

TESE

1070

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ

**Proposta de Sistematização da Simulação  
para Fabricação em Lotes**

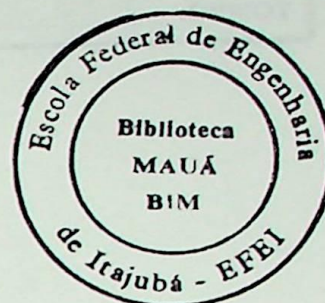
**IVAN COSTA PEREIRA**

**ITAJUBÁ - Outubro**

2000

**ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ**

**Ivan Costa Pereira**



**PROPOSTA DE SISTEMATIZAÇÃO DA SIMULAÇÃO  
PARA FABRICAÇÃO EM LOTES**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em  
Engenharia de Produção como requisito parcial à obtenção  
do título de *Mestre em Engenharia de Produção*

*Orientador:* Prof. Dr. José Arnaldo Barra Montevechi

**Itajubá, outubro de 2000**

CLASS.	658.51:004.383.4(043.2)
CITR. R.	P436 p
TOMBO.	1070



PEREIRA, Ivan Costa. *Proposta de sistematização da simulação para fabricação em lotes*. Itajubá: EFEI, 2000. 134p. (Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Escola Federal de Engenharia de Itajubá).

Palavras chaves: Simulação, Fabricação em Lotes

**ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ****Ivan Costa Pereira****PROPOSTA DE SISTEMATIZAÇÃO DA SIMULAÇÃO  
PARA FABRICAÇÃO EM LOTES**

Dissertação aprovada em 06 de outubro  
de 2000, conferindo ao autor o título de  
*Mestre em Engenharia de Produção*

*Banca Examinadora:*

José Arnaldo Barra Montevechi (orientador)

Luiz Antônio Silveira Lopes

Dagoberto Alves de Almeida

**Itajubá, outubro de 2000**

## Agradecimentos

Acima de tudo agradeço a Deus, que ao lado de seu filho e mediador Jesus Cristo, me deu a capacidade e forças suficientes para cumprir mais essa etapa. Estou ciente de que a toda graça e dom concedido, o Pai espera de nós resultados. Fatalmente não poderei me tornar omisso em tentar exercer o melhor possível, dentro de minhas limitações, a importante missão de ser um mestre.

Agradeço meu professor e orientador José Arnaldo Barra Montevechi, pela paciência com que me tratou nessa nossa convivência. A esse amigo, deixo a mensagem de que nossa vida certamente é uma curta viagem. Nessa estrada que percorremos vamos encontrando pessoas com as quais convivemos às vezes por curtos períodos, até que nossos caminhos tomem rumos diferentes. Creio que o mais importante não é a duração dessa convivência, mas sim sua profundidade e plenitude. A lembrança deste período em que caminhamos juntos certamente não se apagará de minha memória.

Agradeço a todos os professores com os quais muito aprendi e com os quais tive o imenso prazer de conviver. Através de suas atitudes observei que não somente o conhecimento é importante ao professor, mas também o envolvimento com o aluno e sobretudo a dedicação e amor ao ensino. Por todos eles guardo o mais profundo respeito e amizade. Por intermédio deles tenho o parâmetro perfeito de como deve ser exercida a sublime missão de educar.

Aos meus amigos, que são poucos mas extremamente valiosos. Sempre presentes em meus êxitos e momentos difíceis, fazendo com que me sinta eternamente devedor. Deixo a eles a mensagem de que não vou mais me preocupar em pagar essas dívidas com eles. Peço tão somente a Deus que as pague por mim, que os proteja juntamente com suas famílias e que os mantenha sempre como seres iluminados que são.

Agradeço e dedico esse humilde trabalho à minha esposa Vera, minha companheira, cúmplice e amiga. Seu amor é responsável por tudo o que tenho de mais precioso na vida, meus filhos Christian, Camila e Rodrigo. Seu carinho e amizade me dão ânimo, coragem e entusiasmo para continuar a busca de nossas realizações, felicidade e harmonia.

# SUMÁRIO

Agradecimentos	<i>iii</i>
Sumário	<i>iv</i>
Resumo	<i>viii</i>
Abstract	<i>ix</i>
Lista de abreviaturas	<i>x</i>
Lista de figuras	<i>xi</i>
Lista de tabelas	<i>xiii</i>
Lista de quadros	<i>xv</i>
<b>1. Introdução</b>	
1.1. Considerações iniciais	1
1.2. Relevância do trabalho	4
1.3. Contribuição do trabalho	5
1.4. Estrutura do trabalho	5
<b>2. Revisão Bibliográfica</b>	
2.1. Considerações iniciais	7
2.2. Conceitos e relevância da simulação	7
2.3. Simulação computacional	9
2.4. Algumas metodologias para os estudos de simulação	17
2.5. Considerações finais	19
<b>3. Metodologia proposta e plano de estudo</b>	21
3.1. Considerações iniciais	21
3.2. Metodologia a ser adotada	21
3.3. Considerações finais	23
<b>4. Definição do problema</b>	
4.1. Considerações iniciais	24
4.2. Exemplos de problemas enfrentados na fabricação em lotes	24
4.2.1. Aumento da linha para atender um acréscimo de demanda	24

4.2.2. Análise de gargalos	25
4.2.3. Análise de lay-out	26
4.2.4. Análise de material em processo	28
4.2.5. Análise de lead time	29
4.2.6. Análise de tempos de parada	31
4.3. Interação entre o modelador e o cliente	32
4.4. Considerações finais	35
<b>5. Confeção do esboço do layout a ser modelado</b>	
5.1. Considerações iniciais	36
5.2. Tipos de layout	37
5.3. Esboço do layout por produto	38
5.4. Esboço do layout híbrido	41
5.4.1. O layout celular	41
5.4.1.1. Análise visual	42
5.4.1.2. Sistemas de Classificação e Codificação	42
5.4.1.3. Análise do Fluxo de Produção	43
5.4.2. O Sistema Flexível de Manufatura (FMS)	47
5.5. Definindo o melhor seqüenciamento	49
5.6. Considerações finais	51
<b>6. Coleta de dados</b>	
6.1. Considerações iniciais	53
6.2. Coleta dos dados	54
6.3. Análise dos dados	57
6.3.1. Distribuição Normal	57
6.3.2. Distribuição Exponencial	59
6.3.3. Distribuição Gama	61
6.3.4. Distribuição de Weibull	61
6.3.5. Distribuição Binomial	62
6.3.6. Distribuição de Poisson	62
6.3.7. Apresentação dos dados e prova de aderência	62
6.4. Considerações finais	68

<b>7. Construção do modelo computacional</b>	
7.1. Considerações iniciais	69
7.2. Alguns princípios de modelagem	69
7.2.1. Partir de modelos simples	69
7.2.2. Fiscalizar nível de detalhamento	70
7.2.3. Dividir o modelo	70
7.2.4. Verificação e correção dos erros	71
7.3. Uso do Diagrama do Ciclo de Atividades (DCA)	71
7.4. Considerações finais	78
<b>8. Validação</b>	
8.1. Considerações iniciais	79
8.2. Objetivo e propostas para se validar o modelo	80
8.2.1. Mudança dos parâmetros de entrada	81
8.2.2. Turing test	81
8.2.3. Desenvolver o modelo juntamente com o cliente	82
8.2.4. Recorrer a especialistas	82
8.3. Considerações finais	84
<b>9. Simulando Experimentos</b>	
9.1. Considerações iniciais	85
9.2. Definição do período de aquecimento (warm-up period)	85
9.3. Número de replicações e estimação dos resultados	87
9.3.1. Definição do número de replicações necessárias:	88
9.3.2. Estimação dos resultados	90
9.4. Considerações finais	91
<b>10. Análise e apresentação dos resultados</b>	
10.1. Considerações iniciais	93
10.2. Análise dos resultados	93
10.2.1. Aumento da linha para atender um acréscimo de demanda	94
10.2.2. Análise de gargalos	94
10.2.3. Análise de layout	95
10.2.4. Análise de material em processo e lead-time	95

10.3. Apresentação dos resultados	96
10.4. Considerações finais	96
<b>11. Exemplo de aplicação</b>	
11.1. Considerações iniciais	99
11.2. Definição do problema e de um plano de estudo	101
11.3. Confeção do esboço do layout a ser modelado	103
10.3.1. Linha de produção dos corpos deslizantes	104
10.3.2. Linha de produção dos roletes	106
11.4. Coleta de dados	107
11.5. Construção do modelo computacional	108
11.5.1. Modelagem da linha de produção do corpo deslizante	111
11.5.2. Modelagem da linha de produção do rolete	114
11.6. Validação	115
11.7. Simulando experimentos	116
11.7.1. Efeito do acréscimo de mais uma máquina	120
11.7.2. Efeito do acréscimo de mais um posto de inspeção e montagem	121
11.7.3. Experimentos com a linha do rolete	122
11.7.4. Efeito da introdução de dados estocásticos na linha do rolete	125
11.8. Análise e apresentação dos resultados	129
11.9. Considerações finais	129
<b>12. Conclusões</b>	
12.1. Considerações iniciais	131
12.2. Contribuições do trabalho	131
12.3. Sugestões de trabalhos futuros	133
12.4. Considerações finais	134
<b>Referências Bibliográficas</b>	135

## **Resumo**

Este trabalho apresenta uma metodologia para simulação computacional, direcionada especificamente para a produção em lotes na área de manufatura.

Essa proposta tem como um dos objetivos facilitar a interação entre o modelador e o usuário. Também considera a consistência nos dados aumentando assim as possibilidades do modelo simulado ser posteriormente implementado. Tem por finalidade igualmente, a redução do tempo de desenvolvimento, aumentando assim a velocidade de obtenção dos resultados.

## LISTA DE ABREVIATURAS

**Abstract**

APP - Análisis de Datos de Producción

AGV - Automóvil Guiado por Voz

*This work presents a methodology for computing simulation related to batch production, wich is illustrated by means of an hypothetical example.*

CPM - Control de Programación de Actividades

*The proposal facilitates the interaction between the system developer and the user. It also considers data consistence allowing further implementation of de simulated model, reducing developing time and increasing the speed of de output results.*

CPK - Control de Calidad de Procesos

LDFO - Listado de Factores de Orden

PC - Plan de Control de Calidad

SC - Sistema de Clasificación de Calidad

TG - Trazabilidad de Grupo

TMO - Tiempo Medio de Espera

YMS - Sistema de Modelación y Simulación

WP - Work in process (cantidad de procesos)

## LISTA DE ABREVIATURAS

- AFP - Análise de fluxo de produção  
AGV - Automated guided vehicle  
BEA - Bond Energy Analysis  
CAD - Computer-aided design  
CAM - Computer-aided manufacture  
CI - Cluster Identification Algorithm  
FIFO - First In/ First Out  
FMS - Sistemas flexíveis de manufatura  
FMC – Células flexíveis de manufatura  
LIFO - Last In/ First Out  
ROC - Rank Order Clustering  
SCC - Sistemas de classificação e codificação  
TG - Tecnologia de Grupo  
TMEF – Tempo Médio Entre Falhas  
VIMS - Sistema de Modelagem Visual Interativa  
WIP - Work-in-process (trabalho em processo)

## LISTA DE FIGURAS

### 2. Revisão Bibliográfica

Figura 2.1: Tela de construção dos “locations” do software PROMODEL 4.0.

Figura 2.2: STAT-FIT software estatístico que acompanha o PROMODEL 4.0.

Figura 2.3: Passos da proposta de sistematização (Fonte: Lobão e Porto, 1997)

Figura 2.4: Seqüenciamento dos trabalhos de simulação para fabricação em lotes

### 3. Metodologia proposta e plano de estudo

Figura 3.1: Passos dos trabalhos de simulação para fabricação em lotes

### 4. Definição do problema

Figura 4.1: Trecho de relatório do PROMODEL 4.0 relativo às entidades de um sistema

Figura 4.2: Gráfico emitido pelo PROMODEL relativo ao estado das entidades do sistema

Figura 4.3: Definição de qual parte do sistema será modelado

### 5. Confeção do esboço do layout a ser modelado

Figura 5.1: Layout funcional

Figura 5.2: Layout por produto

Figura 5.3: Estações de trabalho resultantes do balanceamento

Figura 5.4: Layout baseado no processo

Figura 5.5: Matriz peça x máquina com os pesos atribuídos.

Figura 5.6: Matriz peça x máquina reordenada com atribuição de pesos para as colunas

Figura 5.7: Matriz peça x máquina em sua forma final.

Figura 5.8: Novo layout celular resultante do uso da Tecnologia de Grupo

Figura 5.9: Exemplo de sistema flexível de manufatura

### 6. Coleta de dados

Figura 6.1: Divisão do sistema

Figura 6.2: Forma da curva de distribuição normal

Figura 6.3: Curva de distribuição exponencial

Figura 6.4: Forma da curva de distribuição gama

Figura 6.5: Forma das curva de distribuição de Weibull para diversos  $\alpha$

Figura 6.6: Histograma

## 7. Construção do modelo computacional

Figura 7.1: Símbolos do estado ativo e passivo do DCA

Figura 7.2: DCA para as peças

Figura 7.3: DCA para o operador e máquinas

Figura 7.4: DCA para o sistema a ser modelado

## 8. Validação

Figura 8.1: Revisão do trabalho em caso de não validação

## 9. Simulando experimentos

Figura 9.1: Tempo de aquecimento

## 11. Exemplo de aplicação

Figura 11.1: Rolamento deslizante

Figura 11.2: DCA do corpo deslizante

Figura 11.3: DCA das máquinas e do operador

Figura 11.4: DCA da estação de trabalho 2

Figura 11.5: Linha de produção do corpo deslizante sem os operadores no PROMODEL 4.0

Figura 11.6: Modelo final do corpo deslizante elaborado no PROMODEL 4.0

Figura 11.7: Modelagem inicial do rolete elaborado no PROMODEL 4.0

Figura 11.8: Modelo final da linha de produção do rolete elaborado no PROMODEL 4.0

Figura 11.9: Gráfico dos valores de WIP para cada hora de simulação

Figura 11.10: Gráfico dos valores de WIP para cada hora de simulação

Figura 11.11: Gráfico do PROMODEL 4.0 relativo à taxa de ocupação do posto de inspeção antes e após a duplicação da retificadora

Figura 11.12: Tempo de aquecimento para a linha dos roletes

Figura 11.13: Gráfico do PROMODEL 4.0 referente à utilização do operador antes da duplicação (fatia verde)

Figura 11.14: Gráfico do PROMODEL 4.0 referente à utilização do operador após da duplicação (fatia verde)

Figura 11.15: Histograma com a curva de distribuição exponencial

## LISTA DE TABELAS

### 5. Confecção do esboço do layout a ser modelado

Tabela 5.1: Seqüência de operações

Tabela 5.2: Matriz peça x máquina

Tabela 5.3: Constituição das células e peças a serem por elas processadas

Tabela 5.4: Tempos de usinagem para as peças 1, 2 e 3, nas máquinas A, B, C e D.

Tabela 5.5: Tempo de processamento para a seqüência 1-3

Tabela 5.6: Tempo de processamento para a seqüência 3-1

Tabela 5.7: Tempo de processamento para a seqüência 3-1-2

Tabela 5.8: Tempo de processamento para a seqüência 3-2-1

Tabela 5.9: Tempo de processamento para a seqüência 2-3-1

### 6. Coleta de dados

Tabela 6.1: Dados correspondentes a tempos de troca de ferramentas

Tabela 6.2: Distribuição de freqüências referentes aos dados da tabela 6.1

Tabela 6.3: Cálculo da média  $\bar{X}$

Tabela 6.4: Cálculo do desvio padrão  $\sigma$

Tabela 6.5: Cálculo das freqüências esperadas ( $E_i$ )

Tabela 6.6: Nova distribuição de freqüências e cálculo do valor do qui-quadrado

### 7. Construção do modelo computacional

Tabela 7.1: Eventos que caracterizam início e fim de uma atividade

Tabela 7.2: Exemplos de estados ativos e passivos da produção em lotes

### 9. Simulando experimentos

Tabela 9.1: Estoque em processo existentes na linha

Tabela 9.2: Valores médios de WIP para 10 replicações

### 11. Exemplo de aplicação

Tabela 11.1: Dados referentes ao rolete

Tabela 11.2: Dados referentes ao corpo deslizante

Tabela 11.3: Distribuição inicial das estações de trabalho no balanceamento

Tabela 11.4: Distribuição final das estações de trabalho no balanceamento

Tabela 11.5: Distribuição das estações de trabalho no balanceamento da linha do rolete

Tabela 11.6: WIP a cada hora para a linha de corpos deslizantes sem operadores

Tabela 11.7: WIP a cada hora de simulação

Tabela 11.8: Efeito da duplicação das máquinas sobre as quantidades produzidas

Tabela 11.9: WIP a cada hora para a linha dos roletes

Tabela 11.10: Acréscimos ao tempo de operação devido à habilidade do operador

Tabela 11.11: Cálculo da média

Tabela 11.12: Cálculo das frequências esperadas ( $E_i$ )

Tabela 11.13: Nova distribuição de frequências e teste do qui-quadrado

Tabela 11.14: Cálculo do valor médio de WIP em 10 replicações

# 1. INTRODUÇÃO

## LISTA DE QUADROS

### 2. Revisão bibliográfica

Quadro 2.1: Resumo dos principais conceitos de simulação

### 5. Confeccção do esboço do layout a ser modelado

Quadro 5.1: Passos do algoritmo de Rank Order Clustering

Quadro 5.2: Passos do algoritmo NEH

### 10. Análise e apresentação dos resultados

Quadro 10.1: Grau de envolvimento do usuário e modelador nas fases do projeto

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Considerações iniciais

A conjuntura atual está conduzindo as empresas a uma competitividade cada vez maior. Esse ambiente de grande concorrência impõe que as solicitações impostas pelo mercado obtenham por parte das empresas respostas rápidas e confiáveis. Em consequência, esse contexto pressiona as empresas, pois as mesmas não podem perder as oportunidades de negócio, por outro lado, as decisões tomadas devem envolver o menor risco possível, de modo a não comprometer a sua sobrevivência.

Neste cenário atual, um dos problemas que as empresas têm que resolver é o de saber quais os meios de produção (operadores, equipamentos, espaço físico, etc), que deverão programar para atender às demandas de mercado, quer seja pela imposição de um incremento de vendas, pela mudança do hábito de consumo, pelo término do ciclo de vida do produto ou mesmo pela encomenda de um novo produto pelo cliente.

As respostas a essas questões são particularmente importantes por envolverem custos, pois geralmente o cliente solicita a resposta sobre a possibilidade de atender um pedido, qual o custo e quando será entregue. A resposta errada no que diz respeito ao custo, por exemplo, poderá implicar na perda do cliente, se os custos forem superavaliados ou em prejuízo financeiro se forem subavaliados.

A solução para esse tipo de problema, pode ser a modelagem do sistema. Modelar um sistema de previsão de demanda por exemplo pode ser feito matematicamente através de regressão linear, o estoque mínimo pode ser determinado através de análise histórica e utilizando-se distribuição de probabilidades. No entanto, a maioria dos sistemas reais não pode ser modelada através de métodos matemáticos clássicos, devido sua grande complexidade, como é o caso de um sistema de manufatura, em que se tem um grande número de entidades (máquinas, operadores, peças, etc) interagindo umas com as outras. Esse sistema é dinâmico e ao mesmo tempo se tem um grande conjunto de variáveis assumindo

valores aleatórios, como os tempos de operação, setup, parada de máquinas, etc. Segundo PIDD (1998), para esse tipo de sistemas dinâmicos, complexos e com componentes interativos a simulação computacional é uma ferramenta adequada.

A simulação computacional tem aplicação em várias áreas, dentre as principais pode-se citar:

- área de manufatura: auxiliando nos estudos de investimentos relativos a aquisição de equipamentos, aumento das instalações industriais, definição de *layout*, estimativa de produção, número de operadores, etc;
- área de logística: através da simulação de redes de distribuição, intervalos de suprimentos, área de armazenagem, número de armazéns e localização, planejamento de inventário, área de estacionamento, *just-in-time*, etc;
- área hospitalar: definindo quantidade de postos de atendimento, áreas de atendimento em pronto socorro, número de leitos, pessoal especializado a ser utilizado, etc;
- área de transportes: simulando tráfego terrestre, aéreo, marítimo e fluvial, estabelecendo rotas e pontos de abastecimento, definindo cargas, etc.

A simulação computacional, que vem a ser a representação de um sistema pela modelagem feita em computador, é uma ferramenta eficiente, atual, que possibilita a análise de sistemas complexos. Também possibilita através da animação em ambiente virtual, que seja visualizado qual será o comportamento, por exemplo, de uma linha de fabricação, sem que as mudanças no ambiente real sejam feitas, possibilitando-se assim economia de recursos pela não interrupção das linhas, bem como maior liberdade na escolha de alternativas. CASSEL e MÜLLER (1996) procuram demonstrar em seu trabalho como a simulação computacional pode auxiliar as empresas nos processos de mudança, possibilitando a solução de problemas de forma mais rápida e eficiente.

O uso da simulação computacional vem resolver uma série de problemas na área de manufatura e logística (SALIBY, 1999). Segundo SILVEIRA (1996), o uso da simulação computacional possibilita que se possa testar os projetos antes de implementá-los, economizando-se dessa forma tempo e recursos.

Especificamente na área de manufatura, e mais particularmente no assunto objeto deste trabalho que é a fabricação em lotes, essa ferramenta pode ser um auxílio importante na tomada de decisões.

*Teste novas propostas a/b*

A simulação também se mostra como um instrumento importante para responder às perguntas tipo *what if*, ou seja, o que aconteceria se no lugar de uma máquina gargalo se dispusesse duas, o que aconteceria se o número de operadores fosse alterado, etc. A resposta a essas perguntas, mesmo antes de se ter o sistema real funcionando, e com grande confiabilidade é outra grande vantagem da simulação computacional.

