

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA  
TESE DEFENDIDA POR CARLOS EDUARDO D'ARAÚJO  
VILAÇA LOBO E APROVADA PELA  
COMISSÃO JULGADORA EM 24 / 02 / 97.

  
ORIENTADOR

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**  
**Área de Materiais e Processos de Fabricação**

**PROPOSTA DE METODOLOGIA PARA  
INCREMENTO DO DESEMPENHO DA  
MANUFATURA ATRAVÉS DA TÉCNICA DE  
SIMULAÇÃO**

Autor : **Carlos Eduardo d'Araujo Vilaça Lobo**

Orientador : **Prof. Dr. Oswaldo Luiz Agostinho**

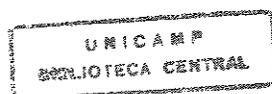
Curso : Engenharia Mecânica

Área de Concentração : Fabricação

Dissertação de mestrado apresentada à comissão de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

24 de fevereiro de 1997

Campinas - Brasil



195046

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**

**FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**PROPOSTA DE METODOLOGIA PARA  
INCREMENTO DO DESEMPENHO DA  
MANUFATURA ATRAVÉS DA TÉCNICA  
DE SIMULAÇÃO**

Autor :Carlos Eduardo d'Araujo Vilaça Lobo

Orientador :Prof. Dr. Oswaldo Luiz Agostinho

UNIDADE	BC		
N.º CHAMADA	T/UNICAMP		
	L786P		
V.	Ex.		
TOMOS	BC/30393		
PROC.	28/197		
C	<input type="checkbox"/>	D	<input checked="" type="checkbox"/>
PREÇO	R. \$	11,00	
DATA	22/05/97		
N.º CPD			

CM-00097723-1

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA  
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

L786p Lobo, Carlos Eduardo d'Araújo Vilaça  
Proposta de metodologia para incremento do desempenho da manufatura através da técnica de simulação / Carlos Eduardo d'Araújo Vilaça.--Campinas, SP: [s.n.], 1997.

Orientador: Oswaldo Luiz Agostinho.  
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica

1. Engenharia de produção. 2. Desempenho. 3. Métodos de simulação. 4. Just-in-time. I. Agostinho, Oswaldo Luiz. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

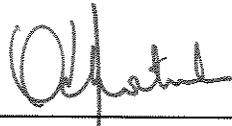
**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**PROPOSTA DE METODOLOGIA PARA INCREMENTO  
DO DESEMPENHO DA MANUFATURA ATRAVÉS DA  
TÉCNICA DE SIMULAÇÃO**

**Autor : Carlos Eduardo d'Araujo Vilaça Lobo**

**Orientador : Prof. Dr. Oswaldo Luiz Agostinho**



---

**Prof. Dr. Oswaldo Luiz Agostinho**



---

**Prof. Dr. Alfredo Colenci Junior**



---

**Prof. Dr. Antonio Batocchio**

Campinas, 24 de fevereiro de 1997

A minha esposa e minha filha

## **Agradecimentos**

Este trabalho não poderia ter terminado sem a ajuda de diversas pessoas às quais presto a minha homenagem :

O Prof. Dr. Oswaldo Luiz Agostinho pela orientação da presente pesquisa e durante todo o transcurso do mestrado.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, CNPq, pela concessão da bolsa de estudos.

A empresa Eaton Truck Components por ceder os dados que foram essenciais para o desenvolvimento da dissertação.

A todos professores e funcionários de Departamento de Engenharia de Fabricação, pela ajuda e facilidades brindadas na execução deste trabalho.

A todos os amigos da pós-graduação de Departamento de Engenharia de Fabricação.

## Sumário

Dedicatória		iii
Agradecimentos		iv
Sumário		v
Lista de Figuras		x
Lista de Tabelas		xii
Nomenclatura		xiii
Resumo		xiv
Abstract		xv
<b>Capítulo 1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>01</b>
1.1.	Objetivo do trabalho	02
1.2.	Conteúdo do trabalho	02
<b>Capítulo 2</b>	<b>ESTRATÉGIA DE DECISÃO, MEDIÇÃO DE DESEMPENHO E TÉCNICAS DE GESTÃO DA PRODUÇÃO</b>	<b>04</b>
2.1.	Introdução	04
2.2.	Evolução da manufatura e globalização dos mercados nacionais	04
2.3.	Estratégia de decisão	06
2.4.	Manufatura de Classe Mundial e Medição de Desempenho	08

2.4.1.	Medidores que inibem a melhoria da manufatura	10
2.4.2.	Medidas de desempenho que agregam valor ao negócio	11
2.4.3.	Medidas de Desempenho	13
2.5.	Técnicas de gestão da produção	15
2.5.1.	<i>Just-In-Time</i>	15
2.5.1.1.	Princípios de funcionamento do JIT	16
2.5.1.2.	Controle da produção - <i>Kanban</i>	18
2.5.1.3.	Dimensionamento dos <i>Kanbans</i>	20
2.5.2.	Teoria das Restrições	21
2.5.2.1.	Princípios de funcionamento da Teoria das Restrições	21
2.5.2.2.	Variáveis de controle da Teoria das Restrições	23
2.5.2.3.	Restrições ao melhor desempenho da manufatura	24
2.5.2.4.	Sincronização da manufatura	25
2.5.3.	Comparação entre o <i>Just-In-Time</i> e a Teoria das Restrições: vantagens e desvantagens	27
2.6.	Comentários Finais	29
<b>Capítulo 3</b>	<b>A TÉCNICA DE SIMULAÇÃO DE EVENTOS DISCRETOS</b>	<b>31</b>
3.1.	Introdução	31

3.2.	Definição	32
3.3.	A técnica de simulação frente a soluções analíticas: vantagens e desvantagens	33
3.4.	Possíveis aplicações para a simulação	35
3.4.1.	A simulação na administração de negócios	35
3.4.2.	A simulação na manufatura	36
3.5.	Classificação dos sistemas e modelos de simulação	38
3.6	Metodologia de simulação de eventos discretos	40
3.7.	Comentários finais	48
<b>Capítulo 4</b>	<b>APLICAÇÃO DA SIMULAÇÃO DE EVENTOS DISCRETOS E DAS TÉCNICAS DE GERENCIAMENTO DA PRODUÇÃO EM BUSCA DE PADRÕES DE CLASSE MUNDIAL</b>	<b>49</b>
4.1.	Introdução	49
4.2.	Utilização da simulação para medição do desempenho	49
4.3.	Análise das medidas de desempenho e dos fatores que as influenciam	55
4.4.	Utilização da Simulação de eventos discretos no Apoio à decisão	59

4.5.	Integração dos modelos de simulação e gerenciamento da produção através da medição do desempenho	61
4.6.	Metodologia de implementação do ciclo de melhorias proposto	62
4.7.	Comentários finais	64
<b>Capítulo 5</b>	<b>APLICAÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA</b>	<b>65</b>
5.1.	Introdução	65
5.2.	Descrição do ambiente de implementação	65
5.3.	Razões para implementação do ciclo de melhoria contínua no ambiente estudado	66
5.3.1.	Objetivos do estudo	66
5.4.	Descrição do estudo de caso	67
5.4.1.	Análise do sistema e definição de metas	67
5.4.2.	Formulação do modelo e análise da estrutura de dados	68
5.4.2.1.	Levantamento de dados	68
5.4.3.	Construção e validação do modelo	69
5.4.4.	Elaboração e execução de experimentos estatísticos - Leitura das medidas de desempenho	70
5.4.5.	Determinação da influência dos fatores de controle nas medidas de desempenho	74

5.4.6.	Otimização do modelo	80
5.5.	Comentários finais	83
<b>Capítulo 6</b>	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</b>	<b>85</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>87</b>
	<b>BIBLIOGRAFIAS CONSULTADAS</b>	<b>90</b>

## Lista de figuras

Figura 2.1.	Tipos de decisões encontradas em manufatura	07
Figura 2.2.	Transformação dos objetivos estratégicos	10
Figura 2.3.	Pirâmide de desempenho	12
Figura 2.4.	Produção Enxuta	17
Figura 2.5.	Empurrando e puxando a produção	18
Figura 2.6.	Tipos de <i>Kanbans</i>	19
Figura 2.7.	As medidas operacionais e o resultado final	24
Figura 3.1.	O papel da simulação no chão-de-fábrica	36
Figura 3.2.	Uso da simulação na manufatura	38
Figura 3.3.	Métodos de análise de resultados	48
Figura 4.1.	Medição de produtividade	55
Figura 4.2.	Relação entre as medidas de desempenho e seus fatores	57
Figura 4.3.	Integração dos sistemas de informação	60
Figura 4.4.	Ciclo de melhoria contínua	61
Figura 4.5.	Implementação do ciclo de melhoria contínua	63
Figura 5.1.	Processo de fabricação	67
Figura 5.2.	Tempo médio do ciclo de produção de cada componente	71
Figura 5.3.	Giros de inventário no ano	72
Figura 5.4.	Produtividade	72

Figura 5.5.	Capacidade ociosa	73
Figura 5.6.	Movimentação de materiais	73
Figura 5.7.	Influência dos fatores sobre o estoque em processo	75
Figura 5.8.	Influência dos fatores sobre a utilização das células de desbaste	76
Figura 5.9.	Influência dos fatores sobre a utilização do forno	76
Figura 5.10.	Influência dos fatores sobre a utilização do shot peening	77
Figura 5.11.	Influência dos fatores sobre a utilização das células de acabamento	77
Figura 5.12.	Influência dos fatores sobre o tempo médio do ciclo de produção	78
Figura 5.13.	Influência dos fatores sobre o tempo de quebra das células de desbaste	78
Figura 5.14.	Influência dos fatores sobre o tempo de quebra das células de acabamento	79
Figura 5.15.	Tempo médio do ciclo de produção de cada componente	81
Figura 5.16.	Giros de inventário no ano	82
Figura 5.17.	Produtividade	82
Figura 5.18.	Capacidade ociosa	83
Figura 5.19.	Movimentação de materiais	83

## Lista de tabelas

Tabela 2.1.	Medidas de desempenho que não agregam valor	11
Tabela 2.2.	Comparação do JIT com a Teoria das Restrições	29
Tabela 3.1.	Comparação da técnica de simulação com métodos analíticos	34
Tabela 3.2.	Aplicabilidade da técnica de simulação nas diversas áreas	35
Tabela 3.3.	Distribuições estatísticas	43
Tabela 3.4.	Matriz do projeto de experimentos fatorial total para três fatores	46
Tabela 4.1.	Fatores de controle de desempenho	56
Tabela 5.1.	Comparação entre softwares de simulação	70
Tabela 5.2.	Projeto de experimentos	74
Tabela 5.3.	Fatores de controle <i>versus</i> Medidas de desempenho	80

## Nomenclaturas

### Siglas

MPS	Plano Mestre de Produção
JIT	Just-In-Time
MRP II	Planejamento dos Recursos da Manufatura
TOC	Teoria das Restrições
TPC	Tambor-Pulmão-Corda
D/P	Taxa entre Tempo de atendimento a demanda e o Tempo do ciclo de produção
TQM	Gerenciamento Total da Qualidade

## Resumo

LOBO, Carlos Eduardo d'Araujo Vilaça, Proposta de metodologia para incremento do desempenho da manufatura através da técnica de simulação, Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade de Campinas, 1996, 90 p. Tese (Mestrado).

A evolução dos mercados consumidores nos últimos 90 anos possibilitou o surgimento da Manufatura de Classe Mundial. Neste trabalho é abordado quais são suas premissas e principalmente, como avaliar o desempenho nessas indústrias.

São abordadas duas técnicas de Gestão da Produção - *Just-In-Time* e a Teoria das Restrições. São apresentados as suas variáveis de controle e os princípios nos quais elas se baseiam.

Neste contexto é proposta a utilização conjunta da simulação de eventos discretos e das técnicas de gerenciamento da produção, para criação de um ciclo de melhoria contínua em busca de padrões de classe mundial.

A partir das medidas de desempenho apresentadas, constrói-se um ciclo de melhorias contínuas, utilizando-se a simulação de eventos discretos e as técnicas de gerenciamento. Obtém-se a melhoria do desempenho através da avaliação da influência das variáveis de controle das técnicas de gerenciamento - que serão chamados de fatores de controle, nos índices de desempenho medidos com a simulação. Deste modo, é possível modificar-se o sistema real e realimentar-se o modelo de simulação, completando o ciclo.

Através de um estudo de caso realizado em uma empresa de autopeças, pode-se aplicar a metodologia proposta. São descritas todas as etapas do processo de implementação desde o levantamento dos dados, construção do modelo, as leituras das medidas de desempenho, até as propostas para melhoria do processo de manufatura.

## Abstract

LOBO, Carlos Eduardo d'Araujo Vilaça, Proposta de metodologia para incremento do desempenho da manufatura através da técnica de simulação, Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade de Campinas, 1996, 90 p. Tese (Mestrado).

The evolution of consumers market in the last ninety years hence forth towards the world class manufacture. This research approaches the basic concepts and mainly, evaluate the way this industries measure their performance.

Two techniques of Production Management: Just-In-Time and Theory of Constraints were evaluated. Their control variables and the principals in which they are based were analized.

In this envaroment, it is proposed the simultaneous use of Descret Event Simulation and the techniques of Production Management, to create a continuous improvement cycle to search World Class Standards.

From the performance measures showed, builds a continuous improvement cycle, using Descret Event Simulation and the techniques of Production Management. The performance improvement is obtained by evaluating the influence of the control variables - named "control factors" - in the performance measures valued with simulation. So, it is possible to change the real system and feedback the simulated model, completing the cycle.

An automotive components factory was used to apply this methodology. All the procedures to implement this technique, since the data aquirement until the construction of the model, ending the cycle.

# Capítulo 1

## Introdução

Nos últimos anos, o mundo dos negócios vem sofrendo bruscas modificações. A partir do ajuste econômico internacional ocorrido na década de 70 com o primeiro choque do petróleo, o ritmo com que os mercados consumidores se integravam precipitou-se, vislumbrando um verdadeiro mercado global - o que se intensificou muito nos últimos anos.

Esta globalização dos mercados exigiu das empresas produtos mais baratos, melhores e diferenciados. Nichos de mercado onde apenas uma empresa atua, tendem a deixar de existir. Atualmente o consumidor tem a opção de escolha.

Para atender a esses novos desafios de mercado os administradores voltaram-se para dentro e elegeram a manufatura como principal fonte de competitividade. A partir desta premissa, ou seja, da busca pela competitividade na manufatura, surgiram novas técnicas de gestão da produção, como a produção enxuta e a Gestão Total da Qualidade.

Esta crescente busca por competências que diferenciam uma empresa das outras, frente ao mercado consumidor, alterou profundamente a fisionomia da manufatura<sup>1</sup>. Atualmente as empresas que correspondem as necessidades do mercado são enquadradas na denominação de Manufatura de Classe Mundial, capazes de competir e vencer em mercados cujas as barreiras alfandegárias não inviabilizem esse movimento.

---

<sup>1</sup> Define-se manufatura de bens como um sistema que integra seus diferentes estágios, necessitando para isto dados de entrada definidos para se obter os resultados esperados. Os dados de entrada podem ser materiais em bruto e/ou dados, que devem ser processados, utilizando-se de vários componentes auxiliares do sistema, tais como ferramentas de corte, dispositivos de fixação e sensores de dados para retorno de informações.

Para tornar-se uma Manufatura de Classe Mundial, as empresas têm de aplicar uma série de metodologias e tecnologias existentes, tais como o *Just-In-Time* (JIT), a Teoria das Restrições (TOC), etc. Estas técnicas tendem melhorar a gestão e a programação da manufatura, permitindo que as empresas se tornem competitivas.

No chão-de-fábrica, isto significa aplicar os recursos disponíveis. Portanto, faz-se necessário o estudo detalhado das alternativas para produção, para obter o benefício dos recursos existentes. Porém, esta análise é inviável sem uma metodologia adequada, devido a sua grande complexidade.

Nesse contexto a simulação de eventos discretos torna-se uma ferramenta de grande valor para a tomada de decisão.

## **1.1. Objetivos do trabalho**

Os objetivos deste trabalho são:

- Desenvolver uma metodologia para otimização da manufatura, através de um ciclo de melhoria contínua, utilizando-se simulação de eventos discretos.

A partir da seleção dos fatores de controle propor uma metodologia para otimização da manufatura.

- Avaliar o desempenho da manufatura segundo padrões de Classe Mundial.

Baseado nos métodos adotados em manufaturas de classe mundial, utilizar-se-á a simulação de eventos discretos para medir-se o desempenho da manufatura.

- Analisar a influência dos fatores de controle em um sistema de manufatura.

Determinar e medir a influência das variáveis que determinam o desempenho da manufatura, através dos fatores de controle e realizar a realimentação.

## **1.2. Conteúdo do trabalho**

O presente trabalho está estruturado em seis capítulos, cujo conteúdo é apresentado a seguir.

O Capítulo 2 apresenta a evolução dos mercados consumidores nos últimos 90 anos. Em seguida, são mostradas as condições que tornaram possível o surgimento da Manufatura de Classe Mundial, quais são suas premissas e principalmente, quais os parâmetros para avaliar o desempenho destas indústrias.

Posteriormente, são definidas duas técnicas de Gestão da Produção - *Just-In-Time* e a Teoria das Restrições.

O Capítulo 3 apresenta a simulação de eventos discretos. Comparam-se essas suas características com outras técnicas analíticas, mostrando suas vantagens e desvantagens. Destacam-se ainda, as principais áreas de aplicação, assim como, os trabalhos realizados nessas áreas. Por fim, apresenta-se uma metodologia de aplicação da simulação e as técnicas utilizadas para análise dos resultados oriundos da simulação.

No Capítulo 4 propõem-se a utilização conjunta da simulação de eventos discretos e das técnicas de gerenciamento da produção, para criação de um ciclo de melhoria contínua em busca de padrões de Classe Mundial. Obtém-se a melhoria de desempenho com a avaliação da influência das variáveis de controle das técnicas de gerenciamento, nos índices de desempenho medidos com a simulação de eventos discretos.

No Capítulo 5 descreve-se o estudo de caso no qual se aplicou a metodologia de implementação do ciclo de melhoria contínua. Inicialmente, faz-se uma descrição do ambiente de implementação. Descreve-se as etapas do processo, como levantamento dos dados, a construção do modelo, as leituras das medidas de desempenho, até as propostas para melhoria do processo de manufatura. Finalmente, são apresentados os resultados.

O Capítulo 6 estabelece as conclusões do presente trabalho, sugerindo algumas recomendações para posteriores estudos.

## **Capítulo 2**

### **Estratégia de Decisão, Medição de Desempenho e Técnicas de Gestão da Produção**

#### **2.1. Introdução**

O presente capítulo apresenta a evolução dos mercados consumidores nos últimos 90 anos. Essa evolução motivou a busca constante da excelência, atualmente conhecida como Manufatura de Classe Mundial [Schonberger, 1986].

Posteriormente, apresenta-se as condições que tornaram possível o surgimento da Manufatura de Classe Mundial, quais são suas premissas e principalmente, quais os parâmetros corretos para a avaliação do desempenho nessas indústrias.

Em seguida, são definidas duas técnicas de Gestão da Produção - *Just-In-Time* e a Teoria das Restrições. São apresentados os seus fatores de controle e os princípios nos quais elas se baseiam.

#### **2.2. Evolução da manufatura e globalização dos mercados nacionais**

Desde as fábricas artesanais de automóveis, do final do século XIX, passando pelos métodos desenvolvidos por Ford e pelos novos conceitos organizacionais introduzidos por Sloan em 1930, na General Motors, as empresas acostumaram a produzir apenas para mercados locais, onde o consumidor final tinha pouco poder de barganha. Não existiam variações de um mesmo produto para que o consumidor pudesse escolher qual se adaptava melhor as suas necessidades - como disse Ford [Johnson, 1994] no início do século, *o cliente pode escolher qualquer cor para o seu carro desde que seja preta.*

Segundo Coutinho et alli [1994], a partir de 1950 este quadro começou a mudar. Ocorreu um processo de integração da economia mundial, o qual foi fruto da iniciativa de transnacionalização das grandes empresas americanas, em uma época em que a hegemonia americana era muito expressiva. Em contrapartida a este movimento, no final da década de 50, as empresas européias iniciaram seus próprios movimentos de transnacionalização como resposta a ameaça representada pelas indústrias americanas nos seus mercados domésticos.

No final da década de 60 e início dos anos 70, a crise do dólar como moeda pivô do mercado internacional, aliada a crescente desregulamentação financeira permitiu o surgimento do primeiro mercado transnacional, o “euromercado” - fundamentado em movimentos políticos em busca de proteção para os seus mercados domésticos e força para atuar em mercados externos.

Este novo mercado, alimentado a partir de 1973 pelos petrodólares, ganhou força e iniciou uma nova fase de integração da economia mundial. Essa fase foi caracterizada pelos grandes empréstimos feitos pelos países desenvolvidos, aos países em desenvolvimento. Esses empréstimos podem ser caracterizados como o primeiro passo para a integração de economias geograficamente separadas. Através desses empréstimos, aumentou-se o poder de barganha dos países industrializados junto ao resto do mundo, em relação as suas políticas econômicas. Assim, incrementou-se a velocidade de integração dos mercados, formando um mercado verdadeiramente globalizado [Coutinho, 1994].

Como consequência natural a estes movimentos, as empresas foram obrigadas a buscar continuamente vantagens competitivas que lhes assegurassem a permanência nesse novo mercado que surgia. Inicialmente essa vantagem ficou restrita principalmente ao mundo dos custos. A década de 50 foi marcada pela busca desenfreada da redução dos custos de produção. Posteriormente, uniu-se ao custo, a qualidade, na década de 70; a flexibilidade de produção, na década de 80; e a redução do tempo de resposta as necessidades do mercado consumidor, na década de 90 [Agostinho, 1995].

Essa crescente busca por competência que diferencia uma empresa das outras, frente ao mercado consumidor, mudou a fisionomia da Manufatura. Nas décadas de 70 e 80, as mudanças tecnológicas se aceleraram e revolucionaram os métodos de produção através da introdução da tecnologia da informação e da micro eletrônica. O aprofundamento da desregulamentação financeira e o surgimento de grandes redes telemáticas mundiais

contribuíram ainda mais para a diluição das fronteiras entre os mercados nacionais e o euromercado.

Para a construção do quadro descrito, ainda contribuíram decisivamente seis outras tendências [Coutinho, 1994]:

1. A emergência de novas tecnologias na área da eletrônica, que é o cerne do processo de inovação nos países avançados;
2. A transformação dos métodos de produção, principalmente através da introdução da automação flexível e integrada, bem como o surgimento de novas técnicas organizacionais - como o *Just-In-Time*, a Teoria das Restrições, o Gerenciamento Total da Qualidade, a Manufatura Integrada por Computador, entre outras. Logo, esta transformação dos métodos de produção implicou em mudanças fundamentais nos processos de manufatura, nas relações de trabalho e nos requisitos educacionais da mão-de-obra;
3. Inovações nas formas de gestão e de organização empresarial, com novas formas de interligação e integração intra e interempresas;
4. Fortes investimentos externos, aumentando a interpenetração patrimonial entre os grandes grupos econômicos dos países desenvolvidos;
5. Crescimento do comércio exterior, em particular do comércio interindustrial<sup>1</sup> (inclusive o comércio intrafirma);
6. O surgimento de novas formas de concorrência entre grupos empresariais, através da proliferação de redes de cooperação e alianças tecnológicas.

### **2.3. Estratégia de decisão**

A situação exposta anteriormente, alçou a manufatura a condição de destaque no âmbito empresarial. Através dela, ganha-se e perde-se a guerra pelo mercado consumidor.

Na manufatura são consolidados o retorno sobre investimento e o nível de qualidade do produto. Desse modo, toda a manufatura deve trabalhar de maneira sincronizada, ou seja, direcionada para o mesmo objetivo.

Para que ocorra esta sincronização, deve existir uma integração entre todos os níveis administrativos da empresa, a fim de proporcionar uma unificação dos objetivos departamentais. Logo, todos os processos de decisão devem ser orientados segundo os mesmos critérios.

Assim, partindo do plano estratégico da empresa, os processos de decisão são agrupados em três tipos: decisões estratégicas, táticas e operacionais, como mostra a figura 2.1.

