhes do teste desenvolvido em uma indústria de fundição, para avaliar a aderência da metodologia desenvolvida. São apresentados os documentos gerados durante o teste de aderência.

### **6.1 A Empresa Apoiadora da Pesquisa**

O teste de aderência da metodologia foi conduzido em uma indústria de fundição de médio porte, localizada no centro-oeste de Minas Gerais. Fundada em 1984, esta indústria atua no comércio interno e externo de fundição de peças especiais sob encomenda, em ferro fundido nodular, cinzento, fundidos ligados, ferro fundido branco, aço e suas ligas. Busca a otimização de seu processo produtivo através de programas de melhoria contínua da qualidade. Para atender à demanda do mercado, trabalha por construir relações duradouras com os seus funcionários, fornecedores e clientes, implementando programas de responsabilidade sócio-ambiental. Investe na capacitação dos colaboradores, incentivando e valorizando a criatividade, a competência, a produtividade e os resultados alcançados, através de treinamentos internos e externos. Portanto, um bom ambiente para aplicação dos conceitos da manufatura enxuta.

### **6.2 A Abordagem Inicial**

O propósito da pesquisa de campo foi estudar a aplicação da metodologia de uso de simulação em projetos de manufatura enxuta. O primeiro passo foi desenvolver o interesse da alta gerência em apoiar o estudo de simulação, apresentando os benefícios da manufatura enxuta como justificativa e assegurando que nenhum dado de processo que não fosse autorizado seria divulgado. Foi enfatizado que não existiriam custos e seria uma relação de contribuição escola-empresa. Também foi enfatizado que o estudo de simulação não alteraria os processos existentes, porém, de acordo com os resultados, seria apresentado um relatório onde a empresa avaliaria as opções de melhoria, podendo implementá-las ou não. A partir do entendimento com a direção da empresa, iniciaram-se os trabalhos seguindo as etapas a seguir descritas.

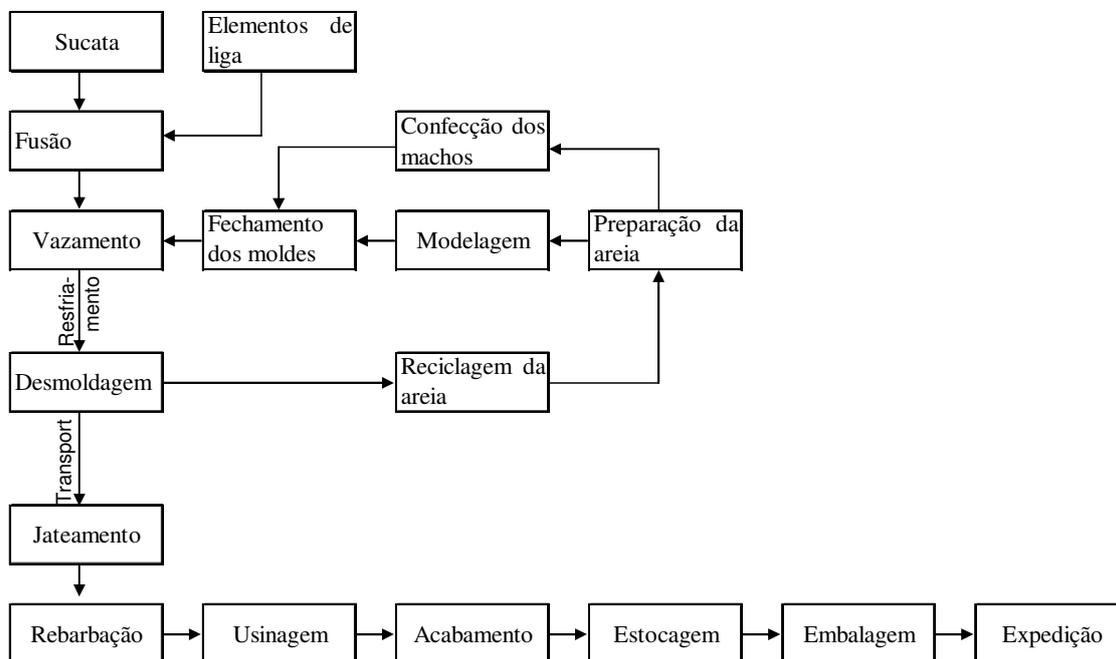
### 6.3 Etapas da Pesquisa de Campo

Contando inicialmente com o apoio da direção da empresa, os trabalhos foram conduzidos seguindo as etapas a seguir descritas:

1. Confirmação do apoio da direção e divulgação do projeto junto às áreas envolvidas;
2. Planejamento das atividades, áreas e pessoas envolvidas diretamente no projeto;
3. Treinamento da equipe através de explanação do projeto em uma reunião de abertura e continuidade *on the job*.
4. Elaboração do fluxograma de processo e mapeamento do fluxo de valor, com apoio da área de qualidade e de produção;
5. Escolha dos processos que seriam simulados, considerando a contribuição que poderia ser dada à empresa;
6. Desenvolvimento do entendimento com as pessoas envolvidas sobre os processos que seriam simulados e os problemas relacionados a estes processos, identificados no mapeamento realizado;
7. Definição das necessidades de coleta de dados e os resultados esperados;
8. Construção do modelo e diagrama de ciclo de atividades;
9. Coleta de dados de processo;
10. Análise estatísticas dos dados no Minitab e definição das distribuições de probabilidades utilizando o Input Analyser do Arena;
11. Construção do modelo computacional utilizando o Arena;
12. Verificação do modelo computacional;
13. Validação do modelo através da comparação com os dados atuais de produção;
14. Análise de cenários (alternativas) a simular;
15. Experimentação das alternativas;
16. Análise dos resultados;
17. Emissão do relatório final;
18. Apresentação dos resultados à direção da empresa.

#### 6.4 O processo de Fundição

A Figura 6-1 a seguir apresenta o fluxograma simplificado do processo central de uma indústria de fundição.



**Figura 6-1** - Fluxograma do processo central de uma indústria de fundição.

O processo de fundição consiste no escoamento de metal fundido em um molde preparado em areia compactada e que após solidificação toma a forma pré-concebida do modelo dentro do molde. O processo de fundição, objeto desta pesquisa, consiste nas etapas descritas a seguir.

*Moldagem:* a partir de um modelo bi-partido fabricado em madeira no formato da peça a ser fundida, são preparados com areia de fundição os moldes que darão a forma desejada à peça a ser fundida. A produção do molde consiste na preparação, colocação e compactação da areia de fundição ao redor de cada meio-modelo, colocado sobre uma superfície plana de madeira com um quadro ao redor formando uma caixa. Após a compactação da areia, a caixa é virada em 180°, retirando-se o meio-modelo e preparando os canais para vazamento do metal fundido, respiros de ar e colocação dos machos (para o caso de peças com cavidades). As duas partes então são montadas, formando o molde, que será posicionado na área onde ocorrerá o vazamento do metal fundido.

*Fusão:* de acordo com a peça a ser produzida, é preparada a carga metálica composta por sucata de aço, sucata de fundidos, ferro ligas e outros constituintes. A fusão desta

carga metálica ocorre nos fornos de indução (1,5 ton./h cada cadinho), a óleo (1,2 ton./h, sendo 2 unidades) ou *cubilot* (3,5 ton./h), que aquecidos irão tornar líquidos a carga metálica que será ajustada dentro das especificações do cliente e aprovado pelo Controle da Qualidade. O metal líquido é transportado manualmente em painéis até a área de vazamento, onde é derramado no molde de areia.

*Resfriamento*: após o derramamento do metal fundido no molde, será dado um tempo para solidificação e resfriamento da peça.

*Desmoldagem*: após o tempo de resfriamento, os moldes são desmoldados e as peças retiradas pelos operários, que separam as duas caixas e retiram, em grande parte, a areia que envolve as peças fundidas e que será posteriormente recuperada e reutilizada. As peças são então transportadas até a área de limpeza.

*Limpeza*: consiste na retirada da areia que fica nas saliências e reentrâncias das peças. Essa limpeza é normalmente realizada através do jateamento de granalhas de aço sobre as peças, em uma cabine isolada.

*Controle da qualidade*: verificação de defeitos antes da rebarbação.

*Rebarbação*: após a limpeza, são retirados os canais de vazamento e as rebarbas normalmente existentes nas junções das duas caixas.

## **6.5 Contextualização do Sistema**

### **6.5.1 Confirmação do apoio da direção e divulgação do projeto junto às áreas envolvidas**

Após a abordagem inicial junto à direção da empresa, conseguindo o apoio necessário para a pesquisa de campo, o projeto foi comunicado oficialmente a todos os envolvidos, através de um e-mail do Diretor de Produção, transcrito Figura 6-2. Nomes e dados de contatos apresentados são fictícios, para proteger a privacidade solicitada pela empresa.

### **6.5.2 Planejamento das atividades, áreas e pessoas envolvidas diretamente no projeto**

O planejamento das atividades iniciou-se pela identificação das principais pessoas da empresa que estariam envolvidas no desenvolvimento dos trabalhos, conforme apresentado no diretório da Figura 6-3, facilitando os contatos.

Posteriormente foi acordado, junto à direção da empresa, o cronograma apresentado na Figura 6-4, com compromisso da coleta de dados até meados do mês de janeiro/08.

### TERMO DE ABERTURA DO PROJETO

**Data:** Tue, 27 Nov 2007 14:26:32 -0200  
**De:** "João Pedro" <joao.pedro@fundi.com.br>  Ver detalhes do contato  
**Para:** "Paulo Paiva" <producao@fundi.com.br>, "Carla Cristina" <qualidade@fundi.com.br>, "Marcelo Oliveira" <manutencao@fundi.com.br>, "Luiz Otávio" <seguranca@fundi.com.br>, "Cléber Souza" <pcp@fundi.com.br>, "Juarez Quintão" <comercial@fundi.com.br>, "José Marques" <expedição@fundi.com.br>, Joelmir Faria <faturamento@fundi.com.br>.  
**Assunto:** Projeto Lean Manufacturing  
**Cc:** "Clênio Senra de Oliveira" <clenios@yahoo.com.br>

Prezados colaboradores,

No próximo mês de dezembro, iniciaremos um trabalho de simulação de processos, onde avaliaremos algumas opções de melhoria que nos foram sugeridas por vocês, ao longo deste ano de 2007, avaliando-as antes de sua implementação. O objetivo final é acertarmos na decisão de investimentos para o ano de 2008.

Contaremos com o apoio do Departamento de Engenharia de Produção da Universidade Federal de Minas Gerais, através do aluno de mestrado engenheiro Clênio Senra de Oliveira, que processará as informações de processo e as alternativas sugeridas, apresentando um relatório final para nossa avaliação final.

Os trabalhos serão liderados internamente pela Carla Cristina, da Qualidade.

Já sabemos que este trabalho envolverá uma coleta intensiva de tempos de processo, para o qual solicito o comprometimento e dedicação daqueles que forem designados este trabalho de coleta de dados e informações complementares que se fizerem necessárias.

Atenciosamente,

João Pedro

#### DISCLAIMER:

Esta mensagem e seus anexos são destinados exclusivamente ao(s) destinatário(s) identificado(s) acima e contém informações confidenciais ou privilegiadas. Se você não é o destinatário destes materiais, não está autorizado a utilizá-los para nenhum fim. Solicitamos que você apague a mensagem e seus anexos e avise imediatamente o remetente. O conteúdo desta mensagem e de seus anexos não representa necessariamente a opinião e a intenção da empresa, não implicando em qualquer obrigação ou responsabilidade adicionais.

**Figura 6-2** - Termo de abertura do projeto.

Projeto: <b>LEAN MANUFACTURING</b>		<b>DIRETÓRIO DE ENVOLVIDOS E INTERESSADOS NO PROJETO</b>			
Nome	Função no projeto	Instituição	E-mail	Fone	Celular
João Pedro	Patrocinador	Fundi	joao.pedro@fundi.com.br	(37) 3241-....	(37) 9983-.....
Paulo Paiva	Supervisor de produção	Fundi	producao@fundi.com.br	(37) 3241-....	(37) 9983-.....
Carla Cristina	Coordenador de qualidade	Fundi	qualidade@fundi.com.br	(37) 3241-....	(37) 9983-.....
Marcelo Oliveira	Supervisor de Manutenção	Fundi	manutencao@fundi.com.br	(37) 3241-....	(37) 9983-.....
Luiz Otávio	Supervisor de Segur. Trab.	Fundi	seguranca@fundi.com.br	(37) 3241-....	(37) 9983-.....
Cléber Souza	PCP	Fundi	pcp@fundi.com.br	(37) 3241-....	(37) 9983-.....
Juarez Quintão	Supervisor de Vendas	Fundi	comercial@fundi.com.br	(37) 3241-....	(37) 9983-.....
José Marques	Supervisor de Expedição	Fundi	expedição@fundi.com.br	(37) 3241-....	(37) 9983-.....
Joelmir Faria	Assistente de Faturamento	Fundi	faturamento@fundi.com.br	(37) 3241-....	(37) 9983-.....
Clênio Senra de Oliveira	DEP UFMG	UFMG	clenios@yahoo.com.br	(37) 3241-....	(37) 9983-.....

Observação: os nomes e dados de contato são fictícios, para proteger a privacidade solicitada pela empresa.

**Figura 6-3** - Diretório de envolvidos no projeto.



Figura 6-4 - Cronograma do projeto.

### 6.5.3 Treinamento da equipe através de explanação do projeto em uma reunião de abertura e continuidade *on the job*

O treinamento com os envolvidos esteve baseado numa explanação sobre o que é a manufatura enxuta e os benefícios conseguidos pelas organizações que se baseiam nesta filosofia para o redesenho de seus processos e o que seria o trabalho de simulação. Destaque foi dado à importância da coleta de dados, que após alguns levantamentos foram apresentados os casos relacionados a seguir.

*Tempos de Vazamento:* os primeiros 30 tempos de vazamento amostrados foram analisados no software Mintab®, realizando o teste dos pontos que se distanciavam muito da média dos dados e a plotagem do gráfico correspondente, apresentado na Figura 6-5.

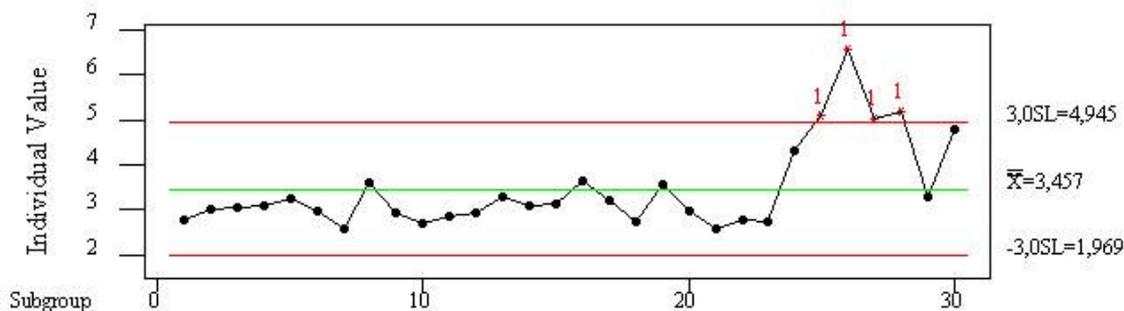
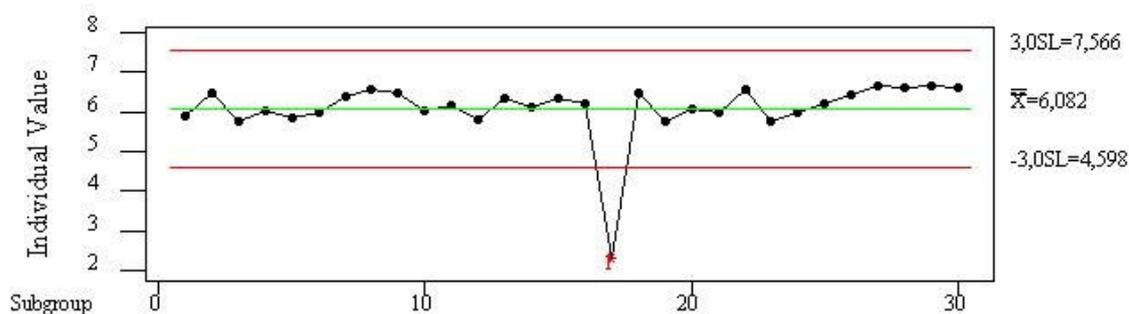


Figura 6-5 - Gráfico de valores individuais para tempos de vazamento.