Mesmo para os sistemas já em funcionamento, há a possibilidade de se testar aumentos de produção utilizando-se como fonte de dados para a simulação, os dados coletados das linhas existentes, podendo-se inferir a necessidade de aquisição de mais equipamentos ou a contratação de mais operadores, tendo em vista melhorar a produtividade ou um aumento de demanda.

Outro aspecto importante a ser ressaltado, é a interatividade entre o cliente, que vem a ser o usuário do sistema, e o modelador ou projetista, pois os softwares atuais, mostram através da animação como o sistema vai se comportar, pode-se assim demonstrar de forma excelente através de recursos visuais os resultados do estudo de simulação. Segundo HARREL et al. (1996), o recurso da animação também ajuda na fase de verificação do modelo e apresentação dos resultados às pessoas que tomarão decisão na empresa.

As empresas têm utilizado a simulação com grande sucesso, e o uso dessa ferramenta tem se mostrado eficiente e poupado recursos de investimentos e tempo. Abaixo alguns exemplos:

- uso da simulação para planejar evacuação de pessoas em caso de emergência, de áreas sujeitas a perigos naturais como terremotos, furacões, erupções vulcânicas e enchentes (PIDD et al 1997);
- modelo de simulação da operação do terminal de importação de granéis de Praia Mole da Companhia Vale do Rio Doce (CERQUEIRA et al, 1997);
- utilização de simulador na previsão de produção e movimentação de petróleo da Bacia de Campos (CASTRO et al 1997);

- aplicação da simulação no dimensionamento de frota de caminhões em mineração para a empresa Mineração Rio do Norte S/A (PIMENTEL, 1997);
- simulação da linha de produção do Laboratório de Circuito Impresso do Instituto de Pesquisas Espaciais (GÔMES, 1988);
- o uso da simulação no redimensionamento de um sistema de distribuição de suprimentos (MENDES et al 1997).

Nos casos citados anteriormente, os autores procuram demonstrar a utilidade da simulação para modelagem, onde a complexidade pelo número de variáveis envolvidas está presente.

## 1.2. Relevância do trabalho

Os elevados custos de preparação limitam as quantidades a serem fabricadas, impondo que as fábricas estabeleçam lotes mínimos de produção de modo a reduzir os custos de fabricação. Dessa forma, a fabricação em lotes é adotada por várias indústrias, e essas empresas estão constantemente sendo solicitadas a atender novos produtos, ou por exigência do mercado, modificar os produtos já existentes.

Essas decisões sempre envolvem custos para empresa, além disso, existe um risco de que ao final do investimento suas necessidades de produção possam não ser satisfeitas por erro de avaliação. Um exemplo de como as empresas podem evitar o desperdício de recursos com o uso da simulação foi citado por CORNÉLIO FILHO et al (1998), onde a Draw Tite Inc. evitou gastar US\$ 80.000,00 na aquisição de equipamentos para mudar suas células de produção em linha contínua, ao simular e constatar que tal modificação não traria os resultados esperados.

A simulação computacional aparece como uma grande aliada nesse tipo de decisão, onde o usuário normalmente quer saber as respostas aos seguintes tipos de perguntas:

- Qual o capital que vai ter que dispor para compra dos equipamentos?
- Quais os equipamentos que vai adquirir?
- Se as quantidades de peças produzidas vão atender à demanda planejada?

- Como terá que planejar sua manutenção, tendo em vista os equipamentos que vai adquirir?
- Qual será seu estoque em processo?
- Qual será sua necessidade em espaço físico para instalar seus equipamentos?
- Quantos operadores vão ter que contratar?
- Como fará o balanceamento da linha?
- Qual será a disposição das máquinas nas células de manufatura?

### 1.3. Objetivo do trabalho

Existem várias propostas de etapas a serem seguidas para que os trabalhos na área de simulação sejam desenvolvidos com metodologia. Segundo LOBÃO e PORTO (1997), se os estudos de simulação forem bem executados e conduzidos de maneira fundamentada haverá qualidade e consistência nos resultados obtidos.

O objetivo deste trabalho é o de propor uma sistematização do uso da simulação computacional, tendo em vista especificamente o estudo de uma linha de fabricação para produção em lotes na área de manufatura.

Essa proposta visa facilitar a interatividade entre o modelador e o cliente ou usuário da linha de produção a ser modelada. Cabe ressaltar que o modelador é aquele que vai lidar com o software e que o usuário é aquele que detém os conhecimentos a respeito do sistema a ser modelado e vai usufruir dos resultados obtidos na simulação. Essa sistematização visa também buscar que os resultados da simulação sejam mais consistentes e ao mesmo tempo busca uma redução nos tempos de trabalho, dando velocidade maior nas respostas às questões levantadas

### 1.4. Estrutura do trabalho

Este trabalho está composto por onze capítulos. O presente capítulo procura demonstrar a relevância do trabalho, bem como definir qual será sua contribuição.

No capítulo 2, será feita uma revisão bibliográfica, de modo a apresentar os conceitos mais importantes a respeito de simulação computacional, bem como apresentar algumas metodologias existentes.

Do capítulo 3 ao capítulo 10, é apresentada a metodologia de sistematização da simulação computacional para a fabricação em lotes, que é o objeto deste trabalho. Nesses capítulos, cada um dos passos do projeto de simulação é apresentado em seqüência.

O capítulo 11 contém um exemplo de aplicação, onde os passos descritos nos capítulos anteriores são aplicados num caso hipotético.

O capítulo 12 conclui o trabalho, resumindo suas contribuições, bem como sugestões para futuros trabalhos.

## 2.2. Conceitos e relevância da simulação

A simulação tornou-se uma ferramenta de adoção para a dificuldade que se tem no mundo dos estudos no processo de desenvolvimento com custos e prazo. Segundo NAYLOR et al (1971), o método científico baseia-se fundamentalmente em quatro etapas: a observação de um fenômeno, a hipótese, a simulação de uma hipótese (ou modelo matemático) que tente explicar o fenômeno observado, fazendo deste modelo testes para o comportamento do sistema, por último, testes experimentais de validação a partir de resultados de testes reais. De acordo com os autores a simulação computacional aparece como um meio de superar as dificuldades inerentes ao método científico.

A simulação de Monte Carlo é um exemplo de um modelo, que busca simular um fenômeno, ou uma situação real, através de um modelo matemático fundamentado em probabilidades, e que tenta resolver os problemas de gestão que são influenciados por fenômenos aleatórios. Segundo os autores, a simulação computacional para cada um dos passos de um modelo, qual é um intervalo de tempo. Ela consiste em gerar valores para a distribuição, qual a distribuição existente para cada variável, bem como estabelecer uma distribuição de probabilidades apropriada. A simulação será feita considerando os dados reais que serão substituídos de acordo com a distribuição. A respeito de NAYLOR et al

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Considerações iniciais

Este capítulo se inicia com um breve histórico a respeito de simulação, onde se evidencia a evolução que essa técnica obteve com o correr dos anos, até o advento das modernas técnicas que envolvem a simulação computacional.

Como este trabalho utilizará a simulação computacional por eventos discretos, o capítulo descreverá o que vem a ser esse tipo de simulação, procurando definir quais são os termos usados nessa área. Por último são apresentadas algumas propostas de seqüências metodológicas já propostas.

### 2.2. Conceitos e relevância da simulação

A simulação nasceu da busca de soluções para a dificuldade que se tem na maioria dos estudos na procura do relacionamento entre causa e efeito. Segundo NAYLOR et al (1971), o método científico baseia-se fundamentalmente em quatro etapas: a observação de um fato real, ou de um sistema; a formulação de uma hipótese (ou modelo matemático) que tente explicar essas observações; baseado nesse modelo tentar prever o comportamento do sistema e, por último, realizar experiências de modo a testar a validade desses modelos. De acordo com os autores a simulação computacional aparece como um meio de superar as dificuldades inerentes ao método científico.

A simulação de Monte Carlo é o exemplo de um modelo, que busca simular um fato real, ou uma situação real, através de um modelo matemático fundamentado em probabilidades, e que tenta reduzir os riscos de ações que são influenciadas por dúvidas. Essa simulação necessita que se determine primeiramente, para cada variável do sistema a ser estudado, qual o seu intervalo de variação. Em seguida é necessário identificar para esses valores qual a distribuição estatística mais aplicável, bem como transformá-la numa distribuição de probabilidades acumulada. A simulação será feita utilizando-se números aleatórios que serão escolhidos de acordo com a distribuição. A restrição à aplicação da

simulação de Monte Carlo na área de manufatura é que essa simulação é estática, ou seja, não permite que se modelem sistemas que necessitem ser estudados ao longo de um determinado tempo, como é o caso da fabricação em lotes.

A programação linear é outro exemplo de modelagem, que soluciona problemas através do método de otimização, sujeito a restrições, constituindo-se num subconjunto da programação matemática. Segundo PIDD (1998), destina-se a otimizar alguma medida de desempenho (maximizando-a ou minimizando-a) quando conhecemos as restrições a que essas medidas estão sujeitas.

Um exemplo de aplicação poderia ser o de se ter como função objetivo da programação linear o de minimizar os recursos investidos em estoque em processo, sujeitos à restrição de uma determinada máquina que só pode processar uma quantidade limite de peças.

Uma das restrições da aplicação da programação linear é a de que, tanto a função objetivo quanto as restrições, são lineares e também não permite que se introduza dados de maneira estocástica. Da mesma forma que a simulação de Monte Carlo, sua aplicação a sistemas dinâmicos pode ser extremamente difícil, pela complexidade que os envolve. No entanto, uma das maiores vantagens da programação linear sobre a simulação é a de ser uma técnica que gera soluções ótimas.

Segundo CHWIF (1997), ultimamente esse importante recurso de otimização, vem sendo implementado também na simulação computacional, através de um módulo específico com essa finalidade, de modo a possibilitar que os softwares executem uma simulação otimizante. Alguns softwares citados pelo autor que possuem esse módulo destinado à otimização são o PROMODEL, o ARENA e o MICROSAINTE.

Nem sempre se pode observar os fatos para a iniciação do método científico e nestes casos a simulação é bastante útil. Um exemplo é a utilização dos simuladores de vôo, onde os pilotos são treinados para procedimentos em situações de emergência. Neste caso a simulação resolveu o problema porque grande parte das situações de perigo dificilmente poderiam ser treinadas repetidamente em vôo real, ou seja, através da observância do fato. A realização de experimentos com fatos reais também pode ser onerosa, senão impossível.

Com o advento do computador, os modelos matemáticos foram adquirindo resolução mais fácil e rápida, gerando, como consequência, a generalização do uso da simulação computacional como uma ferramenta para se analisar a performance de sistemas ou mesmo da análise do comportamento de variáveis para as quais não se conhece o futuro.

A simulação através da modelagem física já vem sendo utilizada há muito tempo, a exemplo da simulação dos campos de batalha, tentando prever a ação do inimigo, e a melhor utilização possível do terreno. Outra modelagem física são os túneis de vento, que simulam em laboratório as condições aerodinâmicas a que as aeronaves vão ser submetidas. Através da utilização de software computacional e voltada à área de manufatura, a simulação começou a tomar importância nos anos 80.

### 2.3. Simulação computacional

A simulação computacional vem a ser a representação de um sistema real através de um modelo de grande precisão através do computador, trazendo a vantagem de se poder visualizar esse sistema, implementar mudanças, respondendo a questões tipo: “o que aconteceria se” (*what-if*), desta maneira economizando recursos econômicos e tempo.

SCHIMIDT e TAYLOR apud LAW E KELTON, 1982 definem *sistema* como sendo um conjunto de entidades (máquinas, operadores, peças, etc) que com a finalidade de desempenhar algum fim lógico devem agir e interagir entre si.

Um exemplo de sistema é a linha de produção para fabricação em lotes, pois é composta por um conjunto de entidades ou componentes interdependentes, que são os diversos equipamentos e operadores, que interagem entre si de maneira a fabricar peças, com uma maior produtividade e menor custo possível. Esse sistema é complexo, por envolver uma série de variáveis aleatórias, como: tempos de setup, tempos de operação, tempos de parada de máquina, tempos para troca de ferramentas, tempos de parada do operador, etc, e pelo fato de as entidades que compõem o sistema estarem interrelacionadas.

A representação desse sistema real, pode ser feita através de um modelo. O objetivo do modelo é o de se estudar esse sistema, sem que seja necessário construí-lo na realidade, ou mesmo fazer modificações nesse sistema, e estudar os resultados dessas modificações, sem

que haja necessidade de se alterá-lo previamente. A vantagem que se tem com a modelagem, é a interatividade com o modelo, ou seja, a facilidade de modificá-lo para fins de estudo, a facilidade de análise dos resultados, a rapidez na obtenção desses resultados e a possibilidade de se verificar através da animação como o processo está sendo conduzido.

Nesses sistemas, a simulação computacional, segundo HARREL e KERIM apud FLINK (1996), se torna uma ferramenta adequada quando:

- é difícil, ou talvez impossível o desenvolvimento de um modelo matemático;
- o sistema possui variáveis aleatórias;
- houver complexidade na dinâmica do processo;
- deseja-se observar o comportamento do sistema em um determinado período;
- o uso da animação é importante para visualizar o processo.

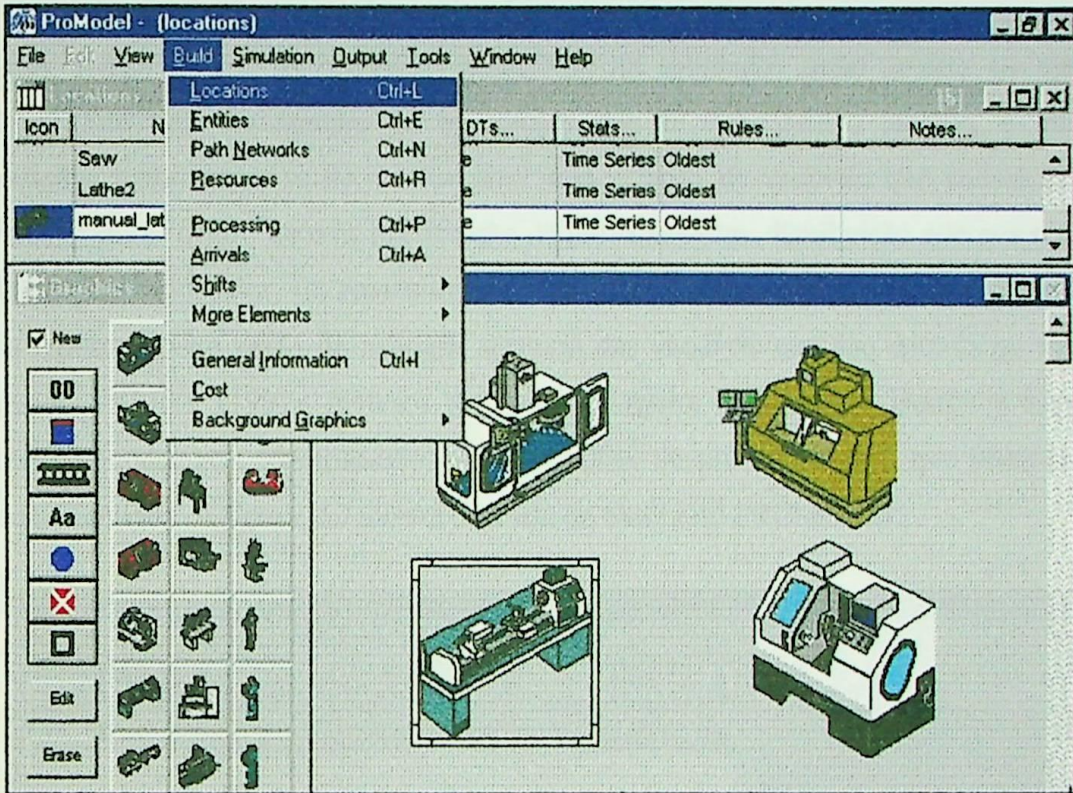
Uma vez que se tenha o sistema modelado, os tempos de experimentação serão reduzidos, ou seja, há possibilidade de se simular várias horas de operação em tempo real em questão de minutos, isto permite que se faça experimentos, com observação imediata dos resultados.

Os softwares destinados à simulação foram sofrendo modificações com o decorrer dos anos. Iniciou-se com desenvolvimento a partir de linguagens gerais de programação tipo FORTRAN, Turbo-Pascal, linguagem C++ e etc. Esses softwares exigem elevado tempo de programação, conseqüentemente de pessoal habilitado que conheça muito bem a linguagem para desenvolvimento do programa.

Segundo CORNÉLIO FILHO et al. (1998), posteriormente surgiram as linguagens específicas para simulação, que são softwares que oferecem bibliotecas contendo conjuntos de comandos pré-programados, ou macro comandos. Essas linguagens facilitam o desenvolvimento do programa, reduzindo dessa forma o esforço de modelagem e a exigência de intensos conhecimentos de programação, a exemplo do GPSS, SIMAN, SLAM, SIMSCRIPT, etc. Segundo os autores essas linguagens serviram de base para desenvolvimento de alguns softwares da geração posterior, a exemplo do software de simulação ARENA que foi baseado no SIMAN.

Mais recentemente os softwares voltados para a simulação são baseados no Sistema de Modelagem Visual Interativa (VIMS). Segundo PIDD (1997), esses softwares dispõem de uma boa interface gráfica com o usuário, através da qual o modelador, através das atividades de clicar e apontar, pode desenvolver e rodar o modelo.

A *figura 2.1* mostra a tela que permite a alocação dos equipamentos (locations) de acordo com o layout, bem como mostra os itens constantes do menu “build” do software PROMODEL 4.0.



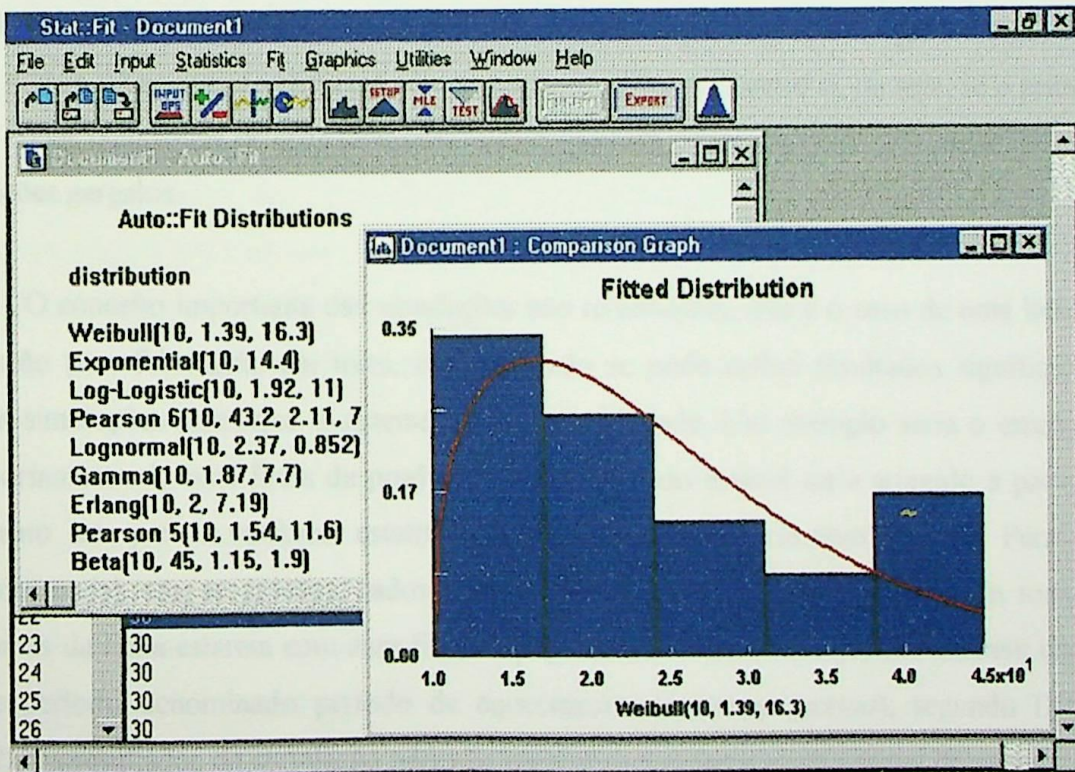
*Figura 2.1:* Tela de construção dos “locations” do software PROMODEL 4.0.

A complexidade desses programas está ligada ao apelo visual proporcionado pela animação e principalmente pela maior facilidade de programação. Essa facilidade de visualização permite uma maior interação entre o modelador e o cliente, podendo também ser usada com a finalidade didática, pois permite que se exponha de maneira atrativa a atuação dos operadores, equipamentos e de todos os demais fatores de produção.

Alguns softwares foram desenvolvidos para modelar sistemas *discretos*, *contínuos* ou a combinação dos dois. Os sistemas são ditos discretos quanto as variáveis envolvidas assumem valores finitos ou infinitos numeráveis (por exemplo peças que chegam a uma

máquina) e contínuos quanto as variáveis mudam continuamente no tempo (por exemplo quilômetros rodados pelos caminhões na simulação de um sistema logístico), neste caso as linguagens de simulação devem estar em condições de resolver sistemas de equações diferenciais. Nas simulações a eventos discretos os programas são dotados de um relógio, que é inicializado com o evento ao qual está vinculado e avança até que o próximo evento esteja programado.

Os modelos de simulação também podem ser *determinísticos* ou *estocásticos*. São determinísticos quando as variáveis que dão entrada que representam o sistema assumem valores exatos, assim, os resultados desse tipo de simulação serão sempre os mesmos independentemente do número de replicações que se fizer para o modelo. O modelo estocástico permite que se dê entrada com uma coleção de variáveis que podem assumir diversos valores dentro de uma distribuição de probabilidades, distribuição esta que pode ser definida pelo modelador. Os resultados gerados pelos modelos estocásticos são diferentes a cada replicação, em razão da natureza aleatória das variáveis que dão entrada no modelo. Segundo SALIBY (1997), diversos softwares de apoio, tais como o BestFit e ExpertFit ajudam a modelagem identificando as distribuições de probabilidade a que pertencem os dados de entrada. A *figura 2.2* mostra uma tela do StatFit do PROMODEL.