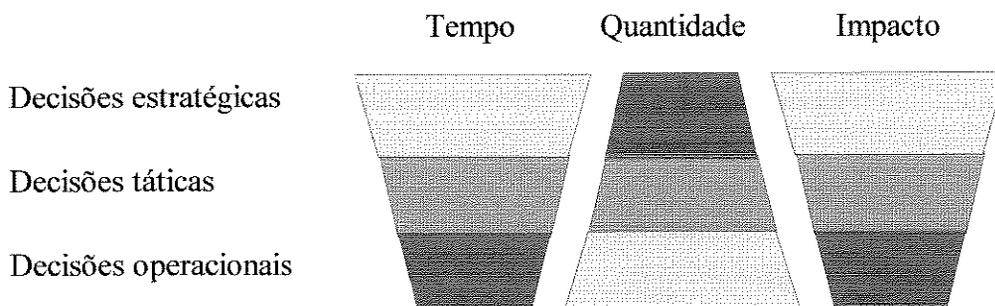


Figura 2.1. Tipos de decisões encontradas em manufatura [Chryssolouris, 1992]

As decisões estratégicas envolvidas em um sistema de manufatura permitem que se disponha de grandes períodos de tempo antes de serem resolvidas. São decisões, em geral, tomadas na fase de projeto e organização do sistema. Devido ao seu alto grau de complexidade, são de difícil solução. Um exemplo de decisão estratégica é a opção por uma nova fábrica ou linha de produto.

No nível das decisões táticas, a frequência necessária é alta e o tempo disponível é menor. As decisões, se analisadas isoladamente, também têm um impacto menor sobre a organização. Um exemplo típico é o Plano Mestre de Produção (MPS).

As decisões operacionais ou de programação dizem respeito, por exemplo, a programação da utilização das máquinas e da seqüência de produção utilizada. Quando essas decisões são tomadas instantaneamente são denominadas programação em tempo real, onde a questão do prazo para a tomada de decisão é crítica. Assim, uma característica marcante das decisões operacionais é a alta frequência com que são exigidas. Outro aspecto das decisões

<sup>1</sup> Relacionamento entre empresas.

operacionais é o seu baixo impacto quando analisadas isoladamente. Por outro lado, o conjunto dessas decisões tem um impacto decisivo sobre a organização.

Neste sentido foram desenvolvidos vários métodos de apoio a decisão. Chryssolouris [1992] propõe um método simples, baseado em quatro etapas, para a tomada de decisão:

1. Selecionar o critério para a tomada de decisão;
2. Selecionar todas as alternativas possíveis para o problema;
3. Determinar as conseqüências de cada uma destas alternativas, baseando-se no critério selecionado;
4. Aplicar as regras de decisão para determinar a melhor alternativa.

Entretanto, este e outros métodos, apesar de se basearem em procedimentos pré definidos, dependem da capacidade de análise do indivíduo. Porém, esta técnica facilita a elaboração de possíveis soluções, mesmo que não seja precisa a avaliação e comparação das mesmas. Logo, estes métodos são pouco utilizados quando é necessário uma maior precisão nas tomadas de decisão.

## **2.4. Manufatura de Classe Mundial e Medição de Desempenho**

Nos últimos vinte anos, os mercados nacionais passaram por um processo de abertura que acirrou a competição. Os mercados artificialmente protegidos - via taxaço sobre produtos importados, e restriçoes a importação de determinados produtos - reduziram ou eliminaram suas barreiras, assim qualquer empresa pode colocar os seus produtos no mercado mundial, logo, chama-se este de mercado global.

Neste mercado globalizado muitas empresas têm se apresentado mais aptas, ou seja, mais competitivas que outras. Estas empresas, que Schonberger [1986] chamou de Manufatura de Classe Mundial, possuem características comuns, que podem ser resumidas em:

- Um novo modelo de qualidade do produto (Busca pela Excelência);
- Técnicas de produção *Just-In-Time*;

- Mudança no modo de gerenciar a mão-de-obra e os recursos da produção;
- Flexibilidade para atender as necessidades dos clientes.

Detalhando-se as características identificadas por Schonberger, chega-se aos pontos enunciados por Hayes et. alli [1988] que identificam uma Manufatura de Classe Mundial:

- São as melhores na sua área, pelo menos no aspecto da manufatura;
- Crescem mais rapidamente, tendo maior lucratividade que os outros competidores;
- Possuem os melhores profissionais existentes no mercado;
- Desenvolvem e testam novos equipamentos de produção na busca permanente por melhorias;
- Respondem rapidamente as mudanças de mercado;
- Adotam metodologias de desenvolvimento do produto e processo que maximizam o desempenho de ambas as áreas;
- Promovem a melhoria contínua em áreas consideradas ótimas.

Ainda segundo Giffi et. alli [1990], estas indústrias criam produtos com grande valor agregado, operando com uma taxa de retorno sobre o investimento muito superior aos demais competidores. Isto ocorre, devido à aplicação coerente de estratégias competitivas em seus sistemas produtivos, como mostra a figura 2.2.

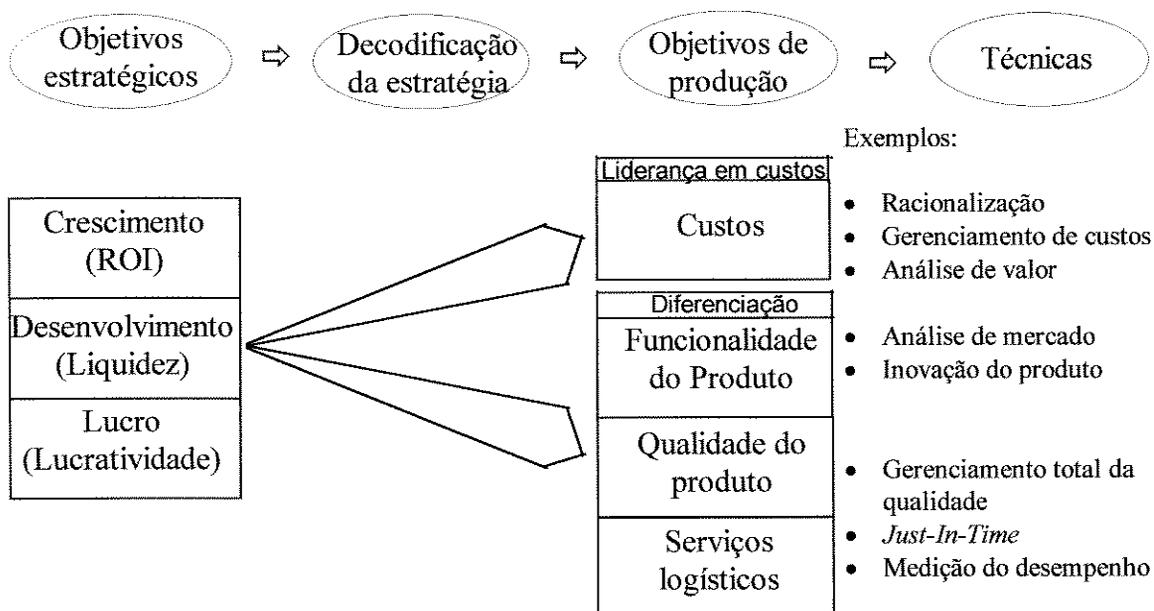


Figura 2.2. Transformação dos objetivos estratégicos [Wiendahl et alli, 1993]

Considerando os princípios enunciados por Hayes, nos quais se baseiam a Manufatura de Classe Mundial deve-se avaliar como medir o desempenho destas plantas. Segundo Agostinho [1995], os padrões de desempenho devem ser utilizados para "puxar" as empresas em direção a um desempenho constantemente crescente, e não apenas monitorar este desempenho.

#### 2.4.1. Medidores que inibem a melhoria da manufatura

Na figura 2.2 observa-se que o desempenho da manufatura é medido em termos de retorno sobre o investimento, liquidez e lucratividade. A liquidez é medida em termos de custo final e diferenciação do produto. Inicialmente, o custo era o único fator considerado pelas manufaturas e mercados. Atualmente, com os mercados em permanente mudança; a funcionalidade, a qualidade e a logística têm se tornado igualmente importantes para a permanência das manufaturas no mercado.

O sistema tradicional de gerenciamento de custos perdeu relevância, não contribuindo para que a manufatura obtenha padrões mundiais, pois só focalizam o fator custo [Giffi et. alli, 1990]. Como mostra a tabela 2.1, muitas medidas de desempenho não refletem as melhorias implementadas no chão-de-fábrica ou até prejudicam o desempenho da mesma.

Medidas tradicionais	Incentivo	Resultados obtidos
Utilização dos recursos	Maximizar a utilização dos recursos através de uma produção elevada	Excesso de inventário de produtos acabados
Eficiência da mão-de-obra direta, utilização e produtividade	Aumento do número de horas-homem trabalhadas	Excesso de inventário de produtos acabados
Preço de compra	Aceitação de grandes lotes para assegurar baixos preços de compra	Materiais de baixa qualidade e potencial de alto nível de inventário
Absorção da mão-de-obra indireta	Altas quantidades de horas trabalhadas para diluir os custos indiretos	Excesso de inventário de produtos acabados
Variâncias	Atenção direta dos gerentes somente para variâncias desfavoráveis	Não incentiva a redução da quantidade e do custo dos produtos rejeitados
Reportagem de horas diretas	Analisar os custos da mão-de-obra direta	Atenção desproporcional aos custos da mão-de-obra direta que em geral não passam de 10%
Composição dos custos indiretos	Relatar os custos indiretos	Não enfatiza os direcionadores de custo e as atividades indiretas que não agregam valor
Qualidade	Comparar os custos da qualidade com o orçamento do departamento de controle da qualidade	Não enfatiza medidas preventivas para reduzir os custos de falha

Tabela 2.1. Medidas de desempenho que não agregam valor [Giffi, 1990]

#### 2.4.2. Medidas de Desempenho que agregam valor ao negócio

Atualmente os clientes estão requerendo altos padrões de qualidade, desempenho nas entregas, e flexibilidade, além do baixo custo, que deixou de ser um fator decisivo para ganhar os pedidos para ser um fator necessário para a competição.

Considerando-se ainda que todas as medidas devem refletir o nível de valor agregado ao produto sob a ótica do cliente, os alavancadores de competitividade tempo, qualidade e preço - observados na figura 2.3, devem refletir a estratégia adotada pela manufatura.

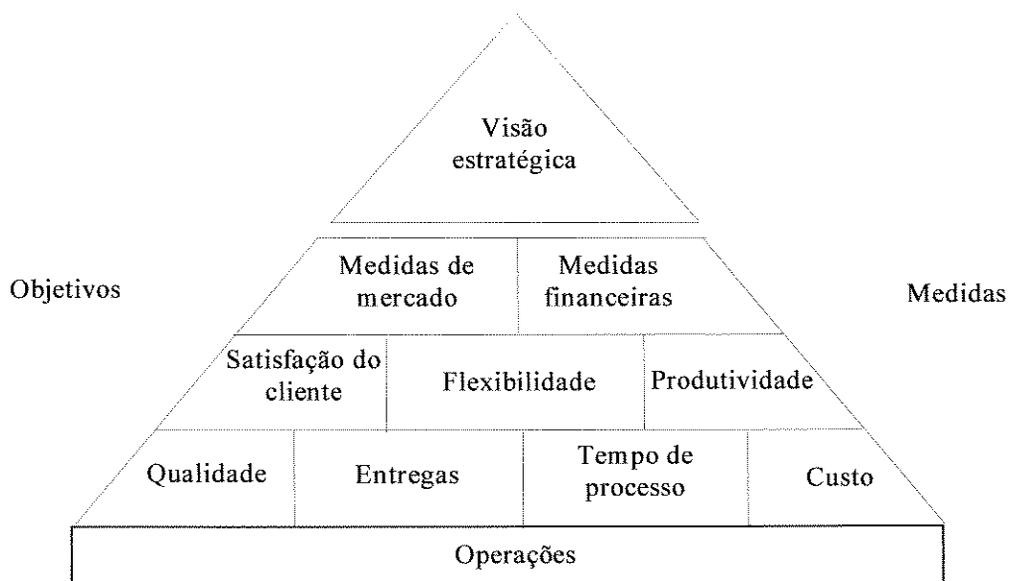


Figura 2.3. Pirâmide de desempenho [Maskell, 1991]

Assim, a partir de uma visão corporativa do negócio é possível avaliar o desempenho da empresa através de medidas de mercado e financeiras para cada divisão da empresa. Para visar estes objetivos, adota-se medidas de satisfação do cliente, flexibilidade e produtividade, onde a satisfação do cliente e a flexibilidade são decisivas para uma boa participação no mercado. Flexibilidade e produtividade são componentes básicos para bons resultados financeiros.

Estes objetivos intermediários necessitam ser transformados em medidas facilmente mensuráveis nos departamentos, chegando assim a quatro macro medidas: Qualidade, entregas, tempo de processo e custo.

Desta forma, a medição do desempenho da manufatura deve ter as seguintes características [Maskell, 1991]:

- Deve traduzir a estratégia da manufatura em termos operacionais;
- Deve ser basicamente apoiada em medidas não financeiras;
- Deve ser fácil de medir e usar;

- Deve prover operadores e gerentes de respostas rápidas;
- Deve ter como objetivo a melhoria contínua e não apenas o monitoramento do processo.

### 2.4.3. Medidas de Desempenho

Partindo dos princípios da Manufatura de Classe Mundial , serão apresentadas medidas de desempenho que indiquem em que nível se situa cada empresa. Essas medidas não são inovações, porém representam uma nova abordagem, uma vez que não se limitaram a monitorar, mas a permitir o direcionamento de ações visando a melhoria contínua do processo.

Não serão abordadas medidas de desempenho financeiro, desempenho nas entregas, e medidas de satisfação dos funcionários e/ou clientes. Considera-se apenas a medição do desempenho em atividades de chão-de-fábrica, ou seja, medidas operacionais.

Com base nos critérios citados anteriormente, avalia-se o desempenho da manufatura através dos seguintes parâmetros:

1. Tempo de ciclo de produção: Esta é uma medida derivada da aplicação direta dos princípios de funcionamento de produção *Just-In-Time*. Longos ciclos de produção causam [Maskell, 1991]:
  - ⇒ Aumento nos níveis de inventário em processo;
  - ⇒ Aumento do inventário de produto acabado;
  - ⇒ Aumento do número de mudanças durante o processo;
  - ⇒ Necessidade de sistemas complexos para o monitoramento da produção;
  - ⇒ Desbalanceamento entre os centros de trabalho devido aos grandes *lead times*;
  - ⇒ Queda da flexibilidade.

O tempo de ciclo de produção é o somatório dos tempo de processo, movimentação, espera, inspeção e preparação das máquinas. Porém, a única atividade que agrega valor é a de processo propriamente dita.

2. Movimentação de materiais: Através da análise da distância percorrida e do tempo gasto pelos materiais em movimentação durante o processo de fabricação pode-se avaliar o desempenho do arranjo físico da manufatura. Esta medida também se reflete no nível de inventário em processo e no tempo de ciclo de produção.
3. Capacidade ociosa: Um modo simples e direto de avaliar a capacidade ociosa de uma planta é comparar a capacidade de produção da manufatura com o volume de produção atual. O excesso de capacidade pode ser transformado em incremento de flexibilidade no mix de produção através da diminuição dos lotes. A Toyota, por exemplo, tem como meta atingir 30% de excesso de capacidade [Maskell, 1991].
4. Giro total de inventário: O giro total de inventário será definido como:

$$\text{Giro de inventário} = \frac{\text{Custo de vendas}}{\text{Inventário médio ou no fim do ano}}$$

ou

$$\text{Giro de inventário} = \frac{\text{Demanda média}}{\text{Inventário médio ou no fim do ano}}$$

O giro de inventário mede os tempos dos sistemas de gerenciamento de materiais da empresa. Este índice é sensível à integração vertical. Empresas de classe mundial possuem um giro de 20 vezes por ano - no mínimo. As empresas da área eletrônica de 30 a 40 giros por ano, a indústria mecânica repetitiva gira de 15 a 20 vezes por ano e a indústria automotiva de 10 a 17 giros por ano. [Agostinho, 1995]

5. Produtividade: A medida de produtividade da mão-de-obra direta sempre foi realizada, porém enfocada a individualmente nas estações de trabalho. Na Manufatura de Classe Mundial esta medida é feita com base nos produtos acabados. Ainda segundo Giffi et. alli [1990], a medida de desempenho mais

significativa, devido a sua abrangência e fácil utilização, é a medida de produtividade que é definida como:

$$\text{Produtividade} = \frac{\text{Produtos vendidos}}{\text{Recursos utilizados}}$$

$$\text{Produtividade} = \frac{\text{Produtos vendidos}}{\text{Pessoa}}$$

## 2.5. Técnicas de gestão da produção

A seguir serão apresentadas dentre as várias técnicas disponíveis, duas técnicas de Gestão da Produção: *Just-In-Time* e Teoria das Restrições, que se ajustam aos propósitos deste trabalho. Através da utilização destas metodologias pode-se obter uma melhoria nos índices de desempenho.

Foram escolhidas as técnicas de *Just-In-Time* e Teoria das Restrições por serem as mais utilizadas na tentativa de inserção na nova realidade competitiva.

Através dessas duas técnicas, pode-se planejar e controlar o processo de manufatura em todos os seus níveis, incluindo materiais, equipamentos, pessoas, fornecedores e distribuidores. Com isto, garante-se que as decisões operacionais sobre o que, quando, quanto e com o que produzir e comprar sejam adequadas às suas necessidades estratégicas, que por sua vez são ditadas por seus objetivos e seu mercado.

### 2.5.1. *Just-In-Time*

A produção enxuta [Womack et. alli 1990] ou *Just-In-Time* (*JIT*) introduzida inicialmente pela Toyota, há vinte e cinco anos atrás, pode ser definida como um modelo de manufatura que procura produzir quantidades de itens corretas quando estes são necessários, reduzindo assim, o inventário em processo e maximizando a produtividade<sup>1</sup>. Segundo Monden [1983], a técnica de *Just-In-Time* permite a redução dos custos através da eliminação dos elementos desnecessários existentes na manufatura, ou seja, dos desperdícios.

---

<sup>1</sup> Segundo Agostinho[1995], produtividade é o resultado (*output*) dividido pelo recurso (*input*) pertinente a uma indústria ou setor da economia.

Com a eliminação dos desperdícios, mais especificamente dos altos níveis de inventário, começam a surgir os problemas - gargalos de produção, manutenções corretivas em excesso, entre outros, estimulando soluções. Isto acontece porque os inventários intermediários funcionam como amortecedores de falhas, isolando as estações de trabalho e impedindo a interrupção da produção.

### **2.5.1.1. Princípios de funcionamento do JIT**

Segundo Taiichi Ohno [Giffi et. alli 1990], o criador da técnica do *Just-In-Time* é definida na forma de sete desperdícios. São eles:

- Desperdício de superprodução: produzir mais do que o necessário é um desperdício. Operar com altos índices de eficiência e eficácia não equivalem a operar com altos índices de utilização dos recursos, que é produzir o necessário e quando necessário.
- Desperdício de tempo: operários ociosos devido a preparação de máquinas, atraso nos transportes, escassez de componentes, e processos e procedimentos complexos são um desperdício.
- Desperdício de transporte: arranjos físicos que provoquem longos tempos de transporte de materiais são um desperdício, mesmo que esta operação seja automatizada.
- Desperdício de processamento: componentes e operações que não agregam valor ao produto não devem ser realizadas. O produto ou o processo deve ser desenvolvido de modo a suprimir estes componentes ou operações.
- Desperdício de inventário: inventário em qualquer etapa da produção, da matéria-prima ao produto final é um desperdício. Um sistema de manufatura ineficiente é disfarçado pelos pulmões (inventário em processo) formados entre os diversos postos de trabalho.
- Desperdício de movimentação: toda movimentação deve ser considerada um desperdício a não ser que seja absolutamente necessária para agregar valor ao produto.

- Desperdício de produzir produtos defeituosos: processos de manufatura que permitam a produção de produtos defeituosos que serão inutilizados ou refeitos são geradores de desperdício.

A figura 2.4 mostra o funcionamento da produção enxuta, e seu auxílio na melhoria contínua do processo produtivo.

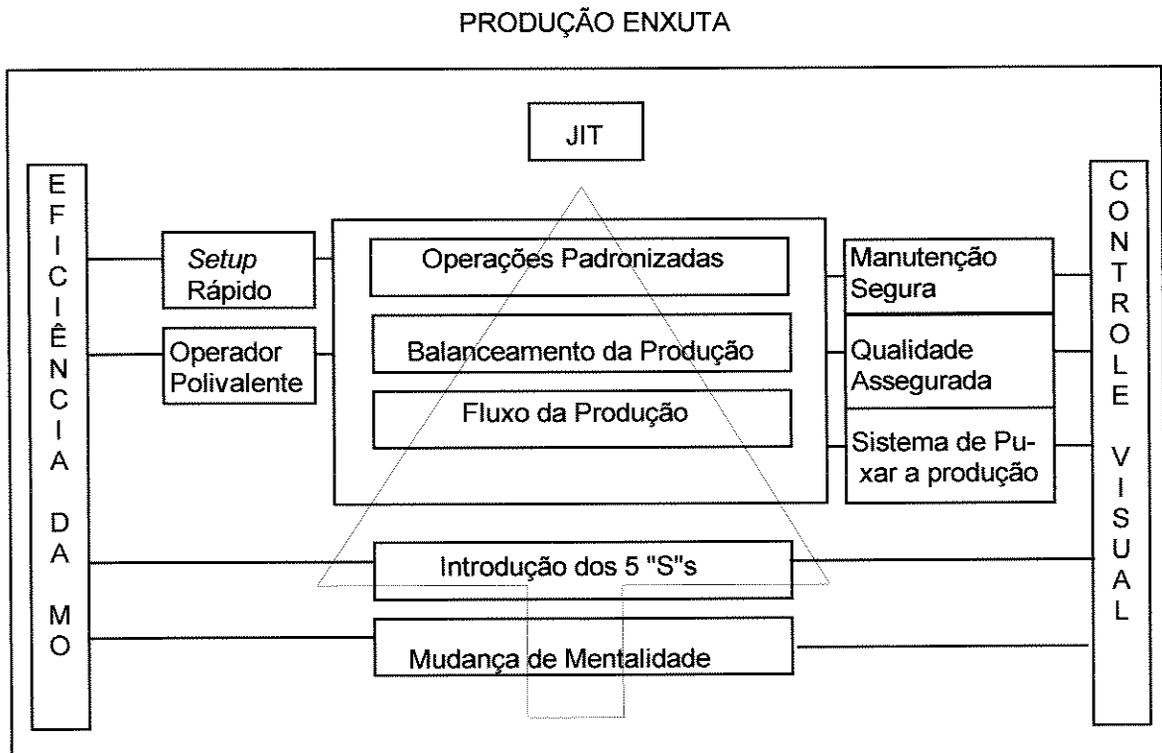


Figura 2.4. Produção Enxuta

O *Just-In-Time* baseia-se na mudança de mentalidade da mão-de-obra, permitindo que esta assuma novas responsabilidades sobre o processo produtivo, e na introdução da melhoria da qualidade - "5 Ss"<sup>1</sup>. Baseado nestes dois pontos, busca-se uma maior eficiência da mão-de-obra através de operadores polivalentes e da redução dos tempos de *setup*. Por outro lado, essa mesma mão-de-obra se responsabiliza pela manutenção dos equipamentos, por assegurar a qualidade do produto e pelo gerenciamento da produção através do sistema de puxar a

<sup>1</sup> Os cinco Ss são: Senso de organização, de arrumação, de limpeza, de padronização e de disciplina.

produção. Assim, consegue-se um fluxo contínuo de produtos e um melhor balanceamento do fluxo.

Todo o sistema de produção enxuta desenvolvido pela Toyota objetiva em última instância a redução dos desperdícios, que são representados nos sistemas de manufatura através dos níveis de inventário.

Este sistema é baseado na real necessidade de venda e não na ordem de produção.