A partir do 24º tempo coletado, fica evidente uma mudança no processo. A investigação das causas identificou a mudança da família de produtos, mudança que não foi percebida pelo funcionário que fazia a coleta dos dados.

*Tempos de transporte:* os primeiros 30 tempos de transporte amostrados foram analisados no software Minitab®, realizando o teste dos pontos que se distanciavam muito da média dos dados e a plotagem do gráfico correspondente, apresentado na Figura 6-6.



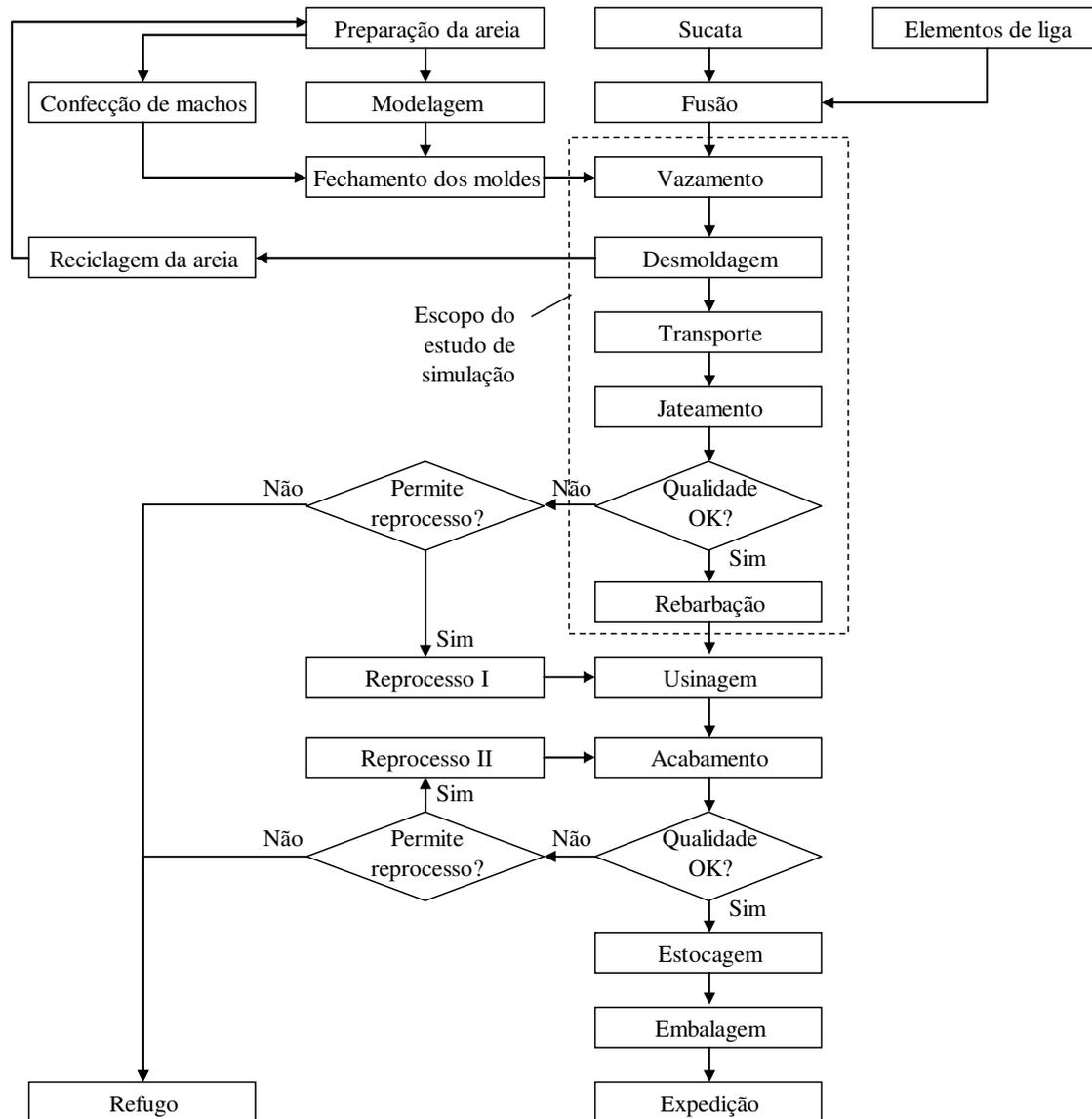
**Figura 6-6** - Gráfico de valores individuais para tempos de transporte.

Como o transporte das peças é realizado por uma carregadeira, se torna evidente o descuido do funcionário no registro do tempo da amostra 16, pois analisando o gráfico, observa-se uma variação relativamente constante em relação à média e no caso da amostra 16, uma redução drástica em seu valor, o que caracterizaria, especificamente neste caso, um aumento exorbitante na velocidade do equipamento de transporte.

Os treinamentos eram informais, na própria área de produção, exceto para a apresentação do modelo computacional, realizado na sala do supervisor de produção, utilizando-se de um computador portátil.

#### 6.5.4 Elaboração do fluxograma de processo e mapeamento do fluxo de valor, com apoio da área de qualidade e de produção

Para o entendimento do processo que seria simulado, inicialmente desenhou-se o fluxograma de processo, conforme ilustrado na Figura 6-7. A partir deste fluxograma, foi realizado um mapeamento do fluxo de valor, traçando o mapa do estado atual, onde puderam ser observados os estoques intermediários, com destaque para as filas de peças na rebarbação. Este mapa do fluxo de valor está apresentado na Figura 6.8 e considerando o processo em estudo, tem-se um *lead time* de 30,2 horas.



**Figura 6-7** - Fluxograma do processo de fundição.

O desenho do mapa do estado atual da Figura 6.8 se baseou nas seguintes informações de processo:

- Demanda mensal dos produtos da família escolhida: 5.000 peças
- Tempo de trabalho disponível: 20 dias / mês; 1 turno de 8 horas;
- Tempo *takt*: calculado dividindo-se o tempo de trabalho disponível (160 horas por mês) pela demanda do cliente (5.000 peças); no processo estudado, o tempo *takt* é então de 115 segundos; representa que, para atender à demanda mensal dos clientes desta família de produtos, dentro do tempo de produção disponível, a empresa precisa produzir uma peça a cada 115 segundos (31,3 peças/hora)
- Vazamento:

- Tempo de médio de vazamento: 1,55 minutos / molde vazado
- Estoque observado: 143 peças vazadas e 16 sendo vazadas;
- Resfriamento:
  - Tempo de médio de resfriamento: 30 minutos
  - Estoque observado: 56 peças;
- Desmoldagem:
  - Tempo de médio de desmoldagem: 0,21 minutos
  - Estoque observado: 56 peças;
- Jateamento:
  - Tempo de médio de jateamento: 0,28 minutos/peça
  - Estoque observado antes da máquina: 50 peças; dentro da máquina: 75 peças;
- Rebarbação:
  - Tempo de médio de rebarbação: 2,87 minutos/peça
  - Estoque observado antes da rebarbação: 576 peças; peças já rebarbadas: 123 peças;

Os estoques intermediários e em processo foram convertidos em número de horas de produção. “Estes *lead times* para cada triângulo de estoque são calculados dessa forma: quantidade em estoque dividida pelos pedidos do cliente” (Rother e Shook, 2003). Exemplo: 576 peças para rebarbar dividido pela demanda de 31,3 peças por hora (1 peça a cada 115 segundos), têm-se um *lead time* de 18,4 horas. Ao somarmos os *lead times* dos estoques intermediários e em processo, temos o *lead time* total de 30,2 horas.

Porém deve-se destacar que os cálculos não consideraram a operação por bateladas, como jateamento e transporte, com os tempos sendo divididos pelo número de peças.

#### **6.5.5 Escolha dos processos que seriam simulados, considerando a contribuição que poderia ser dada à empresa**

Observando todo o processo de produção, foram escolhidos os processos a partir do vazamento nos moldes até o final da rebarbação. Estes processos constituem o centro do sistema de produção da indústria de fundição pesquisada e permitem uma maior facilidade na coleta dos dados, o que pode contribuir para um andamento mais rápido do estudo de simulação. Apresentar resultados iniciais, o mais rápido possível é fundamental para consolidar o apoio da direção da empresa, bem como o interesse e colaboração das demais pessoas envolvidas. O processo de qualidade foi considerado em conjunto com o processo de rebarbação, sendo realizado pelos mesmos funcionários.

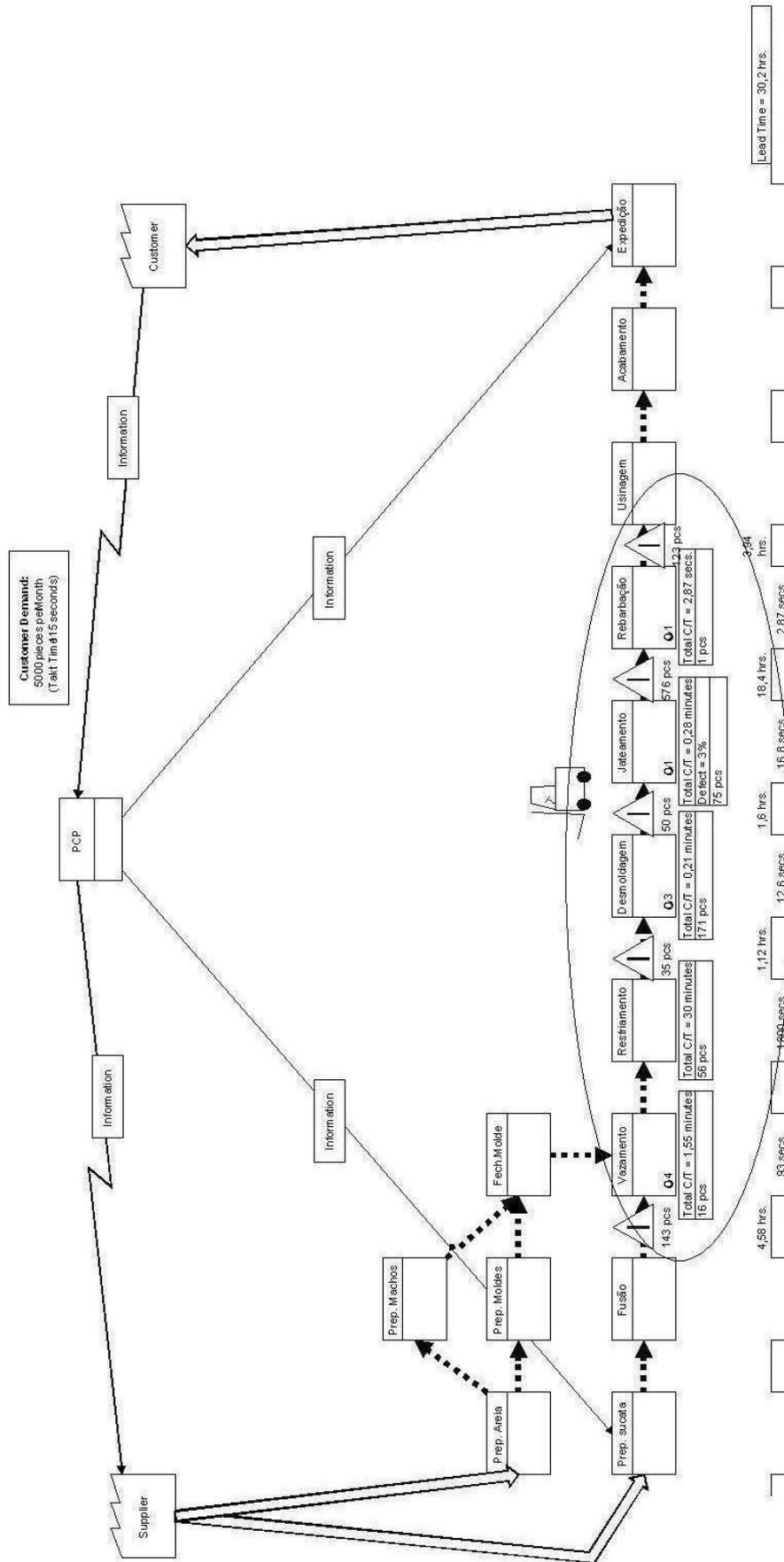


Figura 6-8 - Mapa de fluxo de valor atual.

## **6.6 Análise do Sistema Via Simulação**

### **6.6.1 Desenvolvimento do entendimento sobre os processos que seriam simulados e os problemas relacionados, identificados no mapeamento realizado**

Conforme apresentado no item 6.5.5, as principais pessoas envolvidas diretamente nos processos, como o diretor e o supervisor de produção e o coordenador de qualidade, foram procuradas para acordar sobre os processos que seriam simulados:

- Vazamento
- Desmoldagem
- Transporte
- Jateamento
- Qualidade
- Rebarbação

Os problemas principais foram relacionados:

- O atraso no processo de vazamento provocava ociosidade nos demais processos;
- A falta de capacidade da rebarbação gera estoques de peças para serem rebarbadas e a necessidade de horas extras para eliminação destes estoques.

### **6.6.2 Definição das necessidades de coleta de dados e os resultados esperados**

Limitando o escopo de trabalho aos processos relacionados anteriormente, foram acordados com a área de produção e de qualidade os dados que seriam coletados, sendo:

- Tempo de vazamento;
- Tempo de resfriamento;
- Tempo de desmoldagem;
- Tempo de transporte e quantidade de peças transportadas por vez;
- Tempo de jateamento, considerando carregamento, jateamento e retirada das peças da máquina de jato e o número de peças jateadas por vez;
- Tempo de rebarbação, incluindo a inspeção inicial da qualidade das peças.

Como era evidente a formação de filas de peças para rebarbação, sendo necessário horas extras para eliminação destas filas, o trabalho de simulação buscava o balanceamento dos processos e conseqüentemente a redução do estoque intermediário antes da rebarbação.

### 6.6.3 Construção do Modelo

O primeiro passo para modelar o sistema foi desenhando o fluxograma de processo, contemplando todas as operações que seriam simuladas, sendo apresentadas na Figura 6-9.