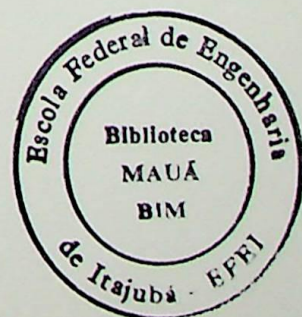


*Figura 2.2:* STAT-FIT software estatístico que acompanha o PROMODEL 4.0.

A simulação é dita *terminante* quando se está interessado em estudar o comportamento do sistema num dado intervalo de tempo de simulação (LAW e KELTON, 1982). Um exemplo de simulação terminante seria o estudo do atendimento num conjunto de caixas automáticos bancários tipo atendimento 24 horas. O objetivo do estudo poderia ser o de se prever, através da simulação, qual o número de caixas que a agência deveria ter. Nesse caso o comportamento do sistema seria estudado desde as zero horas até às 24 horas. Os relatórios de saída desse tipo de simulação têm que ser analisados para aquele dado intervalo de tempo, no qual se está interessado em estudar. No caso do exemplo, haverá horários de pico de demanda e horários em que o sistema estará vazio, de modo que não vai interessar análise através das médias, mas sim dos resultados finais.

Quando se está interessado em estudar o sistema a partir do momento em que o mesmo atingir um estado estável (*steady-state*), a simulação é dita *não terminante* (PROMODEL USER'S GUIDE, 1997). O fato de a simulação ser dita não terminante, significa que a partir de um determinado momento a simulação poderia continuar indefinidamente sem que estatisticamente o sistema venha a ter mudanças significativas de comportamento. A definição do tempo total de simulação vai depender então, dentre outros fatores, do tempo de aquecimento, período em que as variáveis estatísticas que deram entrada no sistema ainda não adquiriram estabilidade. No caso de uma indústria de manufatura, que trabalha em três turnos, o tempo de simulação poderá obrigatoriamente ter que abranger todos esses turnos, se os mesmos tiverem comportamentos diferentes entre si, ou seja, se o primeiro turno rodar com todos os seus recursos, e se o segundo e terceiro turnos rodarem apenas as operações gargalos.

O conceito importante das simulações não terminantes, que é o caso de uma linha de produção para fabricação em lotes, é de que não se pode colher resultados significativos dessas simulações antes que o sistema adquira estabilidade. Um exemplo seria o estudo do comportamento de uma linha de produção, onde o estado estável seria atingido a partir do momento em que as variáveis estatísticas atingem um comportamento estável. Para esse período inicial, não se coletam dados estatísticos, em razão por exemplo de nem todas as máquinas da linha estarem com suas filas de peças estabilizadas, ou seja, não estarem cheias. Nesse período denominado período de aquecimento (*warm-up period*), segundo DIETZ (1992), os resultados da simulação não vão retratar o comportamento normal do sistema que foi modelado.



Quando os modelos de simulação representam o sistema sem levar em conta sua variabilidade com o tempo, ou seja, é uma representação do sistema congelado num determinado momento, é dito *estático*. O modelo é *dinâmico*, quando representa o sistema a qualquer tempo, a exemplo dos modelos que representam uma linha de produção durante um turno de oito horas por exemplo.

O *quadro 2.1* apresenta um resumo desses conceitos apresentados anteriormente para facilidade de visualização.

SISTEMA	MODELO		SIMULAÇÃO
<i>DISCRETO:</i> Variáveis envolvidas assumem valores finitos ou infinitos numeráveis.	<i>DETERMINÍSTICO:</i> Variáveis assumem valores determinados.	<i>ESTÁTICO:</i> Estuda o sistema sem levar em conta sua variabilidade com o tempo.	<i>TERMINANTE:</i> Há interesse em se estudar o sistema num dado intervalo de tempo
<i>CONTÍNUO:</i> Variáveis mudam constantemente com o tempo	<i>ESTOCÁSTICO:</i> Variáveis assumem valores diversos segundo uma determinada distribuição de probabilidades	<i>DINÂMICO:</i> Representa o sistema a qualquer tempo	<i>NÃO TERMINANTE:</i> Há interesse em estudar o sistema a partir de um determinado estado estável, podendo o estudo prolongar-se indefinidamente.

*Quadro 2.1:* Resumo dos principais conceitos de simulação computacional

Os novos softwares de simulação facilitam bastante a modelagem, pois têm amplos recursos de animação, são mais fáceis de serem programados, têm a possibilidade de introdução de variáveis através de programas auxiliares de estatística, recursos de otimização, possibilidade de importar de desenhos do CAD (Computer-aided design) e ao final da simulação geram relatórios detalhados para análise e interpretação. HLUPIC e PAUL (1995) sugerem que na modelagem de sistemas de maior complexidade e detalhamento, é importante que o software possibilite experimentação, tenha suporte estatístico e que também gere relatórios que serão extremamente úteis para a análise dos resultados

A simulação pode ser um processo demorado e conseqüentemente caro, dependendo do grau de semelhança que se queira com o sistema real. A representação verdadeira do sistema real pode vir a ser impossível. Quanto mais se deseja uma aproximação da validação

verdadeira, mais tempo se gasta na simulação, numa tentativa de modelar todas as circunstâncias reais que envolvem o sistema.

Segundo SALIBY (1999), há três áreas que o modelador deve conhecer: o software, a estatística e o sistema.

O conhecimento do *software* é necessário para que o modelador possa extrair o máximo de rendimento através da programação. De acordo com SALIBY (1997), apesar dos softwares mais recentes serem bem mais amigáveis, ainda há necessidade do modelador ter conhecimento de programação quando tiver que fazer alterações necessárias.

Por ser a simulação a modelagem de um sistema, com utilização de variáveis que vão permitir imitá-lo e interpretá-lo, é necessário que o modelador conheça *estatística*, para que os dados que vão dar entrada no programa tenham sido corretamente coletados, analisados e interpretados. Por último, que os resultados provenientes das experimentações e mesmo a resposta final do estudo de simulação sejam estatisticamente analisados de maneira satisfatória.

O conhecimento do *sistema* é imprescindível ao modelador, já que o objetivo da simulação é o de modelá-lo. Nesse aspecto é muito importante a interação entre o usuário, que conhece o sistema, e o modelador. Se os dados que vão interpretar o sistema não forem coerentes, os resultados também não o serão.

Além dos conhecimentos acima, algum conhecimento da área de *simulação* se faz necessário, pois a todo momento o modelador terá que decidir: tempos de aquecimento, quais os níveis de detalhamento necessários para atingir os objetivos esperados, como alterar o programa de maneira a conseguir um determinado intento, etc.

O conhecimento do sistema, por parte do modelador, vai ser adquirido através do estudo detalhado do processo de fabricação, onde o modelador tomará conhecimento, através da interação com o usuário, de diversas informações importantes para o projeto de simulação. Uma dessas informações é a seqüência das operações pelas quais as peças passarão, bem como das máquinas que estão envolvidas em cada uma das operações e suas características. Essas informações sobre as máquinas e o processo serão úteis para tomada de decisão. Por

exemplo, a maneira de se levantar o tempo de operação por peça para um torno automático, que é de alto rendimento, pode ser diferente de se tomar o mesmo tempo para um torno convencional. Talvez o ideal para o torno automático seja fixar um determinado tempo e levantar-se o número de peças torneadas naquele intervalo de tempo. No torno convencional, se a operação for complexa, talvez o método mais indicado seja o de levantar o tempo por peça.

O mesmo procedimento poderia ser adotado ao se levantar tempos de operação para uma retificadora tipo centerless que tem alto rendimento em comparação com uma retificadora cilíndrica convencional. Num torno CNC os tempos de operação têm uma menor variabilidade do que num torno convencional, portanto o número de observações na coleta de dados para esse tipo de máquinas poderá ser menor.

É interessante que o modelador verifique o layout que está sendo adotado, bem como outras informações importantes a respeito das instalações, através de uma inspeção detalhada desses locais. É importante para o modelador saber, por exemplo, que determinado equipamento é de instalação fixa e que se houver mudança de layout, essa mudança tem que se adequar à localização desse equipamento. Alguns espaços não podem ser ocupados, pois dão acesso a banheiros, bebedouros, permitem a visão da chefia do setor, dão acesso a tanques de óleos das máquinas, etc.

O modelador também tem que tomar conhecimento dos tipos de peças e produtos que estão sendo produzidas, quando vai saber da complexidade das peças, dos detalhes de montagem dos conjuntos, da matéria prima utilizada, das dimensões físicas e lotes de fabricação, etc.

Não há necessidade do modelador conhecer tão bem o sistema quanto o usuário para iniciar a modelagem, mesmo porque isto levaria tempo, mas é interessante que conheça o sistema o suficientemente para poder interagir com o usuário, de modo a auxiliá-lo na tomada de decisões. O ideal seria também que o usuário tivesse algum conhecimento de simulação, de modo a poder interagir mais com o modelador.

## 2.4. Algumas metodologias para os estudos de simulação

Algumas metodologias que visam tornar o estudo de simulação mais eficiente foram apresentadas ao longo do tempo, todas elas propõem passos que se forem seguidos poderão conduzir a resultados mais consistentes. Nestas propostas se percebe a preocupação dos autores em estabelecer uma seqüência de trabalho, de modo que se todas as etapas forem cuidadosamente observadas, a metodologia dará ao trabalho maior confiabilidade e ao mesmo tempo a validação do modelo e a implementação da solução encontrada será bastante facilitada.

LAW e KELTON (1982), propõem os passos para o estudo de simulação por eventos discretos. Essas etapas vão desde a formulação do problema e do planejamento do estudo de simulação, até a última etapa que é a apresentação dos resultados, bem como a elaboração da documentação do estudo que foi feito. Os autores enfatizam que freqüentemente será necessário e até mesmo desejável, que se volte a etapas anteriores na medida em que se julgar necessário modificá-las, tendo em vista a evolução do estudo de simulação e a conseqüente obtenção de novos conhecimentos que terão que ser considerados.

Com a recomendação de que uma metodologia deve ser adotada nos estudos de simulação para assegurar o sucesso do projeto, e de que a simulação computacional deve ser conduzida judiciosamente para que seus resultados sejam reconhecidos e implementados. DIETZ (1992) propõe uma metodologia com oito passos que conduzirão a um projeto de simulação de sucesso:

- definir um plano de trabalho e objetivos do estudo;
- coletar os dados e documentá-los;
- documento com todas as proposições, contendo as tabelas de dados, roteamentos, etc;
- criação e verificação do modelo de simulação;
- determinação do tempo de aquecimento e duração da simulação;
- validação da performance do modelo;
- análise dos resultados e sua apresentação.

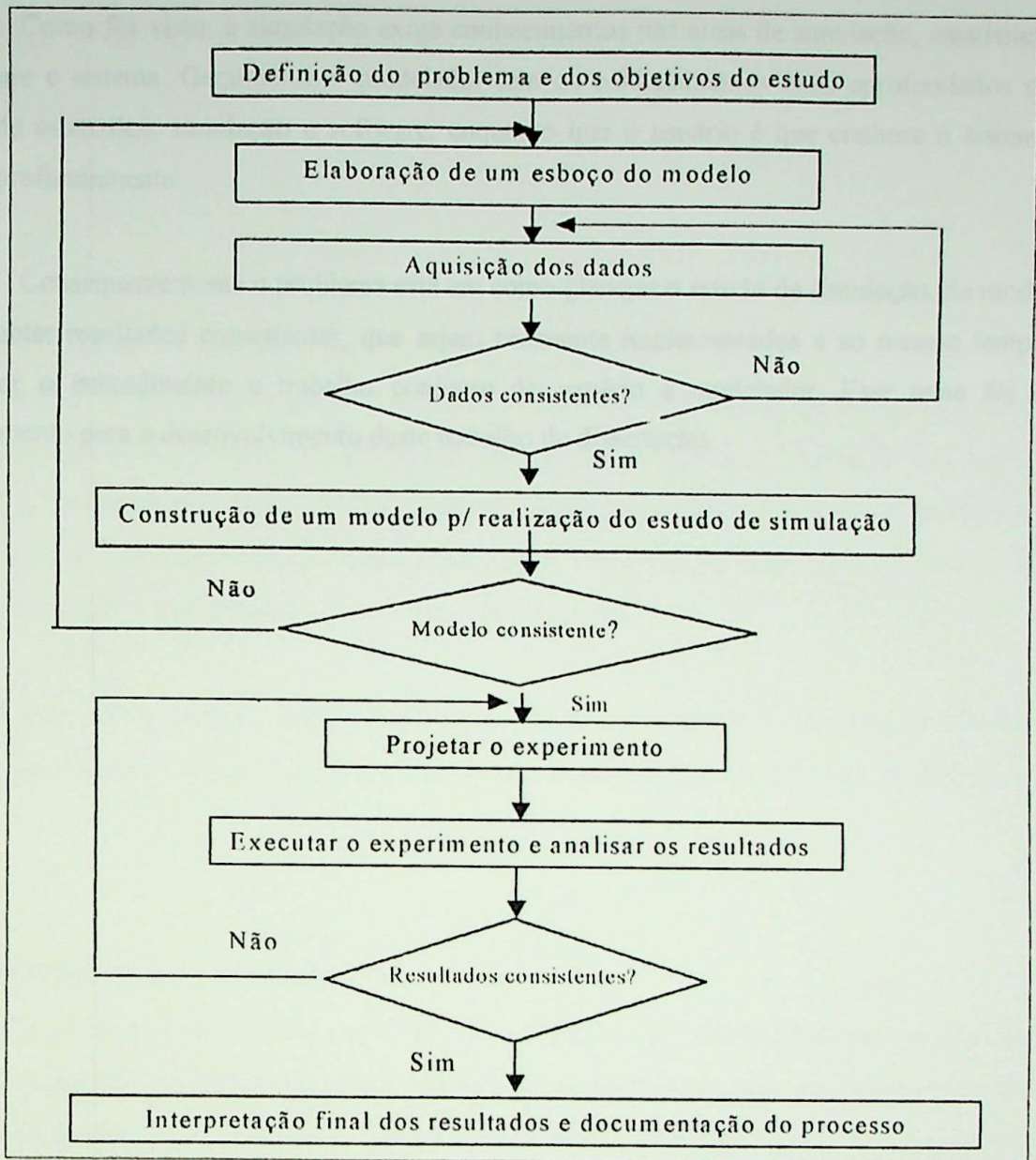
Um trabalho de utilização dessa metodologia para simulação computacional, juntamente com o pensamento sistêmico, na solução de um problema de falta de espaço físico em uma indústria, foi realizada por GIANI et al. (1998) com resultados satisfatórios.

PIDD (1997) relata que a modelagem computacional de um sistema é uma tarefa que exige muito esforço por parte do modelador e que, se conduzida com raciocínio cuidadoso e planejado, será bastante beneficiada. Para que isto ocorra, PIDD (1997) propõe cinco princípios básicos, que devem ser observados ao modelar, os quais são resumidos a seguir:

- o modelo deve ser simples apesar de partir de pensamentos complicados. Os modelos não necessitam ser tão complicados quanto a realidade;
- ser parcimonioso começando do simples e acrescentar complexidade na medida do necessário;
- evitar grandes modelos pela dificuldade em entendê-los. A regra é dividir esses grandes modelos;
- a definição dos dados a serem coletados deve ser orientada pelo modelo. O modelador não deve “se apaixonar pelos dados” como descreve o autor;
- o comportamento do modelador na construção do modelo seria como este estivesse desembaraçando-se dos problemas pois a modelagem de alguma forma é um processo desordenado.

HARREL et al. (1996) alertam que a etapa de construção da estrutura do modelo no computador é somente uma das etapas do projeto de simulação e que o projeto de simulação não pode ser bem conduzido sem um apropriado delineamento, e propõem dez 10 passos para o estudo de simulação. Essas etapas vão desde a definição do problema e da fixação dos objetivos do estudo de simulação até a etapa de implementação. Na fixação do problema os autores recomendam que o modelo deve ser dimensionado de maneira tal, que contenha somente as partes do sistema fundamentais para que se chegar às respostas pretendidas, desta forma, se evitaria os elevados custos de modelagem e se obteria maior velocidade de resposta. Na fase de implementação os autores alertam que se o usuário esteve permanentemente envolvido no estudo de simulação, e se manteve permanentemente informado, haverá muito maior probabilidade de que a solução seja efetivada.

LOBÃO e PORTO (1997) apresentam uma proposta de estudo de sistematização de estudo de simulação. Os autores procuram evidenciar que os resultados obtidos com o estudo de simulação só terão qualidade e consistência se esse estudo for bem conduzido e se tiver uma boa fundamentação. Essa proposta é apresentada na *figura 2.3*, e será aquela que servirá de base para este trabalho.



**Figura 2.3:** Passos da proposta de sistematização  
(FONTE: LOBÃO e PORTO, 1997)

## 2.5. Considerações finais

Como foi visto neste capítulo, a simulação computacional evoluiu com o correr do tempo, tornou-se abrangente, e seu uso tem se difundido pelas indústrias de manufatura. O problema está em como usar essa ferramenta de forma eficaz, e de como se obter dela respostas que sejam válidas, ou seja, que realmente estejam identificadas com o sistema que se está estudando, e ao mesmo tempo, que estas respostas sejam rápidas de modo a não frustrar o usuário na expectativa de aumentar sua competitividade no mercado.

Como foi visto, a simulação exige conhecimentos nas áreas de simulação, estatística, software e sistema. Geralmente o modelador tem os conhecimentos mais aprofundados na área de estatística, simulação e software, enquanto que o usuário é que conhece o sistema mais profundamente.

Conseqüentemente o problema está em como planejar o estudo de simulação, de modo a se obter resultados consistentes, que sejam realmente implementados e ao mesmo tempo facilitar o entendimento e trabalho conjunto do usuário e modelador. Esse tema foi o fundamento para o desenvolvimento deste trabalho de dissertação.

## 2.2 Metodologia e procedimentos

Como foi visto no capítulo anterior, os trabalhos de simulação foram desenvolvidos com uma metodologia adequada e os resultados são considerados válidos. Entretanto, os resultados podem ser influenciados, como gastos de tempo e recursos. Segundo LÓPEZ e ORTEGA (1985) é necessário definir o propósito de realizar os trabalhos de simulação, isto é, determinar o modelo a ser simulado e a metodologia adequada para a realização dos trabalhos. O modelo a ser simulado deve ser definido de acordo com o objetivo da simulação, isto é, com o propósito da simulação. O modelo a ser simulado deve ser definido de acordo com o objetivo da simulação, isto é, com o propósito da simulação.

Tendo em vista os fatos mencionados, a fim de atingir os objetivos propostos por este trabalho, os procedimentos adotados no capítulo 2.2 serão aqueles adotados no trabalho de LÓPEZ e ORTEGA (1985). Os dados foram coletados com a finalidade de avaliar a eficácia do modelo a ser simulado, que é a metodologia de trabalho proposta para a realização dos trabalhos. Os resultados do trabalho serão apresentados em duas figuras, uma mostrando o aspecto de metodologia por área.

## **3. METODOLOGIA PROPOSTA E PLANO DE ESTUDO**

### **3.1. Considerações iniciais**

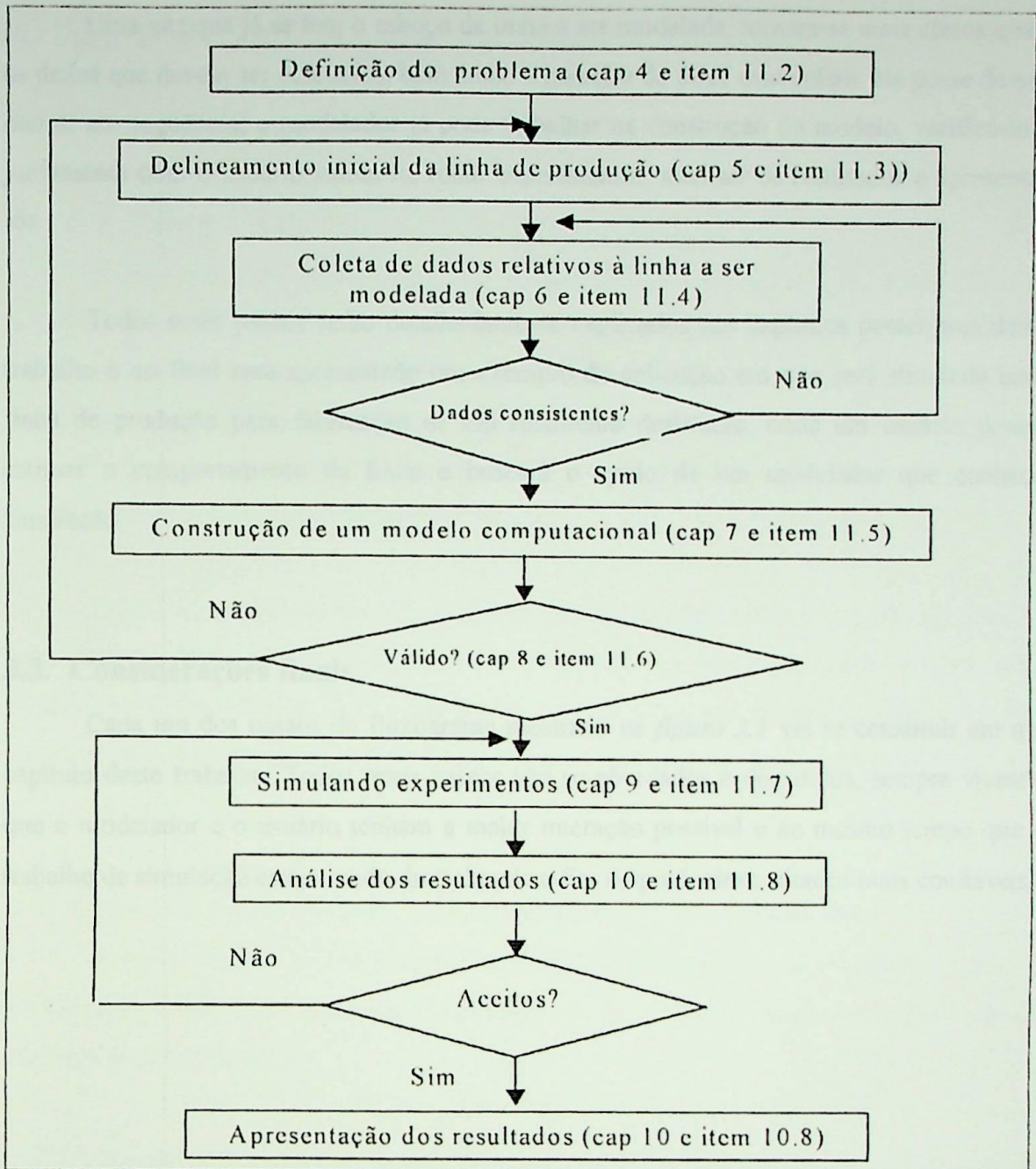
O objetivo deste capítulo é o de apresentar a seqüência metodológica que será adotada para realização dos trabalhos de simulação especificamente para a fabricação em lotes. Durante o estudo de simulação, que vai desde o a definição do problema até a apresentação dos resultados, todos os passos definidos neste capítulo deverão ser abordados de modo a se garantir os resultados pretendidos pelo projeto de simulação.