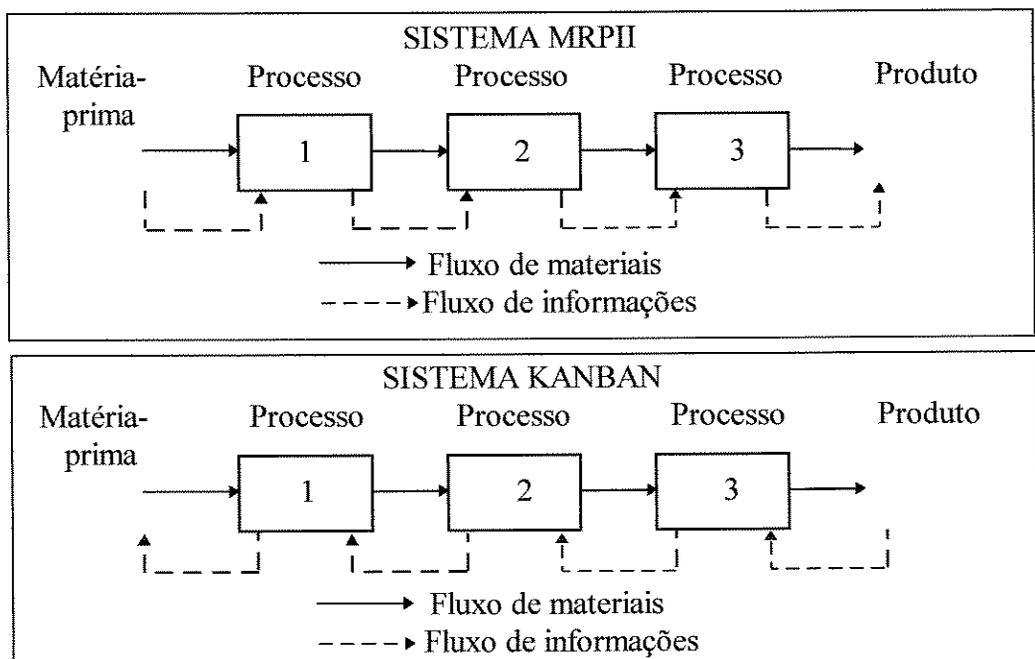


Figura 2.5. Empurrando e puxando a produção [Singh et. alli, 1992]

Com isso se adapta rapidamente a variações da demanda, o que nos dias atuais ocorre com bastante frequência.

### 2.5.1.2. Controle da produção - Kanban

Como exemplificado na figura 2.5, no âmbito do chão-de-fábrica, uma contribuição marcante do *Just-In-Time* é o *kanban*, sistema de gestão da produção onde os itens são puxados através dos recursos com o uso de cartões de produção para o controle do fluxo. Esta metodologia é complementar à utilizada em sistemas MRPII, onde a produção é empurrada através das ordens de serviço.

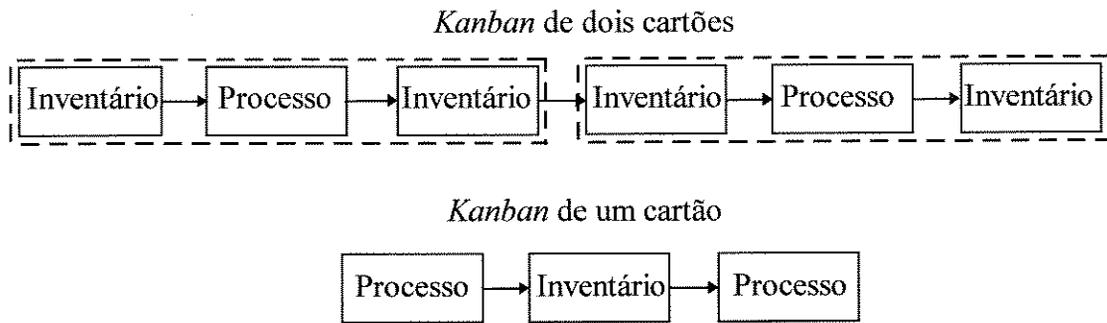


Figura 2.6. Tipos de *kanbans*

Neste sistema de gestão, cada estação de trabalho só entra em operação quando houver demanda dos itens produzidos pela mesma. Desta maneira, o ritmo de produção acompanha possíveis oscilações e os inventários em processo se mantêm estáveis, mesmo com uma demanda de mercado variável.

Segundo Monden [1983], sistemas *kanbans* operam de modo descentralizado e autorreguláveis, pois cada estação de trabalho sabe quando e quanto produzir. Já no modelo tradicional de produção, onde os itens são empurrados através das estações de trabalho, qualquer variação na demanda de mercado provoca um desabastecimento ou um acréscimo nos níveis de inventário, pois as oscilações na demanda não são percebidas pelo sistema a tempo de corrigir as ordens de produção.

Segundo Yavuz [1995] e Singh et. all [1992], existem dois tipos de *kanbans* utilizados em ambientes de manufatura: *Kanban* de um cartão e *kanban* de dois cartões, como exemplificado na figura 2.6.

No *kanban* de dois cartões cada estação de trabalho tem dois inventários. Um inventário de itens a serem processados e um de itens já processados. Sistemas que operam desta maneira são caracterizados por *kanbans* de retirada e produção. O inventário de itens a ser processado, ou *kanban* de produção, indica a quantidade de itens que deverão ser processados quando a estação seguinte retirar o inventário de itens acabados, ou *kanban* de retirada. Assim, os *kanbans* de retirada e produção são sucessivamente trocados entre as estações de trabalho, ocorrendo a interligação do processo.

O *kanban* de um único cartão, ou *kanban* de transferência, muitas vezes utilizado como uma etapa no desenvolvimento do *kanban* de dois cartões, possui apenas o inventário

de itens processados. Quando o inventário de itens processados é retirado pela estação seguinte, o inventário da estação predecessora é também retirado para ser processado. Deste modo, o *container* vazio funciona como o *kanban* de retirada, e o processo é interligado.

### **2.5.1.3. Dimensionamento dos *Kanbans***

Por trabalhar com inventários reduzidos, qualquer falha ou parada de uma das estações de trabalho pode acarretar uma interrupção da produção, pois os inventários intermediários que funcionariam como amortecedores destas ocorrências foram removidos ou minimizados.

Quando estes inventários intermediários ou número de *kanbans*, são dimensionados, os seguintes fatores devem ser avaliados para que não exista risco de interrupções na produção: [Singh e Brar, 1992]

- Capacidade produtiva de cada estação considerando-se a falta de informação sobre o processo e a taxa de produção de cada item;
- Inventário em processo máximo para cada item;
- Relação entre a variabilidade dos tempos de processamento nas várias estações (autocorrelação);
- Tamanho dos lotes (usualmente 10% da demanda diária);
- Coeficiente de variabilidade dos tempos de processamento;
- Tempo total de processamento (somatório dos tempos de processamento, tempos de espera e tempos de transferência);
- Nível de utilização dos recursos.

Segundo Monden [1983], o número de *kanbans* pode ser calculado da seguinte maneira:

$$\text{No. de } \textit{kanbans} = \frac{(\text{demanda}) \times (\text{tempo de processamento}) \times (1 + \text{coef. de segurança})}{\text{tamanho do lote de produção}}$$

onde:

Tempo de processamento = tempo de operação + tempo de espera

Como observado anteriormente, o *Just-In-Time* é controlado, no âmbito do chão-de-fábrica, através de *kanbans*. Estes dependem fundamentalmente do tamanho dos lotes de produção. Através do tamanho do lote, todo o sistema de produção é gerido potencializando-se o tempo total de processo, o estoque em processo, entre outros.

Este sistema de *Kanban* pode ser rígido, quando a demanda ou *mix* de produção é altamente variável. Além disto, o sistema *kanban* permite o balanceamento somente dos recursos, ou seja, procura a utilização máxima; não balanceando o fluxo de materiais. A seguir será apresentada a Teoria das Restrições, que procura tratar o ambiente de forma diferenciada e localizar os gargalos.

## 2.5.2. Teoria das Restrições

A Teoria das Restrições (*Theory of Constraints* - TOC), criada por Goldratt [1990], tem como ponto central o gerenciamento das restrições do sistema de manufatura, objetivando aumentar o desempenho global do sistema através da sincronização da manufatura, como será apresentado a seguir.

### 2.5.2.1 Princípios de funcionamento da Teoria das Restrições

Baseado no comportamento das restrições, ou gargalos existentes na manufatura, Goldratt enunciou nove princípios que formam a Teoria das Restrições [Corrêa e Giansi, 1993]:

1. Balanceamento do fluxo e não da capacidade. O método usual é balancear a capacidade dos recursos para então estabelecer um fluxo de materiais suave, se possível contínuo. Goldratt advoga o balanceamento do fluxo de materiais e não da capacidade dos recursos. Isto só é possível quando são identificados os gargalos que limitam o fluxo do sistema.

2. A utilização de um recurso não-gargalo não é determinada por sua disponibilidade, mas por alguma outra restrição do sistema (por exemplo, um gargalo). Os recursos não-gargalos devem ser utilizados segundo a ocupação dos recursos gargalo, mantendo um fluxo suave de materiais.
3. Utilização e ativação de um recurso não são sinônimos. Segundo a Teoria das Restrições, os recursos devem ser utilizados conforme o ritmo de trabalho dos gargalos. Ativar um recurso não-gargalo mais do que o necessário não contribui em nada para um melhor desempenho global do sistema.
4. Uma hora ganha num recurso gargalo é uma hora ganha para o sistema global. Toda a economia de tempo feita nos recursos gargalos, como por exemplo economia no tempo de preparação de máquina, equivale a uma hora ganha pelo sistema inteiro.
5. Uma hora ganha num recurso não-gargalo não é nada, é só uma miragem. Como consequência do princípio anterior, toda economia de tempo ou melhorias introduzidas em um recurso não-gargalo não contribui em nada para a melhoria do desempenho global do sistema, pois este não limita a capacidade do sistema. Deste modo, o aumento do tamanho dos lotes de processamento em recursos não-gargalo é uma economia contraproducente.
6. O lote de transferência pode não ser e, freqüentemente, não deveria ser, igual ao lote de processamento. Utilizando-se lotes de transferência menores que o lote de processamento, o material é transferido de um recurso para outro antes que todo o lote esteja pronto. Isto acarreta em um aumento da velocidade do fluxo de materiais.
7. O lote de processamento deve ser variável e não fixo. Na Teoria das Restrições, o tamanho do lote de processamento deve variar em função da demanda de mercado, das restrições existentes e dos custos de preparação. Assim, de acordo com o cenário existente determina-se o tamanho do lote de processamento ideal.
8. Os gargalos não só determinam o fluxo do sistema, mas também definem seus estoques. Como citado no primeiro princípio, os gargalos determinam o fluxo de produção porque são seus limitantes, e por outro lado também são determinantes

dos estoques intermediários. Estes são dimensionados e posicionados antes dos gargalos para evitar que estes parem de trabalhar por falta de itens a processar.

9. A programação das atividades e a capacidade devem ser consideradas simultaneamente e não seqüencialmente. Os *lead-times* são um resultado da programação e não podem ser assumidos a priori.

### **2.5.2.2. Variáveis de controle da Teoria das Restrições**

Partindo do princípio que a meta da empresa é gerar dinheiro, e que todas as medidas de desempenho devem ser um meio para se alcançar a meta, Goldratt define como medidas de desempenho da manufatura o lucro líquido, o retorno sobre o investimento e fluxo de caixa. O lucro líquido e o retorno sobre o investimento são as medidas básicas e fluxo de caixa é uma necessidade ou pré-requisito para a sobrevivência da empresa.

Baseado nestas medidas financeiras, são enumerados três parâmetros operacionais que têm fundamental relevância nestas medidas [Goldratt, 1992]:

- Ganho: O índice no qual o sistema gera dinheiro através das vendas, ou *throughput*;
- Inventário: Todo o dinheiro que o sistema investe na compra de coisas que ele pretende vender;
- Despesa Operacional: Todo dinheiro que o sistema gasta para transformar inventário em ganho.

Aumentando-se o ganho, sem aumentar o nível de inventário e a despesa operacional aumenta simultaneamente; o lucro líquido, o retorno sobre o investimento e o fluxo de caixa. Reduzindo-se a despesa operacional e com isto, obtém-se resultado similar.

A redução do inventário influencia diretamente o retorno sobre o investimento e o fluxo de caixa. Porém, pode-se considerar um impacto indireto do nível de inventário sobre a despesa operacional, já que se reduz os custos de armazenamento obsolescência, movimentação e retrabalho. Isto acarreta em um ganho futuro, pois consegue-se um melhor desempenho nas entregas.

Deste modo, observa-se que o inventário, considerando-se estas ligações indiretas que Goldratt chamou de canais de vantagem competitiva, afeta o lucro líquido duas vezes e três vezes o retorno sobre o investimento e o fluxo de caixa, sendo fundamental para o desempenho da manufatura. A relação entre estas medidas é mostrada na figura 2.7.

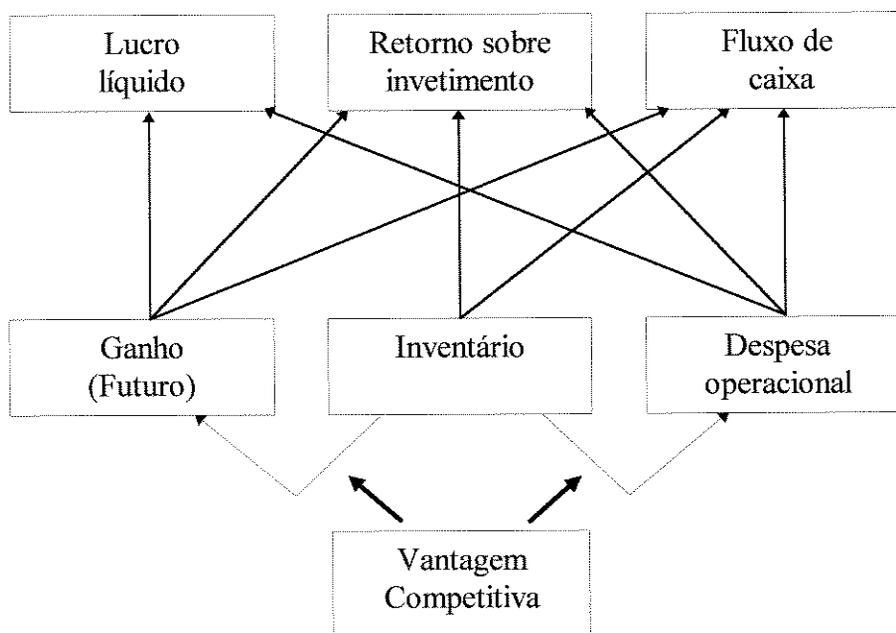


Figura 2.7. As medidas operacionais e o resultado final [Goldratt, 1992]

### 2.5.2.3 Restrições ao melhor desempenho da manufatura

Os diversos processos interligados formam uma linha de manufatura, desde a compra de matéria-prima até o mercado consumidor, podendo ser comparados aos elos de uma corrente. Assim, analisa-se o sistema produtivo com uma corrente formada por elementos (elos) interdependentes.

Na corrente, como na manufatura, existem elos mais fortes e outros mais fracos. Os elos mais fracos limitam a resistência da corrente. No sistema produtivo, os processos ineficientes limitam o desempenho de todo o sistema de manufatura. Estes processos são denominados restrições, ou gargalos de produção, pois limitam a capacidade do sistema de gerar riqueza.

Considerando-se ainda que nenhuma empresa ganha dinheiro indefinidamente, deve-se assumir a premissa que a empresa sempre opera com algum tipo de restrição, seja ela mercadológica ou de capacidade.

Outra analogia usualmente feita é comparar a manufatura com uma fila de escoteiros, onde o tamanho da fila é o inventário - quanto maior for a dispersão da fila, maior será o inventário. A chegada do último da fila ao seu destino representa o ganho - ou realização da venda. O esforço que cada escoteiro faz para acompanhar o ritmo de marcha da fila é a despesa operacional. Neste caso a restrição à velocidade de marcha da fila é o escoteiro mais lento [Goldratt, 1990].

#### **2.5.2.4 Sincronização da manufatura**

Um dos fatores para a redução do inventário é a sincronização da manufatura, que visa movimentar o material rápida e uniformemente através dos vários recursos da fábrica, de acordo com o ritmo da restrição.

Para exemplificação é utilizada uma outra analogia com o Tambor - Pulmão - Corda (TPC). O pulmão é entendido como uma proteção para o recurso restritivo, o tambor é a programação deste recurso e a corda é a ligação entre a primeira máquina e o recurso restritivo, garantindo que a alimentação da primeira máquina seja feita no ritmo de processamento do recurso restritivo. Deste modo, garante-se que não será admitido mais material na fábrica do que o gargalo possa processar - o que só aumentaria os níveis de inventário [Goldratt, 1992].

Com tudo isto, garante-se uma baixa no nível do inventário, uma redução do tempo total de ciclo de produção, um alto desempenho no prazo de entrega, uma melhor qualidade e margens de lucro maiores.

Extrapolando-se o conceito de restrição, observa-se que este elemento pode ser um parâmetro mercadológico, produtivo, ou mesmo gerencial. A partir da determinação da restrição, deve-se explorá-la ao máximo, ou seja, maximizar a sua utilização, sincronizando toda a manufatura com o ritmo de trabalho do gargalo. Uma pesquisa realizada por Umble e Srikanth [1990] apontaram a demanda de mercado, a capacidade do sistema, e as limitações de materiais como sendo as principais restrições encontradas nos sistemas de produção atuais.

Para a implantação de um bom sistema de gerenciamento dos gargalos, Goldratt recomenda uma metodologia composta de cinco etapas que constituem a Teoria das Restrições:

1. Levantamento das restrições do sistema;
2. Análise das restrições de modo a maximizar os benefícios em função das alterações propostas para o sistema produtivo;
3. Sincronizar todo o sistema produtivo às decisões tomadas na etapa anterior;
4. Aumentar a capacidade das restrições do sistema;
5. Se nas etapas anteriores foram rompidas as restrições do sistema, iniciar novamente o método, não permitindo que a inércia do sistema passe a ser sua restrição.

Como observado, o objetivo desta metodologia consiste em identificar os gargalos do sistema produtivo, através da otimização destes elementos, aumentar o desempenho de todo o sistema. Schragenheim e Ronen [1990] concluíram que esta metodologia pode reduzir o inventário em processo, aumentando o desempenho global do sistema.

Este conceito de desempenho global da manufatura é fundamental nesta metodologia. Ótimos localizados, procurando a máxima produtividade dos operários, mesmo que estes estejam fabricando peças para inventário, economia de *setups*, mesmo que o lote de venda seja baixo são sinônimos de altos níveis de ocupação e não de eficiência e eficácia.

No meio de uma corrida pela vantagem competitiva não deve-se procurar por melhorias isoladas, e sim considerar a implantação de um processo de aprimoramento contínuo.

Goldratt também recomenda que seja procurado o problema raiz, gerador de todos os problemas detectados na manufatura. É usual a busca de problemas complexos que requerem soluções complexas. Entretanto, na maioria das vezes, o problema raiz é simples, logo de simples solução. A maior dificuldade na identificação destes problemas é em função destes fazerem, em geral, parte da cultura da empresa [Goldratt, 1994].

### 2.5.3. Comparação entre o *Just-In-Time* e a Teoria das Restrições: vantagens e desvantagens

A seguir são apresentadas as vantagens e desvantagens da Teoria das Restrições. [Plantullo, 1994]

Vantagens:

1. Esta é uma técnica simplificada para planejamento da produção onde:

- Os planejamentos não exigem muito tempo de preparação;
- Os planejamentos não necessitam de grande volume de dados;
- Os dados não necessitam de grande precisão;
- São necessárias poucas pessoas para analisarem o planejamento da produção;

2. Uma rápida projeção ou modificação do planejamento onde:

- No processo de manufatura, existe maximização de saídas (*outputs*) da produção e minimização simultânea do inventário em processo de produtos;
- É possível um aumento de cerca de 10% na taxa de produção, utilizando os mesmos recursos disponíveis;
- É possível uma redução de 20% no estoque em processo de produtos;
- O tamanho dos pequenos lotes são calculados com base na lucratividade e não através do lote econômico de compras e de produção;
- É permitido um controle mais preciso dos recursos a curto prazo;
- Leva-se em conta os recursos finitos existentes;

3. É mais complexo do que o JIT:

- Planejamento rápido, modificação extremamente rápida implica necessidade de maior flexibilidade;
- Modificações no planejamento devem ser feitas em horas em vez de dias;

- Dado que o planejamento seja realizado de forma extremamente rápida, deve ser possível executar diversas simulações;
4. Permite análise acurada da planta industrial:
- As restrições no processo de produção passam a ser claramente definidas;
  - A melhoria pode ser realizada facilmente na planta industrial, graças à definição clara das restrições;
  - Através do processo de simulação, diversos *mixes* (combinações) de produtos podem ser experimentados com implicações para a planta industrial sob o ponto de vista de capacidade das máquinas e financeiro.

Desvantagens:

1. Necessidade de reorganização da planta industrial. Trata-se de uma reorganização conceitual dentro da planta industrial e dentro da empresa, embora seja menor do que a pleiteada pela filosofia JIT;
2. Modificação do estilo gerencial para a condução dos problemas;
3. Criação de uma nova cultura;
4. Movimentações e modificações de equipamentos para que se possa aplicar a teoria mais eficientemente;
5. Ruptura dos sistemas tradicionais de contabilidade e custos;
6. A eficiência não pode mais ser calculada nesses sistemas;
7. Deixa-se de emitir as avaliações de desempenho;
8. Ruptura no conceito dos usuários;
9. Os usuários dos sistemas devem ser treinados; novos tipos de relatório devem ser desenvolvidos para dar suporte ao novo tipo de processamento de dados e os sistemas de contabilidade devem ser adaptados à nova base de informações.

A tabela 2.2 apresenta uma comparação entre as metodologias de gerenciamento da produção.

	JIT	TOC
Capacidade de Produção	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Limitada</li> <li>• Controle através de <i>kanban</i></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Limitada</li> <li>• Controle através do gargalo ou da restrição</li> </ul>
Tamanho dos Lotes	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Níveis muito baixos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Variáveis</li> </ul>
Sincronização da produção	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Seqüência da produção deve ser totalmente sincronizada</li> <li>• Uso do <i>kanban</i> para gerenciar flutuações</li> <li>• Busca do nivelamento da produção</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Flutuações decorrentes do uso da capacidade disponível e de um planejamento da produção mais rígido</li> <li>• Ênfase no fluxo contínuo do processo produtivo</li> </ul>
Acuracidade		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vital nas áreas com restrição de capacidade</li> </ul>
Planejamento	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Menos completo</li> <li>• Menor velocidade de respostas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mais completo</li> <li>• Maior velocidade de respostas</li> </ul>
Flexibilidade	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Menos flexível</li> <li>• Utilização de mais estoque</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mais flexível</li> <li>• Utilização de menos estoque</li> </ul>

Tabela 2.2. Comparação do JIT com a Teoria das Restrições [Plantullo, 1994]

## 2.6. Comentários finais

A Manufatura de Classe Mundial deve ser o objetivo de todas as empresas, para elas continuarem competitivas no mercado atual. Assim, foram desenvolvidos parâmetros para a avaliação destas empresas, ou seja, as medidas de desempenho.

Utilizam-se estas medidas de desempenho para avaliar a manufatura. Já os sistemas de Gestão da Produção conseguem atuar para obter uma melhoria no desempenho da manufatura.

No próximo capítulo será apresentada a técnica de Simulação de eventos discretos. Esta técnica possui um enorme valor para a tomada de decisão, pois é imprescindível um planejamento detalhado de todas as alternativas para a produção, a fim de obter-se o máximo de benefício com os recursos existentes.

## **Capítulo 3**

### **A Técnica de Simulação de eventos discretos**

#### **3.1. Introdução**

O presente capítulo apresenta a simulação de eventos discretos e em quais sistemas pode ser aplicada. Faz-se uma comparação com outras técnicas analíticas apresentando suas vantagens e desvantagens. Destaca-se as principais áreas de aplicação da técnica de simulação nas áreas de manufatura e administração de negócios, assim como os principais trabalhos realizados nessas áreas. São ainda colocadas diferentes técnicas de modelagem de sistemas e uma metodologia de aplicação da simulação, bem como técnicas para a análise dos resultados oriundos da simulação.

Como visto anteriormente, as empresas têm se empenhado em buscar a otimização da manufatura através de novas técnicas de gerenciamento, melhoria da qualidade, flexibilização da produção e novos métodos organizacionais da produção, para atingir um menor tempo de resposta ao mercado para satisfazer melhor o cliente.

Devido a estes novos desafios com os quais a manufatura tem se deparado, é imprescindível um planejamento detalhado de todas as alternativas para a produção, a fim de obter-se o máximo de benefício com os recursos existentes. Porém, a evidente complexidade do problema proposto torna a solução muito difícil de ser encontrada.

Neste contexto a Simulação de eventos discretos torna-se uma ferramenta de enorme valor para a tomada de decisão.

### 3.2. Definição

No *Webster's Collegiate Dictionary*, simular é fingir, obter a essência de, sem a realidade. Segundo Schriber [1987], a técnica de simulação envolve a modelagem de um processo de modo a obter as mesmas respostas que no sistema real ao longo do tempo.

Segundo Law e Kelton [1991], a fábrica ou o processo simulado é chamado de sistema. O conjunto de abstrações feitas no sistema para permitir o seu estudo através da Simulação, que em geral são relações matemáticas e lógicas, constituem o modelo usado para melhor compreender o seu comportamento.