O escopo do projeto de pesquisa contemplou os processos de vazamento, desmoldagem, transporte, jateamento, controle de qualidade e rebarbação. Os tempos do controle de qualidade foram tomados juntamente com a rebarbação (ver item 6.6.4) e o índice de refugo considerado de 3% (média mensal).

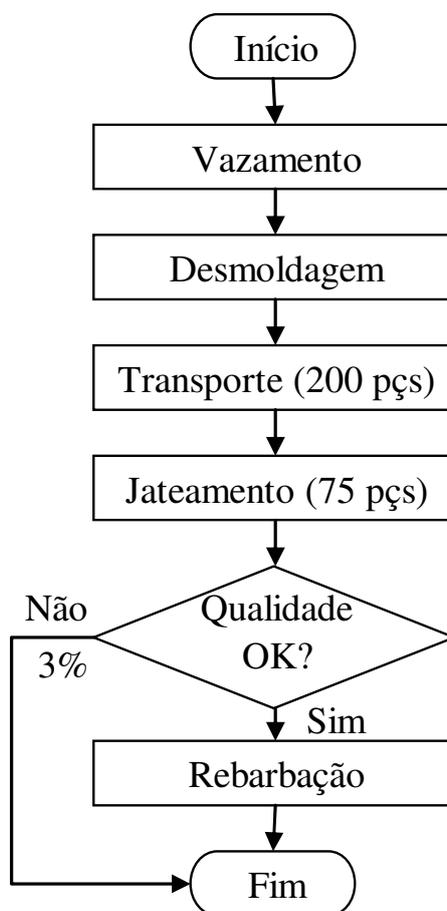


Figura 6-9 - Fluxograma de processo do sistema em estudo.

O modelo conceitual do sistema está apresentado na Figura 6.10. A representação gráfica do modelo foi elaborada utilizando-se elementos do DCA com algumas modificações de forma a facilitar seu entendimento e sua representação esquemática, uma vez que os elementos padrões do DCA não possibilitam o agrupamento de entidades, utilizado no modelo do Arena.

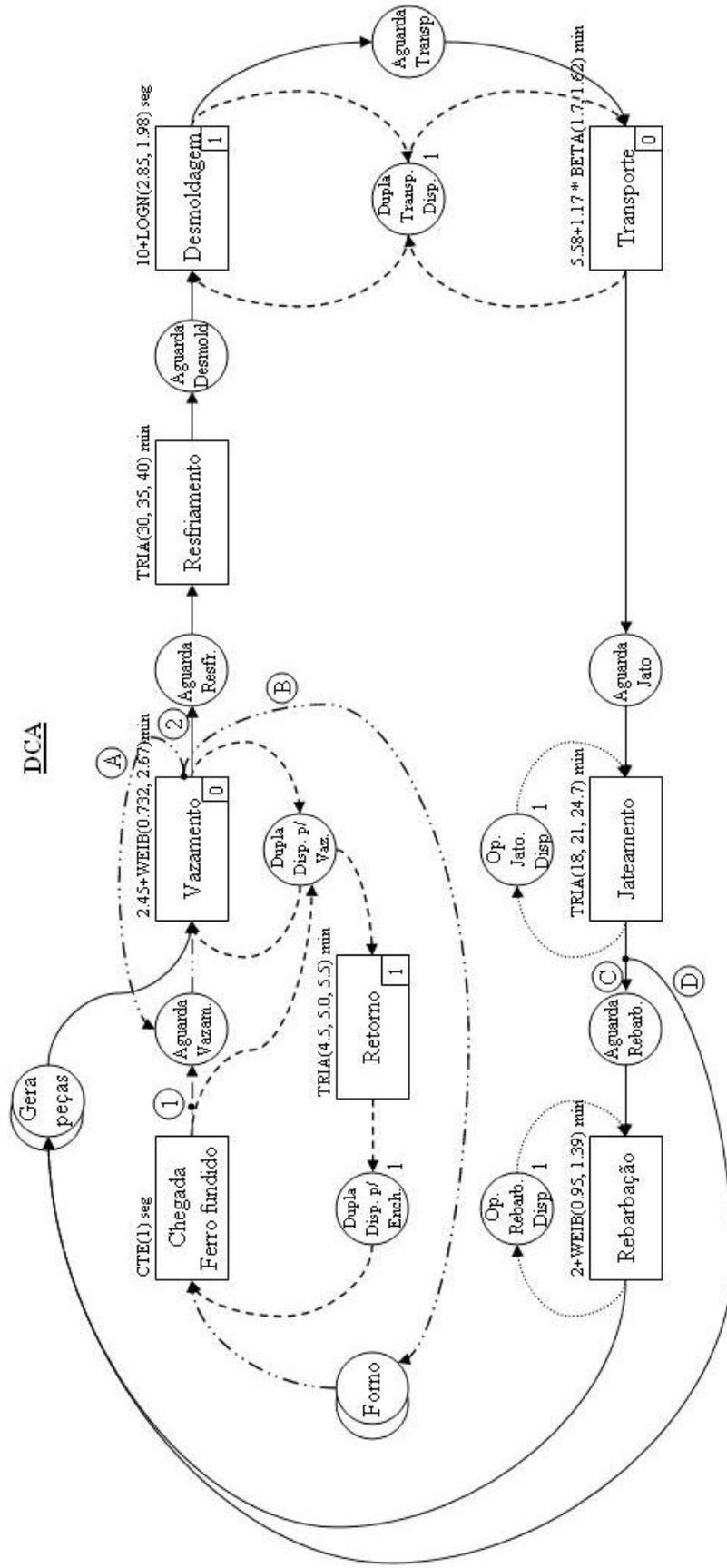


Figura 6-10 - Diagrama de Ciclo de Atividades - DCA.

O modelo conceitual, criado antes do modelo computacional, apresenta os aspectos do processo real que serão considerados. Neste estudo realizado na indústria de fundição, o ferro fundido, após a fusão no forno elétrico (ou forno *cubilot*, dependendo da programação), é transportado manualmente para a área de vazamento em duas painelas de 50 kg cada, por 4 operários, sendo 2 operários por painela. Como o trabalho inicia-se a partir do vazamento, considerou-se a chegada do ferro fundido como constante, ficando o início do vazamento, então, condicionado somente à disponibilidade de recursos (painelas e operadores). As painelas são vazadas de forma independente e os operários do vazamento foram considerados como uma dupla de operadores. Uma painela vaza oito moldes, cada um com uma peça a ser fundida. Cada peça incluindo seus canais de massalote, pesa 6,25 kg – portanto oito moldes pesam 50 kg, que é a capacidade de peso de cada painela. Assim, cada chegada de ferro fundido (ou início de vazamento) corresponde a 8 peças.

Após o vazamento, as peças fundidas ficam aguardando resfriamento natural. Após resfriadas, os moldes são desmoldados por 2 auxiliares, que vão colocando as peças desmoldadas diretamente em uma caçamba de pá carregadeira, com capacidade para 200 peças, quando são, então, transportadas para a área de acabamento.

A primeira etapa do acabamento é o jateamento com granalhas de aço, realizado por um trabalhador. Por vez são jateadas 75 peças. O tempo considerado desta operação inclui o carregamento da máquina, jateamento e retirada das peças.

Cada peça passa, a seguir, pelo processo de rebarbação, o qual conta com um trabalhador disponível, que faz uma triagem das peças boas (97%), refugando as peças com imperfeições. O tempo de rebarbação considerado incluiu as operações de triagem, posicionamento da peça na bancada, rebarbação e retirada da bancada.

Após a rebarbação, as peças seguem para a usinagem, que já não é mais parte do escopo deste trabalho. Foi considerado um turno de trabalho (de 6h00 às 15h48, com intervalo para almoço de 10h30 às 11h30), cinco dias por semana. Considerou-se que as atividades são preemptivas, ou seja, no fim do turno ou no horário de almoço, os trabalhadores não precisam terminar o que estavam fazendo antes de saírem; o modelo não considera realização de horas-extras (para concluir a produção diária, por exemplo). Também não foram consideradas paradas de intervalo para descanso, para ir ao banheiro, quebra e reparo de máquinas, dentre outras dessa natureza.

### 6.6.4 Coleta de Dados de Processo

Para cada processo foi definido a coleta de 100 amostras de tempo, apresentados na Tabela 6-1 e Tabela 6-2.

Dados levantados							
	Vazamento	Resfriamento	Desmoldagem (s)	Transporte/200 pçs	Jateamento/75 pçs	Rebarbação	Retorno
1	2'47"	30 a 40 segundos	11,54	5'53"	21'11"	3'53"	4,0 a 5,5 minutos
2	3'01"		11,75	6'28"	20'41"	3'09"	
3	3'03"		13,84	5'46"	19'36"	4'00"	
4	3'04"		11,73	6'02"	21'45"	2'35"	
5	3'14"		13,97	5'50"	21'08"	3'24"	
6	2'57"		13,03	5'58"	22'17"	3'41"	
7	2'35"		12,05	6'22"	21'12"	2'36"	
8	3'36"		13,79	6'34"	21'43"	2'37"	
9	2'56"		11,00	6'28"	19'28"	3'00"	
10	2'42"		11,92	6'03"	20'00"	2'42"	
11	2'52"		11,67	6'09"	18'09"	2'17"	
12	2'55"		14,83	5'48"	22'18"	2'23"	
13	3'17"		11,34	6'21"	21'08"	2'47"	
14	3'04"		11,67	6'07"	19'02"	2'25"	
15	3'07"		14,36	6'21"	21'15"	2'00"	
16	3'39"		10,95	6'12"	24'07"	3'04"	
17	3'13"		14,96	6'34"	21'19"	2'09"	
18	2'45"		10,82	6'29"	21'49"	3'22"	
19	3'33"		13,10	5'47"	23'40"	2'25"	
20	2'59"		11,85	6'04"	19'45"	2'29"	
21	2'34"		11,41	5'59"	21'32"	2'54"	
22	2'46"		11,02	6'35"	19'48"	3'22"	
23	2'45"		11,20	5'46"	21'04"	2'36"	
24	2'45"		14,00	5'58"	20'37"	2'31"	
25	2'39"		11,35	6'13"	19'46"	2'40"	
26	3'13"		11,63	6'25"	22'16"	3'09"	
27	2'46"		11,37	6'39"	21'15"	2'11"	
28	3'19"		12,28	6'37"	21'21"	4'09"	
29	3'03"		11,85	6'39"	18'55"	3'51"	
30	2'39"		12,04	6'36"	20'51"	2'55"	
31	2'52"		11,12	5'50"	20'46"	2'07"	
32	3'03"		11,39	6'35"	21'40"	2'42"	
33	3'12"		11,45	6'09"	19'21"	2'57"	
34	2'49"		10,92	6'36"	18'53"	2'06"	
35	2'45"		13,05	6'24"	21'41"	2'14"	
36	3'05"		13,14	6'24"	21'54"	2'27"	
37	3'27"		14,17	6'34"	22'50"	3'26"	
38	2'45"		11,73	6'13"	19'34"	2'08"	
39	3'09"		12,24	5'48"	19'09"	2'06"	
40	3'18"		11,91	5'56"	21'38"	2'45"	
41	2'49"		11,03	6'31"	20'55"	3'04"	
42	3'33"		11,10	6'30"	22'55"	3'20"	
43	3'16"		16,46	6'18"	19'38"	2'40"	
44	3'13"		15,52	6'14"	20'46"	3'22"	
45	3'21"		10,63	5'49"	23'24"	3'54"	
46	3'03"		14,31	6'27"	19'15"	3'01"	
47	2'55"		11,68	5'42"	18'46"	3'24"	
48	2'55"		11,84	5'51"	20'56"	2'43"	
49	3'34"		12,48	6'17"	21'17"	2'36"	
50	3'12"		14,72	6'00"	20'50"	2'25"	
51	3'34"		13,96	6'34"	23'06"	3'37"	
52	2'57"		11,26	6'03"	21'04"	2'10"	
53	2'56"		12,36	5'54"	19'31"	3'48"	
54	3'33"		12,12	6'02"	22'48"	3'24"	

Tabela 6-1- Dados coletados - parte 1.

Dados levantados							
	Vazamento [min]	Resfriamento	Desmoldagem (seg)	Transporte/200 pçs	Jateamento/75 pçs	Rebarbação	Retorno
55	2'57"	30 a 40 segundos	11,10	6'26"	21'20"	2'46"	4,0 a 5,5 minutos
56	3'09"		13,49	5'57"	22'27"	4'21"	
57	2'52"		15,49	6'21"	18'49"	4'25"	
58	3'22"		14,11	5'55"	23'25"	3'32"	
59	3'41"		19,35	5'52"	22'54"	2'53"	
60	3'29"		12,31	6'06"	22'21"	2'27"	
61	3'15"		12,21	6'25"	22'49"	3'13"	
62	3'03"		11,41	6'07"	20'41"	3'18"	
63	3'19"		12,07	5'57"	22'52"	2'23"	
64	3'06"		11,74	6'04"	21'31"	2'16"	
65	3'09"		13,60	5'54"	20'16"	2'58"	
66	3'23"		11,10	6'30"	21'13"	2'02"	
67	3'01"		12,50	6'09"	20'14"	2'35"	
68	2'51"		11,06	5'48"	22'40"	2'19"	
69	3'04"		11,11	5'58"	20'52"	2'48"	
70	3'28"		14,12	6'30"	22'22"	2'23"	
71	3'23"		13,69	5'46"	21'05"	2'21"	
72	3'09"		19,43	6'12"	23'04"	2'41"	
73	3'12"		10,90	6'19"	20'15"	2'19"	
74	2'46"		11,33	5'43"	21'24"	3'15"	
75	3'15"		12,56	5'49"	22'34"	2'43"	
76	3'24"		13,09	5'54"	22'37"	2'51"	
77	3'13"		12,15	5'52"	22'33"	2'34"	
78	2'58"		15,90	6'26"	20'31"	2'22"	
79	3'05"		14,65	6'24"	21'22"	2'28"	
80	3'36"		11,62	5'52"	23'07"	3'17"	
81	3'27"		14,31	6'28"	21'54"	3'05"	
82	3'06"		10,99	6'18"	23'07"	2'31"	
83	2'40"		12,22	6'19"	18'11"	3'00"	
84	3'13"		11,52	5'41"	20'04"	2'34"	
85	3'10"	20,84	6'33"	21'58"	3'57"		
86	3'22"	13,75	5'42"	21'01"	2'22"		
87	2'51"	10,80	6'21"	20'57"	2'53"		
88	3'19"	16,25	6'21"	22'54"	2'41"		
89	2'46"	13,47	6'13"	18'46"	2'15"		
90	3'09"	12,27	6'22"	23'32"	2'31"		
91	3'11"	19,92	6'19"	19'33"	2'54"		
92	3'02"	11,52	6'22"	20'15"	4'44"		
93	2'49"	13,55	5'45"	20'09"	3'25"		
94	3'22"	12,21	5'58"	22'03"	4'22"		
95	2'54"	15,39	6'23"	22'01"	2'54"		
96	3'01"	14,47	6'22"	21'59"	2'05"		
97	3'00"	12,36	6'04"	22'22"	2'12"		
98	2'56"	13,69	6'01"	20'21"	2'24"		
99	3'10"	11,55	6'25"	19'49"	2'58"		
100	3'11"	15,17	6'15"	21'24"	2'03"		

Tabela 6-2 - Dados coletados - parte 2.