Como essa seqüência de trabalho tem por objetivo disciplinar o estudo de simulação, esses passos também vão se constituir em um plano de estudo, que irá orientar o modelador e usuário.

### **3.2. Metodologia a ser adotada**

Como foi visto no capítulo anterior, se os trabalhos de simulação forem conduzidos sem uma metodologia adequada, e sem resultados que contribuam para um estudo eficiente do sistema modelado, as conclusões podem ser frustrantes, com gastos de tempo e recursos. Segundo VAZ e GIL (1988), é necessário dominar o impulso de começar os trabalhos de modelagem sem um método. O modelador e o usuário têm que estar plenamente conscientes dos objetivos a que se propõe o estudo de simulação, bem como, um conhecimento completo do sistema a ser estudado.

Tendo em vista os fatos anteriormente expostos, e de forma a atingir os objetivos propostos por este trabalho, os passos apresentados na *figura 3.1* serão adotados, adaptados da proposta de LOBÃO e PORTO (1997). Os passos foram nomeados com a finalidade de melhor adaptá-los ao objeto deste trabalho, que é a modelagem de uma linha de produção para fabricação em lotes. Na seqüência do trabalho cada fase apresentada na citada figura será analisada sob o aspecto da manufatura por lotes.



**Figura 3.1:** Passos dos trabalhos de simulação para fabricação em lotes (adaptado de LOBÃO e PORTO, 1997)

Esta proposta foi escolhida devido ao seqüenciamento de seus passos adaptar-se bem ao caso da fabricação em lotes, como explanado a seguir. A metodologia adotada parte de um estudo conjunto, onde modelador e usuário vão estabelecer o plano de estudo para o problema em questão. O próximo passo natural será o delineamento da linha de produção a ser modelada, fase esta em que ambos, modelador e usuário, vão incrementar sua interação e ao mesmo tempo, quando a linha de produção estiver definida o modelador terá uma boa idéia do sistema.

Uma vez que já se tem o esboço da linha a ser modelada, tornam-se mais claros quais os dados que devem ser coletados, bem como a maneira de fazer essa coleta. Na posse desses dados, em seqüência, o modelador já pode trabalhar na construção do modelo, verificá-lo e juntamente com o usuário validá-lo, rodar experimentos, analisar os resultados e apresentá-los.

Todos esses passos serão detalhadamente explicados nos capítulos posteriores deste trabalho e ao final será apresentado um exemplo de aplicação em que será simulada uma linha de produção para fabricação de um rolamento deslizante, onde um usuário deseja estimar o comportamento da linha e buscará o apoio de um modelador que conheça simulação.

### 3.3. Considerações finais

Cada um dos passos do fluxograma mostrado na *figura 3.1* vai se constituir em um capítulo deste trabalho. Todos esses passos vão se abordados e discutidos, sempre visando que o modelador e o usuário tenham a maior interação possível e ao mesmo tempo que o trabalho de simulação esteja sendo disciplinado a fim de produzir resultados mais confiáveis.

## 4. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

### 4.1. Considerações iniciais

A sugestão é de que todo trabalho de simulação se inicie, ou tenha como ponto de partida a definição do problema. Essa etapa deve ser executada em equipe constituída pelos representantes do cliente e pelo modelador ou equipe de modeladores. É pela definição do problema, num trabalho realizado em conjunto, que todo o esforço despendido será conduzido numa só direção, com a finalidade principal de se evitar a decepção tanto do cliente quanto do modelador com os resultados finais da simulação.

Como o objeto deste trabalho é o de focar exclusivamente a fabricação em lotes, os problemas propostos por este trabalho ficarão restritos a esse tipo de atividade de manufatura. A seguir serão explanados, alguns dos problemas relacionados com esse tipo de atividade, e que as empresas atuantes no setor de manufatura normalmente vão encontrar.

### 4.2. Exemplos de problemas enfrentados na fabricação em lotes

A seguir serão expostos alguns exemplos de problemas que uma empresa poderá ter com relação à fabricação em lotes, relacionando-os ao uso da simulação como uma maneira eficiente para solucioná-los.

#### 4.2.1. *Aumento da linha de produção para atender um acréscimo de demanda*

Esse é um dos problemas mais freqüentemente encontrados, a empresa já fabrica o produto, e quer ponderar quais os equipamentos, quantos operadores, qual o ferramental, enfim, quais os meios produtivos vai ter que acrescentar à linha de produção, tendo em vista um aumento de demanda. Alguns desses trabalhos, devido ao pequeno número de variáveis envolvidas ou à pequena complexidade da linha de produção, não necessitam da simulação para serem resolvidos, no entanto, quanto as linhas de produção forem extensas, envolvendo várias operações, num processo complexo, às vezes exigindo que alguns equipamentos sejam divididos com a produção de outras famílias de peças, a simulação torna-se uma solução de estudo adequada, trazendo economia de tempo e de recursos à empresa. WILD e PORT apud CASSEL e MULLER (1996) apresentam o exemplo da empresa de consultoria Northern

Research and Engineering Corp. que num trabalho para a Torrington Co., ao simular uma nova linha de produção, economizou US\$ 750.000,00 evitando a compra de 4 máquinas que seriam desnecessárias, mas que estavam projetadas para serem adquiridas.

Em algumas circunstâncias o estudo através da simulação permite chegar à conclusões que trazem grande economia à empresa, onde ao se analisar o sistema modelado, por vezes chega-se à conclusão de que não há necessidade de aquisição de mais equipamentos, bastando-se diminuir os tempos de set-up, gerenciar e reduzir adequadamente os tempos de interrupção para se atingir a demanda necessária.

#### ***4.2.2. Análise de gargalos***

O gargalo vem a ser um recurso que restringe a capacidade do sistema que está sendo estudado, assim, no caso de uma linha de produção, o gargalo pode ser uma máquina, um equipamento, um dispositivo de fixação, o operador, o tempo de operação, uma ferramenta, a alimentação de matéria prima, etc. O importante a se considerar na análise, é que a capacidade de todo o sistema está sendo limitada por aquele fator de produção, que terá que ser cuidadosamente avaliado, e também há que se considerar que uma vez eliminado aquele fator o gargalo poderá passar a ser outro. Por vezes, na observação de uma operação gargalo, a simples troca de ferramenta por uma que suporte maiores velocidades de corte já é suficiente para que o gargalo passe a ser outra operação, desta forma nem sempre a solução será a aquisição de mais equipamentos ou contratação.

A simulação computacional aparece como uma ferramenta apropriada à análise de gargalos principalmente quando as variáveis que envolvem o sistema são aleatórias, caso esse que restringe o uso da programação linear. Como a simulação também permite que se represente sistemas complexos e dinâmicos, há possibilidade de se analisar os gargalos de uma linha de produção, através de resposta às perguntas “what if”, pois permitem que se produza no processo qualquer modificação e imediatamente se obtenha a resposta de qual seria o comportamento após essa modificação.

Apesar dessa abordagem heurística não conduzir a uma solução ótima, alguns softwares de simulação, como o PROMODEL, podem vir acompanhados de um programa otimizador, como o SIMRUNNER, que tem condições de analisar a performance das variáveis de saída, ao se modificar alguma entidade que compõe o cenário modelado, como

por exemplo, qual o número ideal de operadores, quando o objetivo é o de minimizar o custo da peça. Esse objetivo pode ser analisado em diferentes cenários, ou seja, pode-se simular um cenário com somente uma máquina onde estiver o gargalo, e outro cenário com duas máquinas, e após rodar o programa otimizador para cada um dos cenários, e finalmente pode-se decidir qual opção adotar.

Um exemplo de aplicação de estudo de gargalos no ramo de gráfico de produção de embalagens e rótulos, foi apresentado por DIEHL e OLIVEIRA (1996). O estudo foi feito em um dos setores da empresa, onde as três máquinas de estampagem existentes não estavam atendendo a demanda, sendo que o custo da máquina adicional estava estimado em torno de US\$700.000,00. A conclusão que se chegou, através do Simulador Computacional *Micro Saint*, é de que a simples redução dos tempos de *set-up* e de interrupções, evitariam a aquisição do equipamento.

### 4.2.3. *Análise de lay-out*

A análise de lay-out quer seja de processo ou de produto, é uma atividade importante pois seus resultados vão influenciar diretamente na performance do sistema que está sendo avaliado. Por relacionar-se com o fluxo de material em processo, deslocamento de operadores e fluxo de informações, sua avaliação torna-se complexa, razão pela qual a simulação computacional apresenta-se como uma ferramenta adequada.

Neste caso, as principais vantagens da simulação estão centradas na possibilidade de se fazer experimentos através de respostas às questões “*what if*”, sem necessidade de que as modificações sejam implementadas fisicamente, isto possibilita um ganho de tempo, de recursos e evita-se as interrupções de produção. A outra vantagem reside no fato de que não há necessidade de aquisição de equipamentos para a experimentação, tampouco de aumento da área física, evitando-se dessa maneira gastos desnecessários, pois os equipamentos só serão adquiridos, ou a área física só será construída quando o sistema que foi modelado ficou definido.

O recurso de animação torna-se também fundamental para que o usuário do sistema possa ver o resultado das modificações experimentadas, prestando-se desta forma à melhoria da interatividade entre o modelador e o usuário. Ao mesmo tempo depois de se haver chegado ao modelo final, serve também como instrumento para treinamento do chão de fábrica, no

como proceder para se obter o melhor desempenho possível no layout que foi definido como o mais apropriado.

A utilização adequada da simulação computacional, pode levar a resultados bastante próximos da realidade e a ganhos de produtividade. Um exemplo de uma linha de montagem de microscópios é apresentado por PICCOLINI e FIGUEIREDO (1998), onde os mesmos eram montados em 26 horas, e após modelagem do lay-out com o software PROMODEL apresentou um tempo de montagem de 7 horas, e a experimentação demonstrou que a montagem do microscópio poderia ser reduzida a 9 horas.

Ao se estudar o layout mais adequado através da simulação, paralelamente os softwares como o PROMODEL apresentam várias informações importantes para o julgamento do modelador e do usuário. Esses outputs, tais como work-in-process (WIP), lead time, distâncias percorridas pelos operadores, throughput das diversas peças, taxa de ocupação dos operadores e equipamentos, etc, são apresentados na forma de um relatório e alguns na forma gráfica.

A *figura 4.1* mostra um trecho do relatório emitido pelo software PROMODEL relativo às entidades de um sistema. No trecho do relatório se pode observar que as informações do relatório PROMODEL sobre as entidades são completas, facilitando bastante a análise dos dados e sua interpretação. Da mesma forma os relatórios fornecem informações detalhadas a respeito dos operadores, equipamentos e todas as variáveis que forem introduzidas no modelo.

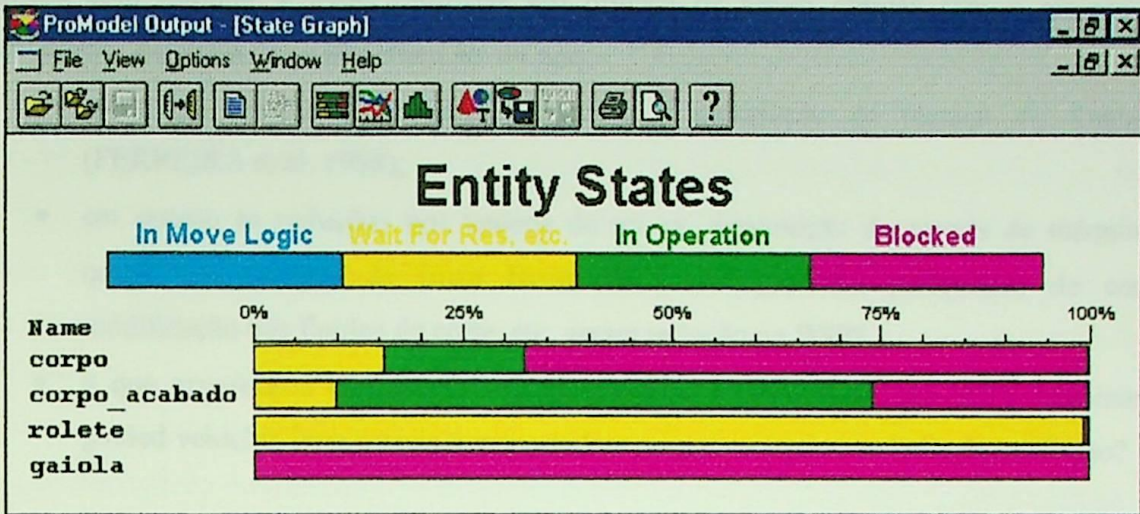
Entity Name	In Move Logic	Wait For Res, etc.	In Operation %	Blocked %
corpore	0.00	15.65	16.89	67.46
corpore acabado	0.00	10.03	64.08	25.89
rolete	0.00	99.55	0.00	0.45
gaiola	0.00	0.00	0.00	100.00

Variable Name	Total Changes	Average Minutes Per Change	Minimum Value	Maximum Value	Current Value	Average Value
wip	720	2.154694	0	482	480	287
corpore pronto	120	12.944833	0	120	120	150
rolamento pronto	60	25.896333	0	60	60	70

*Figura 4.1:* Trecho de relatório do PROMODEL 4.0 relativo às entidades de um sistema

Na *figura 4.2* tem-se um gráfico de barras também emitido pelo PROMODEL, mostrando o estado das entidades durante a simulação, da mesma forma, o software fornece gráficos de fácil interpretação que permitem o acompanhamento dos valores históricos assumidos pelas variáveis, conteúdo das máquinas durante a simulação e etc.



*Figura 4.2:* Gráfico emitido pelo PROMODEL relativo ao estado das entidades do sistema

#### 4.2.4. Análise de material em processo

Um dos fatores básicos para o ganho de competitividade das empresas é a redução de estoque. Baseados nessa premissa, várias técnicas de administração de materiais foram introduzidas, de maneira a reduzir os estoques, proporcionando assim às empresas a redução de recursos nessa área. O *kanban* é um bom exemplo de uma técnica, inserida na filosofia *just-in-time*, que através da padronização do tamanho e capacidade dos contenedores, facilita o inventário e ao mesmo tempo exerce um maior controle sobre o material em processo.

Os estoques podem ser subdivididos em três categorias principais: o estoque de matérias primas, materiais em processo e produtos acabados. Como a atenção do presente trabalho está centrada nas linhas de fabricação, o objetivo será o estudo do material em processo ou “*work-in-process*” (WIP).

A simulação aparece como uma ferramenta adequada para tal estudo pois todas as modificações podem ser feitas sem influência na linha real, fornecendo ao usuário permanentemente qual o WIP naquele dado momento, e depois de terminada a simulação, fornece na forma de relatório os valores mínimos, máximos, médios para aquele período simulado. Os resultados apresentados dessa forma permitem que o modelador e o usuário

possam fazer modificações no cenário e verificar quais as influências que estas geraram no WIP.

Algumas respostas, no que diz respeito ao WIP, são importantes para a redução dos gastos com estoque, e essas respostas são difíceis de serem obtidas sem o recurso da simulação. Algumas delas poderiam ser do tipo:

- como se comportaria a produção com a introdução da técnica do Kanban? (FERREIRA et al, 1998);
- em quanto as reduções nos tempos de set-up, diminuição da parada de máquinas, queda nos tempos de troca ferramentas, alteração nos parâmetros de corte, modificação nos fluidos de corte, etc, geram redução no WIP?
- o que aconteceria com o WIP ao se adicionar um operador, um AGV (automated guided vehicle), uma correia transportadora ou uma máquina na linha de produção?

#### 4.2.5. *Análise de lead time*

O lead time quando relacionado à linha de produção para fabricação em lotes vem a ser o tempo necessário para que determinada atividade do processo de fabricação seja executada em uma peça. A redução de lead-time é um objetivo essencial a ser atingido, pois dentre outros benefícios vai aumentar a flexibilidade da linha de produção, bem como reduzir custos.

O lead time pode ser desmembrado em tempo de preparação (*set up*), tempo de operação (*run time*), tempo de movimentação e tempo de fila, os quais serão explicados a seguir.

O *tempo de preparação (set up)* vem a ser o tempo decorrido desde o término de um lote de produção, até que a primeira peça conforme do próximo lote seja produzida. A redução nos tempos de set up é uma preocupação constante da indústria, e vai depender de uma série de fatores. Uma questão importante a ser considerada é a padronização de dispositivos de fixação, paletes, ferramentas e acessórios de máquinas. O treinamento das operações de troca, bem como a facilidade de acesso a todo os itens (ferramentas, dispositivos, jogos de calibres, fixas de processo, ferramentas, etc) referentes ao próximo lote, também são importantes no sentido de reduzir os tempos de set up. A simulação permite que se modele sistemas destinados à produção de diferentes peças, onde neste caso os tempos de

set up são inseridos no programa. Um dos experimentos que se pode simular é o de verificar qual o impacto sobre a produção devido à variação dos tempos de set up.

O *tempo de operação* é aquele em que efetivamente a peça está sendo submetida a um processo de transformação. Neste caso há inúmeros fatores que influenciam no tempo de operação, como: profundidade e largura de corte; velocidade de corte; avanço; potência da máquina; tipos de ferramentas de corte (ferramentas revestidas, pastilhas de metal duro, ferramentas de aço rápido, pastilhas de material cerâmico); disposição das pastilhas nas fresas rotativas; habilidade do operador; velocidades de troca de ferramentas para as máquinas CNC, bem como das velocidades de deslocamentos das mesas; tipo de fluido de corte e etc. A análise da influência do tempo de operação sobre o lead time, pode ser executado através da simulação. Uma das análises que se pode fazer é a de se realmente vale a pena investir em ferramentas mais caras, verificando-se se os ganhos em tempo de operação realmente vão trazer diminuição do lead time, ou simplesmente vão aumentar os tempos de fila de espera.

Inserido no tempo de operação está o tempo de carregamento e descarregamento correspondente àquele em que a máquina estiver parada aguardando que uma nova peça esteja em posição de usinagem. Esse tempo também é sujeito a uma série de fatores, como: o tipo de dispositivo adotado, se é de acionamento manual ou pneumático, se a máquina contém ou não porta-pallets, habilidade do operador, estudo de movimentos e etc. Uma vez que esses fatores vão redundar na variação dos tempos de carregamento e descarregamento da peça, o uso da simulação poderá analisar qual a influência que as mudanças implementadas vão exercer no lead time da peça.

O *tempo de movimentação* vem a ser o tempo em que a peça está sendo movimentada entre máquinas ou entre seções. Depende dentre outros fatores do layout adotado que vai determinar as distâncias percorridas por qualquer dispositivo de transporte (homem, AGV, correias transportadoras, calhas, pontes rolantes e etc). A simulação se torna interessante nessa análise exatamente por ser analisar qual a influência que as distâncias a serem percorridas ou as diferentes opções de transporte exercem sobre o lead-time.

O *Tempo de fila (queue time)* é aquele em que a peça está aguardando para ser usinada, e segundo SUCOMINE e RESENDE (1996) corresponde à maior parte do lead time. Por essa razão a análise dos tempos de fila constituem-se em um dos objetivos mais

importantes da simulação. Existem diversos critérios para escolha da peça que vai ser usinada na próxima operação, dentre estes critérios os mais correntemente usados são:

- FIFO (*First In – First Out*) – neste tipo de fila, a primeira peça que entrou na fila, ou seja, que teve a operação anterior completada, é a primeira a ser priorizada para sofrer a próxima operação.
- LIFO (*Last In – First Out*) – neste caso, a última peça que entrou na fila será a priorizada para sofrer a próxima operação.
- DECISÃO – existem casos em que se quer priorizar determinado tipo de peça baseado em um atributo, para que esta entre em operação primeiro. Um exemplo desse tipo de priorização pode ser o de uma linha de produção que esteja preparada para usinar peças com dois tipos de matéria prima, neste caso pode-se priorizar uma dessas, de modo que sempre que a peça com aquela determinada matéria prima entrar na fila, deve ser usinada em primeiro lugar.