Assim, um **sistema** é definido como uma coleção de entidades, pessoas ou máquinas, que interagem entre si de acordo com algum objetivo lógico [Law e Kelton, 1991]. Como consequência, o **estado do sistema** é definido como o conjunto de variáveis necessárias para descrever o sistema em determinado instante. O **modelo** é a representação do sistema desenvolvido com o propósito de estudá-lo.

Partindo do modelo faz-se a sua análise ao longo do tempo, a fim de se averiguar seu comportamento. Em resumo, a simulação é uma técnica experimental utilizada na:

- Descrição do comportamento de sistemas;
- Construção de hipóteses que modelem o comportamento observado;
- Previsão do comportamento futuro do sistema.

Isto é possível, através de modelagem que construa em ambiente computacional um sistema virtual representando e respondendo a estímulos externos da mesma maneira que o sistema real. Deste modo, a simulação é baseada na interpretação lógica do estado do sistema em função do tempo, permitindo a solução de problemas de produção extremamente complexos.

Por outro lado, como trata-se de uma técnica experimental, a simulação não é uma ferramenta capaz de solucionar problemas ou sugerir opções, e sim proporcionar uma perfeita observação dos resultados das políticas de produção impostas. Traçando-se um paralelo, a simulação permite que seja medida "a febre de que padece a manufatura, porém é incapaz de curá-la".

### 3.3. A Técnica de Simulação frente a soluções analíticas: vantagens e desvantagens

Segundo Chaharbaghi [1990], todas as técnicas de modelagem de sistemas baseiam-se em dois conceitos:

- O modelo representa um sistema ou um ambiente. A sua exatidão ou complexidade é função dos fatores a serem considerados e das aproximações feitas durante a modelagem.
- O modelo é construído para solucionar um problema, podendo ser analisadas várias alternativas.

Se as relações matemáticas e lógicas que compõem o modelo forem suficientemente simples, pode-se utilizar uma solução analítica para o modelo. Ou seja, através de relações matemáticas que representam o sistema e da teoria da probabilidade obtém-se uma solução mais precisa para o modelo.

Já a solução analítica possui uma grande restrição que é o número de aproximações que devem ser feitas para que o sistema de manufatura seja representado por relações. Logo, é comum utilizar as seguintes aproximações:

- Os tempos de serviço são modelados através de distribuições exponenciais, devido a sua simplicidade e baixo número de parâmetros necessários para sua modelagem;
- As estações de trabalho têm total confiabilidade (Não são consideradas falhas aleatórias) simplificando o modelo e conseqüentemente a sua solução;
- Os tempos de transporte são fixos;
- O sistema é auto-regulável. (Existe um determinado inventário em processo constante, assim para cada peça que sai do sistema, uma nova é introduzida), pois a introdução de novas entidades no modelo geraria eventos não previstos que não podem ser controlados no modelo construído;
- As filas de espera e o sistema de transporte trabalham com políticas de prioridade rígidas;

- Não existem bloqueios (As filas não são limitadas pelo espaço físico disponível).

Apesar de já existirem meios e recursos computacionais para se contornar algumas destas restrições, a aplicação da solução analítica em sistemas reais tende a aumentar em demasia o tempo de solução do modelo, que em geral é baixo. Outro agravante é o baixo comprometimento com resultados práticos devido ao número excessivo de aproximações feitas.

A outra solução existente é a Simulação, que permite o acompanhamento do estado do sistema em função do tempo - possibilitando a modelagem de eventos aleatórios. Deste modo, permite a solução de problemas de produção sem a necessidade de realizar nenhuma aproximação na modelagem.

Na tabela 3.1, faz-se uma comparação entre a solução analítica que permite a otimização do modelo, sendo necessárias uma série de aproximações; e a simulação, que permite uma melhor representação da realidade, mas não permite a otimização do modelo automaticamente.

	Técnica analítica	Técnica de simulação
Otimização de modelos	Possível através da modelagem matemática.	Impossível, pois seria necessário medir a influência de todos os fatores de desempenho do sistema.
Fidelidade a realidade	Baixa fidelidade ao sistema real devido ao número de aproximações necessárias.	Alta, devido a sua grande flexibilidade de modelagem conseguida através de distribuições estatísticas.
Tempo de modelagem	Baixo, pois os modelos possuem uma série de limitações que facilitam a sua construção.	Alto, devido ao tempo necessário para coleta de dados, modelagem, construção e validação do modelo.
Tempo de obtenção e análise dos resultados	Baixo, porque o modelo é desenvolvido para fornecer respostas específicas.	Alto, pois devem ser feitos experimentos estatísticos para a coleta dos resultados. Deve-se ainda validar os experimentos realizados.

Tabela 3.1. Comparação da técnica de simulação com métodos analíticos.

### 3.4. Possíveis aplicações para a simulação

A simulação é extremamente útil em todas áreas onde o número de variáveis aleatórias torna qualquer equacionamento matemático inviável. Depois de modelar e simular o sistema em estudo, a simulação permite a avaliação do mesmo e o estudo de configurações alternativas para este mesmo sistema.

Assim, pode-se utilizar a simulação tanto no planejamento estratégico de uma empresa como no plano tático e operacional da mesma. Como mostrado na tabela 3.2, a simulação possui grande aplicação no desenvolvimento e especificação de alternativas para a solução de questões relativas aos planos estratégico, tático e operacional da manufatura. Já na seleção de alternativas, a simulação tem baixa aplicação.

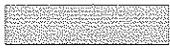
Uso da simulação	Áreas de utilização da simulação		
	Plano estratégico	Plano tático	Plano operacional
Desenvolvimento de alternativas	Alto 	Alto 	Médio 
Especificação de alternativas	Médio 	Médio - baixo 	Alto - Médio 
Seleção de alternativas	Baixo 	Baixo 	Médio - Baixo 

Tabela 3.2. Aplicabilidade da técnica de simulação nas diversas áreas [Pritsker 1992]

Nos dois tópicos seguintes serão exemplificadas aplicações realizadas em ambientes de administração de negócios e de manufatura, apresentando o campo de aplicação e a flexibilidade da técnica de simulação.

#### 3.4.1. A simulação na administração de negócios

Ardhaldjian [1994] utilizou a técnica de simulação como apoio em um projeto de reengenharia do processo do negócio. Deste modo, foi possível não só estudar e comparar novas alternativas ao processo atual, como demonstrar o funcionamento do novo processo e treinar a equipe para trabalhar segundo o mesmo. Por fim, a simulação também foi utilizada

como ferramenta de *benchmarking*<sup>1</sup>. Assim o processo atual pode ser retratado demonstrando seus pontos fortes e fracos.

A simulação também tem sido utilizada nos últimos anos para avaliar o relacionamento entre empresas, ou seja, na simulação da cadeia de fornecedores, como por exemplo no estudo do relacionamento entre uma montadora de automóveis e suas fornecedoras de autopeças. Com isto, é possível avaliar o fluxo entre as duas empresas (peças em um sentido, e capital no sentido contrário).

Portanto, demonstra-se que a utilização da simulação não se restringe apenas ao processo de manufatura, ou seja, ao processo produtivo, pois possibilita a avaliação de todo o processo do negócio, considerando as atividades internas e externas da empresa.

### 3.4.2. A simulação na manufatura

A figura 3.1 delimita o campo de atuação da simulação no chão-de-fábrica. A simulação não só permite a análise das atividades de modo isolado, como também a interação destas atividades dentro da fábrica.

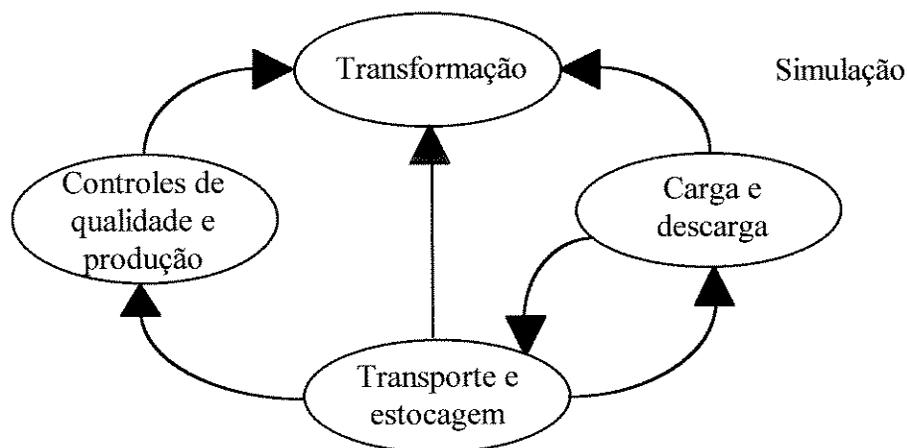


Figura 3.1. O papel da simulação no chão-de-fábrica [Agostinho, 1995]

<sup>1</sup> Segundo Giffi et alli [1990], *Benchmarking* é a comparação do desempenho de uma empresa em fatores críticos de sucesso com o desempenho de outras empresas.

Fallon e Browne [1988] desenvolveram modelos para avaliar o desempenho de manufaturas trabalhando segundo os princípios do *Just-In-Time/Kanban* onde utilizava-se o MRP II. Com este trabalho foi possível avaliar a extensão da utilização do *JIT* simultaneamente com o MRP II. Swinehart [1991] também utilizou a simulação para determinar o número de *Kanbans* ideal. Deste modo, não foi necessário o equacionamento matemático que em geral não traz resultados confiáveis para todos os casos.

Grieco [1995] desenvolveu modelos de simulação para estudar as possíveis políticas de troca de ferramenta e movimentação das peças em um sistema flexível de manufatura. Com isto, preserva-se o bom desempenho do sistema e minimiza-se o número de ferramentas necessárias, reduzindo-se os custos.

Wu [1994] utilizou a simulação para avaliar o desempenho da metodologia desenvolvida por Goldratt, de administração de gargalos, hoje apresentada como a Teoria das Restrições. Este experimento foi implementado em uma indústria fabricante de móveis, trabalhando inicialmente com ordens de produção. Com isto, foi possível demonstrar como a administração dos gargalos pode ser usada para a programação dos recursos (tambor), no dimensionamento dos inventários intermediários (pulmão) e para proteger a linha de produção contra interrupções, e sincronizar a alimentação da linha (corda).

Em resumo, a simulação na manufatura possibilita a solução dos seguintes problemas:

1. Como lidar com o *mix* de produtos requerido com um mínimo de investimento em máquinas e custo operacional;
2. Como alocar os recursos para que sejam cumpridas as metas de produção e para que sejam obtidos resultados financeiros ótimos;
3. Como otimizar o fluxo de produção em termos de custo global e, ao mesmo tempo, ficar dentro das limitações do tempo de ciclo.

A figura 3.2 mostra o desenvolvimento de um sistema de manufatura e coloca como a técnica de simulação pode atuar no auxílio na tomada de decisões fundamentais para o bom desenvolvimento e funcionamento do sistema.

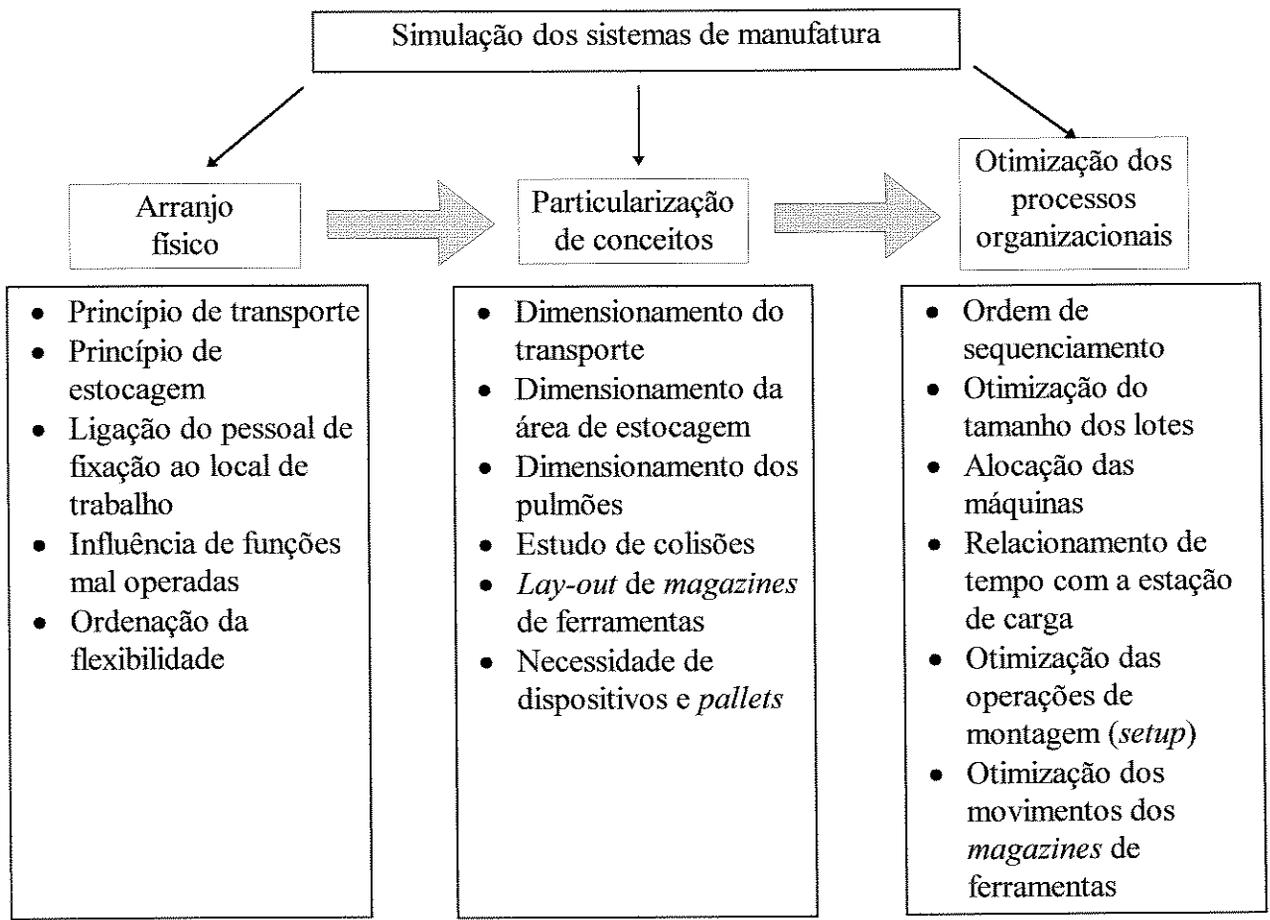


Figura 3.2. Uso da simulação na manufatura [Agostinho, 1995]

### 3.5. Classificação dos sistemas e modelos de simulação

Os sistemas simulados podem ser divididos em sistemas terminais e não terminais. Estes são diferenciados pelo ponto de término da simulação. Um sistema terminal possui a priori um evento que determina o seu fim. Mesmo que este evento dependa de variáveis aleatórias, este sistema se caracteriza por ter fim. Este ponto final da simulação do modelo pode ser determinado por período de tempo ou pela ocorrência de algum evento, como por exemplo, a produção de um lote de peças em uma célula de manufatura. Um exemplo típico de sistema terminal é o regime de atendimento bancário, que se inicia pela manhã e termina a tarde sem que nenhum estoque em processo - pessoas a serem atendidas, espere até o período seguinte de funcionamento. Desta maneira, o sistema possui as mesmas condições iniciais em todos os períodos.

Sistemas não terminais medem o desempenho do sistema a longo prazo. Neste não existe um ponto pré - estabelecido para o final da simulação. A simulação faz uma previsão

do comportamento do sistema para um período de tempo infinito e não apenas por uma semana ou um ano. Neste tipo de sistema a natureza do problema estudado vai determinar o período de tempo a ser simulado para que se possa obter resultados acurados. Um sistema de manufatura é considerado em geral como um sistema não terminal.

Sistemas terminais são muito sensíveis às condições iniciais pois no início de cada período de simulação, possui a mesma configuração. Por isso, diz-se que em sistemas terminais o tempo de aquecimento, ou o tempo que o sistema leva para entrar em regime permanente, deve ser considerado, pois o mesmo faz parte do funcionamento do sistema. Já os sistemas não terminais devem ser analisados sem considerar o tempo de aquecimento do modelo, porque este intervalo de tempo não representa corretamente o sistema, sendo uma característica do modelo construído.

Para o tratamento do tempo de aquecimento do modelo pode-se usar dois procedimentos:

- 1) Simular o modelo por um período de tempo significativamente superior ao tempo de aquecimento. Deste modo, a influência deste período nos resultados obtidos fica diluída;
- 2) Determinar graficamente o tempo de aquecimento do modelo e realizar a coleta dos resultados após este intervalo de tempo.

Obviamente, a primeira opção, apesar de simples, implica em um tempo maior de simulação, não garantindo os efeitos do tempo de aquecimento sobre os resultados tenham sido realmente descartados. A adoção do procedimento de descarte deste período de tempo é usual.

Já os modelos construídos podem ser classificados como estáticos ou dinâmicos, determinísticos ou estocásticos, e discretos ou contínuos; dependendo do sistema em estudo.

O modelo é considerado estático quando representa o sistema em um instante particular; modelos de Monte Carlo<sup>1</sup> são um exemplo típico. Modelos dinâmicos representam sistemas que evoluem com o tempo, como por exemplo um sistema de manufatura ou bancário.

---

<sup>1</sup> Modelos de Monte Carlo, cujo nome originou-se durante o projeto da bomba atômica na II Guerra Mundial, são modelos estáticos e estocásticos.

Modelos determinísticos são aqueles que não contém variáveis aleatórias. Nestes modelos só existe uma única resposta para o conjunto de dados de entrada. Modelos estocásticos são aqueles em que são utilizadas variáveis aleatórias, modeladas segundo distribuições estatísticas. Consequentemente são necessários experimentos estatísticos para a obtenção de respostas médias.

Os modelos discretos mudam de um estado para outro instantaneamente. Exemplos deste tipo de modelagem são a existência ou não de um lote de peças - Ou todo o lote está pronto ou nenhuma peça está pronta, quando na realidade as peças são processadas uma a uma. Outro exemplo típico é o desgaste da ferramenta de usinagem. Não se considera o desgaste desta como contínuo, o que seria correto, podendo-se apenas considerar duas situações: ferramenta quebrada ou não. Em geral, este tipo de modelagem é apropriado para simulação da manufatura.

Os modelos contínuos são utilizados em indústrias de processo, onde se trabalha com meios contínuos. Estes sistemas caracterizam-se pelos longos períodos de mudança. Ou seja, sistemas onde os períodos de mudança são representativos, não podendo assim, ser aproximados por modelos discretos.

Em geral, os sistemas quando modelados exatamente como são, seriam dinâmicos, estocásticos e mistos (em parte discretos e em parte contínuos), porém durante a modelagem podem ser feitas aproximações que não comprometam o estudo a ser realizado e que simplificam muito o trabalho de modelagem. Deste modo, sistemas de manufatura que deveriam ser modelos mistos, são estudados como modelos discretos.

Neste trabalho todos os sistemas serão modelados segundo eventos discretos, devido a não representatividade dos eventos contínuos, sendo dinâmicos e aleatórios.

### **3.6. Metodologia de simulação de eventos discretos**

A seguir são mostradas as etapas que em geral compõe um estudo de simulação [Law e Kelton, 1991]:

1. Formulação do problema e planejamento do estudo.

Todo estudo de simulação inicia-se com o entendimento do sistema e com a definição dos objetivos do estudo, sem os quais as chances de insucesso são grandes, pois a construção do

modelo deve ser dirigida exclusivamente para o cumprimento destes objetivos, retirando do sistema real apenas as informações relevantes ao estudo.

Assim, nesta etapa inicial, deve-se capturar a essência do sistema sem sobrecarregar o modelo com detalhes desnecessários. Um modelo com excesso de detalhes pode comprometer todo o trabalho devido ao tempo excessivo de implementação.

Ainda nesta etapa, se possível, devem ser delineadas as possíveis alternativas para o sistema e estabelecidos os critérios de avaliação da eficácia destas alternativas.

## 2. Coleta de dados e definição do modelo.

Após o estabelecimento das metas do estudo e da total compreensão do sistema real, deve-se definir o modelo, montando a sua lógica de funcionamento. Em seguida, realiza-se a coleta dos dados a serem utilizados no modelo.

Neste estágio pode-se encontrar duas situações distintas:

- O sistema em estudo já existe, o que permite que seja feita uma amostragem dos dados;
- O sistema em estudo não existe e os dados de entrada devem ser estimados.

No caso do sistema já existir, deve-se inicialmente calcular o tamanho mínimo da amostra para que os dados coletados representem corretamente o sistema real. Para isto são utilizadas as seguintes fórmulas [Freitas, 1995]:

$$n_0 = 1/E_0^2 \quad \text{e} \quad n = (N \times n_0) / (N + n_0)$$

onde:

$N$  = Tamanho da população;

$n$  = Tamanho da amostra;

$n_0$  = Primeira aproximação para o tamanho da amostra;

$E_0$  = Erro amostral tolerável.

Após a coleta dos dados deve-se encontrar distribuições estatísticas, que serão utilizadas no modelo de simulação, compatíveis com a frequência dos dados observados na amostra. Com esta finalidade, são utilizados testes de aderência (Chi-Quadrado e Kolmogorov-Smirnov) para avaliação do desvio entre a distribuição amostral e a teórica.

No caso de não existirem dados reais para a realização da amostragem, como acontece quando são simulados sistemas inexistentes, deve-se estimá-los com base em experiências anteriores, informações do fabricante dos equipamentos e considerações teóricas sobre o sistema [Freitas, 1995].

Em geral estas estimativas são feitas de três formas distintas:

- **Valor médio:** Em processos com baixa variabilidade é usual a adoção do valor médio como constante, pois este, em geral é conhecido. Em processos com alta variabilidade pode-se modelar o processo usando uma distribuição exponencial, já que o único parâmetro necessário é o valor médio. Deve-se porém, observar que na distribuição exponencial a média é aproximadamente igual a sua variância, resultando num grande espectro de resposta. Em geral, a distribuição exponencial é utilizada na modelagem do intervalo de tempo entre chegadas, sendo rara a sua utilização para estimar tempos de processos ou serviços. Outra opção é utilizar o valor médio mais/menos um percentual fixo, fazendo-se uso de uma distribuição uniforme ou triangular simétrica.
- **Valores mínimo e máximo:** Muitas vezes pode-se obter os valores mínimos e máximos para um determinado processo. Nestes casos deve-se utilizar uma distribuição normal ou triangular. Outra opção é utilizar uma distribuição uniforme, o que segundo Freitas [1995] e Law [1991] apenas confirma a falta de conhecimento do processo modelado, não comprometendo a representatividade do modelo.
- **Valores máximo, mínimo e mais provável:** Quando for possível estimar os valores mínimo, máximo e mais provável, então as distribuições triangular, beta ou normal são as melhores estimativas, com a triangular sendo a mais conveniente.

Na tabela 3.3 são exemplificadas as diferenças obtidas quando se faz uso das distribuições normal, uniforme e triangular.

<b>Distribuição</b>	<b>Média</b>	<b>Variância</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>
Normal	99.9	9.91	63	141
Uniforme	99.9	11.4	80	120
Triangular	99.9	8.09	80.4	120

Tabela 3.3. Distribuições estatísticas [Freitas, 1995]

### 3. Validação do modelo elaborado.

Depois de definido o modelo e coletados os dados de entrada, toda a modelagem deve ser submetida às críticas dos indivíduos ligados as operações em estudo, comparando o sistema real com o modelo que será implementado, criando aderência ao modelo, validando-o.

### 4. Implementação do modelo em computador e verificação.

Posteriormente é feita a implementação do modelo em computador. Nesta etapa, o modelador deve decidir em que ambiente implementar o modelo. É possível a utilização de uma linguagem de uso genérico como C++ ou Pascal, uma linguagem de simulação ou simuladores específicos. Nesta decisão estão envolvidos fatores como flexibilidade, nível de detalhamento necessário ao modelo e tempo disponível para a implementação do mesmo. Uma linguagem de uso genérico oferece total flexibilidade de construção, porém demanda muito tempo para implementação do modelo, pois todas as rotinas (geração de números aleatórios, gerenciamento do sistema de transportes e filas) devem ser implementadas. No outro extremo encontram-se os simuladores que têm baixa flexibilidade, embora facilitem o trabalho de construção do modelo. Entre estes dois tipos de ambientes, existem as linguagens de simulação que conciliam os dois extremos, pois como linguagem, o usuário tem total flexibilidade de trabalho, possuindo ainda, a vantagem de ter embutidas as rotinas básicas de simulação. Durante esta etapa também são feitos alguns testes para verificação do funcionamento do modelo.