### 6.6.5 Análise dos Dados e Determinação da Distribuição de Probabilidades

Os dados foram analisados utilizando-se inicialmente o Minitab<sup>®</sup> para avaliar a variação dos dados na linha de tempo, buscando identificar valores que poderiam não condizer com a realidade dos processos, por ocorrência de algum evento especial ou mesmo pelo descuido na tomada ou registro de tempo pelo funcionário encarregado da coleta dos dados, como exemplificado no item 6.5.3. Os gráficos de valores individuais desta análise encontram-se a seguir, na análise de cada processo.

Após a análise inicial e complementação do número de amostras necessárias (100), os dados passaram a ser analisados no Input Analyser<sup>®</sup> do Arena<sup>®</sup>, para identificar a distribuição de probabilidade de cada processo. Para isto foi plotado o histograma e cada distribuição testada, sendo aquela que melhor se ajusta aos dados coletados, escolhida para utilização no estudo de simulação. A seguir são apresentados os dados e suas distribuições de probabilidades, bem como os gráficos e informações do Minitab<sup>®</sup> e do Input Analyser<sup>®</sup>.

### Vazamento:

Distribuição: Weibull									
Expressão: 2.45 + WEIB(0.732, 2.67)									
Vazamento									
Minutos									
2,78	3,02	3,05	3,07	3,23	2,95	2,58	3,60	2,93	2,70
2,87	2,92	3,28	3,07	3,12	3,65	3,22	2,75	3,55	2,98
2,57	2,77	2,75	2,75	2,65	3,22	2,77	3,32	3,05	2,65
2,87	3,05	3,20	2,82	2,75	3,08	3,45	2,75	3,15	3,30
2,82	3,55	3,27	3,22	3,35	3,05	2,92	2,92	3,57	3,20
3,57	2,95	2,93	3,55	2,95	3,15	2,87	3,37	3,68	3,48
3,25	3,05	3,32	3,10	3,15	3,38	3,02	2,85	3,07	3,47
3,38	3,15	3,20	2,77	3,25	3,40	3,22	2,97	3,08	3,60
3,45	3,10	2,67	3,22	3,17	3,37	2,85	3,32	2,77	3,15
3,18	3,03	2,82	3,37	2,90	3,02	3,00	2,93	3,17	3,18

Tabela 6-3 - Tempos de vazamento.

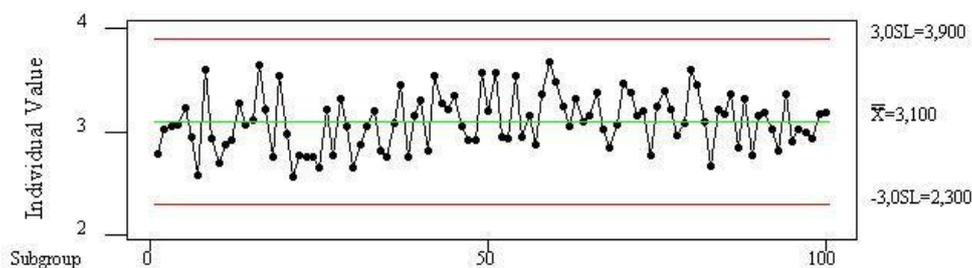
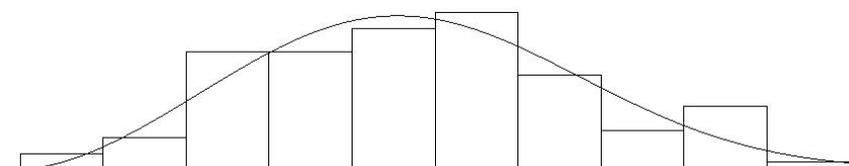


Figura 6-11 - Gráfico de valores individuais para tempos de vazamento.



Distribution:	Weibull
Expression:	2.45 + WEIB(0.732, 2.67)
Square Error:	0.005283
Chi Square Test	Corresponding p-value = 0.739
Kolmogorov-Smirnov Test	Corresponding p-value > 0.15

Figura 6-12 - Histograma dos tempos de vazamento.

**Resfriamento:**

Para este processo não houve a coleta de tempo, porém a empresa indicou de 30 a 40 segundos para resfriamento.

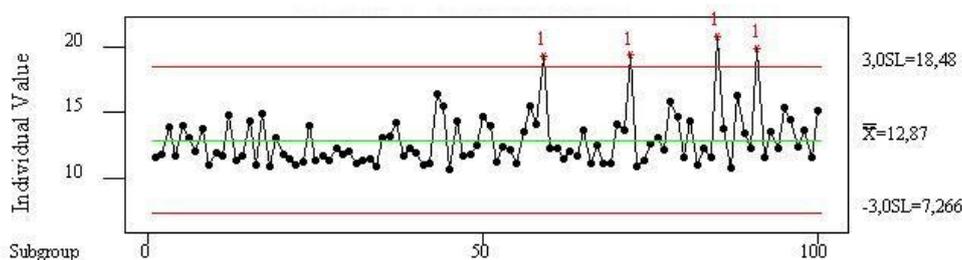
Distribuição:	Triangular	<b>Resfriamento</b>
Expressão:	T(30, 35, 40)	Segundos

**Tabela 6-4** - Tempos de resfriamento.

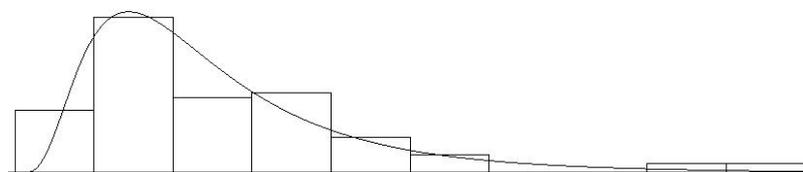
**Desmoldagem:**

Distribuição:	Lognormal	<b>Desmoldagem</b>							
Expressão:	10 + LOGN(2.85, 1.98)	Segundos							
11,54	11,75	13,84	11,73	13,97	13,03	12,05	13,79	11,00	11,92
11,67	14,83	11,34	11,67	14,36	10,95	14,96	10,82	13,10	11,85
11,41	11,02	11,20	14,00	11,35	11,63	11,37	12,28	11,85	12,04
11,12	11,39	11,45	10,92	13,05	13,14	14,17	11,73	12,24	11,91
11,03	11,10	16,46	15,52	10,63	14,31	11,68	11,84	12,48	14,72
13,96	11,26	12,36	12,12	11,10	13,49	15,49	14,11	19,35	12,31
12,21	11,41	12,07	11,74	13,60	11,10	12,50	11,06	11,11	14,12
13,69	19,43	10,90	11,33	12,56	13,09	12,15	15,90	14,65	11,62
14,31	10,99	12,22	11,52	20,84	13,75	10,80	16,25	13,47	12,27
19,92	11,52	13,55	12,21	15,39	14,47	12,36	13,69	11,55	15,17

**Tabela 6-5** - Tempo de desmoldagem.



**Figura 6-13** - Gráfico de valores individuais para tempos de desmoldagem.

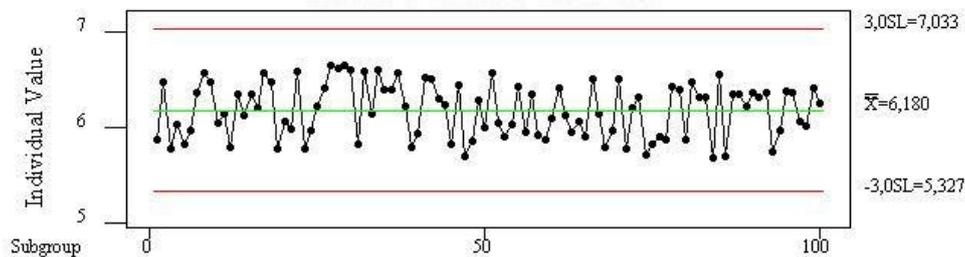
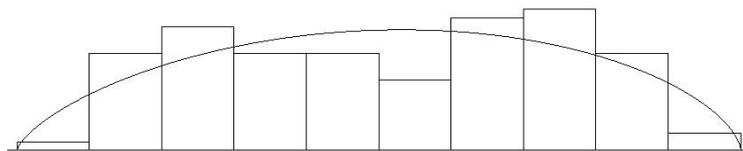


Distribution:	Lognormal
Expression:	10 + LOGN(2.85, 1.98)
Square Error:	0.009735
Chi Square Test	Corresponding p-value = 0.0973
Kolmogorov-Smirnov Test	Corresponding p-value > 0.15

**Figura 6-14** - Histograma dos tempos de desmoldagem.

**Transporte:**

Distribuição: Beta		<b>Transporte</b>							
Expressão: $5.58 + 1.17 * \text{BETA}(1.7, 1.62)$		Minutos/200 peças							
5,88	6,47	5,77	6,03	5,83	5,97	6,37	6,57	6,47	6,05
6,15	5,80	6,35	6,12	6,35	6,20	6,57	6,48	5,78	6,07
5,98	6,58	5,77	5,97	6,22	6,42	6,65	6,62	6,65	6,60
5,83	6,58	6,15	6,60	6,40	6,40	6,57	6,22	5,80	5,93
6,52	6,50	6,30	6,23	5,82	6,45	5,70	5,85	6,28	6,00
6,57	6,05	5,90	6,03	6,43	5,95	6,35	5,92	5,87	6,10
6,42	6,12	5,95	6,07	5,90	6,50	6,15	5,80	5,97	6,50
5,77	6,20	6,32	5,72	5,82	5,90	5,87	6,43	6,40	5,87
6,47	6,31	6,32	5,68	6,55	5,70	6,35	6,35	6,22	6,37
6,32	6,37	5,75	5,97	6,38	6,37	6,07	6,02	6,42	6,25

**Tabela 6-6** - Tempos de transporte.**Figura 6-15** - Gráfico de valores individuais para tempos de transporte.

Distribution:	Beta
Expression:	$5.58 + 1.17 * \text{BETA}(1.7, 1.62)$
Square Error:	0.009906
Chi Square Test	Corresponding p-value = 0.341
Kolmogorov-Smirnov Test	Corresponding p-value > 0.15

**Figura 6-16** - Histograma dos tempos de transporte.**Jateamento:**

Distribuição: Triangular		<b>Jateamento</b>							
Expressão: $\text{TRIA}(18, 21, 24.7)$		Minutos/75 peças							
21,18	20,68	19,60	21,75	21,13	22,28	21,20	21,72	19,47	20,00
18,15	22,30	21,13	19,03	21,25	24,12	21,32	21,82	23,67	19,75
21,53	19,80	21,07	20,62	19,77	22,27	21,25	21,35	18,92	20,85
20,77	21,67	19,35	18,88	21,68	21,90	22,83	19,57	19,15	21,63
20,92	22,92	19,63	20,77	23,40	19,25	18,77	20,93	21,28	20,83
23,10	21,07	19,52	22,80	21,33	22,45	18,82	23,42	22,90	22,35
22,82	20,68	22,87	21,52	20,27	21,22	20,23	22,67	20,87	22,37
21,08	23,07	20,25	21,40	22,57	22,62	22,55	20,52	21,37	23,12
21,90	23,12	18,18	20,07	21,97	21,02	20,95	22,90	18,77	23,53
19,55	20,25	20,15	22,05	22,02	21,98	22,37	20,35	19,82	21,40

**Tabela 6-7** - Tempos de jateamento.

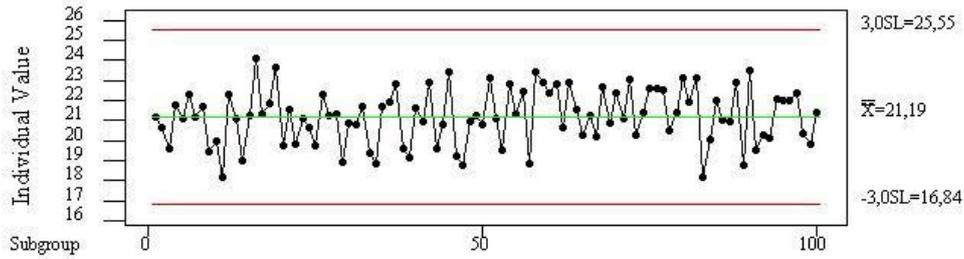
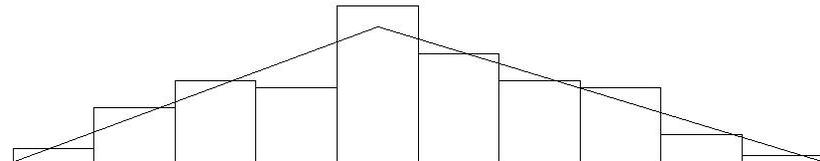


Figura 6-17 - Gráfico de valores individuais para tempos de jateamento.



Distribution: Triangular  
 Expression: TRIA(18, 21, 24.7)  
 Square Error: 0.004654  
 Chi Square Test Corresponding p-value = 0.658  
 Kolmogorov-Smirnov Test Corresponding p-value > 0.15

Figura 6-18 - Histograma dos tempos de jateamento.

**Rebarbação:**

Distribuição:		Weibull								Rebarbação
Expressão:		2 + WEIB(0.95, 1.39)								Minutos
3,88	3,15	4,00	2,58	3,40	3,68	2,60	2,62	3,00	2,70	
2,28	2,38	2,78	2,42	2,00	3,07	2,15	3,37	2,42	2,48	
2,90	3,37	2,60	2,52	2,67	3,15	2,18	4,15	3,85	2,92	
2,12	2,70	2,95	2,10	2,23	2,45	3,43	2,13	2,10	2,75	
3,07	3,33	2,67	3,37	3,90	3,02	3,40	2,72	2,60	2,42	
3,62	2,17	3,80	3,40	2,77	4,35	4,42	3,53	2,88	2,45	
3,22	3,30	2,38	2,27	2,97	2,03	2,58	2,32	2,80	2,38	
2,35	2,68	2,32	3,25	2,72	2,85	2,57	2,37	2,47	3,28	
3,08	2,52	3,00	2,57	3,95	2,37	2,88	2,68	2,25	2,52	
2,90	4,73	3,42	4,37	2,90	2,08	2,20	2,40	2,97	2,05	

Tabela 6-8 - Tempos de rebarbação.

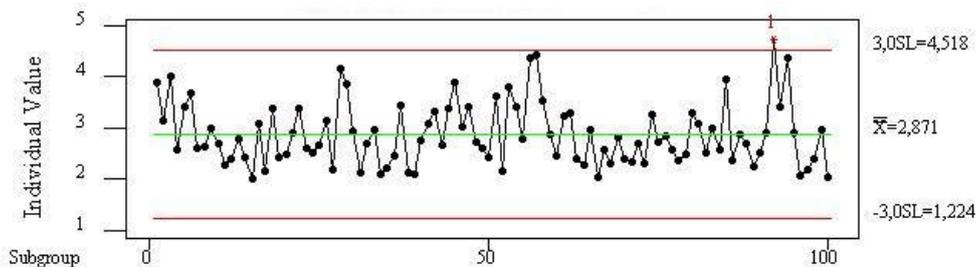
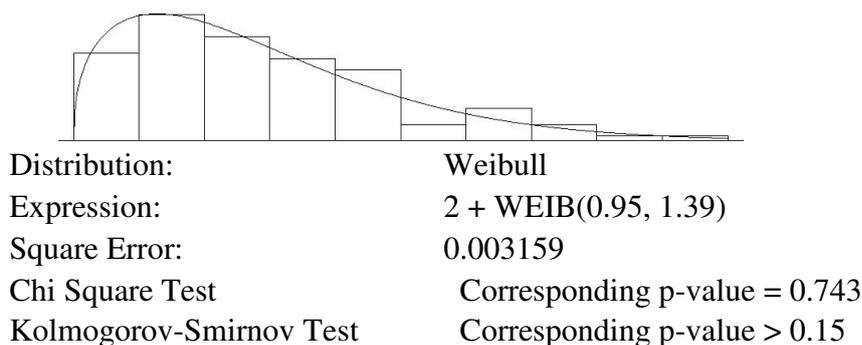


Figura 6-19 - Gráfico de valores individuais para tempos de rebarbação.