#### **4.2.6. Análise de tempos de parada**

A simulação computacional permite que se analise os tempos de parada dos equipamentos, quer para manutenção preventiva, manutenção corretiva ou setup. Esse tipo de análise é importante por influir em todas as variáveis, como no WIP, custo das peças, lead time, tempo de utilização dos operadores e equipamentos e etc.

Os tempos de parada para manutenção preventiva, podem ser programadas na simulação da mesma forma que no sistema real. Pode-se programar a parada de um equipamento baseado num determinado número de peças trabalhadas ou que entraram na máquina, num determinado tempo de funcionamento ou mesmo programá-la a fim de parar numa determinada hora anteriormente fixada para manutenção. Quando aquela variável é atingida a máquina pára e o programa permite que se determine prioridade de escolha, ou seja, qual máquina parada vai ser atendida primeiro e por quem será atendida, neste caso se for o próprio operador, o mesmo deixará de executar outras tarefas.

Como as paradas nem sempre são previstas, ocorrem com freqüências variadas e nem sempre os tempos em que a máquina é colocada em funcionamento novamente são constantes, a simulação computacional permite que todas essas variáveis sejam inseridas segundo uma distribuição de probabilidade. Pode-se tabular os dados colhidos no sistema real, lançar esses dados num programa auxiliar estatístico, como o StatFit por exemplo, que é um

software estatístico que vem incorporado ao PROMODEL, e esse programa vai determinar qual a curva de distribuição que mais se adapta àquele conjunto de dados. O simulador computacional, como o PROMODEL por exemplo, permite que se utilize essas variáveis segundo uma determinada distribuição probabilística a elas atribuídas.

Desta forma, mesmo num ambiente complexo de uma linha de produção, em que inúmeras variáveis têm que ser consideradas, é possível prever e estudar os impactos que os tempos de parada exercem sobre os custos, WIP e produtividade.

### 4.3. Interação entre o modelador e o cliente

Nem sempre o usuário, ou seja, aquele que conhece o sistema a ser modelado e vai usufruir dos benefícios resultantes da simulação é o modelador. Em grande parte das vezes, a utilização da simulação computacional é prestada na forma de consultoria externa, ou mesmo que a empresa tenha o software de simulação, pode acontecer de o modelador não conhecer suficientemente todos os sistemas existentes. Neste caso é necessário que o modelador e o usuário estejam perfeitamente integrados de modo que os resultados da simulação sejam profícuos.

É nessa fase inicial em que o modelador faz conhecer ao usuário do sistema, as limitações da simulação computacional, bem como suas principais características e necessidades, para que o projeto de simulação atinja os objetivos pretendidos. O usuário por sua vez, é conhecedor da linha de produção a ser modelada, ou das necessidades produtivas da empresa, e vai orientar o modelador a esse respeito.

Um dos aspectos importantes a serem discutidos é o de quais são os dados realmente importantes e como serão feitas as coletas desses dados a respeito das linhas de produção, de modo que não se influa no sistema a ser modelado, e ao mesmo tempo, esse conjunto de dados espelhe o mais próximo possível a linha de produção a ser modelada.

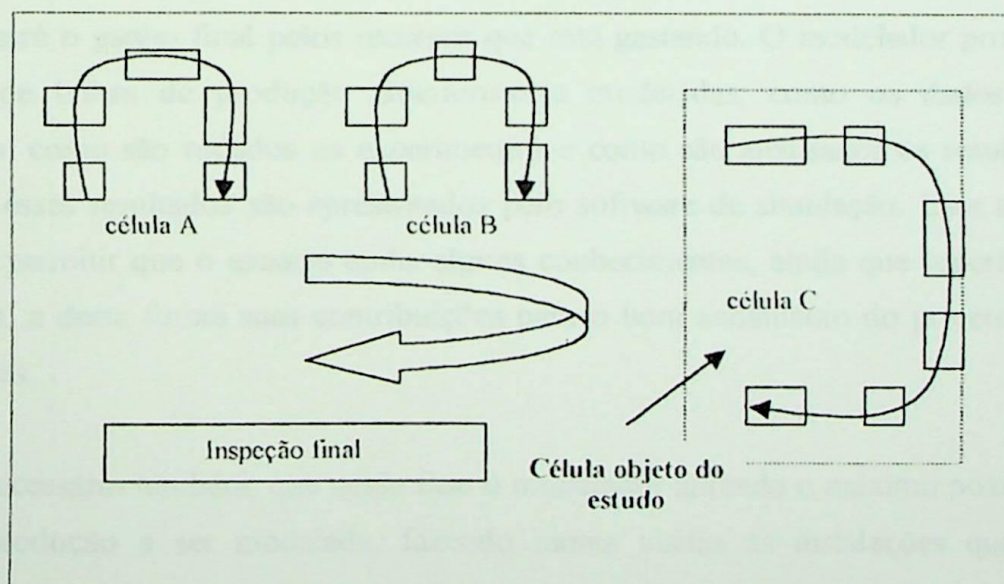
Juntamente com o modelador, o usuário deverá definir qual parte da linha de fabricação será modelada e em que nível de detalhamento, deixando claro que quanto maior for a linha a ser modelada maior será o tempo despendido para modelagem. O objetivo de

estudo da simulação computacional poderá ser a linha de produção toda, parte dessa linha ou apenas uma de suas células.

Se o objetivo da simulação computacional for o de se estabelecer os equipamentos e operadores que vão compor uma linha de produção ainda inexistente, provavelmente será necessário simular toda a linha de produção para ser estudada todas as possibilidades envolvidas. Por outro lado, se o objetivo da simulação computacional for o de ser conhecer o impacto da aquisição de uma máquina CNC sobre uma das células de fabricação, não haverá necessidade de se modelar todo o sistema, modela-se somente aquela célula e toda a parte da linha de produção que a antecede entrará como se fosse uma única atividade, sendo que os outputs dessa atividade servirão de inputs para a célula a ser modelada.

No exemplo da *figura 4.3*, o objeto de interesse é o estudo da célula C, neste caso não interessará a modelagem das células A, B e da linha de inspeção final. A modelagem da célula C, receberá como dados de entrada somente o tipo de peça que está sendo processada na linha de produção, o número de ocorrências (quantidade de peças que darão entrada na célula) e frequência (quantidade de peças que dão entrada numa fração de tempo) com que essas peças entrarão na célula e quantas entrarão por vez.

Esta abordagem, de se modelar somente a parte que vai interessar ao estudo, tornará o tamanho do modelo menor e conseqüentemente os gastos em tempo e recursos destinados a modelagem serão significativamente menores.



*Figura 4.3:* Definição de qual parte do sistema será modelado

Da mesma forma os dados de saída dessa célula têm que ser compatíveis com a parte da linha de produção que está à frente, no exemplo a linha de inspeção final, ou seja, o output da modelagem da célula C, como por exemplo o número de peças produzidas num determinado tempo (frequência), tem que ser compatível com a capacidade de inspeção nas bancadas de inspeção final.

O modelador e o usuário também têm que definir qual vai ser o prazo para a modelagem da linha de produção. Esse prazo vai depender, além do tamanho da linha a ser modelada, do detalhamento com que essa linha de produção vai ser modelada. Quanto maior o nível de detalhamento que se deseja, mais tempo será gasto na modelagem, e segundo AKBAY (1996), normalmente não é possível se colocar no modelo todas as características do sistema real, desta forma é necessário fazer suposições que permitam que se modele o sistema.

Assim, na modelagem da linha de produção, o tempo de operação por exemplo, pode ser desdobrado no tempo em que o operador leva para retirar a peça do dispositivo, colocar uma outra peça e acionar a máquina, mais o tempo de usinagem propriamente dito. Na modelagem, para simplificação, e com a finalidade de se diminuir a complexidade e detalhamento do modelo, pode-se somar todos esses tempos e considerá-lo como tempo de operação, não importando os diversos tempos que o compõem.

Nessa fase inicial é importante que o usuário seja conscientizado sobre o que pode esperar da simulação computacional, para que não haja frustração quanto aos resultados, ou seja, qual será o ganho final pelos recursos que está gastando. O modelador poderá mostrar exemplos de linhas de produção anteriormente modeladas, como os dados entram na modelagem, como são rodados os experimentos e como são analisados os resultados, e em que forma esses resultados são apresentados pelo software de simulação. Essa apresentação inicial, vai permitir que o usuário tenha alguns conhecimentos, ainda que superficiais, sobre modelagem, e desta forma suas contribuições para o bom andamento do projeto serão mais significativas.

É necessário também, que nessa fase o modelador aprenda o máximo possível sobre a linha de produção a ser modelada, fazendo tantas visitas às instalações quantas forem necessárias, até que tenha conhecimento suficiente para dar início ao projeto de simulação. É

importante que o modelador saiba o seqüenciamento das máquinas, tipo de produto que está sendo fabricado, dados quanto ao processo de fabricação, que tipos de máquinas estão sendo usadas, o layout das máquinas, número de operadores, instalações físicas disponíveis, etc. Uma vez iniciado o projeto, o modelador poderá ir aumentando seus conhecimentos sobre o sistema, até que tenha segurança de que o modelo a ser construído seja compatível com a linha de produção existente ou pretendida pelo usuário. Esses conhecimentos são importantes, não somente para a modelagem, mas também porque o modelador poderá contribuir com suas idéias para a melhoria do sistema.

#### 4.4. Considerações finais

Como foi visto neste capítulo, existem vários problemas na área de fabricação em lotes que podem ser estudados através do uso da simulação computacional por eventos discretos. O importante no trabalho de simulação é que algum tempo seja dedicado ao estudo minucioso do que se quer desse estudo e que desde o início, ou seja, desde a definição do problema e do plano de estudo, o modelador e o usuário estejam envolvidos e interagindo, de maneira a se obter uma maior garantia de resultados positivos.

Uma vez que o modelador e usuário estão perfeitamente entrosados, o problema esteja definido e haja um planejamento do estudo de simulação, passa-se ao próximo passo que é a confecção do esboço do layout a ser modelado.

## 5. CONFECÇÃO DO ESBOÇO DO LAYOUT A SER MODELADO

### 5.1. Considerações iniciais

Antes do sistema de produção para fabricação em lotes ser modelado, há necessidade de se fazer um esboço desse layout. O objetivo é o de se ganhar tempo de simulação, aumentar a interação entre o modelador e o usuário e ao mesmo tempo tornar mais fácil o estágio de modelagem.

Se o sistema já existe, o esboço do layout obrigará que o modelador dele tome conhecimento, e que ao mesmo tempo, ambos, o modelador e o usuário estejam trocando informações, que serão necessárias na modelagem, tais como regra das filas, movimentação dos materiais, arranjo físico e etc.

Se o sistema não existe, o esboço do layout servirá para que o modelador e principalmente o usuário adotem uma linha de ação sistematizada para elaboração do arranjo físico inicial, definição preliminar dos equipamentos necessários, número de operadores, turnos e etc.

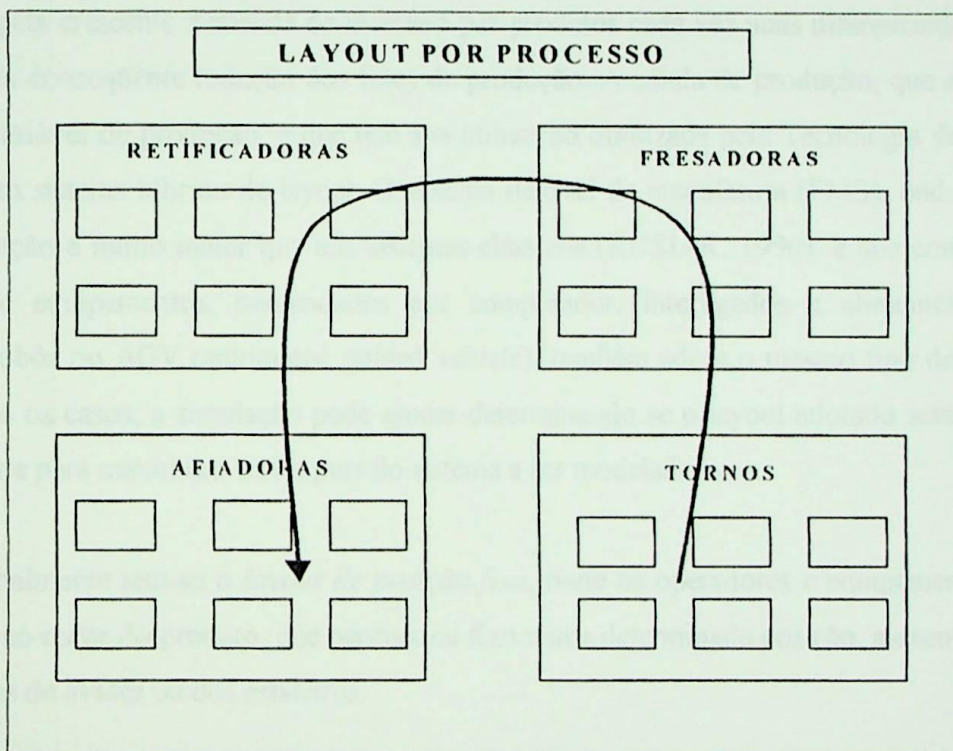
Alguns conceitos importantes a respeito do estudo de layout, que se propõe a um arranjo físico ótimo para os equipamentos produtivos e materiais em processamento são:

- Assegurar-se que o trabalho, material, as pessoas e as informações devem fluir da melhor maneira através do sistema que está sendo estudado (RUSSEL e TAYLOR III, 1998);
- Segundo MUTHER (1978), as mudanças de layout devem ser planejadas antes da implementação, pois essa medida reduz as perdas e integra todas as modificações através de um programa que facilita e estabelece uma seqüência lógica para as mudanças;
- HEARD e PLOSSL (1984) alertam para o uso da Tecnologia de Grupo na análise do layout funcional. Também salientam, que se poderá conseguir uma redução de movimentação, lead time e trabalho em processo, com um estudo do roteamento e fluxo.

## 5.2. Tipos de layout

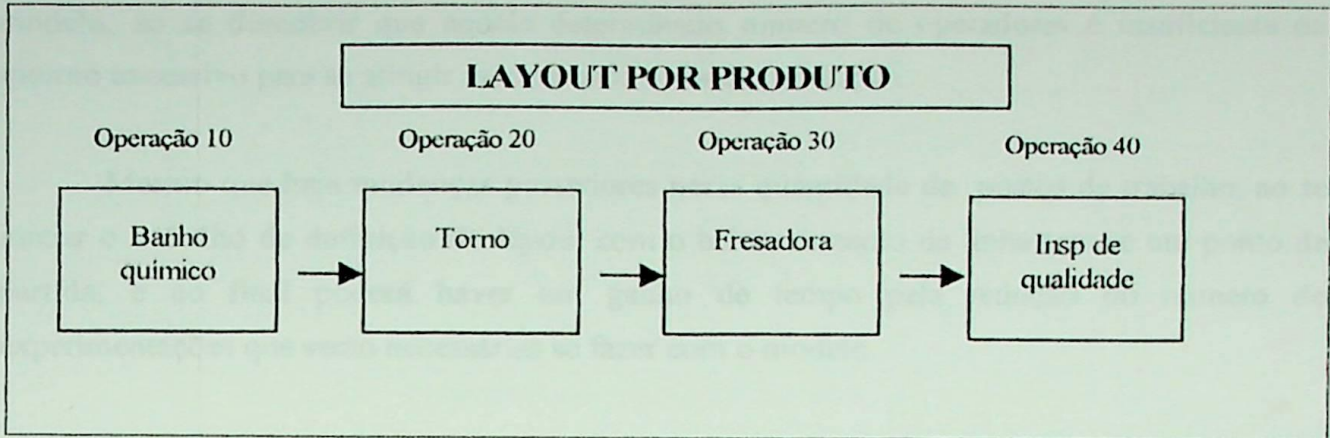
Segundo KRAJEWSKI e RITZMAN (1996), existem quatro tipos de layout: por processo, por produto, híbrido e o layout de posições fixas. O layout celular e o sistema flexível de manufatura são sistemas híbridos de layout.

O *layout por processo*, também conhecido como layout funcional é mais aplicável quando se tem um baixo volume aliado a uma grande variabilidade de peças. Esse tipo de layout, como mostrado na *figura 5.1*, grupa os equipamentos de acordo com sua função, ou seja, os tornos, fresas, retíficas, afiadoras e etc, são grupados numa disposição que racionalize o melhor possível a deslocamento dentro da oficina. É o tipo de layout utilizado numa ferramentaria de indústria, pois atende a uma grande variedade de itens com baixa quantidade produzida.



*Figura 5.1:* Layout funcional

O *layout por produto* é orientado para a produção repetitiva ou seriada, e a grandes volumes de produção, geralmente as máquinas são dispostas em linha, obedecendo ao seqüenciamento do processo, neste caso privilegiando a movimentação das peças, que é reduzido ao mínimo, mas prejudicando-se a versatilidade para atendimento de uma possível mudança de mix de produção. Esse tipo de layout pode ser visto na *figura 5.2*.



**Figura 5.2:** Layout por produto

A forma de *layout híbrido* visa principalmente o atendimento das necessidades impostas pela crescente demanda de mercado por produtos cada vez mais diferenciados, bem como, pela conseqüente redução dos lotes de produção. A célula de produção, que atende a um mix variável de produção, e que tem sua utilização otimizada pela Tecnologia de Grupo (TG), é um sistema híbrido de layout. O sistema flexível de manufatura (FMS), onde o grau de automação é muito maior que nos sistemas clássicos (KUSIAK, 1990), e que consiste de grupos de equipamentos, comandados por computador, interligados e alimentados por esteiras, robôs ou AGV (automated guided vehicle), também adota o mesmo tipo de layout. Em ambos os casos, a simulação pode ajudar determinando se o layout adotado será o mais conveniente para maximizar os outputs do sistema a ser modelado.

Finalmente tem-se o *layout de posição fixa*, onde os operadores e equipamentos são dispostos ao redor do produto, que permanece fixo numa determinada posição, a exemplo das fabricações de aviões ou dos estaleiros.

Tendo em vista o objetivo deste trabalho, que é a fabricação em lotes será explorado somente o layout por produto e híbrido.

### 5.3. Esboço do layout por produto

O primeiro passo para a definição do esboço de layout é a definição do número de postos de trabalho que serão necessários. A quantidade de postos de trabalho vão definir o número de operadores que serão necessários na linha de produção. Esse número será usado

como ponto de partida para a modelagem e poderá mudar durante as experimentações com o modelo, ao se descobrir que aquele determinado número de operadores é insuficiente ou mesmo excessivo para se atingir determinada meta de produção.

Mesmo que haja mudanças posteriores nessa quantidade de postos de trabalho, ao se iniciar o trabalho de definição do layout com o balanceamento da linha tem-se um ponto de partida, e ao final poderá haver um ganho de tempo pela redução do número de experimentações que serão necessárias se fazer com o modelo.

Como visto o esboço do layout por produto vai depender do balanceamento da linha, uma vez que este vai determinar o número de estações de trabalho necessário, para que se obtenha a produção requerida. A linha de produção mudará todas as vezes que o processo mudar, devendo adaptar-se ao novo seqüenciamento, e também mudará, evidentemente todas as vezes que o produto mudar, em razão também da mudança do processo. Segundo KRAJEWSKI e RITZMAN (1996), o objetivo do balanceamento é se obter um menor número possível de estações de trabalho para uma determinada produção desejada.

O tempo por peça é a informação mais importante ao se iniciar o estudo do balanceamento, para determinar o número de estações de trabalho. Esse tempo é dado por (5.1).

$$0 \quad \text{tempo por peça} = \frac{\text{período de tempo disponível para produção}}{\text{produção desejada nesse período}} \quad (5.1)$$

Se por exemplo a linha for trabalhar em turnos de 9 horas e a produção necessária para esse tempo de trabalho for de 675 peças, o tempo por peça será aquele apresentado em (5.2).

$$\text{tempo por peça} = \frac{9 \times 60}{675} = \frac{540}{675} = 0.8 \text{ min/peça} \quad (5.2)$$

No exemplo, supondo que essa peça seja um eixo qualquer, retificado, com rosca e rasgo de chaveta em uma das extremidades, e que sofrerá as operações descritas na *tabela 5.1*:

Número da operação	Descrição da operação	Tempo de duração (min)
10	Corte da barra	0,30
20	Desengraxe	0,45
30	Furação dos entre-pontos	0,30
40	Torneamento de desbaste	0,50
50	Torneamento externo	0,65
60	Retífica externa	0,70
70	Abertura da rosca	0,45
80	Fresamento do rasgo de chaveta	0,30

Tabela 5.1: Sequência de operações

Como os tempos de permanência nas estações de trabalho não podem exceder o tempo por peça, no caso do eixo acima 0,80 min, o balanceamento da linha determinaria que a mesma seria constituída de 5 estações de trabalho dispostas como na *figura 5.3*.