## 5. Execução de testes pilotos.

Nesta etapa são executados testes pilotos cujos resultados serão validados na etapa seguinte e utilizados nas etapas posteriores.

## 6. Validação do modelo construído.

Diferentemente da verificação feita durante a etapa 4, onde determina-se se o modelo funciona como esperado, nesta etapa é feita a validação do modelo construído. Ou seja, determina-se com que acuracidade o sistema real foi representado pelo modelo.

Após a obtenção dos resultados provenientes dos testes pilotos, compara-se o seu comportamento com o sistema real, analisando-se a sua sensibilidade<sup>1</sup> e determinando-se a representatividade dos resultados obtidos. Se existir um sistema real, os dados de saída do modelo devem ser comparados com os do sistema real.

## 7. Projeto de experimentos.

Com base nos resultados obtidos durante os testes das duas etapas anteriores, são elaborados experimentos para analisar as possíveis alternativas para o sistema, visando otimizá-lo. Após determinar o tipo de sistema que está em estudo, ou seja, se o sistema é terminal ou não terminal, são necessários tratamentos estatísticos distintos para cada tipo de sistema e especificados o tempo de duração da simulação, o número de replicações necessárias para a obtenção dos resultados, como também, estudada a coleta dos resultados. [Law e Kelton, 1991]

Depois de construído e validado o modelo; selecionadas as medidas de desempenho através das quais vão ser comparadas as diversas configurações possíveis para o sistema em estudo; selecionadas as variáveis existentes no modelo e os valores que estas podem assumir, faz-se necessário a construção de experimentos para a correta avaliação da influência destas variáveis no desempenho do modelo.

A realização destes testes pode ser feita alterando-se seguidamente o valor de cada variável, medindo de forma independente a influência de cada uma destas sobre o desempenho

---

<sup>1</sup> Nesta análise são introduzidas pequenas variações nos dados de entrada e avaliada a sua influência nos dados de saída. Parâmetros de saída muito sensíveis, devem ser substituídos por outros.

global do modelo. Porém, segundo Fleury [1993] este procedimento possui dois inconvenientes.

1. Não contempla o efeito provocado pela interação entre as diversas variáveis envolvidas, considerando apenas o efeito isolado de cada uma delas. É esperado que mudanças numa determinada variável impacte o desempenho do sistema apenas nas configurações onde uma segunda variável também tenha sido modificada. Assim, o efeito conjunto das mudanças feitas em duas ou mais variáveis de controle pode modificar o desempenho do modelo, ao passo que quando isoladas não contribuem em nada.
2. Considerando-se apenas o efeito isolado de cada uma das variáveis de controle, não se garante que a configuração escolhida como a melhor, comporte-se conforme o esperado em qualquer caso. O correto é analisar cada mudança individual em relação a uma ampla variedade de configurações.

Para contornar estes problemas utiliza-se um Projeto Estatístico de Experimentos (*Statistical Design of Experiments* - DOE), que propõe uma metodologia rigorosa e universal para projetar e analisar experimentos comparativos. Avalia-se não só a ação isolada de cada um dos fatores, mas também a sua ação em conjunto com os outros fatores. Assim, as variáveis de controle são consideradas como fatores do modelo, sendo seus possíveis valores, os níveis destes fatores.

Uma das razões mais importantes para se utilizar o DOE é a possibilidade de otimização do sistema com o mínimo de experimentos possíveis.

Obviamente a construção de um projeto de experimentos que considere todas as ordens de interação entre os fatores - dois a dois, três a três, etc., pode impossibilitar o trabalho, devido ao grande número de combinações possíveis. Assim são descartados os efeitos de terceira ordem e superiores. A eliminação destas ordens reduz a acuracidade dos resultados obtidos, mas segundo Fleury [1993] os efeitos oriundos destas interações são em geral desprezíveis e difíceis de interpretar.

A tabela 3.4 mostra a matriz de um projeto de experimentos fatorial total considerando apenas 3 fatores. Considerando-se que para cada fator são utilizados dois níveis, o sinal negativo indica o nível inferior e o positivo o superior, o número de experimentos necessários é  $2^3$  combinações, ou oito experimentos. Deve-se observar ainda, que este é o número necessário de diferentes combinações para a correta avaliação da influência dos fatores sobre o desempenho do sistema. Porém, para cada combinação diferente são necessárias várias replicações para que se possa estabelecer um intervalo de confiança para o cálculo de cada um dos efeitos desejados.

Combinação	Fator 1	Fator 2	Fator 3	Fator 12	Fator 13	Fator 23	Resposta
1	-	-	-	+	+	+	$R_1$
2	+	-	-	-	-	+	$R_2$
3	-	+	-	-	+	-	$R_3$
4	+	+	-	+	-	-	$R_4$
5	-	-	+	+	-	-	$R_5$
6	+	-	+	-	+	-	$R_6$
7	-	+	+	-	-	+	$R_7$
8	+	+	+	+	+	+	$R_8$

Tabela 3.4. Matriz do projeto de experimentos fatorial total para 3 fatores

Assim para o cálculo do efeito provocado pelo fator 1 tem-se:

$$e_1 = \frac{[(R_2 - R_1) + (R_4 - R_3) + (R_6 - R_5) + (R_8 - R_7)]}{4}$$

ou

$$e_1 = \frac{[-R_1 + R_2 - R_3 + R_4 - R_5 + R_6 - R_7 + R_8]}{4}$$

$$\text{Assim, } e_j = \frac{\sum_{i=1}^{2^k} a_{ij} \times R_i}{2^{k-1}} \quad (1)$$

Onde:

j - fator (Coluna j da tabela 3.4)

i - Número da combinação

k - Número de fatores

Assim, quando o valor resultante da expressão 1 é nulo o efeito provocado pela variação do fator entre seu nível inferior e superior é desprezível.

#### 8. Execução do modelo de simulação.

Após o projeto dos experimentos, deve-se realizar a simulação para medir o desempenho do sistema e avaliar as diversas alternativas estabelecidas na primeira etapa do estudo.

#### 9. Análise de resultados.

Nesta etapa devem ser utilizadas ferramentas estatísticas para a análise dos dados de resposta. Basicamente é definido um intervalo de confiança para cada medida de desempenho realizada e medido o desempenho de cada uma das alternativas para o sistema.

A obtenção de valores médios para as medidas de desempenho selecionadas, pode utilizar dois métodos distintos: Método das replicações ou método dos lotes. Ambos os métodos geram valores médios e intervalos de confiança para as medidas realizadas. Os dados necessários para a construção destes intervalos de confiança, são coletados através de consecutivas leituras feitas no modelo em intervalos de tempo iguais, usualmente chamados de passo.

O método das replicações calcula o valor médio da medida desejada a partir de uma série independente de execuções ou replicações do modelo. Deste modo, o modelo é simulado várias vezes, em cada uma destas, são coletados novos valores passo a passo. Ao final é calculado um valor médio e um intervalo de confiança para os dados coletados.

Já no método de lote, o tempo total de simulação é dividido em lotes iguais e dentro de cada lote são coletados novos dados passo a passo. Assim, ao final de uma única replicação são calculados valores médios da medida desejada para cada lote, realizando então, o cálculo do valor médio e do seu intervalo de confiança. Faz-se o procedimento deste modo para que todos os valores médios dos lotes tenham o mesmo peso no resultado final.

O método das replicações é utilizado exclusivamente em sistemas terminais. Uma variação deste método, método da replicação/eliminação, pode ser utilizado em sistemas não terminais. Neste, a coleta dos dados inicia-se após o término do período de aquecimento do modelo, fazendo passo a passo até o final do período de simulação. Deste modo, a série de resultados coletados das várias replicações são usados para o cálculo do valor médio da

medida e do seu intervalo de confiança. A utilização de replicações separadas garante que não exista correlação entre as replicações, garantindo assim a independência dos experimentos.

No método da replicação o tempo de aquecimento do modelo é ultrapassado uma única vez, ao contrário do método Replicação/Eliminação. A maior desvantagem deste método é a possível ocorrência de correlação entre os dados coletados, já que a coleta foi realizada em uma única replicação. Deve-se fazer a análise do caso para medir a correlação entre os dados coletados.

A figura 3.3 mostra onde são aplicados os métodos descritos acima.

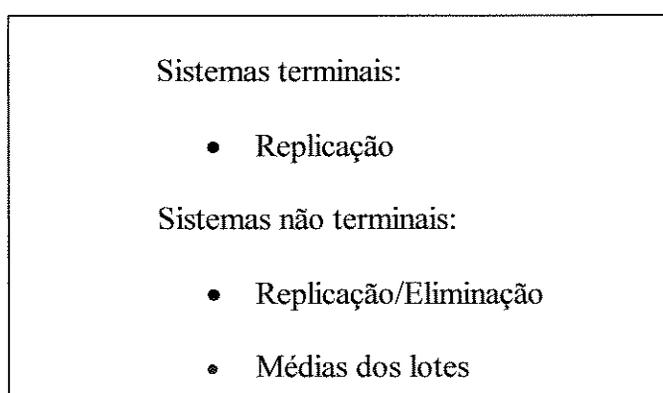


Figura 3.3. Métodos de análise de resultados

#### 10. Documentação e implementação dos resultados.

Por fim, todo o modelo deve ser documentado juntamente com os resultados obtidos, pois em geral, os modelos podem ser aplicados em outras situações. Os resultados serão documentados para posterior comparação com os resultados oriundos das modificações no sistema real.

### 3.7. Comentários finais

Como apresentado, a simulação é uma metodologia que permite a análise de cenários que ainda estão no campo das propostas. Cenários que só existirão em função de decisões estratégicas, podendo ser simulados antes de entrarem em funcionamento.

No próximo capítulo será demonstrado como através da simulação de eventos discretos e a utilização das técnicas de gestão da produção, pode-se melhorar o desempenho de uma planta, realizando um ciclo de melhoria contínua.

## **Capítulo 4**

# **Aplicação da Simulação de eventos discretos e das Técnicas de Gerenciamento da Produção em Busca de Padrões de Classe Mundial**

### **4.1. Introdução**

O presente capítulo propõe a utilização conjunta da simulação de eventos discretos e das técnicas de gerenciamento da produção, para criação de um ciclo de melhoria contínua em busca de padrões de classe mundial.

A partir das medidas de desempenho apresentadas, constrói-se um ciclo de melhorias contínuas na manufatura, utilizando-se a simulação de eventos discretos e as técnicas de gerenciamento. A melhoria do desempenho é obtida com a avaliação da influência das variáveis de controle das técnicas de gerenciamento - que serão chamados de fatores de controle, nos índices de desempenho medidos com a simulação. Deste modo, é possível modificar-se o sistema real e realimentar-se o modelo de simulação, completando o ciclo.

Por fim, é apresentada metodologia para a implementação deste ciclo de melhorias proposto.

### **4.2. Utilização da simulação para medição do desempenho**

A manufatura possui a constante necessidade de melhorar a sua competitividade. Esta necessidade inclui a melhoria do desempenho da manufatura. Com este fim, são utilizadas medidas de desempenho, e mais especificamente medidas de desempenho de chão-de-fábrica, que permitem a avaliação do sistema de manufatura.

A utilização da simulação para medição do desempenho do sistema de manufatura permite a avaliação de mudanças propostas ou a previsão do desempenho de sistemas que ainda não foram inteiramente implementados. Principalmente neste último caso, a medição do desempenho destes sistemas pode ser extremamente difícil, porque é impossível a realização de uma coleta de dados diretamente no sistema. Ou seja, quando o sistema ainda não existe, ou ainda não está em funcionamento, não é possível medir o seu desempenho. Assim, propõe-se a utilização da simulação de eventos discretos para medição do desempenho de sistemas de manufatura.

Existe ainda a necessidade de avaliar a influência, positiva ou negativa, de algumas modificações no desempenho do sistema. Mesmo realizando estas modificações e posteriormente medindo-se o novo desempenho do sistema, é impossível garantir-se que o sistema se comporte sempre do mesmo modo. Ou seja, o comportamento observado no sistema de manufatura pode apenas ser consequência de alguma configuração especial, ou de uma combinação de fatores de controle que pode não se repetir sempre.

Como citado no capítulo 3, através da simulação de eventos discretos é possível realizar muitas medidas no modelo. Assim, utilizando a simulação, mede-se o desempenho do sistema em várias configurações diferentes, a influência de todos os fatores existentes e o desempenho do sistema com o intervalo de confiança desejado, garantindo que todas as configurações plausíveis foram avaliadas.

A seguir, são apresentadas as medidas de desempenho selecionadas, como estas são realizadas em sistemas reais, e como esta medição será realizada utilizando a simulação de eventos discretos. Esta metodologia de medição será utilizada no capítulo 5, onde é realizado um estudo de caso.

1. Tempo de ciclo de produção: Segundo Maskell [1991], apesar da importância fundamental desta medida de desempenho, geralmente não é fácil fazer a coleta de dados necessária ao cálculo deste índice de desempenho. Assim, existem basicamente quatro métodos para medição do tempo de ciclo de produção:

- Controle total dos tempos de ciclo;
- Análise das folhas de processo da engenharia de fabricação;

- Realização de experimentos estatísticos;
- Medição indireta.

Em geral, o controle detalhado do tempo de ciclo de produção de todos os itens, ou mesmo lotes, processados por uma célula ou linha, demanda muito tempo e revela-se pouco prático. Quando este método é aplicado, são registrados os horários de entrada e saída dos itens na linha, célula ou na própria empresa, e calculado um valor médio diário ou semanal, dependendo do volume de produção e da própria duração do ciclo de fabricação. Este método inviabiliza o controle manual dos tempos de ciclo de produção mesmo em sistemas relativamente simples. Para contornar este problema, utiliza-se a coleta automática dos dados, com uso de uma leitora de códigos de barra ou similares. Com isto, obtém-se um alto grau de detalhamento da informação. Porém, segundo Vollmann[1985], controlar o ciclo de fabricação com precisão não faz com que seu desempenho melhore. Neste caso, as ações tomadas em função dos resultados observados é mais importante que a precisão dos mesmos.

Uma outra forma de se realizar esta medida é analisar as folhas de processo de fabricação, a fim de se calcular o tempo total de produção. Em empresas de Classe Mundial, as folhas de processos são precisas, tornando esta análise viável. Nas empresas que não possuem estas folhas de processos atualizadas, esta análise torna-se impossível.

A utilização de controle em tempo real para todos os itens fabricados pode ser tão custosa a ponto de tornar-se proibitiva. Já a utilização das folhas de processo para análise do tempo de ciclo de produção não é adequada, porque não retrata a situação atual do processo, mas sim a esperada ou planejada. Mesmo em Manufaturas de Classe Mundial esta diferença pode ser substancial. Como opção, é possível a utilização de experimentos, a fim de obter um valor aproximado para o tempo total de produção segundo um dado intervalo de confiança para o tempo de ciclo de produção. Assim faz-se a medição do ciclo de produção de apenas um conjunto de itens que passam pelo processo, economizando tempo e esforço de medição, garantindo precisão nos resultados.

Por fim, pode-se ainda utilizar medidas indiretas através das quais é possível obter-se o tempo de ciclo de produção. Uma forma simples de medir o tempo de ciclo de produção é realizar o controle da produção diária e do estoque em processo. A taxa obtida com a razão entre estas duas medidas fornece o tempo de ciclo de produção.

Independentemente do método utilizado para o cálculo do tempo de ciclo de produção, é importante dar maior relevância a tendência de redução do tempo de ciclo de produção medido e ao intervalo de tempo que este pode assumir, indicando a existência de um ciclo de melhoria contínua. Por outro lado, resultados ótimos intercalados, não indicam uma tendência de melhoria.

Com o uso da simulação de eventos discretos, pode-se realizar a medição do tempo de ciclo de produção, utilizando o método do controle total dos tempos de ciclo, ou medição direta. Pode-se obter o tempo de todos os itens processados a um custo mínimo e com a mesma precisão obtida com a medição direta na produção. Isto acontece porque o modelo simulado reflete o sistema real de produção.

No modelo simulado são criados atributos para todos os itens processados pelo modelo. Estes atributos são utilizados para controlar o instante de entrada e saída do item do modelo. A partir destes atributos calcula-se o valor médio para o ciclo de produção.

2. Movimentação de materiais: Poucos sistemas de planejamento e controle da produção possuem dados sobre as distâncias percorridas pelos itens durante os processos de fabricação. Com uso dos roteiros de fabricação e através do registro das distâncias entre as estações de trabalho, em geral desconhecidas, é possível realizar-se o cômputo das distâncias percorridas.

Com uso da simulação de eventos discretos torna-se mais simples a obtenção destes dados, pois mesmo nos casos de desvios e rotas alternativas para um mesmo item, a simulação permite o controle individual de cada um dos itens que trafegam pelo modelo simulado. Sendo utilizada uma ferramenta qualquer de simulação de eventos discretos, é possível retirar-se automaticamente os dados

necessários sobre o arranjo físico do sistema de qualquer sistema gráfico computacional.

3. Capacidade ociosa: A medição da capacidade ociosa é uma tarefa complexa, pois a determinação da capacidade de produção, em geral, não pode ser feita sem a determinação do *mix* de produção. Por isso, muitas empresas adotam como capacidade de produção o número de horas disponíveis de produção (onde é grande a variação no *mix*), ou a quantidade de produtos fabricados ao longo do tempo (onde o *mix* é aproximadamente constante). [Maskell, 1991]

Assim, a razão entre a produção diária, semanal ou mensal, e a capacidade de produção fornece o percentual da capacidade ocupada, permitindo o cálculo da capacidade ociosa.

Por outro lado, mesmo a capacidade de produção pode variar por exemplo, devido as horas extras. Assim, é usual a realização deste cálculo em função das capacidades média e máxima, para comparar os resultados ao longo do tempo.

Com o uso da simulação de eventos discretos acompanha-se a ocupação de cada recurso existente no modelo. Todo o tempo disponível de um determinado recurso é contabilizado em termos de tempo de *setup*, tempo de operação e tempos de manutenção, permitindo o cômputo da sua ocupação, permitindo assim, o cálculo de sua capacidade ociosa.

4. Giro de inventário: O giro de inventário pode ser medido segundo vários métodos distintos. Uma metodologia muito utilizada é a do número de vezes que o inventário é consumido em um ano. Por exemplo, para conhecer o giro de inventário de um componente, divide-se a demanda média deste componente em um ano, pelo estoque atual deste item.

Através da simulação de eventos discretos, é possível conhecer o número de itens em estoque de uma dada peça, facilitando, com isto, o cálculo do giro de inventário.

5. Produtividade: A definição mais conhecida sobre produtividade é a razão entre saída (*output*) e a entrada (*input*). Logo, pode-se definir a produtividade como a

taxa entre os produtos vendidos e os recursos empregados - podendo ser utilizado o número de equipamentos empregados, ou o número de pessoas envolvidas, ou ainda, as horas máquina. [Giff et. alli, 1990]

O número de produtos vendidos pode ser medido diretamente no modelo, através da contagem dos produtos expedidos. Este número pode ser convertido para horas de máquinas agregadas a este produto, ou seja:

$$\text{HPV} = \text{Número de produtos vendidos} \times \text{Tempo total de fabricação}$$

Onde:

$$\text{HPV} = \text{Horas de Produtos Vendidos.}$$

A medição dos recursos utilizados pode ser computada através da seguinte fórmula:

$$\text{HRU} = \sum \text{HWIP} + \text{HPA}$$

Onde:

$$\text{HRU} = \text{Horas Totais dos recursos utilizados}$$

$$\text{HWIP} = \text{Número de produtos em estoque} \times \text{Tempo das operações anteriores}$$

$$\text{HPA} = \text{Número de produtos acabados} \times \text{Tempo total de fabricação}$$

A figura 4.1 mostra como pode-se medir a produtividade, onde:

$$\text{Produtividade} = \frac{\text{HPV}}{\text{HRU}}$$

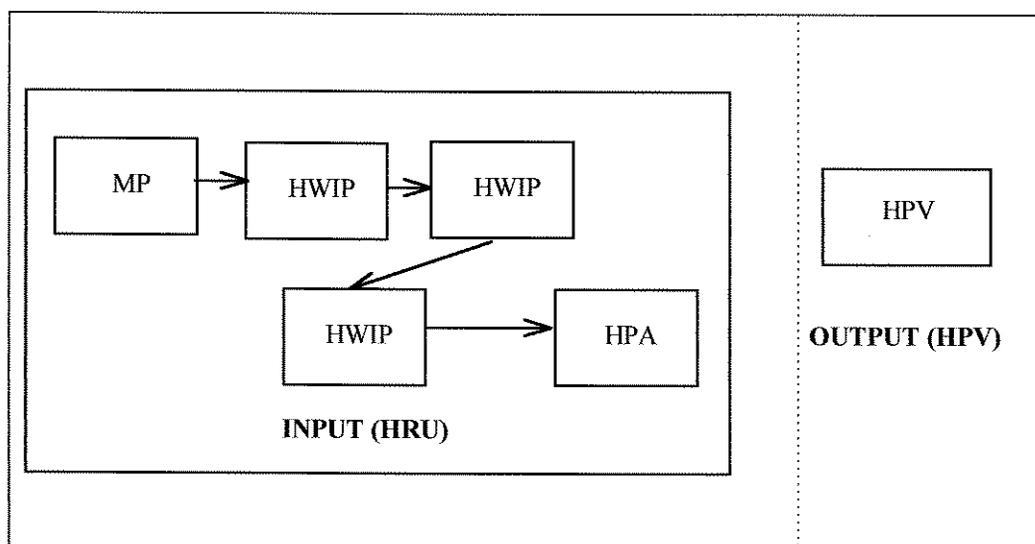


Figura 4.1. Medição da produtividade

### 4.3. Análise das medidas de desempenho e dos fatores que as influenciam

Analisando as medidas de desempenho selecionadas sob o enfoque das técnicas de gestão da produção estudadas, foram escolhidos os fatores de controle tidos como críticos nas metodologias *Just-In-Time* e Teoria das Restrições. A tabela 4.1 relaciona os fatores selecionados e em qual técnica de gestão da produção este está fundamentado.

Uma observação importante é feita a partir da tabela 4.1. A maioria dos fatores de controle selecionados baseiam-se no *Just-In-Time*. Esta observação não implica em afirmar que uma metodologia seja mais abrangente que a outra. Na verdade, as duas metodologias não são, na maioria dos casos, contrárias. Ambas apontam na mesma direção por diferentes enfoques.

Fatores	Técnica de gerenciamento
• Tamanho do Lote	• JIT /TOC
• Variabilidade do tempo de processo	• JIT
• Número de <i>kanbans</i>	• JIT
• Tempo de <i>setup</i>	• JIT
• Arranjo físico	• JIT
• Número de estações	• JIT
• Regra de alimentação dos recursos	• TOC
• Manutenções	• JIT
• Falta de material	• JIT/TOC

Tabela 4.1. Fatores de controle do desempenho

A figura 4.2 mostra o relacionamento esperado entre as medidas de desempenho e os fatores de controle que os influenciam. Além desta interação, também observa-se interações entre os fatores e das próprias medidas de desempenho entre si.