**Figura 6-20** - Histograma dos tempos de rebarbação.

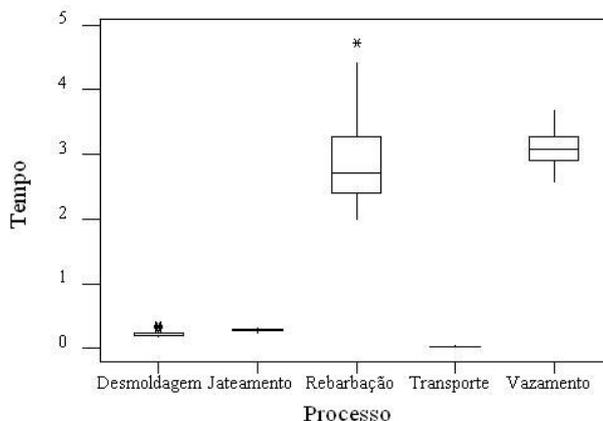
### Retorno e novo enchimento da panela:

Para este processo não houve a coleta de tempo, porém a empresa indicou de 4,5 a 5,5 minutos para toda a operação, apresentado na Tabela 6-9.

Distribuição:	Triangular	<b>Retorno e Enchimento</b>
Expressão:	T(4.5, 5.0, 5.5)	Minutos

**Tabela 6-9** – Tempos de retorno e enchimento da panela.

O gráfico *Boxplot* da Figura 6-21 faz o comparativo dos tempos dos processos, ficando nitidamente evidenciado o desbalanceamento da linha de produção, onde os processos de vazamento e rebarbação estão com tempos de ciclo muito acima dos demais processos.



**Figura 6-21** - Gráfico *Boxplot* com dados dos processos.

Devido à diferença de produtividade entre os processos descritos anteriormente, são formados estoques intermediários de produtos semi-elaborados. Estes estoques vão se formando ao longo do dia e da semana, chegando a congestionar a área da indústria e dificultando a programação de tarefas, que passam a seguir a orientação de prioridades de entregas e não especificamente a uma programação ideal de produção.

Portanto este teste de aderência da metodologia proposta buscará apresentar alternativas para um melhor balanceamento da linha de produção estudada.

### 6.6.6 Construção do Modelo Computacional utilizando o Arena

Diversos aplicativos (softwares) específicos para o desenvolvimento de modelos de simulação existem no mercado. A escolha foi por utilizar o Arena, da Rockwell Softwares, que apresenta uma interface gráfica destinada ao desenvolvimento de modelos, animação e análise estatística de dados de entrada e saída. O Arena adota a abordagem por processos para executar a simulação, modelando o sistema pelas entidades que passam por ele, cooperando entre si e competindo por recursos para execução das operações.

As distribuições apresentadas na Tabela 6-10 foram consideradas no desenvolvimento do modelo.

Processo	Distribuição
Vazamento	$2.45 + \text{WEIB}(0.732, 2.67)$
Refriamento	$\text{TRIA}(30, 35, 40)$
Desmoldagem	$10 + \text{LOGN}(2.85, 1.98)$
Transporte	$5.58 + 1.17 * \text{BETA}(1.7, 1.62)$
Jateamento	$\text{TRIA}(18, 21, 24.7)$
Rebarbação	$2 + \text{WEIB}(0.95, 1.39)$
Retorno / enchimento	$\text{TRIA}(4.5, 5.0, 5.5)$

Tabela 6-10 - Distribuição de probabilidade das durações.

O desenho dos processos e suas interfaces no Arena estão apresentados na Figura 6-22.

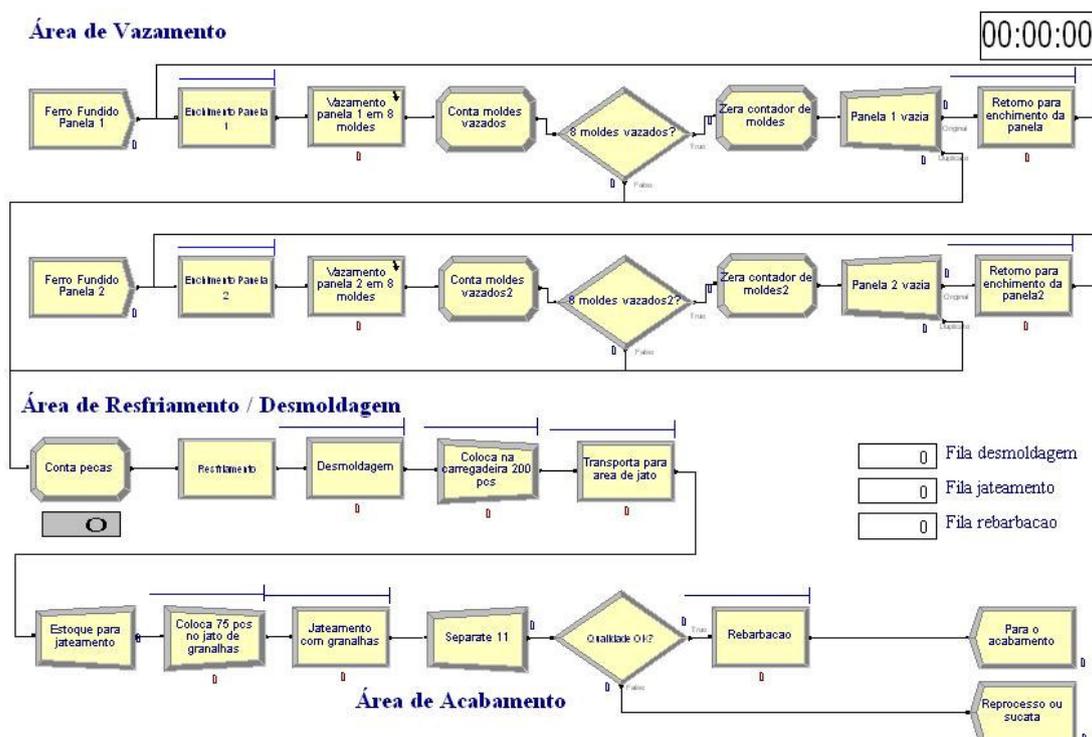


Figura 6-22 - Modelo gerado no Arena.

### **6.6.7 Verificação do Modelo Computacional**

Após a modelagem dos processos, entidades e recursos do sistema em estudo no Arena, passou-se para a verificação do modelo desenvolvido. Esta tarefa se torna mais fácil quando se utiliza o “*debugger*” do Arena (Run\Check model, ou F4), que facilita a localização do erro. Porém, localizar um erro não significa sua solução, que por vezes sim, transforma a tarefa de verificação numa atividade árdua e às vezes frustrante para o modelador. Mas depois de várias correções, consultando supervisores de área e observando o sistema real para efetuar mais correções, o programa rodou satisfatoriamente, apresentando resultados razoavelmente condizentes com o processo de produção da empresa apoiadora.

### **6.6.8 Validação do Modelo Computacional**

Uma das etapas mais importantes da simulação é a validação. Caso os resultados produzidos pelo modelo computacional apresentem um erro muito grande em relação aos valores reais a que se referem, pode haver um erro de lógica no modelo, algum erro quanto aos dados, ou mesmo problemas no modelo conceitual.

Devido à grande diversidade da linha de produtos produzidos ao longo do mês, a validação do modelo foi realizada pela quantidade de peças da linha de produtos escolhida para simulação (em toneladas) produzidas em 1 dia útil de trabalho, sem horas extras. Para validação foram realizadas 30 replicações com duração de 1 dia e a média, quando comparada com a produção real, apresentou-se 8% menor, porém um valor considerado satisfatório devido à grande variabilidade existente no sistema em estudo. Além disso, a elevada taxa de utilização dos operadores da rebarbação e as filas neste processo, obtidas no modelo, são claramente observados no sistema real.

### **6.6.9 Análise de Cenários a Investigar**

“Última etapa de construção de um modelo, a análise de cenários, pode ser vista como a resposta do modelo a uma determinada configuração, ou seja, a resposta de perguntas do tipo: “o que aconteceria se o sistema operasse de determinada forma?”. Estas respostas auxiliam efetivamente o tomador de decisão, uma vez que ele pode testar uma série de alternativas e escolher aquela que julgar a mais adequada para a situação. Esta análise de cenários implica na observação de diversas características do sistema tais como: a taxa de utilização de recursos, gargalos existentes, tempos em fila, etc.” (Pinto e Pinto, 2005).

Foram considerados cinco cenários no estudo de simulação:

Cenário 1: considera 2 duplas de vazadores com 1 panela cada; 1 dupla de auxiliares de desmoldagem e carregadeira / operador; 1 operário para jateamento; e 1 operário para rebarbação.

Cenário 2: cenário 1, acrescentando-se mais uma dupla de vazadores com 1 panela.

Cenário 3: cenário 1, acrescentando-se mais um turno de trabalho na rebarbação (turno 2, das 12h00 às 21h48, com intervalo para o jantar de 17h00 as 18h00).

Cenário 4: cenário 1, acrescentando-se mais uma dupla de vazadores e um turno de trabalho (turno 2) na rebarbação.

Cenário 5: cenário 1, acrescentando-se

- mais uma dupla de vazadores; mais um turno de trabalho na rebarbação (turno 2 citado anteriormente); [igual ao cenário 4]
- mudança no *layout*, posicionando a área de vazamento mais próximo do forno de fusão, reduzindo em 1,0 minuto o tempo de retorno para enchimento da panela; [C5a]
- mudança do *layout*, aproximando-se a área de acabamento da área de vazamento e desmoldagem, reduzindo em 2 minutos o tempo de transporte; [C5b]
- desenvolvimento de sistemas a prova de erros, como sensores de umidade da areia antes da moldagem, para evitar perdas no vazamento e resfriamento e treinamento intensificado das duplas de vazamento, reduzindo a perdas por má qualidade em 1%; [C5c]
- desenvolvimento de dispositivos padronizados para suporte das peças a serem rebarbadas, facilitando o manuseio e fixação na bancada; desenvolvimento de suportes para esmerilhadeira, facilitando sua retirada antes da operação de rebarbação e recolocação posterior, reduzindo-se em 0,5 minuto o tempo total da rebarbação; [C5d]
- desenvolvimento das habilidades dos auxiliares de desmoldagem também no processo de rebarbação.

Obs.: tempos de vazamento, desmoldagem e jateamento inalterados, devido ao fato de não terem sido identificadas oportunidades de melhoria.

### 6.6.10 Experimentação das Alternativas

Na experimentação dos cenários anteriormente relacionados, foram realizadas 30 replicações de 30 dias cada (zerando o sistema e as estatísticas a cada replicação), considerando um tempo de aquecimento de 10 minutos.

Utilizou-se de um computador com processador Intel Pentium 4 de 3,2 GHz e memória RAM de 256 Mb, com um tempo de processamento em torno de 30 minutos para cada corrida de simulação.

### 6.6.11 Análise dos Resultados

Primeiramente foi avaliada a produção total (peças brutas) ao final de cada mês, comparando com a produção de peças rebarbadas, em cada cenário simulado. As diferenças observadas nos cenários 1 e 2 do gráfico da Figura 6-23, é compensada no sistema real com trabalho em horário extraordinário na rebarbação.

Pode-se observar que a inclusão do 2º turno proposto para a rebarbação nos cenários 3, 4 e 5, permite um ganho de produção de peças rebarbadas de até 151%, se comparado com o cenário 1, sendo que no cenário 5, que aplica outros conceitos de manufatura enxuta para melhoria dos processos, tem-se 18% a mais de peças rebarbadas se comparado ao cenário 4. Com o segundo turno e as melhorias baseadas nos conceitos de manufatura enxuta então, reduz-se as horas extras e possibilita a produção a fluir de forma mais contínua.

As diferenças existentes entre a produção total e a produção rebarbada nos diversos cenários, justificaria contratar mais 1 rebarbador ou talvez 2; porém a empresa não achou necessário simular, pois existem dias na semana onde são produzidas peças gigantes (contra peso de guinchos e empilhadeiras), que alivia a área de rebarbação.

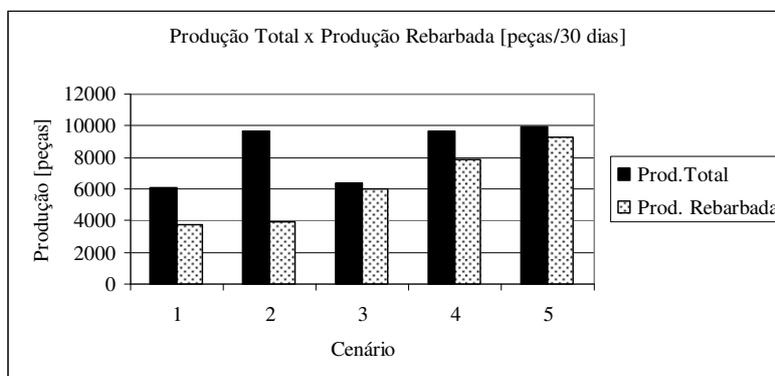
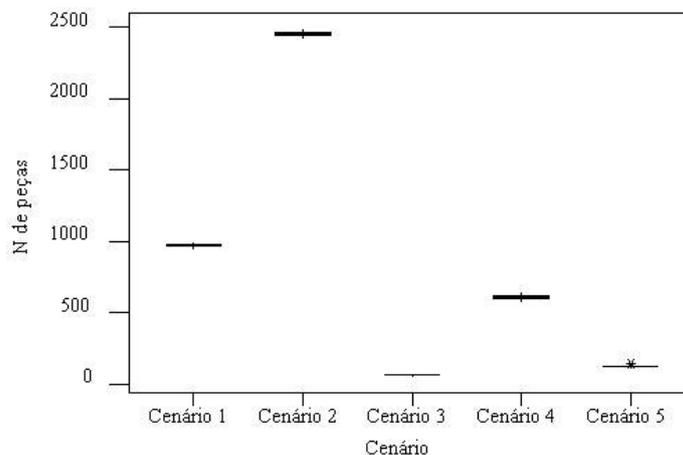


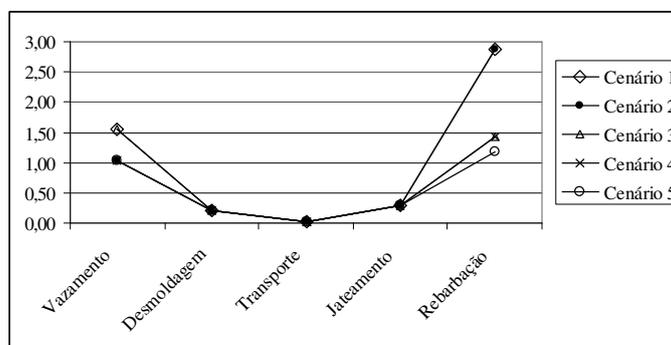
Figura 6-23 - Gráfico de produção frente aos cenários simulados.