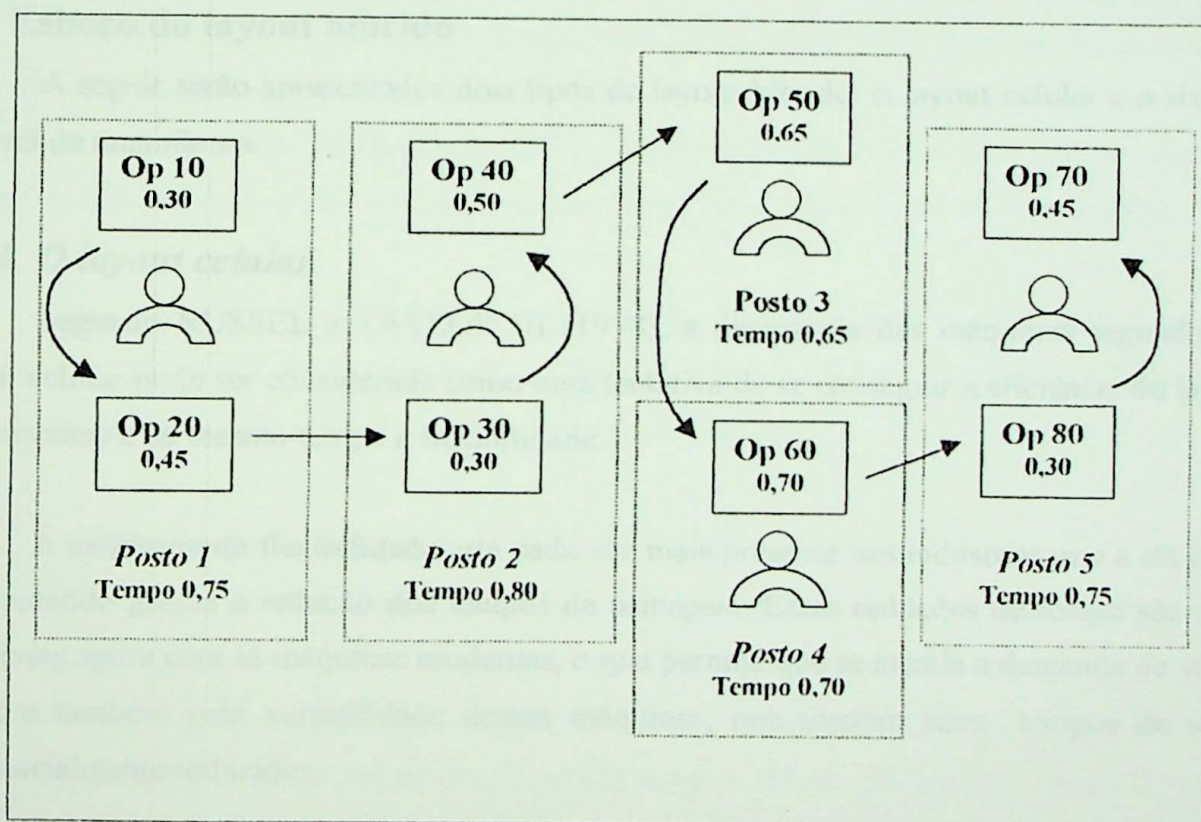
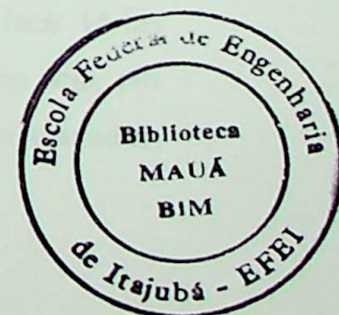


Figura 5.3: Estações de trabalho resultantes do balanceamento



A eficiência do balanceamento é dada pelo tempo gasto no layout construído, pelo número de estações de trabalho multiplicado pelo tempo por peça (5.3).

$$\text{eficiência da linha balanceada} = \frac{\text{somatório dos tempos dos postos de trabalho}}{\text{número de postos de trabalho} \times \text{tempo por peça}} \quad (5.3)$$

No caso do exemplo acima a eficiência é de 91,3%. Calculada em (5.4).

$$\text{eficiência} = \frac{0,75 + 0,80 + 0,65 + 0,70 + 0,75}{5 \times 0,80} = \frac{3,65}{4,00} = 91,3\% \quad (5.4)$$

Isto significa que a linha está perdendo 8,8% de seu tempo, ou seja o trabalho que está sendo realizado por cinco operadores, teoricamente poderia ser realizado por  $0,913 \times 5 = 4,56$  operadores.

## 5.4. Esboço do layout híbrido

A seguir serão apresentados dois tipos de layout híbrido: o layout celular e o sistema flexível de manufatura.

### 5.4.1. O layout celular

Segundo RUSSEL e TAYLOR III (1998), a disposição das máquinas segundo um layout celular pode ser considerada como uma tentativa de se conseguir a eficiência do layout por processo e ao mesmo tempo a flexibilidade.

A exigência de flexibilidade está cada vez mais presente nas indústrias que a ela estão se adaptando graças à redução dos tempos de usinagem. Essas reduções de tempo são mais plausíveis agora com as máquinas modernas, o que permite que se atenda a demanda de várias peças e também pela versatilidade dessas máquinas, que tiveram seus tempos de setup substancialmente reduzidos.

A Tecnologia de Grupo (TG) vem a ser uma concepção que estabelece várias metodologias com os objetivos tanto de agrupar as peças em famílias de peças, ou seja, em peças cuja similaridade faria com que usassem as mesmas máquinas para serem usinadas,

quanto de se agrupar essas máquinas em células, de modo a se reduzir ao máximo a movimentação. Pode-se inferir então, que no layout celular as máquinas são agrupadas de modo a atender uma determinada família de peças, e esses grupos são as células de fabricação. Segundo SHANG e TADIKAMALLA (1998), o fato das células estarem voltadas à fabricação de peças similares, redundando em menores tempos totais de set up, desta forma o processo é simplificado e os tamanhos dos lotes podem ser reduzidos, conduzindo a menor WIP e lead time.

A seguir serão apresentados, de acordo com MONTEVECHI (1996), os métodos para identificação das famílias de peças que podem ser agrupados em três grandes áreas:

- Análise visual;
- Sistemas de classificação e codificação (SCC);
- Análise de fluxo de produção (AFP).

#### ***5.4.1.1. Análise visual***

A análise visual é feita por alguém que tenha experiência com as peças a serem agrupadas, e fundamenta-se unicamente na similaridade baseada em observação visual. Esse sistema apresenta como desvantagens o fato de depender da experiência das pessoas para fazer essa classificação e também ao limite no tamanho das amostras a serem analisadas.

Apesar de ser bastante simples e econômico em sua aplicação, segundo o autor, a grande restrição ao seu uso consiste no fato de não se poder utilizar os recursos da Tecnologia de Grupo (TG), e em consequência não poder ser automatizado.

#### ***5.4.1.2. Sistemas de Classificação e Codificação***

Os sistemas de classificação e codificação, procuram traduzir a similaridade entre as peças através de um sistema de codificação numérica ou alfanumérica. As peças são então identificadas por uma série de dígitos que representam suas características, em consequência identificando a que família pertencem. Segundo o autor acima referenciado, os SCC exigem uma boa base de dados e dependendo da empresa é necessário que a mesma desenvolva seu próprio sistema ou seja adaptado algum já existente.

### 5.4.1.3. Análise do Fluxo de Produção

A Análise do Fluxo de Produção (AFP) baseia-se fundamentalmente no processo de fabricação para buscar a similaridade entre as peças. Segundo VAKHARIA e SELIM (1994), a AFP tem sido amplamente usada para identificação de família de peças simultaneamente com os grupos de máquinas a ela associado.

Conforme MONTEVECHI (1996), essa técnica proposta por Burbidge pode ser sintetizada em três fases. Na primeira fase estuda-se o fluxo de materiais entre as unidades de processamento. Na segunda fase grupa-se as peças em famílias e analisam-se as combinações de máquinas que vão processar essa família de peças, formando-se assim o grupo de máquinas que vai se constituir na célula de manufatura. Na terceira e última fase estuda-se o fluxo de produção dentro da célula de fabricação, de modo a se obter o melhor layout.

Segundo RUSSEL e TAYLOR III (1998), a AFP seria a técnica dentro da Tecnologia de Grupo que vai reordenar uma matriz contendo as peças e as máquinas que vão processá-las, de modo a identificar as famílias de peças com exigências de processo similares.

Existem vários algoritmos desenvolvidos para essa ordenação :

- Rank Order Clustering (ROC) de KING (1980);
- Bond Energy Analysis (BEA) de McCORMICK et al (1972);
- Cluster Identification Algorithm (CI) de KUSIAK e CHOW (1987).

Para melhor ilustrar esse método de Tecnologia de Grupo suponha-se um caso em que uma determinada fábrica tenha oito peças para serem usinadas em oito máquinas, e será necessário determinar qual o melhor grupamento de máquinas para realizar essa tarefa. A matriz **peça x máquina**  $[a_{ij}]$ , é aquela em que as linhas são as  $m$  máquinas e as colunas são as  $n$  peças. As entradas são os números 1 ou 0, sendo que o número 1 significa que a peça  $j$  vai ser processada pela máquina  $i$ , e o número 0 significa que essa peça não passa pela máquina em questão.

A matriz **peça x máquina** do caso em questão é a apresentada na *tabela 5.2*. Assim sendo, tomando-se como exemplo a peça 1, a matriz indica que a mesma é processada somente pelas máquinas C, E e H.

MÁQUINAS	PEÇAS							
	1	2	3	4	5	6	7	8
A	0	0	1	0	0	1	1	0
B	0	0	0	0	1	1	1	1
C	1	1	0	1	0	0	0	0
D	0	0	1	0	1	0	1	1
E	1	0	0	1	0	0	0	0
F	0	0	1	0	1	0	1	0
G	0	0	0	0	0	1	1	1
H	1	1	0	1	0	0	0	0

Tabela 5.2: Matriz peça x máquina

Se as máquinas acima forem grupadas segundo o layout por processo, considerando-se que as máquinas A, B e C são fresadoras; D, E e F são tornos e G e H são retíficas, o layout funcional ficaria com na *figura 5.4*. Nesse tipo de layout, a peça 1 teria que percorrer três oficinas funcionais, ou seja, teria que sair da seção de fresadoras para a tornearia e por último iria para a seção de retíficas. A peça 7 da mesma forma teria que percorrer as três seções, representando tempo perdido e movimentações excessivas.

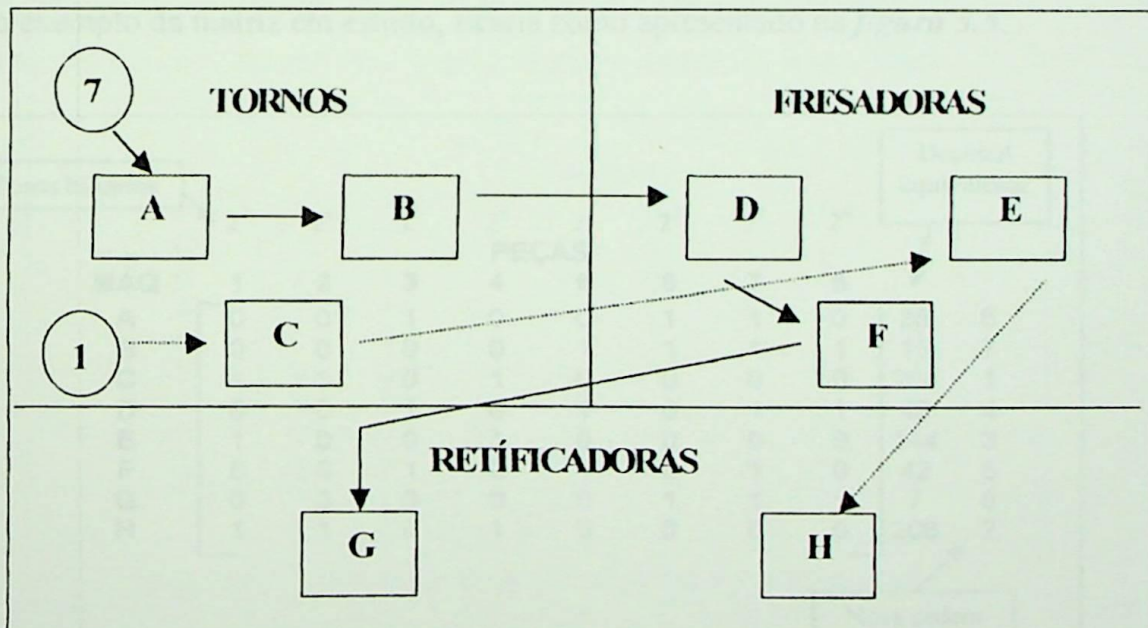


Figura 5.4: Layout baseado no processo

Um algoritmo que pode ser utilizado para se determinar o melhor agrupamento de máquinas e peças possível é o de Rank Order Clustering desenvolvido por KING (1980). Esse algoritmo é composto basicamente por quatro passos expostos no *quadro 5.1*.

<b>1º passo</b>	Para cada linha da matriz, atribuir pesos binários e calcular o decimal equivalente
<b>2º passo</b>	Reorganizar as linhas da matriz na ordem decrescente dos pesos de cada uma das linhas
<b>3º passo</b>	Repetir os dois passos anteriores para as colunas
<b>4º passo</b>	Esses passos devem ser repetidos até que não haja mais trocas de linhas ou colunas

**Quadro 5.1:** Passos do algoritmo de Rank Order Clustering

O peso de cada linha *i* e coluna *j* deve ser calculado da seguinte conforme as equações (5.5) e (5.6).

$$\text{linha } i: \sum_{k=1}^n a_{ik} 2^{n-k} \tag{5.5}$$

$$\text{linha } j: \sum_{k=1}^m a_{kj} 2^{m-k} \tag{5.6}$$

No exemplo da matriz em estudo, ficaria como apresentado na *figura 5.5*.

MÁQ	Pesos binários								Decimal equivalente	
	2 <sup>7</sup>	2 <sup>6</sup>	2 <sup>5</sup>	2 <sup>4</sup>	2 <sup>3</sup>	2 <sup>2</sup>	2 <sup>1</sup>	2 <sup>0</sup>		
	PEÇAS									
	1	2	3	4	5	6	7	8		
A	0	0	1	0	0	1	1	0	38	6
B	0	0	0	0	1	1	1	1	15	7
C	1	1	0	1	0	0	0	0	208	1
D	0	0	1	0	1	0	1	1	43	4
E	1	0	0	1	0	0	0	0	144	3
F	0	0	1	0	1	0	1	0	42	5
G	0	0	0	0	0	1	1	1	7	8
H	1	1	0	1	0	0	0	0	208	2

Nova ordem das linhas

**Figura 5.5:** Matriz peça x máquina com os pesos atribuídos.

O equivalente decimal da primeira linha foi calculado conforme (5.7).

$$\text{dec eq} = (0 \times 2^7) + (0 \times 2^6) + (1 \times 2^5) + (0 \times 2^4) + (0 \times 2^3) + (1 \times 2^2) + (1 \times 2^1) + (0 \times 2^0) = 38 \quad (5.7)$$

A matriz é então reordenada e o mesmo procedimento é deverá ser feito com relação às colunas conforme a *figura 5.6*.

MÁQ	1	2	3	4	5	6	7	8
C	1	1	0	1	0	0	0	0
H	1	1	0	1	0	0	0	0
E	1	0	0	1	0	0	0	0
D	0	0	1	0	1	0	1	1
F	0	0	1	0	1	0	1	0
A	0	0	1	0	0	1	1	0
B	0	0	0	0	1	1	1	1
G	0	0	0	0	0	1	1	1

Decimal equivalente	224	192	28	224	26	7	31	19
	1	3	5	2	6	8	4	7

*Nota: Na Figura 5.6, uma seta aponta para a primeira linha da matriz original, e outra seta aponta para a primeira linha da matriz de pesos. Um retângulo envolve a primeira coluna da matriz original, e outro retângulo envolve a primeira linha da matriz de pesos. Um retângulo também envolve a última coluna da matriz original, e uma seta aponta para a última linha da matriz de pesos.*

*Figura 5.6:* Matriz peça x máquina reordenada com atribuição de pesos para as colunas

Reordenando as colunas de acordo com a ordem decrescente dos pesos decimais correspondentes tem-se a matriz final peça x máquina apresentada na *figura 5.7*.

MAQ	1	4	2	7	3	5	8	6
C	1	1	1	0	0	0	0	0
H	1	1	1	0	0	0	0	0
E	1	1	0	0	0	0	0	0
D	0	0	0	1	1	1	1	0
F	0	0	0	1	1	1	0	0
A	0	0	0	1	1	0	0	1
B	0	0	0	1	0	1	1	1
G	0	0	0	1	0	0	1	1

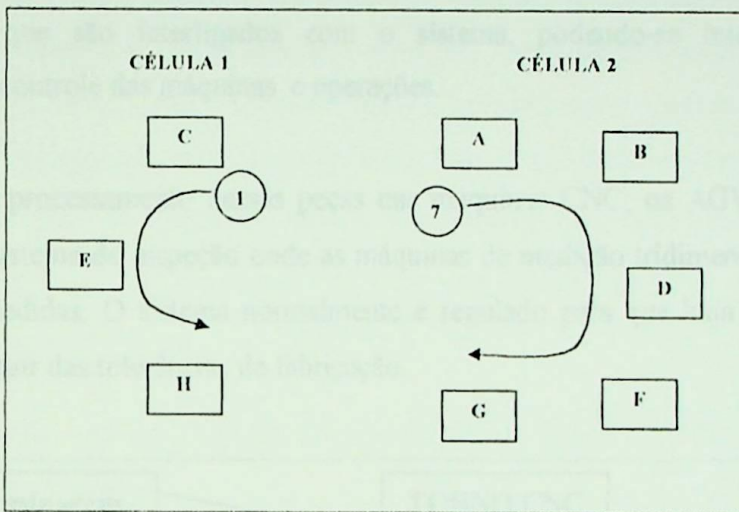
*Figura 5.7:* Matriz peça x máquina em sua forma final.

Desta forma, obteve-se duas células de fabricação ou dois grupamentos de máquinas, e duas famílias de peças, assim constituídas como mostrado na *tabela 5.3*.

Célula	Máquinas	Peças processadas
1	C,E e H	1,2 e 4
2	A,B,D,F e G	3, 5, 6, 7 e 8

**Tabela 5.3:** Constituição das células e peças a serem por elas processadas

As peças 1 e 7 a exemplo de todas as demais peças, teriam suas movimentações reduzidas, a partir do novo layout definido segundo a *figura 5.8*.



**Figura 5.8:** Novo layout celular resultante do uso da Tecnologia de Grupo

Assim como foi utilizado o algoritmo de Rank Order Clustering existem outros algoritmos que se prestam à mesma finalidade como os exemplificados no início deste item (MONTEVECHI, 1996).

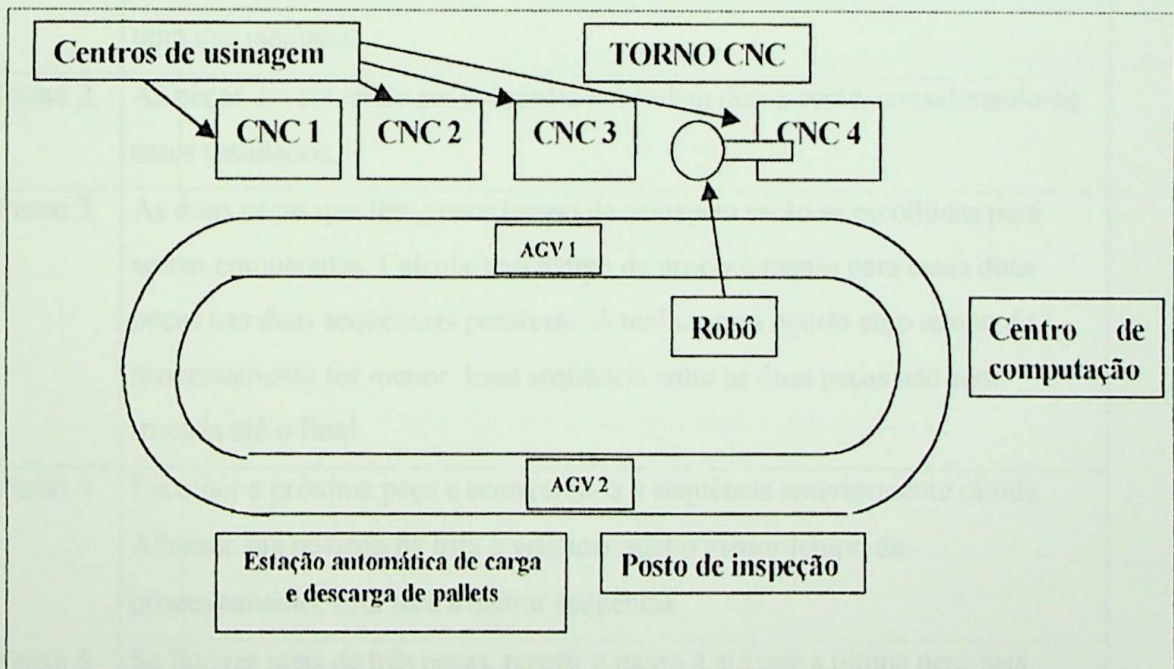
#### 5.4.2. O Sistema Flexível de Manufatura (FMS)

Os sistemas flexíveis de manufatura (FMS), são grupamentos de máquinas ou células flexíveis de manufatura (FMC) interligadas por sistemas automáticos de movimentação de materiais, tais como: AGV (automated guided vehicles), esteiras rolantes, robôs e etc. Esse sistema é controlado por computador, de modo que a intervenção humana é reduzida a um mínimo possível. Os investimentos nesse tipo de sistema são elevados, razão pela qual tem que ser bem estudado antes da implantação.

Segundo GROOVER (1994), o FMS caracteriza bem o conceito de flexibilidade na produção. Onde os objetivos primários passam a ser então a minimização dos tempos de setup e tempos de programação das máquinas. Uma vez que esses objetivos são atingidos a consequência será a redução dos tempos não produtivos, redução do lead time e dos trabalhos em processo.

A *figura 5.9* mostra um exemplo de um sistema flexível de manufatura, sendo constituído de dois AGV's que coletam os pallets já com as peças a serem usinadas neles fixadas, transportam esses pallets para os centros de usinagem 1 e 2 ou/e para os centros de usinagem 3 e 4, onde há um robô destinado a colocar as peças que necessitam torneamento no torno CNC. O sistema é controlado de um centro de controle elevado onde estão os computadores que são interligados com o sistema, podendo-se interferir na própria programação e controle das máquinas e operações.