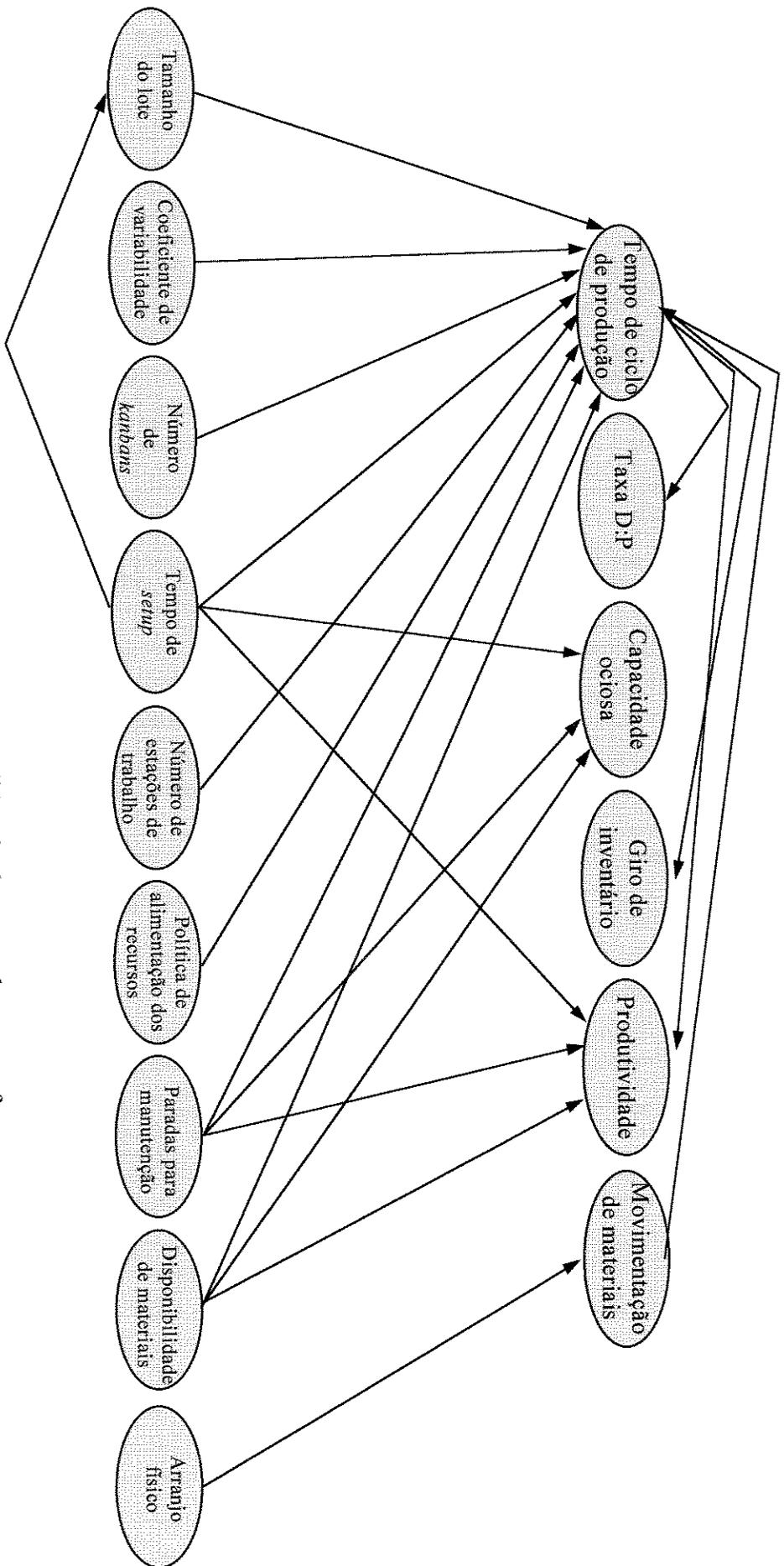


Figura 4.2. Relação entre as medidas de desempenho e seus fatores

Como observado, a medida de desempenho do tempo total de ciclo de produção influencia decisivamente no giro de inventário, pois este é calculado em função do tempo de ciclo de produção. Por outro lado, a medida de movimentação de materiais tem influência, porém menor, sobre o tempo de ciclo de produção, pois este contém os tempos de processo, e os tempos de espera e movimentação.

Dentro do grupo dos fatores, o tempo de *setup* influencia de maneira indireta o tamanho do lote, pois o seu aumento inviabiliza a utilização de lotes menores, o que implicaria em uma redução da disponibilidade do recurso e conseqüentemente na capacidade de produção. No caso deste recurso se tornar uma restrição do sistema, a redução do tamanho do lote é inviabilizada.

O tamanho do lote, principal objeto de estudo do JIT - via redução do desperdício que este representa, e também contemplado na TOC - via sincronização da manufatura em função da restrição do sistema, tem relação direta com o tempo de ciclo de produção. Reduzindo-se o tamanho do lote espera-se uma redução substancial do tempo de ciclo de produção. Isto acontece porque o fluxo de itens pelo sistema passa a ocorrer de modo contínuo, e não de maneira intercalada como acontece quando é utilizado um tamanho de lote alto.

A variabilidade do tempo de processo deve refletir nas medidas de desempenho da mesma forma que o tamanho do lote. Este influencia somente o tempo de ciclo de produção, porém de forma menos sensível.

O número de *kanbans*, fator com grande afinidade com o tamanho do lote, ou seja, influencia o desempenho do sistema de manufatura do mesmo modo, também deve refletir-se no tempo de ciclo de produção. Um maior número de *kanbans* aumenta o inventário em processo, o que implica em um aumento do tempo de ciclo de produção, pois os itens ficam mais tempo no sistema para serem processados.

O tempo de *setup* deve ser fundamental nas medidas do tempo de ciclo de produção, capacidade ociosa e na produtividade. Com a redução do tempo de *setup* obtém-se uma maior disponibilidade da máquina ou um aumento da capacidade ociosa, diminuindo o tempo de ciclo de produção e aumentando a produtividade. Reduzindo-se o tempo de *setup*, pode-se aumentar sua freqüência, reduzir o tamanho dos lotes e em conseqüência obter uma maior flexibilidade e rapidez nas entregas.

## Referências bibliográficas

1. AGOSTINHO, Oswaldo L. *Integração Estrutural dos Sistemas de Manufatura como Pré-Requisito de Competitividade*. Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Unicamp, 1995, 146 p. Tese (Livre Docência).
2. ARDHALDJIAN, Raffy; FAHNER, Mike. Using Simulation in the Business Process Reengineering Effort. *Industrial Engineering*, julho de 1994, p.60-61.
3. CHAHARBAGHI, K. Using Simulation to Solve Design and Operational Problems. *International Journal of Operations and Production Management*, janeiro de 1990, p.89-105.
4. CHRYSSOLOURIS, 1992. \_\_\_\_\_ .
5. CORRÊA, H.; GIANESI, I. *Just-In-Time, MRPII e OPT - um enfoque estratégico*. Editora Atlas, 1993, 186 p.
6. COUTINHO, Luciano; FERRAZ, João Carlos. *Estudo da Competitividade da Indústria Brasileira*. 2º ed., Campinas, 1994, 510 p.
7. FALLON, D.; BROWNE, J. Simulating Just-In-Time Systems. *International Journal of Operations and Production Management*, 1988, p.30-45.
8. FLEURY, Paulo Fernando. Estrutura de produção e desempenho operacional: identificação de variáveis-chave através da simulação. *Revista de Administração de Empresas*, nov/dez, 1993, p.8-19.
9. FREITAS. *Apostila do Curso de Análise de dados para simulação de sistemas*. Paragon Consultoria e Tecnologia, 1995.

O número de estações de trabalho deve refletir no tempo de ciclo de produção, pois agiliza o fluxo de produção pelos recursos da fábrica.

A política de alimentação dos recursos influencia positivamente apenas o tempo de ciclo de produção dos itens beneficiados pela política implementada, influenciando negativamente os itens não privilegiados por esta política.

A política utilizada para manutenção, deve influenciar o tempo de ciclo de produção, a capacidade ociosa e a produtividade. Através de um plano de manutenção preventiva pode-se reduzir os tempos de parada da máquina. Se uma máquina sofre uma manutenção corretiva, ela pode ficar parada por um longo tempo realizando a manutenção propriamente dita, ou mesmo esperando uma peça de reposição. Estes eventos implicam numa diminuição da capacidade ociosa, no aumento do tempo de ciclo de produção e na redução da produtividade.

A disponibilidade de materiais influencia o tempo de ciclo de produção, a capacidade ociosa e a produtividade.

Por fim, o arranjo físico influencia a distância percorrida pelos materiais, ou seja, a movimentação de materiais.

#### **4.4. Utilização da Simulação de eventos discretos no Apoio à Decisão**

No capítulo 2 foram expostas a que tipo de questões está exposto o gestor da manufatura e como estas decisões são classificadas. Também ficou evidente que os sistemas de apoio a decisão, geralmente adotados, são incapazes através de medidas realizadas no próprio sistema, prever o comportamento futuro do mesmo para apontar automaticamente oportunidades de melhoria. Sendo melhor aplicados na organização das melhorias propostas e na sua evolução, porém são incapazes de realizar uma avaliação quantitativa de um conjunto de melhorias propostas, e apontar a melhor.

Com a utilização da simulação de eventos discretos para suportar estes processos decisórios soluciona-se a deficiência encontrada nos outros sistemas de apoio a decisão, ou seja, quantifica-se o efeito de cada decisão analisada. Por exemplo, quando a configuração do sistema deixa de atender a demanda devido a um aumento da mesma, é possível simular o modelo do sistema real e identificar a restrição que impede o aumento da capacidade do

sistema. Por fim, pode auxiliar no processo de análise das possíveis soluções para a remoção ou aumento da capacidade da restrição.

Assim, a simulação de eventos discretos revela-se uma ferramenta de uso diário na gestão da produção. Quanto mais objetiva for a questão a ser estudada, melhor se aplica a simulação de eventos discretos. Ou seja, quando é detectado um problema no chão-de-fábrica, torna-se mais fácil comparar as possíveis soluções utilizando a simulação de eventos discretos. Determinadas quais medidas de desempenho serão utilizadas para determinar qual das soluções é a melhor, o modelo é simulado com cada uma das configurações propostas - soluções propostas. Assim são realizadas e comparadas as medidas de desempenho correspondentes a cada uma das soluções propostas.

Por fim, a simulação é capaz de integrar-se às várias tecnologias de informação utilizadas na gestão da produção, podendo inclusive tornar-se um sistema automático, sendo alimentado pelos outros sistemas de informação. Isto dispensa ou diminui bastante o trabalho de modelagem do sistema, como mostrado na figura 4.3.

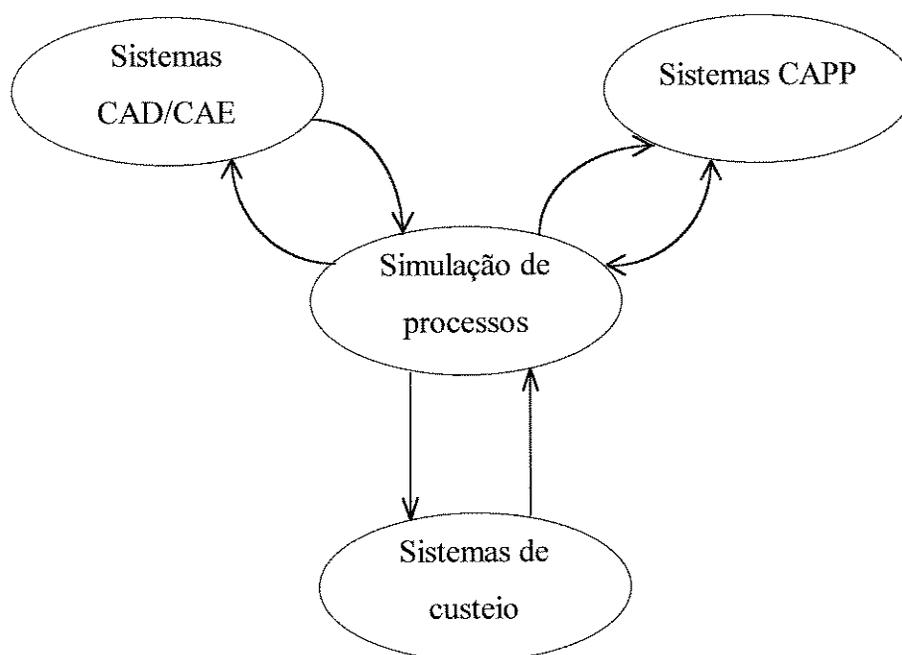


Figura 4.3. Integração dos sistemas de informação

Lima et. alli [1996] desenvolveu um trabalho onde o modelo de simulação de eventos discretos de uma linha de fabricação foi utilizado para fornecer os dados necessários para um sistema de Custeio Baseado em Atividades.

#### 4.5. Integração dos modelos de simulação e gerenciamento da produção através da medição do desempenho

Com base na apresentação das medidas de desempenho operacionais e como a simulação pode ser utilizada para realizar estas medidas, pode-se utilizar os conceitos nos quais se baseiam as técnicas de gerenciamento da produção para melhorar o processo e realimentar o modelo de simulação, fechando o ciclo de melhoria contínua do processo, observado na figura 4.4.

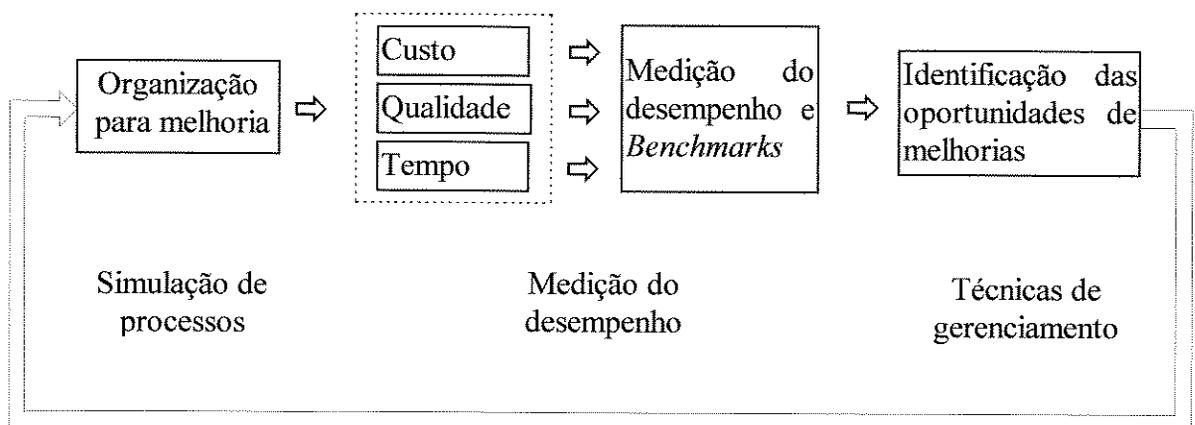


Figura 4.4. Ciclo de melhoria contínua

Para a avaliação dos diversos cenários possíveis para um mesmo sistema produtivo propõe-se a utilização de medidas de desempenho de classe mundial - que são um reflexo direto dos alavancadores de competitividade: custo, qualidade e tempo - para a avaliação simples e direta da eficácia das operações de chão-de-fábrica.

Através da observação do comportamento destas medidas de desempenho, em função dos fatores de controle apontados pelas técnicas de gerenciamento da produção *Just-In-Time* e a Teoria das Restrições, é possível modificar-se o processo, otimizando-se as medidas de desempenho, através da realimentação do processo de simulação.

Outra vantagem de se realizar este estudo em paralelo com a simulação é a possibilidade de se estudar o arranjo físico da manufatura, ou seja otimizá-lo. O *Just-In-Time* aponta o arranjo físico como uma das sete fontes de desperdício a serem eliminadas na manufatura, porém não fornece nenhuma ferramenta direta com a qual se possa comparar dois ou mais arranjos físicos.

A utilização da simulação de eventos discretos permite a validação das mudanças promovidas com a aplicação do *Just-In-Time* e a Teoria das Restrições.

Com a utilização conjunta da simulação de eventos discretos e das medidas de desempenho de classe mundial é possível suprir a principal deficiência que a técnica de simulação apresenta, ou seja, não realizar a otimização dos modelos, e não apontar a direção das melhorias a serem feitas.

#### **4.6. Metodologia de implementação do ciclo de melhorias proposto**

Para implementação do ciclo de melhoria apresentado nos tópicos anteriores e com base nas metodologias de simulação e de tomada de decisão, foi proposto o seguinte método de trabalho mostrado na figura 4.5.

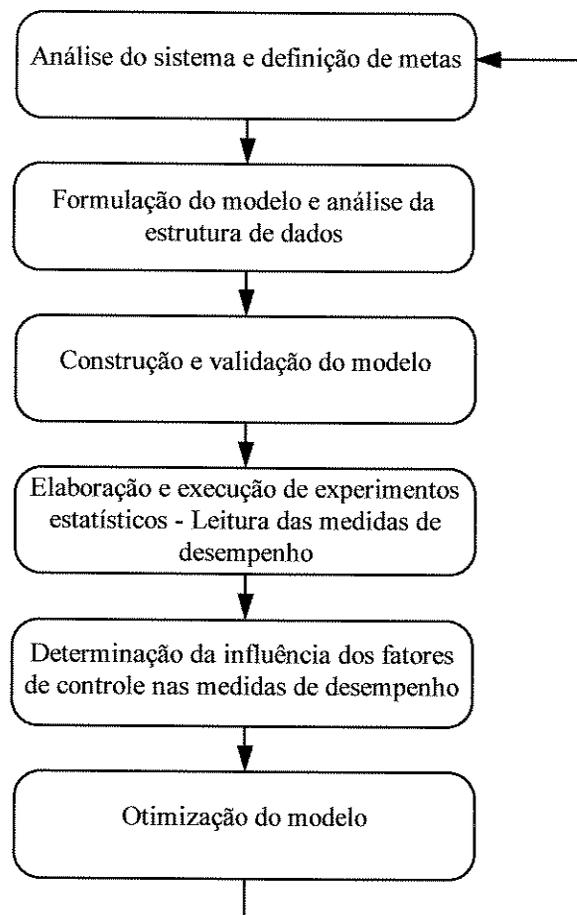


Figura 4.5. Implementação do ciclo de melhoria contínua

A seguir será detalhada cada etapa de implementação do ciclo de melhoria.

1. Análise do sistema a ser estudado e definição das metas de produção do sistema. Nesta etapa inicial é estudado todo o sistema de produção para entendimento dos seus mecanismos de funcionamento e das metas de produção.
2. Formulação do modelo e análise da estrutura de dados necessária. Nesta etapa é formulado o modelo de simulação descartando-se todas as informações desnecessárias ao estudo. É também realizada a definição e coleta dos dados necessários ao modelo e ao estudo das variáveis de controle, apontadas na tabela 3.1, passíveis de mudança.
3. Construção do modelo e validação do mesmo. Nesta etapa, com a utilização dos dados coletados na etapa anterior e tendo em vista as medidas de desempenho a

serem realizadas, é construído o modelo de simulação em ambiente computacional, realizados testes piloto e validado o modelo.

4. Elaboração e execução de experimentos estatísticos para a leitura das medidas de desempenho. Após a construção e validação do modelo são definidos experimentos através dos quais, será medido e descartado o tempo de aquecimento do modelo, e realizadas as medidas de desempenho.
5. Determinação da influência dos fatores de controle nas medidas de desempenho. Depois de feitas as medidas de desempenho são realizados experimentos estatísticos para a determinação da influência de cada uma das variáveis de controle sob as medidas de desempenho realizadas.
6. Otimização do modelo e reinício. Por fim, o modelo é otimizado com a introdução dos valores encontrados na etapa anterior, novamente medido o desempenho do modelo para a validação dos resultados.

#### **4.7. Comentários finais**

Neste capítulo foi apresentado o ciclo de melhoria contínua. Foi utilizada a simulação de eventos discretos para a realização de medidas de desempenho e definidos fatores de controle do sistema que maximizam estas medidas, sob o enfoque do *Just-In-Time* e da Teoria das Restrições. Assim, pode-se medir a influência isolada e em conjunto destes fatores de controle nas medidas de desempenho, conseqüentemente no desempenho do sistema.

No próximo capítulo será apresentado um estudo de caso onde foi aplicada a metodologia apresentada para construção do ciclo de melhoria contínua em um sistema de manufatura.

Com a implementação do ciclo de melhoria contínua em um ambiente industrial, pode-se validar a proposta da metodologia.

## **Capítulo 5**

### **Aplicação da metodologia proposta**

#### **5.1. Introdução**

Este capítulo descreve a aplicação da metodologia proposta para a construção de um ciclo de melhoria contínua em um ambiente industrial, validando desta forma o método proposto.

Faz-se, inicialmente, uma descrição do ambiente de implementação. Em seguida, justifica-se a necessidade de implementar um ciclo de melhoria contínua, através de um modelo de simulação de eventos discretos.

A seguir, baseando-se no ciclo proposto no capítulo anterior, faz-se uma descrição das etapas do processo de implementação. Descreve-se desde a fase de levantamento dos dados, construção do modelo, leitura das medidas de desempenho, até as propostas para melhoria do processo de manufatura.

O capítulo é finalizado com a apresentação dos resultados obtidos após completado o ciclo de melhoria.

#### **5.2. Descrição do ambiente de implementação**

A empresa em questão é uma indústria do setor de autopeças que fabrica transmissões para veículos.

O ambiente escolhido para implementação da metodologia não existia no início do trabalho. Ele foi integralmente montado para atender a demanda de um produto específico, ou seja, após o estabelecimento da demanda do produto, foi especificado e montado o ambiente industrial para a sua produção.

Este produto foi encomendado por uma indústria montadora de automóveis e caracteriza-se pelo alto volume produzido. Deste modo, o ambiente a ser construído foi integralmente dedicado a produção deste produto.

Este produto é composto por onze componentes distintos. Esta indústria deve fornecer diariamente a montadora de automóveis um lote de conjuntos prontos para serem montados.

### **5.3. Razões para implementação do ciclo de melhoria contínua no ambiente estudado**

Apesar do ambiente escolhido para implementação da metodologia ainda não existir, detectou-se a necessidade de investigação do desempenho esperado do sistema. Mesmo considerando-se a extrema simplicidade do novo ambiente de manufatura, surgiram várias questões a respeito do funcionamento do novo sistema que não puderam ser respondidas. Capacidade de produção quando consideradas as quebras aleatórias, nível de estoque em processo, e qual seria a real necessidade da formação de um pulmão de itens acabados foram algumas dúvidas levantadas.

Assim, este estudo possibilitou a implementação e validação da metodologia proposta e, indiretamente proporcionou um melhor conhecimento do comportamento do ambiente ainda inexistente. Considerando-se ainda que este ambiente não existia, este tipo de análise apesar de ser importante, é extremamente difícil de ser realizada. Deste modo, justifica-se a utilização da simulação de eventos discretos para prever o comportamento do futuro ambiente.

#### **5.3.1. Objetivos do estudo**

Partindo deste panorama, foram estabelecidos os seguintes objetivos:

- Conhecer as medidas de desempenho do sistema na configuração atual;
- Sugerir mudanças no sistema atual, baseando-se nos princípios do *Just-In-Time* e da Teoria das Restrições;
- Realizar estas mudanças em ambiente de simulação e medir o novo desempenho obtido com esta nova configuração.

## 5.4. Descrição do estudo de caso

A seguir serão detalhadas todas as seis etapas da metodologia proposta.

### 5.4.1. Análise do sistema e definição de metas

O sistema estudado possui um processo simples, pois este é utilizado por um único produto, tendo linhas dedicadas - de usinagem de desbaste e acabamento, para cada item que compõe o produto. Como o sistema foi inteiramente projetado, não sendo aproveitado nenhum sistema de manufatura já existente, todo o arranjo físico foi desenvolvido para satisfazer as premissas de produção do novo sistema, o que acarretou em um arranjo físico bastante otimizado.

O processo de fabricação dos onze componentes do produto a ser entregue a montadora é composto da usinagem de desbaste dos componentes forjados, tratamento térmico e usinagem de acabamento. A figura 5.1 mostra uma representação esquemática do processo de fabricação dos componentes e do estoque de produto acabado.

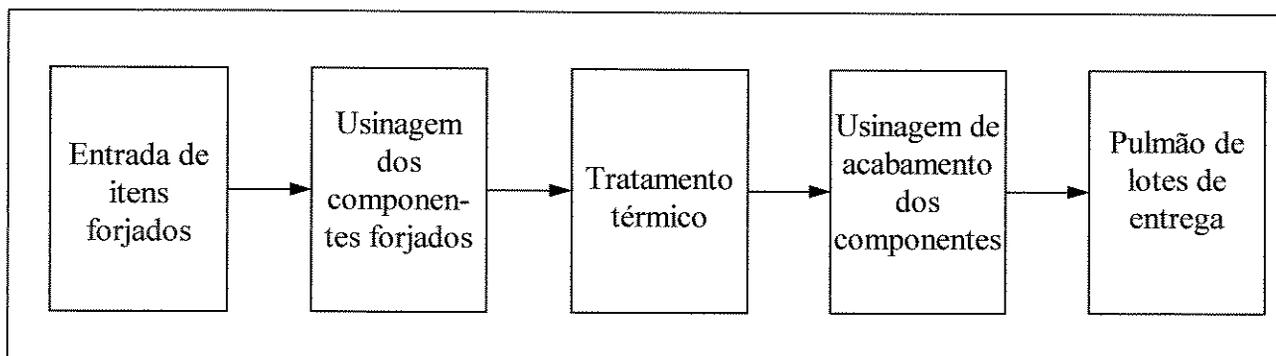


Figura 5.1. Processo de fabricação

Após o recebimento dos componentes forjados, estes são usinados em células dedicadas a cada um dos itens. Em seguida, são tratados termicamente e usinados para melhorar o acabamento em suas respectivas células de acabamento.

A célula de tratamento térmico é composta por um forno contínuo, um forno de indução para o tratamento térmico de um único componente e uma máquina de limpeza dos componentes - *shot peening*.