Com relação aos estoques intermediários, também fica evidente a melhoria apresentada com os cenários 3, 4 e 5, sendo um pouco menor neste último, quando considerado o volume de peças brutas produzidas. A redução no processo mais crítico, a rebarbação, pode ser observada no gráfico *Boxplot* da Figura 6-24.



**Figura 6-24** - Gráfico *Boxplot* para estoque intermediário na rebarbação.

Considerando-se a necessidade de melhorar o balanceamento da linha de produção, buscando um maior nivelamento dos tempos de ciclo de cada operação, o cenário 5 também se apresentou mais favorável para melhoria geral do sistema de produção estudado, conforme apresentado na Figura 6-25.



**Figura 6-25** - Gráfico de tempos de ciclo.

Os resultados apresentados anteriormente satisfazem aos objetivos definidos para o estudo de simulação, reduzindo as filas de peças para rebarbação e conseqüentemente as horas extras para eliminação destas filas, bem como melhora o balanceamento dos processos, apesar de ainda distante da condição ideal.

Foram também comparados os tempos em que o ferro fundido permanecia no sistema até ser transformado em peça rebarbada, sendo que para o cenário 1 este tempo era de 142,26 horas e para o cenário 5, 26,61 horas.

Como o cenário 5 incluía diversas técnicas de manufatura enxuta, foram realizadas novas corridas de simulação, de forma a observar a contribuição de cada uma delas separadamente. A Tabela 6.11 apresenta os resultados comparados com o cenário 4.

	Comparação com o cenário 4				
	Cenário 5	Cenário 5a	Cenário 5b	Cenário 5c	Cenário 5d
Melhoria específica	Tecn_Lean	Layout	Layout	Poka yoke	Poka yoke
Ganhos	Geral	Ret_pan	Transp_jat	Perda_qual.	Rebarb.
		< 1 min	< 2 min	< 1 %	< 0,5 min
Ganho de Produção	3,4%	3,4%	0,0%	0,0%	0,0%
Ganho de Produção Rebarbada	18,8%	0,0%	0,0%	0,0%	18,8%

**Tabela 6-11** - Comparativo entre os cenários 4 e 5.

Se comparado ao cenário 4, temos uma contribuição no ganho de produção de 3,4% alterando-se o *layout* da área de vazamento (5a). As outras mudanças propostas não influenciam no ganho de produção por estarem após o vazamento. O ganho de peças rebarbadas somente será conseguido com o desenvolvimento dos dispositivos na rebarbação, conseqüentemente contribuirá com a redução de fila antes deste processo (5d). As demais alterações se justificam por fazer fluir a produção (5b) ou reduzir as perdas por má qualidade (5c).

### 6.6.12 Emissão do Relatório e Arquivo do Projeto

Ao final do estudo de simulação, os resultados apresentados nos gráficos da seção 6.6.11 foram colocados em um relatório gerencial e apresentados à direção da empresa, supervisores de área e pessoas chaves dos processos envolvidos. Complementando o relatório, numa reunião com as pessoas relacionadas anteriormente e utilizando-se de um projetor multimídia, rodou-se o modelo de simulação para que todos observassem o comportamento do sistema atual e o comportamento de acordo com os cenários simulados. Surgiu então o interesse em ampliar o estudo de simulação para todas as etapas de produção, trabalho a ser pensado no futuro.

Toda a documentação foi organizada em um arquivo eletrônico, gravado em CD e entregue à direção da empresa.

### 6.6.13 Implementação

No momento do fechamento deste trabalho a empresa já havia considerado a possibilidade da implementação do 2º turno e a mudança de *layout*, com a expansão do galpão na área dos fornos, para permitir a colocação dos moldes mais próximos a estes, que reduziria o tempo total de vazamento.

## 7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Este trabalho de pesquisa buscou desenvolver uma metodologia para utilização de simulação em projetos de manufatura enxuta. Abordou o tema inicialmente sobre duas linhas de trabalho, sendo a primeira a manufatura enxuta e a segunda a simulação computacional. Estas duas linhas iniciais convergiram para a linha central do trabalho, ou seja, a utilização da simulação em projetos de manufatura enxuta.

A metodologia proposta faz duas abordagens distintas, sendo a abordagem organizacional através da contextualização do sistema, iniciando-se pela compreensão e apoio da alta gerência, fator determinante do sucesso da implementação *lean*. Considera também o planejamento do projeto, o desenvolvimento das equipes envolvidas, o entendimento do fluxo de valor e a seleção dos processos a serem simulados.

A segunda abordagem trata da análise do sistema via simulação, através do entendimento sobre o problema a ser estudado e os objetivos do projeto, coleta de dados em número e qualidade suficientes para a determinação das distribuições estatísticas, construção do modelo conceitual e da construção, verificação e validação do modelo computacional. Na seqüência aborda a definição dos cenários a serem simulados, experimentação das alternativas e a análise dos resultados. Por fim trata do encerramento do estudo da simulação, com a emissão do relatório final, passando então para a implementação.

Um teste de aderência da metodologia foi realizado em uma indústria de fundição, demonstrando passo a passo, a utilização da metodologia, buscando confirmar que através de uma modelagem adequada é possível prever com maior precisão os benefícios oriundos da manufatura enxuta em uma empresa. Na simulação dos processos foram verificados os ganhos com a inclusão de mais um turno de trabalho em etapas gargalo, a alteração de *layout* e a implementação de dispositivos à prova de erros, provendo uma base para a tomada de decisão por parte dos gestores de produção.

Como recomendação para pesquisas futuras, sugere-se aplicar a metodologia a diferentes processos de produção e, numa visão mais abrangente, simular toda uma cadeia de um processo produtivo, desde os fornecedores até os clientes finais, passando pela indústria de manufatura, aplicando-se mais conceitos da manufatura enxuta.

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ADAMS, Mel; COMPONATION, Paul; CZARNECKI, Hank; SCHROER, Bernard J. Simulation as a toll for continuous process improvement. In **Proceedings of the 1999 Winter Simulation Conference**. Piscataway, N.J., USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1999, p.766-7731.

ANFAVEA, Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores. Tabela de Produção de Veículos do 1º Semestre de 2007. Disponível em <[http://www.anfavea.com.br/tabelas/autoveiculos/tabela01\\_producao.pdf](http://www.anfavea.com.br/tabelas/autoveiculos/tabela01_producao.pdf)>. Acesso em 30/07/2007.

BARKER, R.C.. Value chain development: An account of some implementation problems. **International Journal of Operations & Production Management**, Vol. 16, No. 10, 1996, 23-36.

BALDWIN, L. P.; ELDABI, T.; HLUPIC, V.; IRANI, Z. Enhancing simulation software for use in manufacturing. **Logistics Information Management**, Vol. 13, Nº 5, 2000, p. 263-270.

BALLOU, Ronald H. **Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos/Logística Empresarial**. 5ª. Edição. Bookman, Porto Alegre, 2006. 616p.

BANKS, Jerry; CARSON II, John S.; NELSON, Barry L.; NICOL, David M. **Discrete – Event System Simulation**. 4<sup>th</sup> Edition. Upper Saddle River, New Jersey, USA: Prentice Hall, 2005. 608p.

BRUNET, Adam Paul; NEW, Steve. Kaizen in Japan: an empirical study. **International Journal of Operations & Production Management**, Vol. 23, No. 12, 2003, 1426-1446.

CHAKRAVORTY, S. & ATWATER, J.B. (1996). A comparative study of line design approaches for serial production systems. **International Journal of Operations & Production Management**, Vol. 16, No. 6, 91-108.

CHAKRAVORTY, S.; ATWATER, J.B. (1995). Do JIT lines perform better than traditionally balanced lines? **International Journal of Operations & Production Management**, Vol. 15, No. 2, 77-88.

CHI, Hsin. Computer simulation models for sustainability. **International Journal of Sustainability in Higher Education**, Vol. 1, Nº 2, 2000, p.154-167.

CONCEIÇÃO, Samuel Vieira. Otimização do fluxo de materiais através da manufatura celular. **Produção**, Vol.15 Nº.2, 2005, p. 235-250.

CONTI, R.; ANGELIS, J.; COOPER, C.; FARAGHER, B.; GILL, C.. The effects of lean production on worker job stress. **International Journal of Operations & Production Management**, Vol. 26, No. 9, 2006, 1013-1038.

DUFFUAA, S. O.; BEN-DAYA, M.; AL-SULTAN, K. S.; ANDIJANI, A. A.. A generic conceptual simulation model for maintenance systems. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, Vol. 7, Nº 3, 2001, p.207-219.

FERREIRA, Aurélio Buarque de Holanda. **Novo Dicionário Aurélio da Língua Portuguesa**. 2ª. Edição. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1986. 1838p.

FORZA, C.. Work organization in lean production and traditional plants: What are the differences? **International Journal of Operations & Production Management**, Vol. 16, No. 2, 1996, 42-62.

GOLDRATT, Eliyahu M.; COX, Jeff. **A Meta: um processo de aprendizagem contínuo**. São Paulo: Educator, 1997. 385p.

GREASLEY, A. The case for the organisational use of simulation. **Journal of Manufacturing Technology Management**, Vol. 15, N° 7, 2004, p.560-566.

GRIMARD, C.; MARVEL, J. H.; STANDRIDGE, C. R.. Validation of The Re-Design of a Manufacturing Work Cell Using Simulation. In **Proceedings of the 2005 Winter Simulation Conference**. Piscataway, N.J., USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2005, p.1386-1391.;

GUPTA, Satyandra K.; PAREDIS, Christiaan F.F.; SINHA, Rajarishi; BROWN, Peter F. Intelligent assembly modeling and simulation. **Assembly Automation**, vol. 21, N° 3, 2001, p.215-235.

HARRISON, A.; STOREY, J.. New wave manufacturing strategies: Operational, organizational and human dimensions. **International Journal of Operations & Production Management**, Vol. 16, No. 2, 1996, 63-76.

HASLETT, Tim; OSBORNE, Charles. Local rules: their application in a *kanban* system. **International Journal of Operations & Production Management**, Vol. 20, No. 9, 2000, p.1078-1092.

HO, Samuel K.; CICMIL, Svetlana. Japanese 5-S practice. **The TQM Magazine**, Vol. 8, N° 1, 1996. p45-53.

IMAI, Masaaki. **Kaizen (Ky'zen): the key to Japan's competitive success**. New York: McGraw-Hill, 1986. 259p.

KELTON, W. David; SADOWSKI, Randall P.; STURROCK, David T. **Simulation with Arena**. 4<sup>th</sup> Edition. New York, USA: McGraw-Hill, 2007. 630p.

LAW, Averill M; KELTON, W. David. **Simulation modeling and analysis**. 2<sup>nd</sup> Edition. New York, USA: McGraw-Hill, 1991. 759p.

LEAN INSTITUTE DO BRASIL. **Léxico Lean**: Glossário ilustrado para praticantes do Pensamento Lean. São Paulo: Lean Institute Brasil, 2003. 98p.

LEE, G. L.; OAKES, I. K.. Templates for change with supply chain rationalization. **International Journal of Operations & Production Management**, Vol. 16, No. 2, 1996, 197-209.

LEE, Hau L.; PADMANABHAN V.; WHANG, Seungjin. Information Distortion in a Supply Chain: The Bullwhip Effect. **Management Science**, vol. 43, N° 4, 1977, p.546-557.

LEE, W.L.; ALWOOD, J.M.. Lean manufacturing in temperature dependent processes with interruptions. **International Journal of Operations & Production Management**, Vol. 23, No. 11, 2003, p.1377-1400.

LIKER, Jeffrey K. **O Modelo Toyota**: 14 princípios de gestão do maior fabricante do mundo. Porto Alegre: Bookman, 2005. 320p.

MAGALHÃES, Marcos Nascimento; LIMA, Antônio Carlos Pedroso. **Noções de Probabilidade e Estatística**. 6<sup>a</sup> Edição. São Paulo: Edusp, 2005. 394p.

NAKAJIMA, Seiichi. **Introdução ao TPM: total productive maintenance**. São Paulo: ICM Internacional Sistemas Educativos, 1989. 108p.

NEUMANN, W.P.; WINKEL, J.; MEDBO, L.; MAGNEBERG, R.; MATHIASSEN, S.E. Production system design elements influencing productivity and ergonomics. **International Journal of Operations & Production Management**, Vol. 26, Nº. 8, 2006, p.904-923.

O'BRIEN, Robert. Avenidas de Linhas de Montagem que dão para a Abundância. In: Biblioteca Científica LIFE: **As máquinas**. Rio de Janeiro: Livraria José Olympio Editora, 1969. 24v.

OHNO, Taiichi. **O Sistema Toyota de produção**: além da produção em larga escala. Porto Alegre: Bookman, 1997. 152p.

OWEN, B. Por dentro da maior montadora do mundo: Com uma cultura baseada na tradição, na melhoria contínua e no trabalho em grupo, a Toyota roubou a liderança da rival GM. In: **Revista Exame**, 03/05/2007, por Cristiane Correa, de Tóquio e Toyota City, 2007.

PEGELS, C. Carl; WATROUS, Craig. Application of the theory of constraints to a bottleneck operation in a manufacturing plant. **Journal of Manufacturing Technology Management**, Vol. 16, Nº. 3, 2005, p. 302-311.

PERERA, T.; LIYANAGE, K.. Methodology for rapid identification and collection of input data in the simulation of manufacturing systems. **Simulation Practice and Theory**, Nº 7, 2000, P. 645-656.

PIDD, M. **Computer Simulation in Management Science**. 4th Edition. New York: John Wiley & Sons Ltd., 1998. 280p.

PINTO, Eduardo.Barbosa; PINTO, Luiz Ricardo. O uso da simulação como ferramenta de apoio à tomada de decisões em uma indústria siderúrgica: estudo de caso. **Anais do SBPO XXXVII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional**, 2005, p.2231-2238.

PINTO, L.R.; SALIBY, E. Análise de confiabilidade de redes usando simulação: estudo de caso dinâmico. **XXVI Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional**. 1994.

PROJECT MANAGEMENT INSTITUTE. **Guia do Conjunto de Conhecimentos em Gerenciamento de Projetos, PMBOK® Guide**. Newtown Square, Pennsylvania, USA, 2004. 389p.

RAHMAN, Shams-ur. Theory of constraints: A review of the philosophy and its applications. **International Journal of Operations & Production Management**, Vol. 18, No. 4, 1998, p.336-355.

RAJAKUMAR, S.; ARUNACHALAN, V.P.; Selladurai, V.. Simulation of Workflow balancing in assembly shopfloor operations. **Journal of Manufacturing Technology Management**, vol 16, No.3, 2005, p.265-281

RIBEIRO, José Francisco Ferreira; MEGUELATI, Smaïne. Organização de um sistema de produção em células de fabricação. **Gestão e Produção**, Vol.9, Nº.1, 2002, p.62-77.

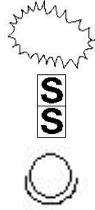
ROTHER, Mike; SHOOK, John. **Aprendendo a Enxergar: mapeando o fluxo de valor para agregar valor e eliminar o desperdício**. São Paulo: Lean Institute Brasil, 2003, 112p.