Após o processamento dessas peças nas máquinas CNC, os AGV's transportam os pallets para o sistema de inspeção onde as máquinas de medição tridimensionais vão fazer o controle das medidas. O sistema normalmente é regulado para que haja parada automática quando a peça sair das tolerâncias de fabricação.



*Figura 5.9:* Exemplo de sistema flexível de manufatura

## 5.5. Definindo o melhor seqüenciamento

Um dos possíveis problemas que o modelador e usuário poderão se defrontar no estudo de simulação, é o de qual a melhor seqüência com que as peças deverão entrar em produção, considerando-se que o tempo total de processamento seja o mínimo possível.

Existem várias abordagens heurísticas que ajudam nessa tomada de decisão, segundo MOCCELLIN e NAGANO apud PINHO (1999), um dos melhores é o algoritmo heurístico proposto por NAWAZ, ENSCORE e HAM (1983), que foi intitulado NEH (inicial dos autores).

O algoritmo NEH, segundo seus autores, é baseado no fato de que aquela peça que necessita menor tempo de processamento total em todas as máquinas, será a que terá prioridade no seqüenciamento. Os passos desse algoritmo estão descritos no *quadro 5.2*, considerando-se  $n$  peças que serão usinadas em  $m$  máquinas. O número total de iterações que serão necessárias para se chegar ao melhor seqüenciamento é dado por (5.7), sendo  $n$  o número de peças.

$$\frac{n(n+1)}{2} - 1 \quad (5.7)$$

Passo 1	Para cada uma das peças calcular a soma dos tempos de usinagem em cada uma das máquinas.
Passo 2	As peças devem então ser colocadas em ordem decrescente, considerando-se esses resultados.
Passo 3	As duas peças que têm maior tempo de usinagem serão as escolhidas para serem comparadas. Calcula-se o tempo de processamento para essas duas peças nas duas seqüências possíveis. A melhor será aquela cujo tempo de processamento for menor. Essa seqüência entre as duas peças não será trocada até o final.
Passo 4	Escolher a próxima peça e acrescentá-la à seqüência anteriormente obtida. Alternar sua posição na lista e verificar qual o menor tempo de processamento, essa será a menor seqüência.
Passo 5	Se houver mais de três peças, repetir o passo 4 até que a última peça seja seqüenciada.

*Quadro 5.2:* Passos do algoritmo NEH

Como exemplo de aplicação do algoritmo NEH, suponha-se que três peças vão ser usinadas em quatro máquinas, desejando-se saber qual a melhor seqüência para a entrada dessas peças em produção. Os tempos de usinagem são aqueles descritos na *tabela 5.4*.

		Máquinas			
		A	B	C	D
Peças	1	8	5	9	3
	2	4	3	10	4
	3	7	4	5	8

**Tabela 5.4:** Tempos de usinagem para as peças 1, 2 e 3, nas máquinas A, B, C e D.

O primeiro passo do algoritmo é somar os tempos de usinagem de cada peça:

$$T_1 = 8 + 5 + 9 + 3 = 25$$

$$T_2 = 4 + 3 + 10 + 4 = 21$$

$$T_3 = 7 + 4 + 5 + 8 = 24$$

No segundo passo ordena-se em ordem decrescente desses tempos. Tem-se então que a ordem é dada pelas peças 1, 3 e 2.

No terceiro passo testa-se as duas primeiras peças, verificando-se qual a seqüência dá o menor tempo de processamento. As *tabelas 5.5 e 5.6* mostram o tempo de processamento para a seqüência 1-3 e 3-1, respectivamente.

Peças		Máquinas			
		A	B	C	D
1	3	8/8	5/13	9/22	3/25
3	1	7/15	4/19	5/27	8/35

**Tabela 5.5:** Tempo de processamento para a seqüência 1-3

Peças		Máquinas			
		A	B	C	D
3	1	7/7	4/11	5/16	8/24
1	3	8/15	5/20	9/29	3/32

**Tabela 5.6:** Tempo de processamento para a seqüência 3-1

A seqüência 3-1 é aquela que dá o menor tempo de processamento, portanto essa posição relativa é escolhida e permanece imutável.

O próximo passo será testar a inserção da peça número 2 em todas as posições possíveis da *tabela 5.6*, como demonstrado a seguir.

Peças	Máquinas			
	A	B	C	D
3	7/7	4/11	5/16	8/24
1	8/15	5/20	9/29	3/32
2	4/19	3/23	10/39	4/43

**Tabela 5.7:** Tempo de processamento para a seqüência 3-1-2

Peças	Máquinas			
	A	B	C	D
3	7/7	4/11	5/16	8/24
2	4/11	3/14	10/26	4/30
1	8/19	5/24	9/35	3/38

**Tabela 5.8:** Tempo de processamento para a seqüência 3-2-1

Peças	Máquinas			
	A	B	C	D
2	4/4	3/7	10/17	4/21
3	7/11	4/15	5/22	8/30
1	8/19	5/24	9/33	3/36

**Tabela 5.9:** Tempo de processamento para a seqüência 2-3-1

Em conseqüência do demonstrado nas *tabelas 5.7, 5.8 e 5.9*, o menor tempo de processamento é o proporcionado pela seqüência 2-3-1, dando como resultado um tempo total de 36, desta forma este será o melhor seqüenciamento. Essa definição foi dada em 5 iterações, a partir da equação (5.7), considerando-se  $n = 3$ .

## 5.6. Considerações finais

Como se pôde verificar no decorrer do capítulo, existem diversos tipos de layout, sendo que no layout por produto é importante se iniciar o trabalho de modelagem com uma

idéia inicial do número de postos de trabalho que serão necessários através do balanceamento. Nos layout celular existem algumas metodologias que vão dar uma idéia inicial de qual vai ser o grupamento ideal de máquinas. Essa fase, se bem executada, vai poupar tempo na modelagem do sistema, em conseqüência gerando rapidamente os resultados finais.

Uma vez que já se tem o esboço do layout que vai ser adotado, e em conseqüência já se tem o seqüenciamento das máquinas, as operações e os postos de trabalho, fica bem mais nítido para o modelador e usuário a maneira como vão ser coletados os dados e quais dados devem ser coletados, que é a próxima etapa do projeto de simulação.

## 6. COLETA DE DADOS

### 6.1. Considerações iniciais

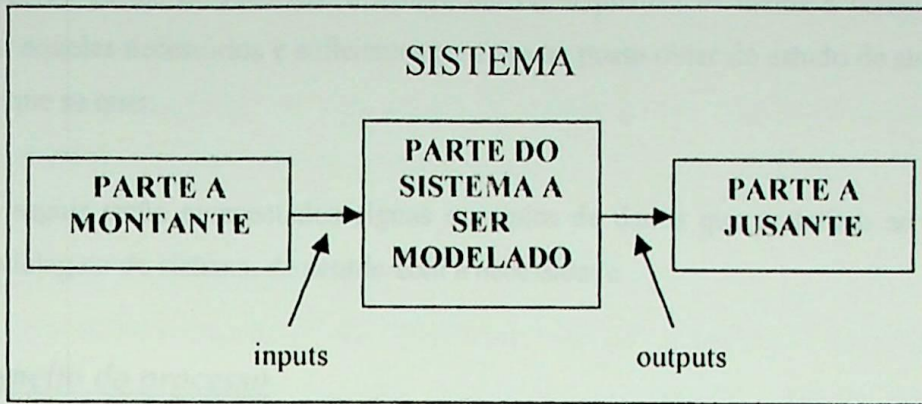
Os dados a serem coletados sobre o sistema a ser modelado devem ser compatíveis com esse sistema, de modo a não se perder em nenhuma etapa do trabalho o foco sobre o objetivo do estudo de simulação, e portanto, das respostas que se quer da simulação. Segundo NEWMAN et al. (1998), os dados a serem coletados têm que estar corretamente ajustados ao nível de detalhamento que se quer do modelo.

A coleta insuficiente de dados pode comprometer a qualidade das respostas, por outro lado a coleta de dados que não interessam ao problema em estudo pode encarecer a simulação, pois a coleta de dados é dispendiosa, além de ocasionar perda de tempo para se atingir os objetivos finais. Assim sendo, a coleta de dados deve estar de acordo com as respostas que se quer obter, se por exemplo não se deseja analisar custos, torna-se desnecessário coletar e introduzir os dados relativos a custo na modelagem. Essa medida também vai facilitar a programação, pois não vai haver necessidade de criação e introdução de mais variáveis no programa, variáveis estas relativas a custo, com isto economizando-se também tempo de modelagem.

É importante também que a coleta de dados esteja relacionada somente com aquele determinado segmento do sistema que está sendo objeto de estudo. Mesmo que o processo produtivo seja composto por várias células de fabricação, o objetivo pode ser o de se estudar somente uma delas, ou mesmo, pode-se ter várias seções num layout funcional, mas o objetivo pode ser o de se estudar apenas uma delas. Dessa forma somente os dados relativos a essa parte do sistema a ser modelado devem ser coletados, e os dados das partes do sistema que antecedem ou sucedem o trecho objeto de estudo vão entrar como *input* ou *output* na modelagem (*figura 6.1*).

Neste caso os dados que vão interessar da parte anterior do sistema seriam por exemplo a freqüência de entrada de peças, a quantidade de peças que entram por vez, o

momento da primeira entrada, o número de ocorrências num determinado período de tempo ou mesmo a lógica a ser adotada na entrada de peças.



*Figura 6.1:* Divisão do sistema

A coleta de dados deve ser compatível com o nível de detalhamento do modelo. Ao se organizar a coleta de dados, não se pode perder de vista o nível de detalhamento que se quer do modelo. Seria uma perda de tempo, por exemplo, tomar-se o tempo de todas as operações, de uma linha de produção, quando o que se deseja estudar é somente uma das células. Os tempos de parada de máquina para efeito de manutenção, poderiam ser desprezados quando se constatar que as máquinas sofrem uma manutenção preventiva eficiente quando não utilizadas, e que realmente o que se observa é que as máquinas raramente param por esse motivo.

## 6.2. Coleta dos dados

Deve-se estabelecer uma metodologia para a coleta de dados, e se os dados forem coletados por terceiros, deve haver uma conscientização da importância de que esses dados têm que ser confiáveis e espelhar a realidade, sendo aconselhável que haja um acompanhamento ou fiscalização dessa coleta. A consistência dos dados coletados com os dados que realmente representam o sistema a ser modelado é a base para o estudo da simulação dentro da filosofia básica de que: “se entra lixo, sai lixo”.

A seguir serão relacionados, alguns dados que poderiam ser coletados para um estudo de simulação para produção em lotes. É importante salientar que a coleta de dados é uma

atividade que envolve a utilização de tempo e pessoal para coleta, dentro do conceito de que não podem ser coletados sem uma metodologia consistente. Isto vai significar que a coleta de dados envolve gastos de recursos, e tempo, em consequência os dados a serem coletados devem ser aqueles necessários e suficientes para que se possa obter do estudo de simulação as respostas que se quer.

A seguir serão apresentados alguns exemplos de dados que poderiam ser coletados para a modelagem do sistema, de acordo com a necessidade.

#### **a) A respeito do processo**

- rotas pelas quais cada uma das peças vão passar;
- regras de roteamento. Por exemplo, entre duas máquinas desocupadas qual deve ser a escolhida para realizar a operação: a disponível a mais tempo; a primeira a desocupar, se tiverem capacidade para processamento de mais de uma peça por vez, a que tiver menor ou maior capacidade disponível e etc;
- qual o tempo em que a operação está sendo realizada;
- qual o sistema de movimentação da peça (AGV, robôs, calhas, esteiras, operador e etc);
- tempo de colocação das peças nos paletes.

#### **b) A respeito dos operadores**

- quais os tempos de parada, motivo e a frequência de paradas;
- número de operadores;
- tempo de movimentação dos operadores nos postos de trabalho;
- distâncias percorridas (será uma consequência do layout).

#### **c) A respeito dos equipamentos**

- qual o tempo de parada das máquinas devido a quebra, limpeza, retirada de cavacos, etc, bem como a frequência;
- existem paradas programadas para manutenção? Caso positivo as paradas são programadas pelo número de peças processadas ou pelo número de horas de funcionamento da máquina;
- em caso de quebras simultâneas, qual máquina deve ser consertada primeiro;

- se está sendo consertada pelo operador ou pelo mecânico, pois no caso de ser pelo operador vai inferir em parada do operador;
- capacidade em peças tanto dos equipamentos diversos como fornos de tratamento térmico, rebarbadoras, banhos, etc e também das máquinas de usinagem;
- se as máquinas usam ou não sistema de paletes e caso positivo qual a capacidade desses paletes, bem como os tempos de troca.

#### ***d) Outras informações importantes***

- tempos de parada para troca de ferramentas, quebra de dispositivos, quebra ou falta de instrumentos de medição (calibres, paquímetros, micrômetros, medidor de perfil, etc), ajuste do processo;
- tempos de setup para cada um dos equipamentos, relacionando-os a cada uma das peças que vão ser processadas naquele equipamento;
- qual a frequência com que as peças entram em fabricação, bem como o número de ocorrências. O momento em que ocorre a primeira delas e a quantidade por vez;
- com quantos turnos de produção a fábrica trabalha, qual a duração desses turnos e quais os equipamentos e quais operadores que trabalham em cada turno.

Quanto às tabelas que vão ser utilizadas para as coletas desses dados no ambiente fabril, o importante é que sejam construídas de modo a registrar todas as informações necessárias para a base de dados que se quer. Por exemplo, se a tabela é destinada a coleta de dados para quebra de máquina, parada de operador, troca de ferramenta é interessante que registre a hora de parada e a hora de reinício daquele determinado evento, isto porque nesses casos a exemplo de outros semelhantes é necessário saber não somente quais os tempos de parada, mas também os intervalos com que estas paradas estão ocorrendo, para posteriormente ao se analisar esses dados, se levantar qual a distribuição de probabilidades mais apropriada para representar esses intervalos ou frequências de paradas. Já para os tempos de operação, talvez não haja necessidade dessa informação, mas tão somente da cronometragem desses tempos.

Em certas circunstâncias, a fim simplificar o trabalho de modelagem e coleta de dados, é interessante se agrupar tempos. Por exemplo o tempo de ocupação do operador poderá ser aquele que o operador necessita para retirar a peça pronta do dispositivo de fabricação, pegar a peça a ser usinada, colocá-la no dispositivo, ligar a máquina, calibrar a peça já usinada. Ao

invés de se cronometrar cada um desses tempos, pode-se grupá-los num só tempo, ou seja, o tempo total de ocupação do operador com aquela determinada operação. Qualquer ganho que se conseguir numa dessas parcelas poderá ser então abatido desse tempo total.

Em alguns casos o sistema a ser implementado ainda não existe, o que se deseja então é saber quais os equipamentos a serem adquiridos, qual o espaço físico requerido, o número de operadores a serem contratados, etc. Nestes casos os dados para a modelagem do sistema podem que ser obtidos através de estimativas baseadas em:

- especificações dos equipamentos fornecidas pelos fabricantes, bem como assessoria destes;
- consulta a pessoal especializado com experiência na área;
- consulta àqueles que já tenham um sistema de fabricação em lotes semelhante ao que se deseja implantar, ou pelo menos parte deste já em funcionamento;
- utilização de softwares como o CAM (computer-aided manufacture) para determinação dos tempos de usinagem;
- etc.

### **6.3. Análise dos dados**

Os dados devem ser coletados de uma forma sistematizada, de modo que ao serem utilizados na modelagem do sistema gerem resultados confiáveis, dentro da filosofia de que se o modelo for alimentado com informações erradas o que se terá como output é uma resposta inadequada.

Normalmente esses dados têm que ser inseridos no programa segundo uma distribuição de probabilidades. Os itens a seguir fornecem informações a respeito de algumas distribuições de probabilidade.

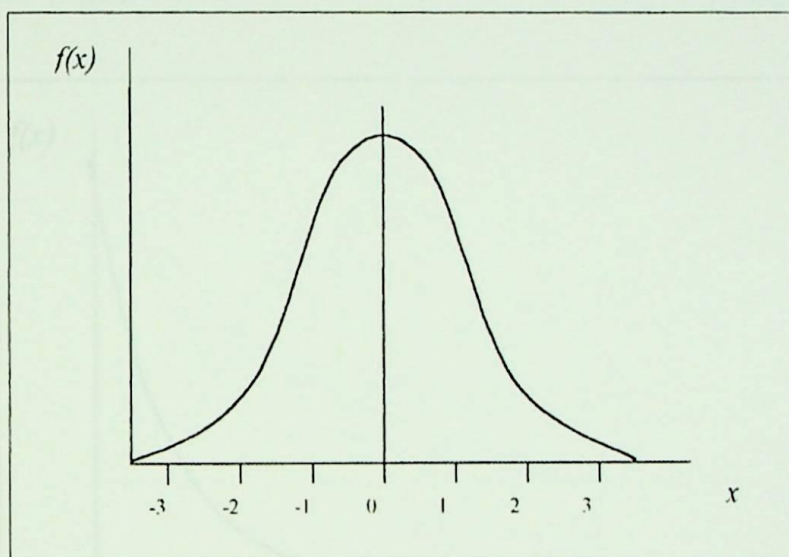
#### **6.3.1. Distribuição Normal**

É uma distribuição contínua de probabilidades com ampla utilização na estatística, pois um grande número de variáveis aleatórias podem ser representadas por essa distribuição, daí a razão de sua grande importância. Também é conhecida como distribuição de Gauss e tem a forma de um sino. No entanto, exatamente pelo fato de ser amplamente aplicada, pode

haver a tendência de usá-la indevidamente, quando os dados são mais apropriadamente representados por outras curvas de distribuição.

As medidas feitas por um instrumento qualquer, geralmente podem ser assumidas como sendo normalmente distribuídas, pois fisicamente não podem ser negativas (BOWKER e LIEBERMAN, 1972). Um exemplo na área de manufatura poderia ser o das medidas coletadas nas inspeções de medição feitas na peça após uma determinada operação, como as feitas por relógios comparadores, paquímetros, micrômetros, etc.

Sua forma está representada na *figura 6.2*. Sua função densidade de probabilidade é dada pela equação (6.1), a média por (6.2) e o desvio padrão por (6.3).



*Figura 6.2:* Forma da curva de distribuição normal

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-(x-\mu)^2/2\sigma^2} \quad \text{para todos os números reais } x \quad (6.1)$$

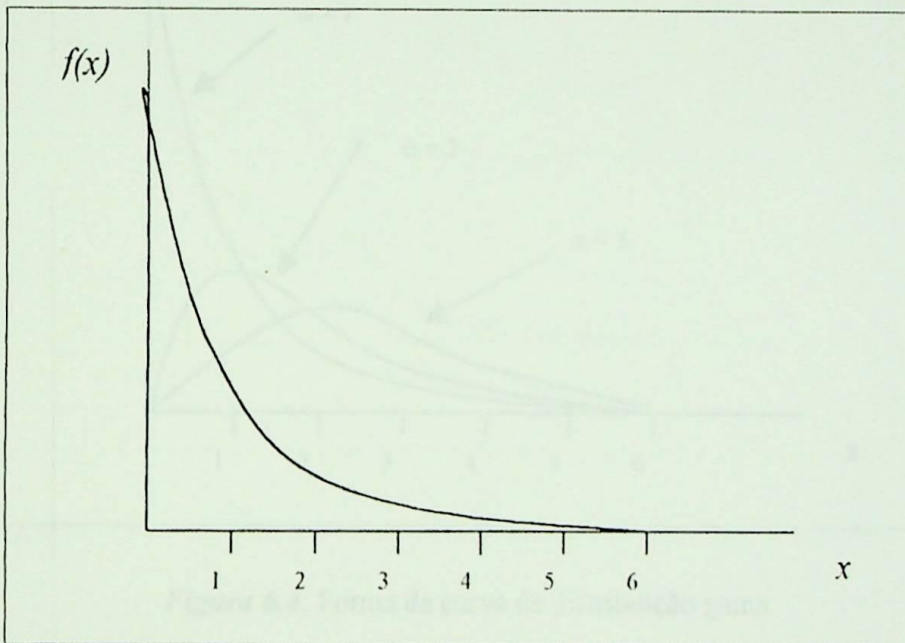
$$\mu = \bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (6.2)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (6.3)$$

### 6.3.2. Distribuição Exponencial

É uma distribuição contínua de probabilidades pode ser usada em sistemas onde ocorrem filas, para representar o tempo entre ocorrências aleatórias, como por exemplo no caso dos tempos entre chegadas em um local num modelo onde ocorrem filas ou tempo para completar uma tarefa (HARREL et al, 1996). Na área de manufatura poderia ser exemplificado com o intervalo de tempo entre chegada das peças em uma determinada máquina, ou mesmo o tempo para se completar uma operação.

A forma da curva de distribuição exponencial está representada na *figura 6.3*, e corresponde a um caso particular da distribuição de Weibull para  $\alpha = 1$ . Sua função densidade de probabilidade é dada pela equação (6.4), seus parâmetros por (6.5) e sua função de distribuição acumulada por (6.6).