Como meta para a aplicação da metodologia proposta foi estabelecido:

- Detalhar o funcionamento do novo ambiente, e como este se comporta em condições críticas - condições de funcionamento não previstas;
- Determinar o desempenho deste sistema ainda inexistente;
- Propor melhorias para que o sistema inicie suas operações em condições ideais.

#### **5.4.2. Formulação do modelo e análise da estrutura de dados**

Nesta etapa foi formulada a lógica de funcionamento do sistema e foram levantados os dados que eram relevantes para o estudo a ser realizado.

Como o sistema de manufatura ainda não existia, foi feita uma modelagem que enfocou apenas a logística de funcionamento das células - deste modo a menor unidade no modelo é a célula e não as máquinas operatrizes. Ou seja, como as células se integram, como é feito o transporte entre estas, e como flui a produção pelo ambiente de manufatura. Isto foi realizado, porque o levantamento de dados para cada uma das máquinas que compunham a fábrica, inviabilizava a sua modelagem, além de não dispor de informações suficientes para isso.

##### **5.4.2.1. Levantamento de dados**

O levantamento de dados deste ambiente ocorreu do seguinte modo:

###### **A. Levantamento do *layout***

Este levantamento foi realizado através de um *layout* em CAD.

###### **B. Levantamento do fluxo de peças e do tempo padrão das peças em cada operação**

O fluxo de peças pelo sistema foi obtido pelas folhas de processo de engenharia e detalhados em entrevistas com o pessoal responsável pelo projeto da fábrica.

A modelagem dos tempos de processo de um sistema que ainda não existe é uma tarefa bastante complexa. Como foi discutido anteriormente, em sistemas existentes, são realizadas coletas de dados e geradas distribuições estatísticas que representem os tempos dos processos. Na ausência de dados históricos, são utilizados os tempos de

processo esperados pelos fabricantes dos equipamentos, tempos de operações semelhantes já realizadas em sistemas similares e principalmente, utilizada a experiência dos engenheiros envolvidos na implantação deste novo sistema.

Em geral, os valores médios obtidos não são muito diferentes dos valores reais. O problema maior diz respeito a qual distribuição estatística utilizar, quais são seus valores máximo e mínimo. Nos processos onde estão envolvidas grandes quantidades de horas diretas de trabalho dos operadores, a distribuição estatística encontrada costuma ter uma amplitude muito maior, obtendo-se valores mínimo e máximo muito mais distantes, devido a inconstância na produtividade da mão-de-obra. No sistema estudado, a dependência da mão-de-obra é muito pequena. Isto possibilitou a utilização de uma distribuição uniforme, junto com um coeficiente de variabilidade - que determina quanto o tempo de processo varia em torno do seu valor médio, determinado com base em experiências anteriores.

#### C. Levantamento das atividades de apoio a produção

As máquinas são alimentadas automaticamente, praticamente não são feitas operações de *setup*, pois o sistema é dedicado a um único produto, sendo apenas realizadas trocas de ferramentas e operações de manutenção das máquinas.

### 5.4.3. Construção e validação do modelo

Para construção e simulação do modelo, foi utilizado o *software* AUTOMOD II. Este *software* é classificado como uma linguagem de simulação - ou seja, é construído um programa que funciona como roteiro de funcionamento do modelo de simulação. Por isso oferece ao usuário total flexibilidade de trabalho, possuindo também as rotinas básicas de simulação embutidas.

Este *software* oferece ainda a possibilidade de construção de projetos de experimentos, possibilitando a avaliação da influência de quaisquer fatores nas respostas selecionadas.

Na tabela 5.1 é feita a comparação entre três *softwares* disponíveis no mercado para simulação.

	<b>AutoMod</b>	<b>ARENA</b>	<b>Promodel</b>
Controle do processo	X	X	X
Programação da produção	X		
Interface com outros sistemas gráficos	X		
Projeto de experimentos	X		
Modelagem estatística dos dados		X	
Análise de resultados	X	X	X
Animação	X	X	X
Suporte dado ao usuário		X	X

Tabela 5.1. Comparação entre *softwares* de simulação

Para validação do modelo construído foram comparados alguns resultados com o desempenho obtido no sistema real, já que nesta etapa do estudo, o ambiente de manufatura já tinha iniciado suas operações.

#### **5.4.4. Elaboração e execução de experimentos estatísticos - Leitura das medidas de desempenho**

Após a construção e verificação do modelo, foi realizada a validação do modelo, comparando o seu comportamento com o sistema real. Foi realizada ainda a medição do desempenho do sistema segundo os índices anteriormente apresentados.

Para a medição do desempenho foi realizada uma amostragem com 15 replicações de 150 dias de duração, sendo descartados os 30 primeiros dias para remover os efeitos oriundos do tempo de aquecimento do modelo - período inicial de simulação onde o modelo ainda não atingiu o regime permanente. Os dados foram tratados utilizando-se o método da

replicação/deleção. Para o cálculo dos índices médios de desempenho foi adotado um intervalo de confiança de 95%.

A seguir são apresentados os resultados obtidos.

Como observado na figura 5.2, foi medido o tempo de ciclo de produção para cada um dos componentes fabricados. Para o tempo de ciclo de produção do conjunto completo foi adotado o maior tempo de ciclo de produção dentre os seus componentes, ou seja, o tempo do ciclo de produção da engrenagem 5ª.

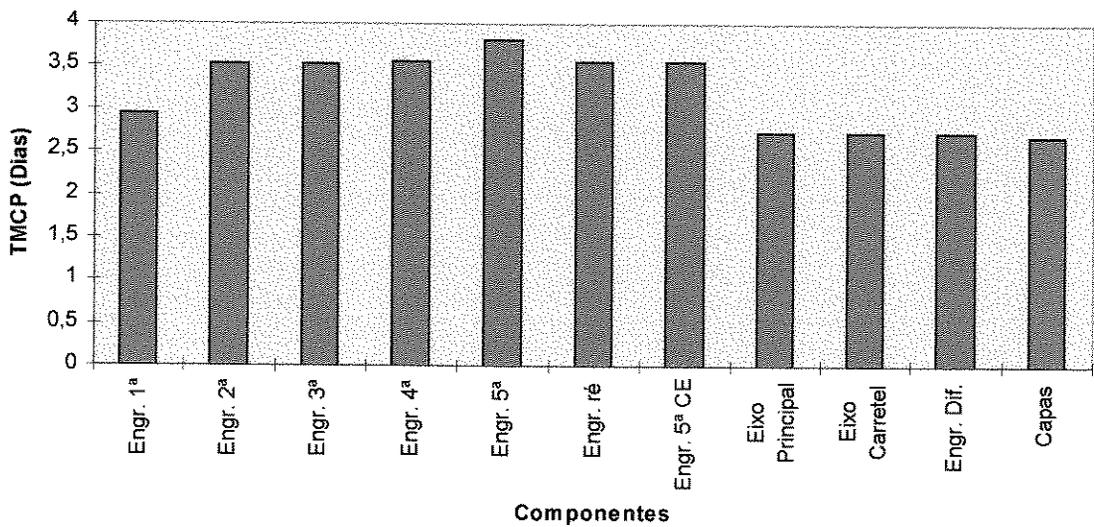


Figura 5.2. Tempo médio do ciclo de produção de cada componente

Este resultado, apesar de desconhecido, era esperado, pois este componente possui o maior tamanho de lote de fabricação.

Para o cálculo do giro de inventário, observado na figura 5.3, foi medido o estoque em processo em todos os pontos do sistema de manufatura. O giro de inventário foi calculado dividindo-se a demanda total em um ano pelo estoque total em processo. O giro de inventário, apesar de aparentemente alto, contempla apenas a logística interna da fábrica, não considerando a forjaria que supre de forjados este sistema de manufatura.

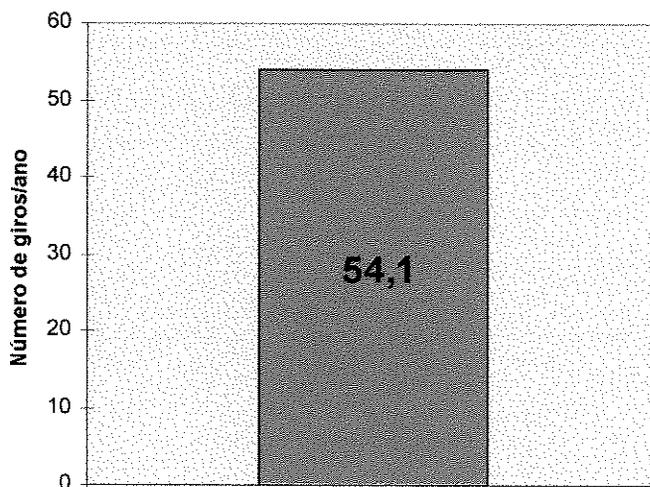


Figura 5.3. Giros de inventário por ano

Calcula-se a produtividade, mostrada na figura 5.4, dividindo-se os produtos vendidos pelo recurso total utilizado. Para a medição do recurso total, estoque em processo, o estoque de produtos acabados e os produtos vendidos foram valorizados em horas.

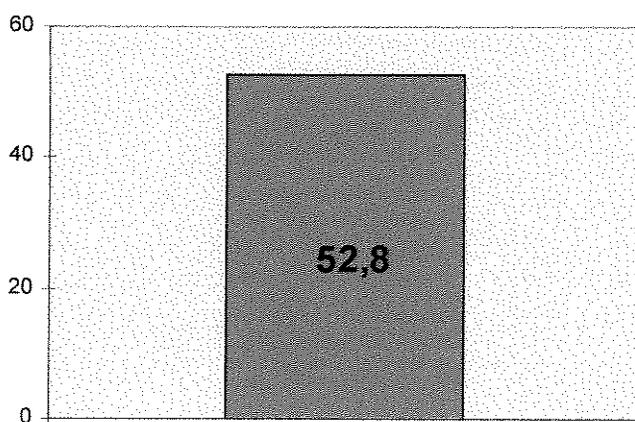


Figura 5.4. Produtividade

A figura 5.5 mostra a capacidade ociosa dos principais recursos do sistema de manufatura. Para o cálculo destes percentuais foi considerado um período total de vinte quatro horas por dia e sete dias por semana, ou seja, o tempo total disponível.

As capacidades ociosas dizem respeito as células de desbaste e acabamento, e não as máquinas operatrizes propriamente ditas.

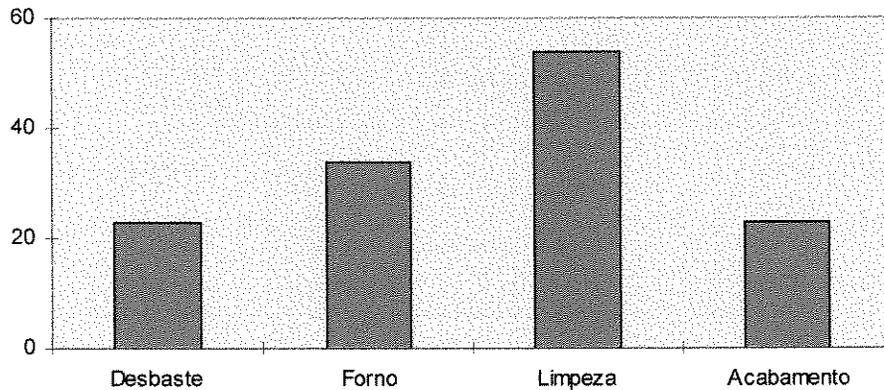


Figura 5.5. Capacidade ociosa

Na figura 5.6, pode-se observar que quando este novo sistema foi projetado, procurou-se posicionar fisicamente as células para evitar um desequilíbrio marcante entre as distâncias percorridas por cada um dos componentes do produto. Assim, as células de desbaste e acabamento que fabricam os componentes, cujos lotes de fabricação são menores - eixo principal, eixo carretel e engrenagem diferencial, foram posicionadas mais próximas ao forno contínuo, para que o total de viagens necessárias não sobrecarregassem a atividade de transporte.

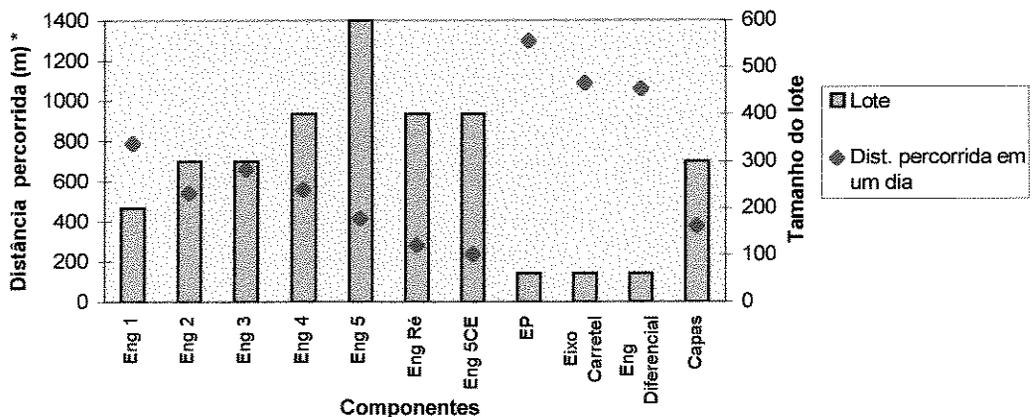


Figura 5.6. Movimentação de materiais

### 5.4.5. Determinação da influência dos fatores de controle nas medidas de desempenho

A partir das medidas de desempenho realizadas e dos fatores de controle selecionados, foi analisado o efeito provocado por cada um dos fatores nas medidas de desempenho. Assim, foi realizado um experimento onde os fatores selecionados variaram da forma mostrada na tabela 5.2.

Fator de controle	Valor		
	Atual	Nível 1	Nível 2
Coefficiente de variação do processo (%) - CV	0,17	0,10	0,24
Frequência das manutenções corretivas (Ocorrências/semana) - FM	1	2	0,5
Duração das manutenções corretivas (Horas) - DM	2	1	4
Tamanho do lote de produção (x Tamanho atual do lote) - TL	1	2	0,5
Número de <i>kanbans</i> de entrega - NK	2	1	3
Disponibilidade de materiais (distribuição estatística adotada) - FC	constante	constante	exponencial

Tabela 5.2. Projeto do experimento

Para cada um dos fatores - com exceção da disponibilidade de materiais, foi estabelecido um nível abaixo do valor adotado na configuração inicial e outro acima. Esta faixa de valores permitiu a detecção de influências positivas e negativas sobre as medidas de desempenho.

A análise do fator disponibilidade de materiais, ao contrário da realizada com os outros fatores selecionados, considerou apenas um nível acima do atual para sua avaliação, pois sua variação não foi produzida de forma quantitativa, e sim qualitativa. Na configuração inicial, a entrega de forjados para a usinagem foi considerada constante e no experimento avaliou-se a influência de atrasos e adiantamentos na entrega dos forjados no desempenho do sistema. Para isso, ao invés de utilizar uma distribuição estatística de chegada diária e constante, utilizou-se uma distribuição exponencial com a mesma média, usualmente utilizada para modelagem de entregas e eventos com grande variabilidade.

Para a análise da influência dos fatores fez-se um experimento fatorial total. Assim, foram analisados os efeitos oriundos dos fatores, tomados de maneira independente e da combinação dos mesmos dois a dois. A seguir são apresentados os efeitos provocados por cada um dos fatores nas medidas de desempenho.

Em cada gráfico é mostrado o desvio provocado pela variação de cada um dos fatores, quando se muda o valor de um determinado fator do nível 1 para o nível 2. Estes efeitos foram calculados a partir de cinco replicações e utilizado um intervalo de confiança de 95%. Assim, um valor de desvio em torno de zero é equivalente ao valor da medida de desempenho na configuração inicial do modelo. Isto indica que a variação dentro dos níveis propostos deste fator é irrelevante para esta medida de desempenho.

Para a avaliação do efeito provocado pela variação dos fatores nos níveis de produtividade e giro de inventário foi avaliado o efeito sobre o estoque em processo, pois é através deste que o giro de inventário e a produtividade são calculados.

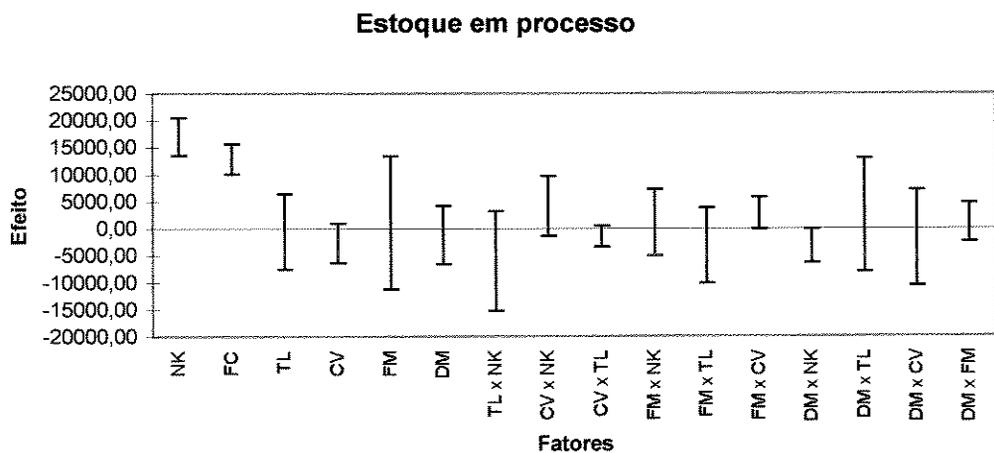


Figura 5.7. Influência dos fatores sobre o estoque em processo

No figura 5.7 fica evidente a grande influência do número de *kanbans* de entrega (NK) e da freqüência de chegada de materiais (FM) no estoque em processo. Com a passagem do nível 1 para o nível 2, destes fatores; obtém-se uma queda no giro de inventário e produtividade. Além disso, foram detectados efeitos de segunda ordem na variação conjunta da freqüência da manutenção (FM) e do coeficiente de variabilidade do processo (CV) e da duração dos tempos de manutenção (DM) juntamente com o número de *kanbans* de entrega (NK).

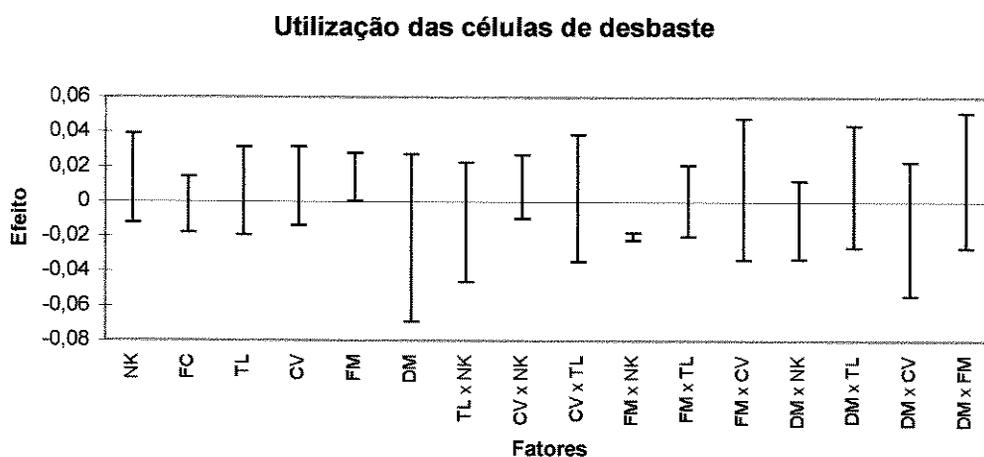


Figura 5.8. Influência dos fatores sobre a utilização das células de desbaste

A figura 5.8 mostra o efeito obtido sobre a utilização das células, índice importante para se determinar a capacidade ociosa destas. Foi detectada uma influência negativa, ou seja, aumenta-se a capacidade ociosa, quando combinam-se a frequência de manutenção e o número de *kanbans* de entrega.

A seguir são apresentados as figuras correspondentes a utilização do forno de tratamento térmico, da máquina de limpeza - *shot peening* e das células de acabamento. Neles, identificam-se como fatores importantes o número de *kanbans*, o tamanho do lote de fabricação e o coeficiente de variabilidade do processo; além da combinação da duração da manutenção em conjunto com a frequência das manutenções.

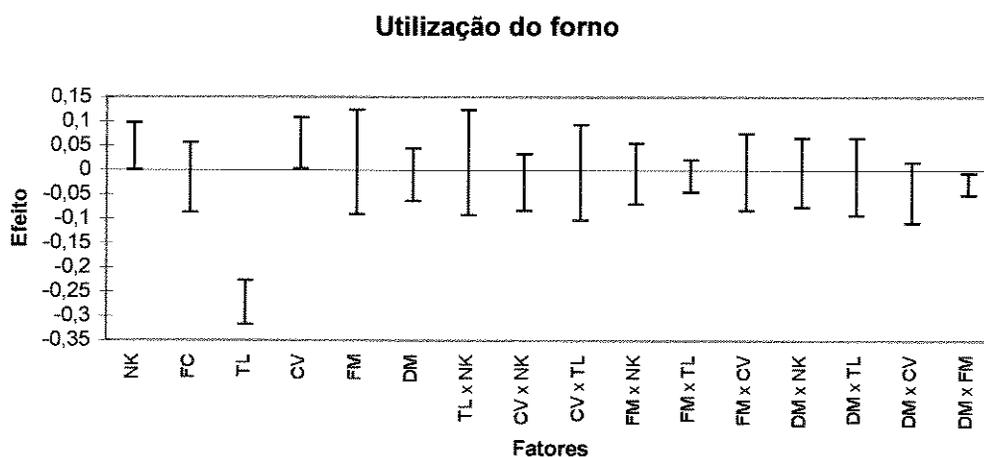


Figura 5.9. Influência dos fatores sobre a utilização do forno

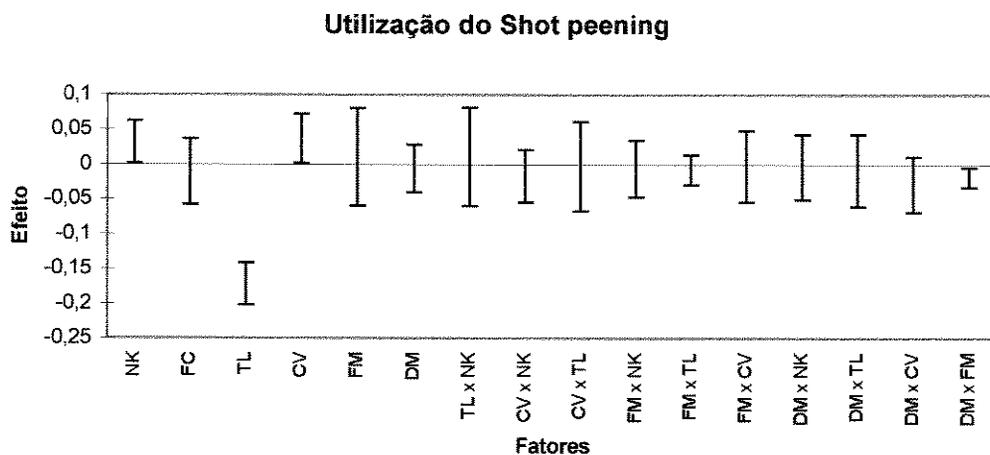


Figura 5.10. Influência dos fatores sobre a utilização do Shot peening

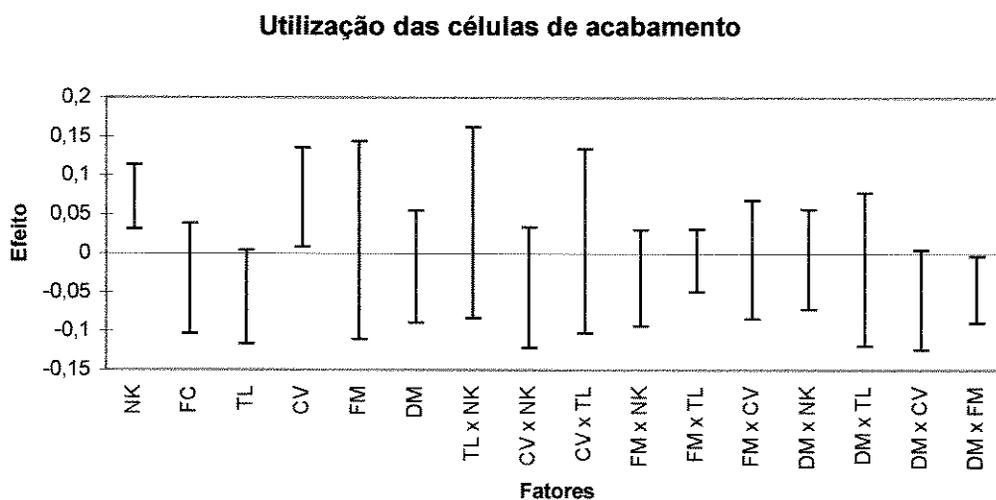


Figura 5.11. Influência dos fatores sobre a utilização das células de acabamento

Na figura 5.12, observa-se que o tempo médio do ciclo de produção é influenciado pelo tamanho do lote. Com a redução do tamanho do lote, consegue-se uma redução no tempo do ciclo de produção, ocorrendo uma melhoria no desempenho da manufatura.