- SALIBY, Eduardo. Descriptive Sampling: A Better Approach to Monte Carlo Simulation. **Journal of Operational Research Society**. Vol. 41, Nº. 12, 1990. p.1133-1142.
- SHIN, Dooyoung; MIN, Hokey. An analysis of line stop strategy in just-in-time manufacturing. **International Journal of Operations & Production Management**, Vol. 15, No. 9, 1995, p.104-115.
- SHINGO, Shigeo. **O sistema Toyota de Produção do ponto de vista da Engenharia de Produção**. 2ª Edição. Porto Alegre: Bookman, 1996. 291p.
- SILVA, João Martins da. **O ambiente da qualidade na prática- 5S**. Belo Horizonte: Fundação Cristiano Ottoni, 1996. 260p.
- SLACK, Niguel; CHAMBERS, Stuart; JOHNSTON, Robert. **Administração da Produção**. 2ª. Edição. São Paulo: Atlas, 2002. 754p.
- SOUZA, Fernando Bernardi de. Do OPT à Teoria das Restrições: avanços e mitos. **Produção**, Vol.15 Nº.2, 2005, p. 184-197.
- STANDRIDGE, C. R.; MARVEL, J. H.. Why Lean Needs Simulation. In **Proceedings of the 2006 Winter Simulation Conference**. Piscataway, N.J., USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2006, p.1907-1913.
- TOYOTA do Brasil. Tabela de especificações. Disponível em <<http://www.toyota.com.br/showroom/corolla/specs.html>>. Acesso em 30/07/2007.
- VAN HORN, R. L. Validation of Simulation Results. **Management Science**, Vol. 17, p.247-258, 1971.
- VAN HORN, R. L. Validation. In: **The Design of Computer Simulation Experiments**. T. H. Naylor. Durham, N.C.: Duke University Press, 1969.
- VOLKSWAGEN do Brasil. Especificações do Automóvel Gol. Disponível em <<http://www.vw.com.br/NovoSite/>>. Acesso em 06/08/2007.
- VOLLMANN, T. E.; BERRY, W. L.; WHYBARK, D. C.. **Manufacturing Planning and Control Systems**. 4th Edition, Boston, USA: Irwin/McGraw-Hill, 1997, 836p.
- WELGAMA, P. S.; MILLS, R. G. J.. Use of simulation in the design of a JIT System. **International Journal of Operations and Production Management**, Vol. 15, nº. 9, 1995, p.245-260.
- WIKIPEDIA. Assembly Line: 1913 photograph Ford company, USA. Disponível em: <<http://en.wikipedia.org/wiki/Image:A-line1913.jpg>>. Acesso em 01/03/07.
- WIKIPEDIA. Toyota Production System. Disponível em: <[http://en.wikipedia.org/wiki/Toyota\\_Production\\_System](http://en.wikipedia.org/wiki/Toyota_Production_System)>. Acesso em 01/03/07.
- WOMACK, James P.; JONES, Daniel T. **A Mentalidade Enxuta nas Empresas**. 3ª Edição. Rio de Janeiro: Campus, 2004. 408p.
- WOMACK, James P.; JONES, Daniel T.; ROSS, Daniel. **A máquina que mudou o mundo**. 5ª Edição. Rio de Janeiro: Campus, 1992. 347p.
- YAUCH, Charlene A.; STEUDEL, Harold J. Cellular manufacturing for small businesses: key cultural factors that impact the conversion process. **Journal of operations management**, V. 20, Nº. 5, 2002, p. 593-617.

## Anexo 1 – Mapeamento do Fluxo de Valor

\* Adaptado de Rother e Shook (2003)

Ícones de Materiais	Representação	Notas
	Processo	Identifica os processos em uma linha de produção.
	Fontes externas	Clientes, fornecedores e processos externos.
	Caixa de dados	Informações relativas a um processo.
	Caixa de dados	Cálculo do <i>lead time</i> e tempo total de processamento
	Estoque	Quantidade e tempo de estoque.
	Entrega via caminhão	Registra a frequência de recebimentos e entregas.
	Movimento de materiais empurrado	Material “empurrado” para o próximo processo.
	Movimento de materiais para o cliente	
	Supermercado	Peças necessárias para regularizar a produção.
	Retirada	Puxada de materiais de um supermercado.
	Primeiro a entrar primeiro a sair	Transferência entre processos numa seqüência.
Ícones de Informação	Representação	Notas
	Fluxo de informação manual	Programação de produção impressa, por exemplo.
	Fluxo de informação eletrônica	E-mail, por exemplo.
	Informação	Descreve um fluxo de informação.
	<i>Kanban</i> de produção	1 cartão ou dispositivo de aviso sobre a produção.
	<i>Kanban</i> de retirada	Avisa o movimentador para retirar peças.
	<i>Kanban</i> de sinalização	Sinaliza quando o ponto de reposição é alcançado.
	Puxada seqüenciada	Instrui para iniciar a produção de um item.
	Posto de <i>kanban</i>	Local onde o <i>kanban</i> é coletado
	<i>Kanban</i> em lotes	Vários cartões <i>kanban</i> .
	Nivelamento de carga	Nivela o volume e mix de um produto por um tempo.
	Programação “ <i>vá ver</i> ”	Verificação do estoque para ajustar a produção.

**Ícones Gerais****Representação**Necessidade de *kaizen*Estoque de segurança ou  
pulmão

Operador

**Notas**Destaca as melhorias  
necessárias nos processos.Estoque mínimo para  
garantir a produção.Representa uma pessoa  
vista de cima.**Algumas métricas Lean**

**Tempo de Ciclo:** a frequência com que uma peça ou produto é realmente completada em um processo, cronometrada como observado. Também, o tempo que um operador leva para percorrer todos os seus elementos de trabalho antes de repeti-los.

**Tempo de Agregação de Valor:** tempo dos elementos de trabalho que efetivamente transformam o produto de uma maneira que o cliente está disposto a pagar.

**Lead Time:** tempo que uma peça leva para mover-se ao longo de todo um processo ou um fluxo d valor, desde o começo até o fim; visualize cronometrar uma peça marcada que move do início até o fim.

**Takt Time:** tempo de trabalho disponível dividido pela demanda do clientes; representa a taxa de produção que deveria se ter no sistema para atender a real demand do clientes.

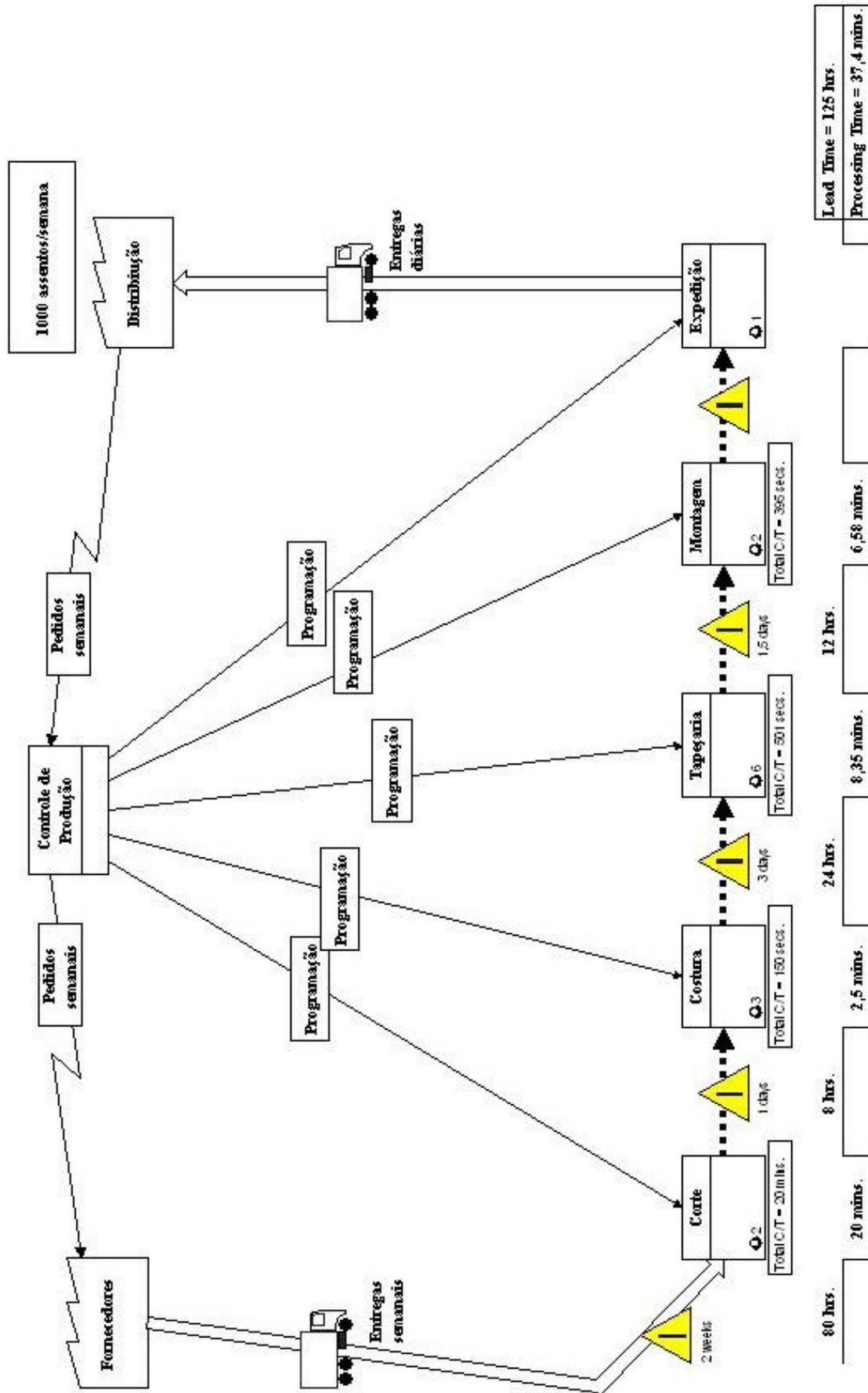


Figura A1.1 - Exemplo de Mapa do Fluxo de Valor

**Anexo 2 – Diagrama de Fluxo de Processo**

DIAGRAMA DE FLUXO DE PROCESSO							
Produto:		Etapa:				1/2	
Descrição da Tarefa							
							
							
							
							
							
							
							
							
							
							
							
							
							
							
							
							
							
							
							
							
							
							
							
							
							
							
<b>Totais</b>							

**Legenda:**  Informação;  Operação;  Movimento;  Inspeção;  Espera;  Estocagem.

Adaptado do livro SLACK, Nigel; CHAMBERS, Stuart; JOHNSTON, Robert. Administração da Produção. 2ª. Edição. São Paulo: Atlas, 2002. 754p.

**Figura A2.1** - Diagrama de fluxo de processo.

**Anexo 3 – Tabelas dos Dados da Simulação****Tabela A3.1** - Tempos de ciclo dos processos simulados.

	Vazamento	Desmoldagem	Transporte	Jateamento	Rebarbação
Cenário 1	1,55	0,21	0,03	0,28	2,87
Cenário 2	1,03	0,21	0,03	0,28	2,87
Cenário 3	1,55	0,21	0,03	0,28	1,43
Cenário 4	1,03	0,21	0,03	0,28	1,43
Cenário 5	1,03	0,21	0,02	0,28	1,18

**Tabela A3.2** - Resultados da simulação - estoque na rebarbação.

Replicação	Fila na rebarbação [peças/30 dias]				
	C1	C2	C3	C4	C5
R1	981	2460	61	611	119
R2	961	2458	59	600	118
R3	973	2446	62	606	122
R4	967	2428	59	575	138
R5	976	2435	62	617	125
R6	970	2465	60	590	134
R7	970	2467	59	603	123
R8	971	2470	63	621	119
R9	961	2475	61	582	117
R10	978	2442	58	594	112
R11	985	2428	57	590	120
R12	954	2446	58	580	119
R13	967	2454	58	612	128
R14	976	2436	61	629	115
R15	964	2451	62	616	118
R16	961	2453	61	600	129
R17	978	2458	61	607	120
R18	962	2427	61	605	125
R19	978	2464	59	617	116
R20	972	2453	60	616	115
R21	948	2449	58	609	126
R22	961	2457	61	604	109
R23	968	2449	59	582	125
R24	970	2468	60	634	140
R25	952	2459	63	585	117
R26	965	2441	60	607	118
R27	975	2440	60	613	133
R28	966	2455	60	595	124
R29	980	2477	59	600	119
R30	968	2479	62	612	116

**Tabela A3.3** - Produção total simulada.

Replicação	Produção Total [30 dias]					Produção Rebarbada [30 dias]				
	C1	C2	C3	C4	C5	C1	C2	C3	C4	C5
R1	6048	9644	6.336	9.628	9960	3680	3956	5966	7848	9287
R2	6056	9644	6.336	9.644	9944	3729	3938	5947	7873	9338
R3	6056	9628	6.344	9.652	9952	3707	3948	5966	7905	9323
R4	6048	9636	6.336	9.620	9952	3722	3972	5962	7861	9285
R5	6056	9636	6.344	9.668	9968	3719	3971	5966	7873	9300
R6	6048	9652	6.336	9.636	9968	3697	3925	5947	7875	9348
R7	6048	9660	6.336	9.636	9968	3691	3949	5955	7864	9308
R8	6056	9636	6.344	9.652	9936	3714	3924	5966	7870	9325
R9	6040	9660	6.336	9.660	9960	3716	3936	5948	7866	9315
R10	6048	9644	6.336	9.652	9936	3699	3969	5957	7887	9280
R11	6048	9608	6.336	9.636	9976	3672	3967	5959	7872	9337
R12	6048	9652	6.336	9.652	9976	3727	3955	5950	7886	9364
R13	6048	9660	6.344	9.628	9976	3710	3938	5966	7878	9295
R14	6048	9636	6.336	9.644	9936	3697	3958	5948	7844	9324
R15	6056	9652	6.344	9.644	9968	3717	3934	5966	7884	9300
R16	6048	9660	6.336	9.636	10000	3718	3957	5945	7877	9380
R17	6056	9652	6.344	9.636	9944	3709	3938	5965	7861	9306
R18	6056	9620	6.344	9.636	9968	3721	3957	5966	7869	9301
R19	6048	9660	6.336	9.652	9968	3712	3951	5949	7864	9341
R20	6056	9636	6.344	9.644	9968	3721	3952	5966	7869	9341
R21	6048	9652	6.336	9.652	9952	3737	3959	5926	7869	9305
R22	6056	9644	6.336	9.660	9968	3720	3955	5951	7894	9323
R23	6048	9636	6.344	9.609	9952	3693	3928	5966	7865	9315
R24	6040	9660	6.344	9.652	9968	3705	3934	5966	7862	9293
R25	6056	9652	6.344	9.668	9968	3733	3974	5954	7883	9377
R26	6048	9652	6.336	9.636	9920	3685	3944	5956	7852	9267
R27	6048	9660	6.336	9.644	9984	3694	3972	5955	7860	9320
R28	6048	9652	6.336	9.644	9968	3698	3941	5956	7862	9299
R29	6056	9644	6.336	9.636	9952	3702	3944	5957	7887	9332
R30	6048	9660	6.336	9.636	9968	3717	3948	5949	7879	9358

Anexo 4 – Cenários Simulados

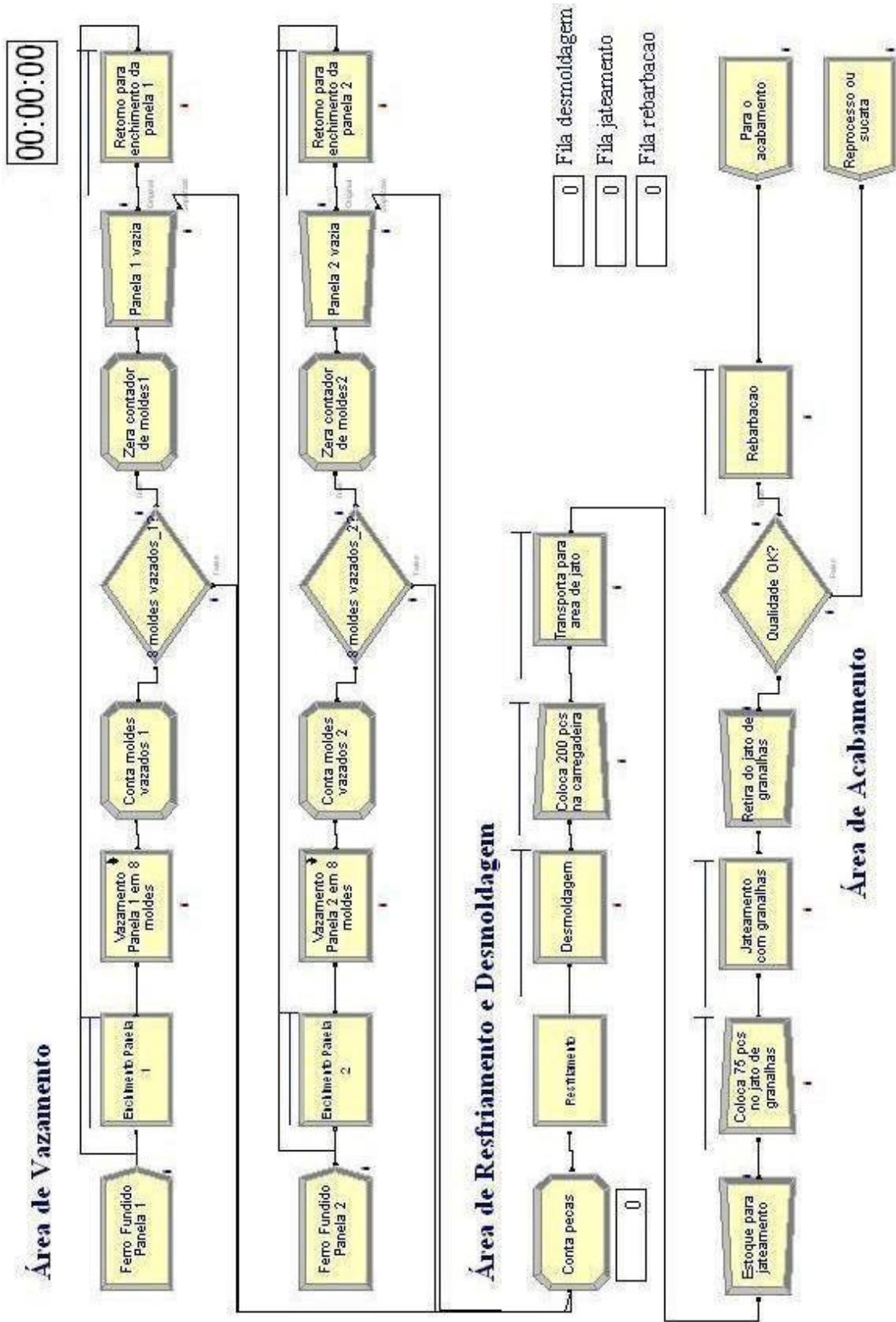


Figura A4.1 - Cenário 1.

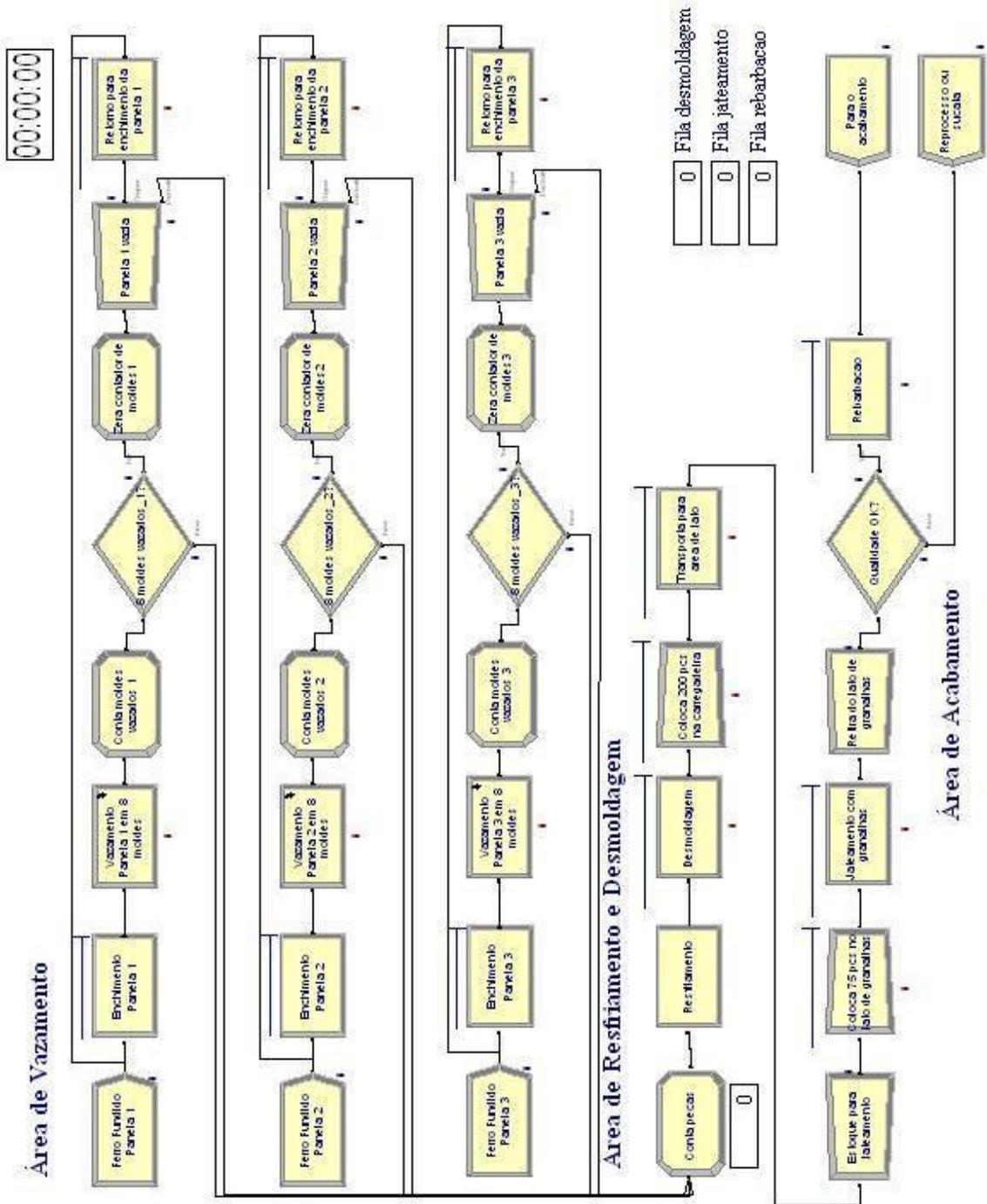


Figura A4.2 - Cenário 2.

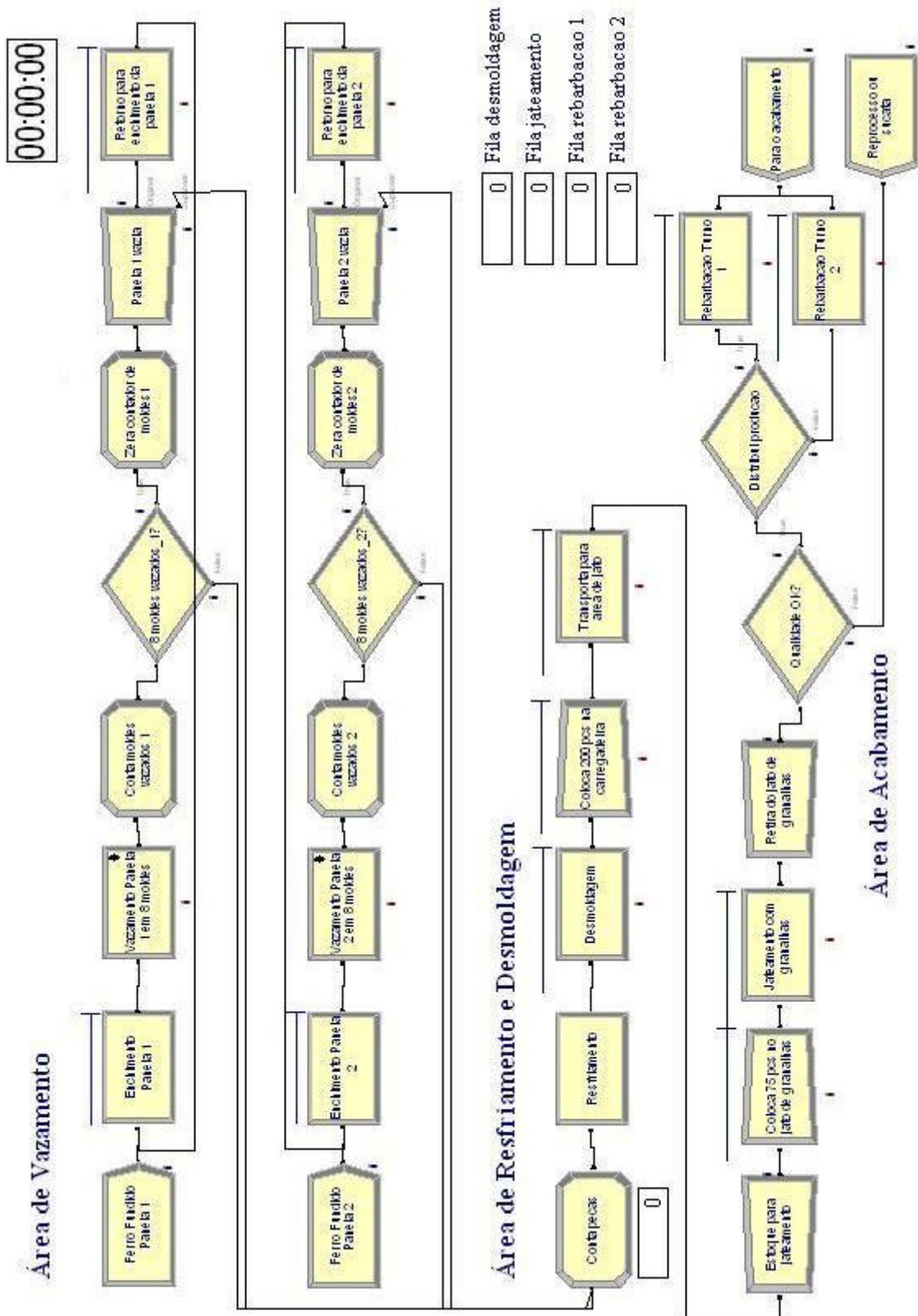


Figura A4.3 - Cenário 3.

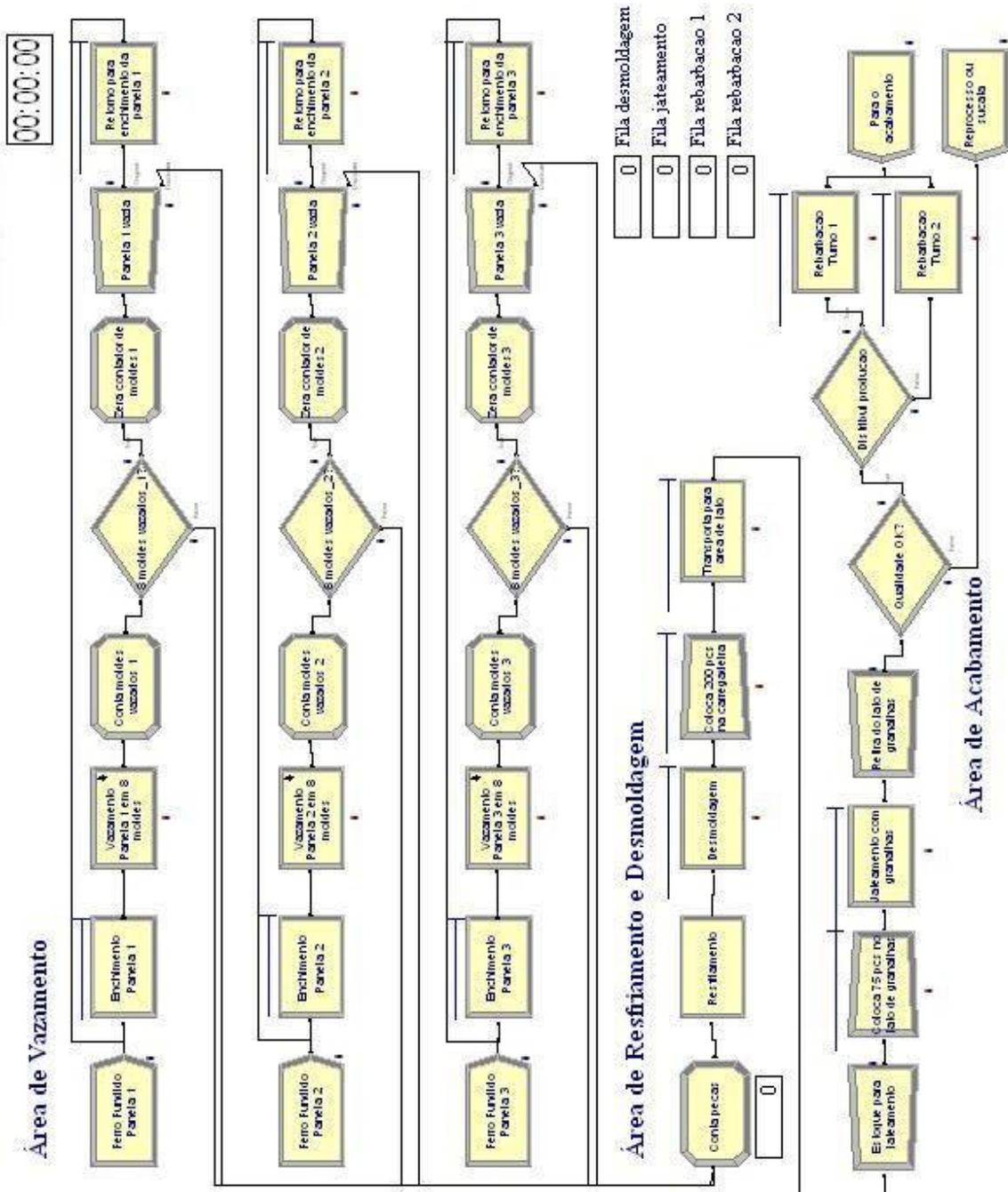


Figura A4.4 - Cenário 4.



# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)