**Tempo médio do ciclo de produção**

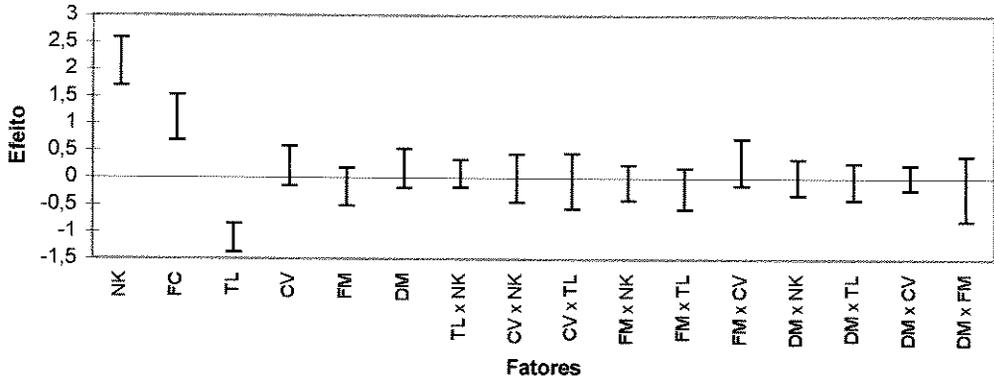


Figura 5.12. Influência dos fatores sobre o tempo médio do ciclo de produção

A figura 5.13 mede a influência dos fatores de controle no percentual do tempo que cada uma das células de desbaste permanece em manutenção. Observa-se a influência marcante da frequência e da duração das manutenções. A diminuição da frequência de manutenção reflete diretamente na diminuição do percentual de tempo de manutenção, assim como, o aumento no tempo de duração destas manutenções tende a aumentar o percentual de tempo dedicado a manutenção.

**Tempo de quebra das células de desbaste**

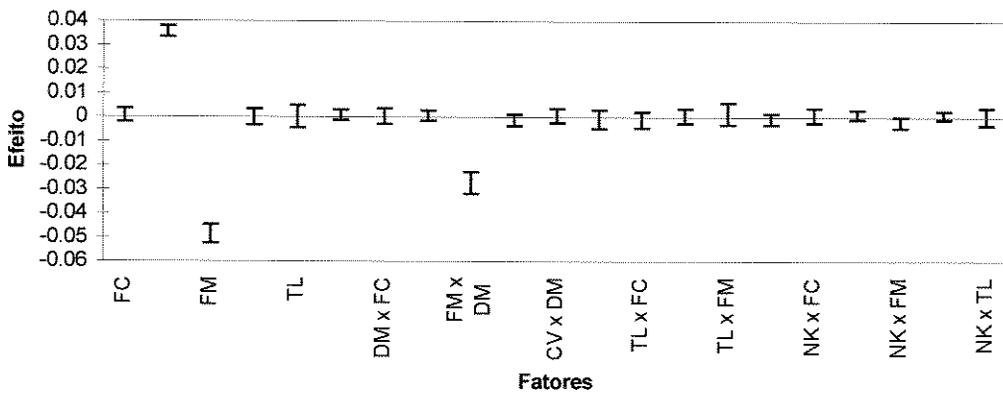


Figura 5.13. Influência dos fatores sobre o tempo de quebra das células de desbaste

A figura 5.14 faz a mesma análise para as células de acabamento, obtendo-se resultados semelhantes.

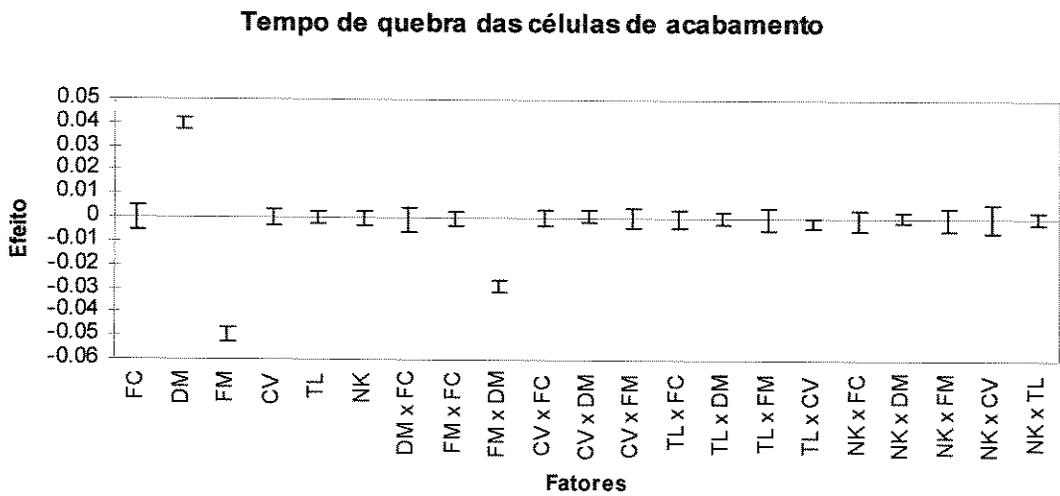


Figura 5.14. Influência dos fatores sobre o tempo de quebra das células de acabamento

Na tabela 5.3, onde é feito um resumo dos efeitos relevantes encontrados, também foi quantificado o efeito provocado por cada um dos fatores sobre as medidas de desempenho. Esta quantificação permitiu que fossem determinados os fatores mais importantes para cada uma das medidas realizadas.

	Capacidade ociosa						TMCP
	Giro de inventário	Produtividade	Limpeza	Desbaste	Acabamento	Forno	
Frequência de Chegada	↓ ↓	↓ ↓					↑ ↑
Duração das Manutenções				↓	↓		
Frequência de Manutenção				↑	↑		
Coefficiente de Variabilidade			↓	↓	↓	↑ ↑	
Tamanho do Lote			↑ ↑			↓ ↓	↓ ↓
Número de <i>Kanbans</i>	↓ ↓ ↓	↓ ↓ ↓					↓ ↓ ↓
Duração Manut. X Freq. Chegada				↓			
Freq. Manut. X Duração Manut.				↑	↑		
Coef. Variab. X Freq. Chegada				↓			
Tamanho Lote X Freq chegada					↓		

Tabela 5.3. Influência dos fatores nas medidas de desempenho

Obs.: O número de setas indica uma maior ou menor influência do fator sobre a medida de desempenho. O sentido da seta indica se esta influência é positiva ou negativa.

#### 5.4.6. Otimização do modelo

Por fim completa-se o ciclo de melhoria do sistema ajustando os fatores considerados críticos, obtendo-se medidas de desempenho ótimas.

Considerando os efeitos encontrados foram selecionados os fatores mais fáceis de serem alterados sem que houvesse a necessidade de investimentos. Conclui-se que a redução do tamanho do lote para a metade do tamanho original, a redução do tamanho do pulmão de

produtos acabados de dois dias para um dia, além da redução da frequência e da duração das manutenções são as mudanças mais significativas.

Por outro lado, o coeficiente de variabilidade, apesar de influenciar o desempenho do sistema, o faz em uma escala menor. Esta mudança poderia ser feita em uma segunda etapa.

Feitas estas modificações foi medido novamente o desempenho do sistema e obtidos os gráficos a seguir.

Na figura 5.15 é mostrado o tempo médio de ciclo de produção, observando-se que uma redução média de 20% no tempo de ciclo de cada um dos componentes foi obtida com as alterações realizadas.

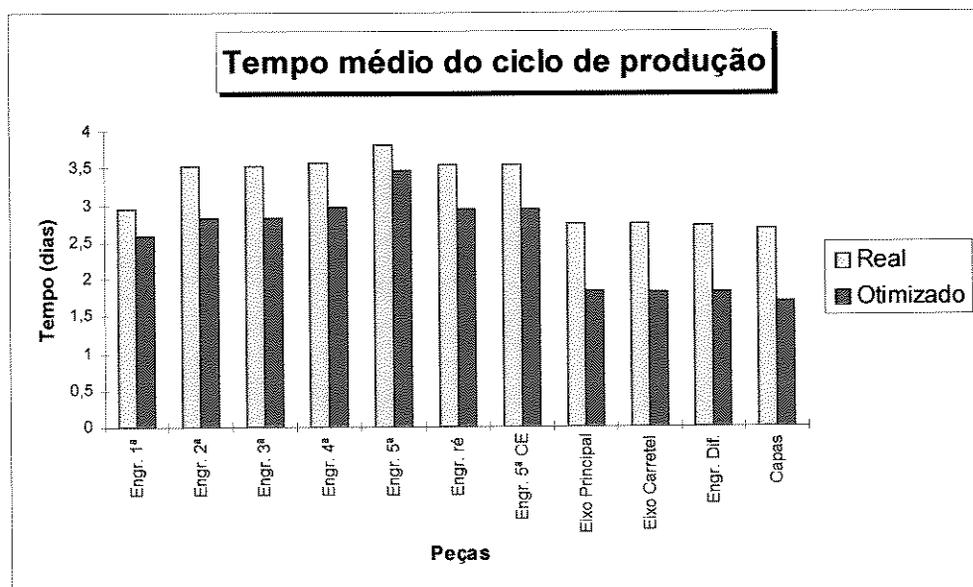


Figura 5.15. Tempo médio do ciclo de produção de cada componente

No giro de inventário, mostrado na figura 5.16, houve um aumento significativo de aproximadamente 50%. Isto é explicado pela redução substancial no estoque em processo, causada pela redução do tamanho do lote.

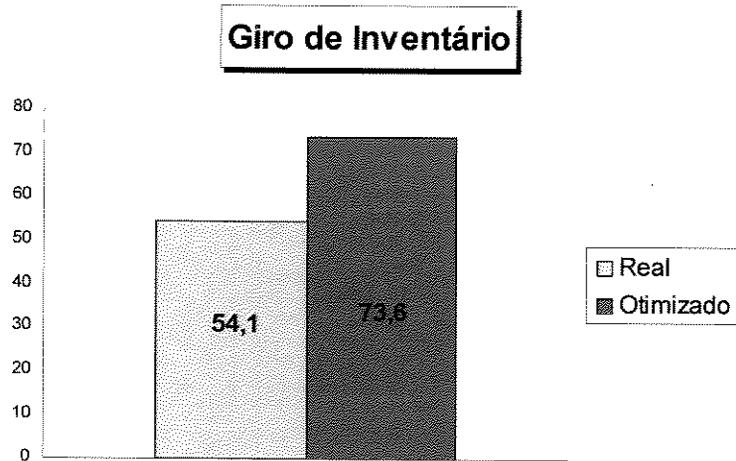


Figura 5.16. Giros de inventário por ano

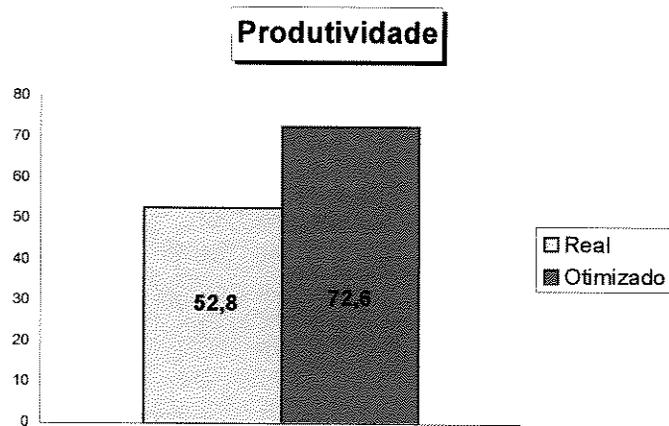


Figura 5.17. Produtividade

Assim como aconteceu com o giro de inventário, a produtividade - apresentada na Figura 5.17 - também apresentou uma mudança positiva em seu resultado.

Na figura 5.18 observa-se um aumento na capacidade ociosa das células de desgaste e acabamento, devido a diminuição da frequência e da manutenção.

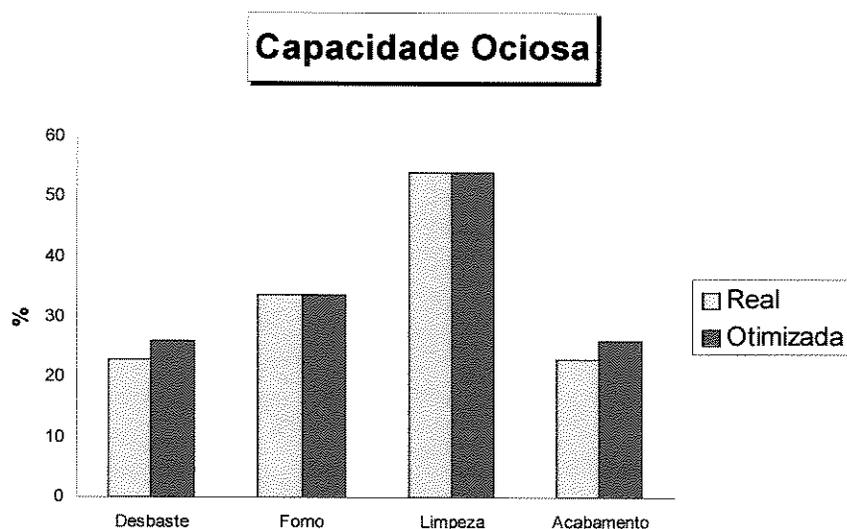


Figura 5.18. Capacidade ociosa

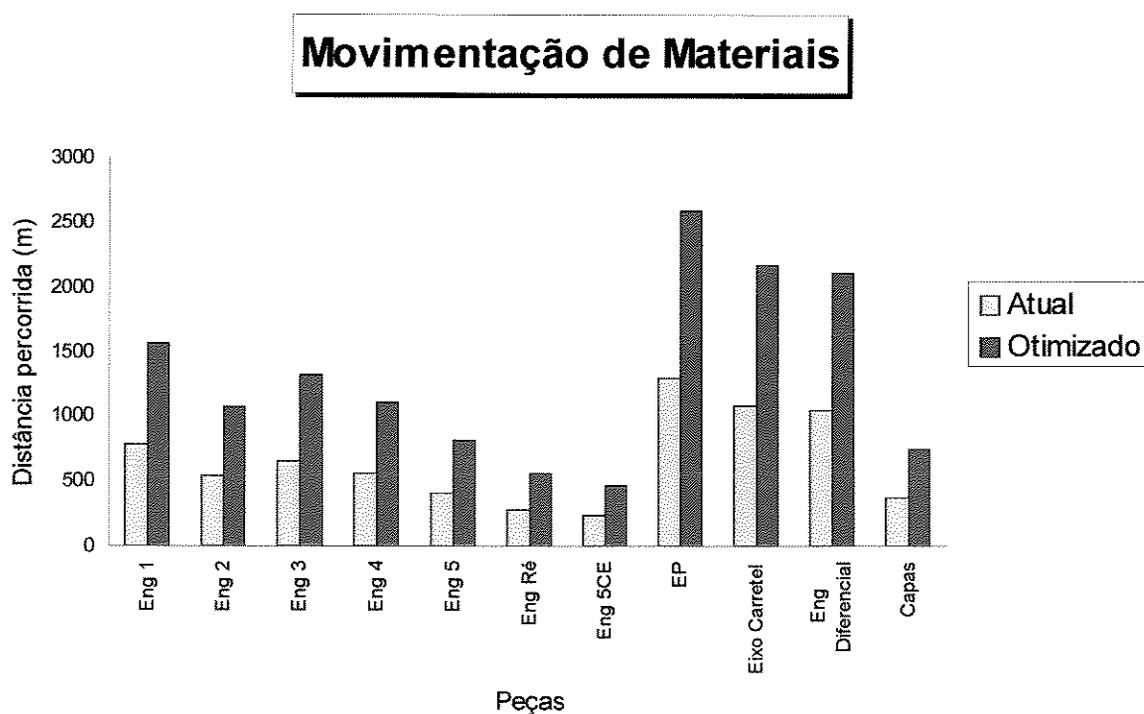


Figura 5.19. Movimentação de materiais

Na figura 5.19 constata-se o aumento da distância percorrida, devida a redução do tamanho do lote.

## 5.5. Comentários finais

A aplicação desta metodologia revelou-se útil, pois permitiu que se conhecesse o desempenho do sistema e como este funciona. Além, obviamente, de possibilitar a correção de comportamentos inesperados.

A identificação dos fatores críticos serviu não somente para otimização do sistema, mas também para quantificar a influência de cada um dos fatores caracterizados como críticos. Esta quantificação revela-se útil, pois permite que o sistema seja otimizado por etapas. Inicialmente podem ser corrigidos os níveis dos fatores mais importantes e posteriormente os demais.

## **Capítulo 6**

### **Conclusões e Recomendações**

Este trabalho teve como objetivo propor a construção de um ciclo de melhoria contínua em busca de padrões de classe mundial, utilizando a simulação de processos. Além do desenvolvimento teórico, fez-se uma implementação em uma empresa de autopeças onde foram obtidos os resultados apresentados no capítulo 5.

Em função destes resultados obtiveram-se as seguintes conclusões :

- A utilização da simulação de eventos discretos permite analisar o funcionamento prever o comportamento futuro do sistema de manufatura.
- A aplicação da simulação permite analisar sistemas de manufatura inexistentes e prever o seu comportamento. Permite também detalhar as condições de funcionamento do sistema de manufatura, que seria inviável sem o uso da simulação.
- A medição do desempenho da manufatura é facilitada quando utiliza-se a técnica de simulação. Além da facilidade na realização destas medias, obtêm-se maior rapidez e precisão nos resultados obtidos.
- Os fatores de controle selecionados realmente tem uma relação direta com as medidas de desempenho. Isto indica que a monitorização das medidas de desempenho da manufatura em conjunto com os fatores que os afetam é mais benéfico que apenas controlar as medidas de desempenho.

- Através da metodologia proposta, é possível melhorar-se o desempenho do sistema de manufatura através da manipulação dos fatores de controle. O que foi possível através da identificação dos principais fatores de controle do sistema.
- Por fim, utilizando esta metodologia foi possível quantificar o grau de importância de cada um dos fatores de controle selecionados para as medidas de desempenho realizadas.

A seguir, colocam-se algumas indicações para posteriores estudos, tais como:

- Utilização desta metodologia para melhoria de ambientes distintos da manufatura, como a indústria de processos ou ambiente de serviços, por exemplo, um banco.
- Aplicação da simulação de processos e da técnica de projeto de experimentos no estudo de eventos ligados a qualidade, como por exemplo controle estatístico do processo.

## **Bibliografias Consultadas**

1. BARD, J. F.; GOLANY, B. Determining the number of kanbans in a multiproduct, multistage production system. *International Journal of Production Research*, 1991, p.881-895.
2. BITRAN, G.R.; CHANG, L. A Mathematical Programming Approach to Deterministic Kanban System. *Management Science*, 1987, p.427-441.
3. KIMURA, D.; TERADA, H. Design and Analysis of Pull System: a Method of Multi-Stage Production Control. *International Journal of Production Research*, 1981, p.241-253.
4. LEEMIS, L.; BADIRU, A. et alli. Job Shop Configuration Optimization at Tinker Air Force Base. *Simulation*, vol. 54, no. 6, 1990, p.287-290.
5. LI, A.; CO, Henry C. A Dynamic Programming Model for Kanban Assignment Problem in Multistage Multiperiod Production System. *International Journal of Production Research*, 1991, p.1-16.
6. MIYAZAKI, S.; OHTA, H.; NIXHIYAMA, N. The Optimal Operating of Kanban to Minimize the Total Operation Cost. *International Journal of Production Research*, 1988, p.1605-1611.
7. MOHANTY, R.P. Simulation Availability in a Manufacturing Plant. *International Journal of Production Research*, dezembro de 1988, p.59-71.
8. PORTER, Michael. *Estratégica Competitiva*. Editora Campus, Rio de Janeiro, 1994.
9. WESTON, F.C. *Manufacturing Strategy and the Theory of Constrains*, 1992 p. 319-329.

10. GIFFI, Craig, ROTH, Aleda, SEAL, Greg. *Competing in World-Class Manufacturing : American's 21st Century Challenge*. National Center for Manufacturing Sciences, 1990, 410 p.
11. GOLDRATT, Eliahu; COX, Jeff. *A Meta*. Educator, 1990.
12. GOLDRATT, E. M.; FOX, R. *A Corrida pela Vantagem Competitiva*. Educator, 1992, 177 p.
13. GOLDRATT, E. M. *Mais que a sorte...um processo de raciocínio*. Educator, São Paulo, 1994, 303 p.
14. GRIECO, A.; DEMERARO, Q.; TOLIO, T.; TOMA, S. Simulation of Tool and Part Flow in FMSs. *International Journal of Production Research*, vol. 33, no. 3, 1995, p.643-658.
15. HAYES, Robert H.; WHEELRIGHT, Steven C. CLARK, Kim B. *Dynamic Manufacturing*. Free Press, New York, 1988
16. JOHNSON, Thomas H. *Relevância Recuperada*. São Paulo, Editora Pioneira, 1994, 217p.
17. LAW, A. M.; KELTON, W. D. *Simulation Modeling and Analysis*. McGraw-Hill, 2ª ed., 1991, 400p.
18. LIMA, Paulo C.; LOBO, Carlos; AGOSTINHO, Luiz Oswaldo. Simultaneous use of simulation and Activity-Based Costing for the Design and Cost Analysis of manufacturing systems. *Proceedings of 6<sup>th</sup> International FAIM Conference*, maio de 1996, p. 439-448.
19. MASKELL, Brian H. *Performance Measurement for World Class Manufacturing*. Productivity Press, 1991, 407 p.
20. MODEN, Y. *Toyota Production System*. Atlanta: Industrial Engineering and Management Press, 1983.
21. PLANTULLO, Vicente Lentini. Um pouco além do Just-In-Time: uma abordagem à Teoria das Restrições. *Revista de Administração de Empresas*, v. 34, n. 5, set/out 1994, p.32-39.
22. PRITSKER, A. A., Simulation: The Premier Technique of Industrial Engineering. *Industrial Engineering*, julho 1992

23. SCHONBERGER, Richard J. *World Class Manufacturing: the lessons of simplicity applied*. New York, 1986.
24. SCHRAGENHEIM, E. M.; RONEN, B. Drum-buffer-rope shop floor control. *Production Inventory Management Journal*, no. 3, 1990, p.18-22.
25. SCHRIBER, T. J. The Nature and role of simulation in the design of manufacturing systems. *Simulation in CIM and Artificial Intelligence Techniques*. J. Retti and K.E. Wichmann (EDS), Society for Computer Simulation, 1987, p.5-18.
26. SINGH, N.; BRAR, J.K. Modelling and Analysis of Just-In-Time Manufacturing Systems: a Review. *International Journal of Operations and Production Management*, vol. 12, no. 2, 1992, p.3-14.
27. SWINEHART, K.D.; BLACKSTONE, J.H. Jr. Simulating a JIT/Kanban Production System Using GEMS. *Simulation*, vol. 57, no. 4, 1991, p.262-269.
28. UMBLE, M.M.; SRIKANTH, M.L. *Synchronous Manufacturing*. South-Western Publishing, Co., Dallas, 1990.
29. VOLLMANN, T.E.; BERRY, W.L.; WHYBARK, D.C. *Manufacturing Planning and Control Systems*, 1985.
30. WIENDAHL, Hans-Peter, ULLMANN, Werner. Logistics Performance Measurement of Shop Floor Activities. *Annals of the CIRP*, vol. 42, 1993, p.509-512.
31. WOMACK, J. P.; JONES D. T.; ROOS D. *A Máquina que Mudou o Mundo*. Editora Campus, 1990, 347 p.
32. WU, Shing-Yin; MORRIS, John S.; GORDON, Thomas M. A Simulation Analysis of Drum-Buffer-Rope Scheduling in Furniture Manufacturing. *Computers Ind. Engng.*, vol. 26, no. 4, 1994, p.757-764.
33. YAVUZ, H.; SATIR, A. A Kanban-based Simulation Study of a Mixed Model Just-In-Time Manufacturing Line. *International Journal of Production Research*, vol. 33, no. 4, 1995, p.1027-1048.