*Figura 6.3:* Curva de distribuição exponencial

$$f(x) = \frac{1}{\beta} e^{-x/\beta} \quad \text{para } x \geq 0; \quad 0 \text{ para os demais valores} \quad (6.4)$$

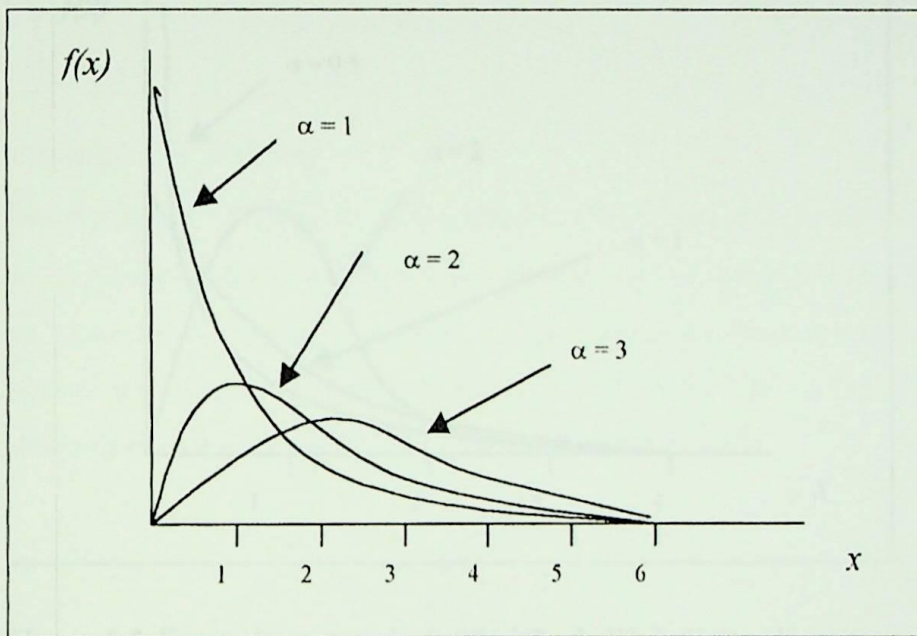
$$\text{desvio padrão} = \text{média} = \beta \quad (6.5)$$

$$F(x) = 1 - e^{-x/\beta} \quad (6.6)$$

### 6.3.3. Distribuição Gama

É uma distribuição contínua de probabilidade e pode ser usada para representar o tempo para se completar uma tarefa, como tempos de serviço ou tempo para se reparar uma máquina (LAW e KELTON, 1982). Na área de manufatura poderia ser o tempo necessário para se realizar a manutenção de uma máquina corretiva ou preventivamente, o tempo de troca de um dispositivo ou o tempo de troca de ferramentas.

A forma da curva de distribuição gama está representada na *figura 6.4*. Sua função densidade de probabilidade é dada pela equação (6.7), seus parâmetros por (6.8) e (6.9) e sua função de distribuição acumulada por (6.10).



*Figura 6.4:* Forma da curva de distribuição gama

$$f(x) = \frac{x^{\alpha-1}}{\beta^{\alpha}\Gamma(\alpha)} e^{-x/\beta} \quad \text{para } x \geq 0; \quad 0 \text{ para os demais valores} \quad (6.7)$$

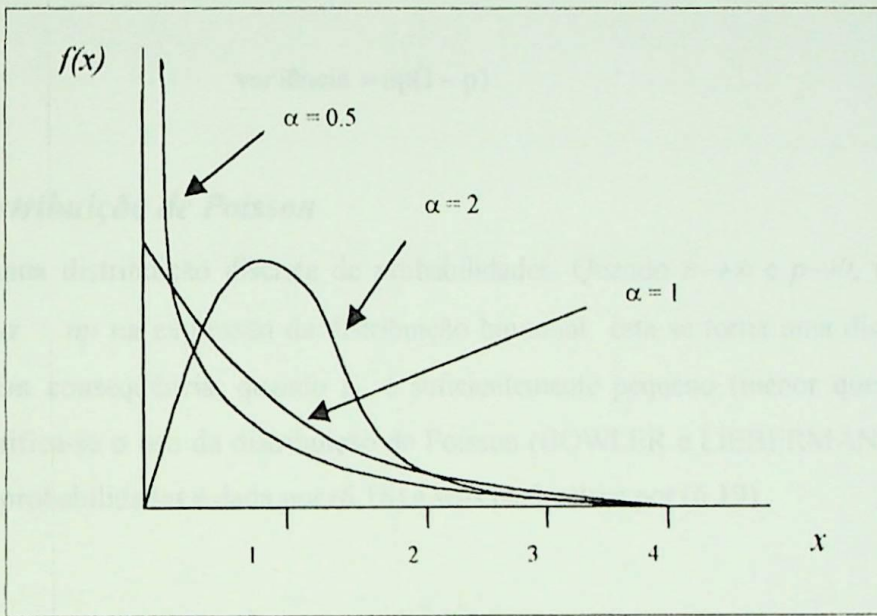
$$\text{média} = \alpha\beta \quad (6.8)$$

$$\text{variância} = \alpha\beta^2 \quad (6.9)$$

$$F(x) = 1 - \sum_{j=0}^{k-1} e^{-\lambda x} \frac{(\lambda x)^j}{j!} \quad (6.10)$$

### 6.3.4. Distribuição de Weibull

É uma distribuição contínua de probabilidade que pode ser usada para se estimar tempo de falha de uma peça de equipamento ou o tempo para completar uma tarefa (HARREL et al, 1996). Na área de produção poderia ser o tempo vida de uma ferramenta, o tempo de operação em manutenção preventiva (TMEF). A forma da curva de distribuição de Weibull está representada na *figura 6.5*. Sua função densidade de probabilidade é dada pela equação (6.10), seus parâmetros por (6.11) e (6.12) e sua função de distribuição acumulada por (6.13).



*Figura 6.5:* Forma das curvas de distribuição de Weibull para diversos  $\alpha$

$$f(x) = \frac{\alpha}{\beta^\alpha} x^{\alpha-1} e^{-(x/\beta)^\alpha} \quad \text{para } x \geq 0; \quad 0 \text{ para os demais valores} \quad (6.10)$$

$$\text{média} = \frac{\beta}{\alpha} \Gamma\left(\frac{1}{\alpha}\right) \quad (6.11)$$

$$\text{var iância} = \frac{\beta^2}{\alpha} \left\{ 2\Gamma\left(\frac{2}{\alpha}\right) - \frac{1}{\alpha} \left[ \Gamma\left(\frac{1}{\alpha}\right) \right]^2 \right\} \quad (6.12)$$

$$F(x) = 1 - e^{-(x/\beta)^\alpha} \quad \text{para } x \geq 0; \quad 0 \text{ para os demais valores} \quad (6.13)$$

### 6.3.5. Distribuição Binomial

É uma distribuição discreta de probabilidades que descreve a probabilidade de sucesso  $p$ , em  $n$  tentativas independentes. Pode ser utilizada para ser determinar a probabilidade de se encontrar um determinado número de peças defeituosas em um lote de produção de tamanho  $n$ , sabendo-se a probabilidade de ocorrência de defeitos  $p$ . Sua função de probabilidades é dada por (6.14) e seus parâmetros por (6.15) e (6.16).

$$P(X = k) = \binom{n}{k} p^k (1-p)^{n-k} = \frac{n!}{k!(n-k)!} p^k (1-p)^{n-k} \quad (6.14)$$

$$\text{média} = np \quad (6.15)$$

$$\text{var iância} = np(1-p) \quad (6.16)$$

### 6.3.6. Distribuição de Poisson

É uma distribuição discreta de probabilidades. Quando  $n \rightarrow \infty$  e  $p \rightarrow 0$ , mantendo-se constante  $\alpha = np$  na expressão da distribuição binomial esta se torna uma distribuição de Poisson. Em consequência, quando  $p$  é suficientemente pequeno (menor que 0.1), e  $n$  é grande justifica-se o uso da distribuição de Poisson (BOWLER e LIEBERMAN, 1972). Sua função de probabilidades é dada por (6.18) e seus parâmetros por (6.19).

$$P(X = k) = \frac{e^{-\alpha} \alpha^k}{k!} \quad X=0,1,2,\dots \quad (6.18)$$

$$\text{média} = \text{var iância} = \alpha \quad (6.19)$$

### 6.3.7. Apresentação dos dados e prova de aderência

Os dados coletados devem então ser dispostos na forma de uma tabela denominada distribuição de freqüências ou tabela de freqüências. Nessa tabela constam os intervalos de classes em que os dados foram subdivididos, geralmente entre 5 e 20 intervalos, e as freqüências com que os dados apareceram dentro de cada um dos intervalos.

Suponha-se que os dados referentes aos tempos de troca de ferramentas de uma determinada máquina, tenham sido coletados conforme a *tabela 6.1*. As freqüências referentes a esses dados são apresentadas da *tabela 6.2*.

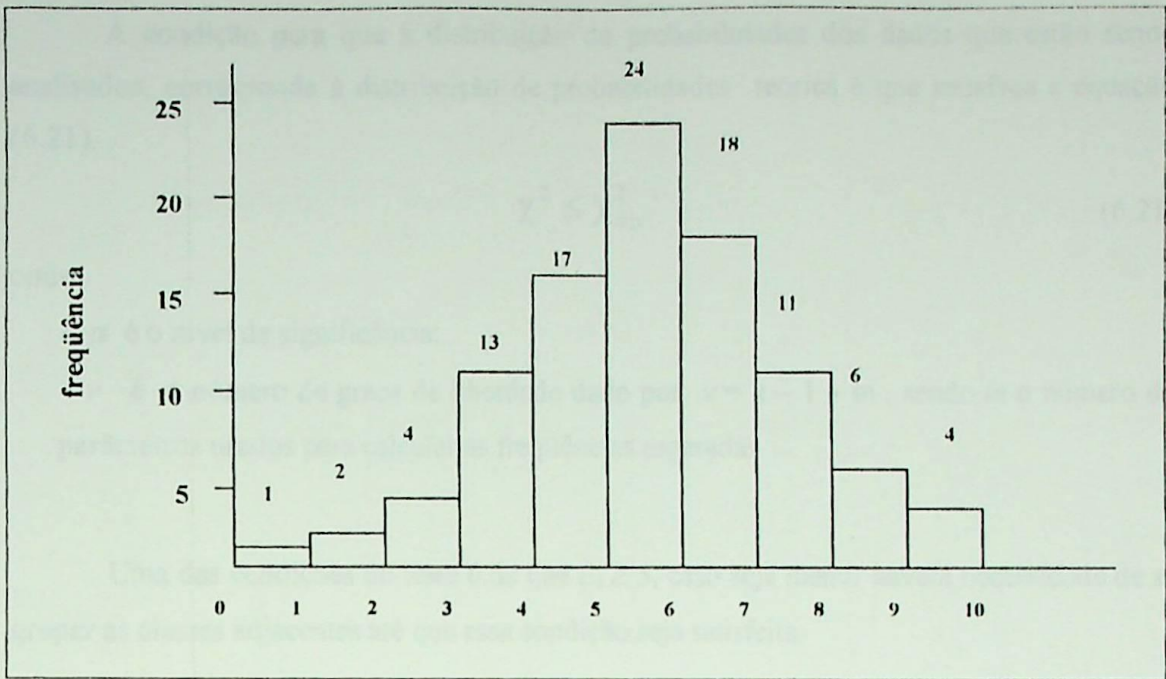
Tempos de troca de ferramenta em minutos									
6,7	1,5	5,8	6,1	7,6	7,9	7,2	5,2	4,7	4,8
5,9	7,8	5,5	4,0	8,5	5,6	4,6	6,5	4,8	3,1
5,4	5,4	4,6	2,8	6,7	2,8	6,0	4,5	6,0	5,7
3,5	3,2	9,0	2,1	8,0	9,4	1,6	4,3	5,7	0,8
6,9	4,1	3,8	2,6	4,6	7,1	5,0	7,3	7,1	4,2
6,8	6,2	9,5	5,3	3,1	4,2	4,1	5,3	5,0	5,6
3,8	3,0	6,7	9,8	5,4	3,0	3,7	3,6	5,2	5,4
6,2	5,9	8,1	7,5	4,4	6,5	5,4	6,4	5,1	5,9
6,8	6,5	8,1	7,7	5,2	7,0	3,7	6,3	5,2	3,1
6,9	8,1	5,2	4,2	6,0	4,2	7,3	8,4	3,1	4,1

*Tabela 6.1:* Dados correspondentes a tempos de troca de ferramentas

Intervalo de classes	freqüências
0,0 – 0,9	1
1,0 – 1,9	2
2,0 – 2,9	4
3,0 – 3,9	13
4,0 – 4,9	17
5,0 – 5,9	24
6,0 – 6,9	18
7,0 – 7,9	11
8,0 – 8,9	6
9,0 – 9,9	4
total	100

*Tabela 6.2:* Distribuição de freqüências referentes aos dados da tabela 6.1

Através da tabela de freqüências pode-se construir o histograma relativo a esses dados (*figura 6.6*). O histograma é de fácil construção e pode ser de grande utilidade. Sua forma é comparada com uma das curvas de distribuição de probabilidade, desta forma, aquela curva que mais se aproximar da forma do histograma, vai indicar que aquela distribuição de probabilidades que é por ela representada, será uma candidata a representar o conjunto de dados.



**Figura 6.6:** Histograma

Numa avaliação visual uma das distribuições de probabilidade que poderia ser considerada, seria a normal, tendo em vista a forma aproximada do histograma aproximar-se da forma da curva de distribuição normal.

A condição essencial é a de que esse modelo de distribuição de probabilidades tem que representar, ou descrever, os dados coletados. Um dos testes para verificação se uma determinada distribuição teórica pode ser usada para representar os dados de uma determinada distribuição empírica obtida dos dados coletados, ou seja, para realizar a *prova de aderência*, é o **teste do qui-quadrado**, que será realizado a seguir.

O qui-quadrado é dado pela equação (6.20).

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i} \quad (6.20)$$

onde:

- $O_i$  é a frequência observada para os dados de uma determinada classe;
- $E_i$  é a frequência esperada para os dados de uma determinada classe;
- $k$  = número de classes.

A condição para que a distribuição de probabilidades dos dados que estão sendo analisados, corresponda à distribuição de probabilidades teórica é que satisfaça a equação (6.21).

$$\chi^2 \leq \chi_{\alpha;v}^2 \quad (6.21)$$

onde:

- $\alpha$  é o nível de significância;
- $\nu$  é o número de graus de liberdade dado por:  $\nu = k - 1 - m$ , sendo  $m$  o número de parâmetros usados para calcular as frequências esperadas.

Uma das condições do teste é de que  $E_i \geq 5$ , caso seja menor haverá necessidade de se agrupar as classes adjacentes até que essa condição seja satisfeita.

No exemplo que está sendo estudado, será feito o teste do qui-quadrado para verificação se a distribuição dos dados coletados sobre os tempos de parada de máquina para fins de troca de ferramenta realmente correspondem à curva de distribuição normal de probabilidades como se supôs pela semelhança da curva com o histograma. O primeiro passo será o cálculo da média (*tabela 6.3*) para os dados agrupados, resultando 5,56 min (6.22).

tempo (min)	Frequência (f)	ponto médio (X)	fX
0,0 – 0,9	1	0,45	0,45
1,0 – 1,9	2	1,45	2,90
2,0 – 2,9	4	2,45	9,80
3,0 – 3,9	13	3,45	44,85
4,0 – 4,9	17	4,45	75,65
5,0 – 5,9	24	5,45	130,80
6,0 – 6,9	18	6,45	116,10
7,0 – 7,9	11	7,45	81,95
8,0 – 8,9	6	8,45	50,70
9,0 – 9,9	4	9,45	37,80
	100		551

*Tabela 6.3:* Cálculo da média  $\bar{X}$

$$\bar{X} = \frac{\sum fX}{n} = \frac{551}{100} = 5,51 \quad (6.22)$$

Tendo-se a média (6.23), calcula-se o desvio padrão (*tabela 6.4*) para os dados agrupados, resultando em 1,85 min (6.23).

tempo (min)	Frequência (f)	Ponto médio (X)	$X - \bar{X}$	$(X - \bar{X})^2$	$f(X - \bar{X})^2$
0,0 – 0,9	1	0,45	-5,06	25,60	25,60
1,0 – 1,9	2	1,45	-4,06	16,48	32,97
2,0 – 2,9	4	2,45	-3,06	9,36	37,45
3,0 – 3,9	13	3,45	-2,06	4,24	55,17
4,0 – 4,9	17	4,45	-1,06	1,12	19,10
5,0 – 5,9	24	5,45	-0,06	0,00	0,09
6,0 – 6,9	18	6,45	0,94	0,88	15,90
7,0 – 7,9	11	7,45	1,94	3,76	41,40
8,0 – 8,9	6	8,45	2,94	8,64	51,86
9,0 – 9,9	4	9,45	3,94	15,52	62,09
	100				341,64

Tabela 6.4: Cálculo do desvio padrão  $\sigma$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum f(X - \bar{X})^2}{n}} = \sqrt{\frac{341,64}{100}} = 1,85 \tag{6.23}$$

Tendo-se a média e desvio padrão, calcula-se a probabilidade  $p_i$  de uma variável aleatória cair na classe considerada, como se tem  $n = 100$  observações, as frequências esperadas para cada classe, dada por (6.24) como mostra a *tabela 6.5*.

$$E_i = np_i = 100p_i \tag{6.24}$$

classes	limites de classe	área correspondente à classe sob a curva normal ( $p_i$ )	frequência esperada $E_i = np_i$
0,0 – 0,9	0,95	0,005404	0,54
1,0 – 1,9	1,95	0,020304	2,03
2,0 – 2,9	2,95	0,056055	5,61
3,0 – 3,9	3,95	0,116334	11,63
4,0 – 4,9	4,95	0,181512	18,15
5,0 – 5,9	5,95	0,212938	21,29
6,0 – 6,9	6,95	0,187831	18,78
7,0 – 7,9	7,95	0,124575	12,46
8,0 – 8,9	8,95	0,062117	6,21
9,0 – 9,9	9,95	0,023283	2,33

Tabela 6.5: Cálculo das frequências esperadas ( $E_i$ )

Como a condição  $E_i \geq 5$  não está sendo satisfeita pelas classes de 0-1 e 1-2, as mesmas devem ser combinadas com a classe 2-3. Da mesma forma a classe 9-10 deve ser combinada à classe 8-9. A nova distribuição de frequências, com essas classes combinadas, fica sendo aquela da *tabela 6.6*, onde o valor do qui-quadrado é calculado através da expressão (6.20).

classes	freqüência esperada $E_i = np_i$	freqüência observada $O_i$	$O_i - E_i$	$(O_i - E_i)^2$	$\frac{(O_i - E_i)^2}{E_i}$
<3	8,18	7	-1,18	1,3838	0,17
3,0 – 3,9	11,63	13	1,37	1,8677	0,16
4,0 – 4,9	18,15	17	-1,15	1,3253	0,07
5,0 – 5,9	21,29	24	2,71	7,3234	0,34
6,0 – 6,9	18,78	18	-0,78	0,6132	0,03
7,0 – 7,9	12,46	11	-1,46	2,1242	0,17
>8	8,54	10	1,46	2,1314	0,25
Valor do qui-quadrado ( $\chi^2$ ):					1,20

**Tabela 6.6:** Nova distribuição de frequências e cálculo do valor do qui-quadrado

Utilizando-se o  $\alpha = 5\%$  de erro Tipo 1 (risco de 5% de se rejeitar a hipótese da curva ser normal, quando a hipótese é de fato verdadeira), e considerando-se que o número de graus de liberdade  $\nu = k - 1 - m = 7 - 1 - 2 = 4$ , pois no caso em estudo tem-se sete classes e o número de parâmetros estimados para o cálculo da frequência foi de 2 (desvio padrão e média).

Consultado-se a tabela para os valores da distribuição  $\chi^2$  tem-se que o valor do qui-quadrado para erro de 5% e 4 graus de liberdade é 9,49 (6.25).

$$\chi_{4;5\%}^2 = 9,49 \quad (6.25)$$

Em conseqüência, como  $1,20 < 9,49$ , satisfazendo a expressão (6.21), tudo indica que a hipótese de que o conjunto de dados tem aderência com a distribuição normal pode ser aceita.

Além do teste do qui-quadrado, existem outros testes de aderência a exemplo do teste de Kolmogorogov-Smirnov. O teste de aderência também pode servir para comparar duas distribuições de probabilidade, aquela que tiver um valor de qui-quadrado menor será a mais adequada.

## 6.4. Considerações finais

Como visto no presente capítulo, há que se ter cuidado quanto ao critério como se coletam os dados a respeito do sistema a ser modelado. Da mesma forma, deve haver uma preocupação quanto à seleção dos dados mais importantes a serem considerados para melhor representar esse sistema. Também foi explanado como esses dados devem ser cuidadosamente analisados para que dêem entrada no modelo de maneira correta.

Nessa altura do trabalho, o modelador e usuário já têm uma idéia do problema, da linha de produção que vai ser modelada, bem como já dispõem dos dados que foram coletados e analisados, em conseqüência, a próxima etapa do trabalho, que é a modelagem propriamente dita já pode ser iniciada.

## 7. CONSTRUÇÃO DO MODELO COMPUTACIONAL

### 7.1. Considerações iniciais

Uma vez que o modelador e o usuário já possuem uma visão clara de qual o problema que será analisado e quais as respostas que se deseja obter com o estudo de simulação, já conhecem o sistema que vai ser modelado, e os dados principais sobre o sistema já foram coletados e analisados quanto à sua correção, ou seja, quanto à maneira como foram coletados e sua correspondência com o sistema real de modo a poder representá-lo, a próxima fase que é a construção do modelo computacional já pode ser iniciada.

Na modelagem todos os dados que foram coletados relativos ao sistema, tais como: layout, equipamentos que participarão da simulação, tempos, número de operadores, tipos de peças processadas, serão agora introduzidos no programa, de modo que ao final se tenha o modelo computacional do qual serão obtidos resultados e se farão os estudos e experimentações de simulação. Durante a fase de modelagem o usuário e modelador vão procurar a similaridade com o sistema real, dentro de certas limitações, e poderão chegar a conclusão de que alguns dados que foram coletados não vão ser utilizados, e por outro lado, para se atingir o objetivo do estudo, outros dados não previstos, deverão ser levantados.

### 7.2. Alguns princípios de modelagem

A seguir serão apresentados alguns princípios que se aplicados vão facilitar os trabalhos de modelagem, possibilitando que se chegue a resultados mais confiáveis em menores tempos de trabalho.

#### 7.2.1. *Partir de modelos simples*

Os modelos mais complexos são de difícil construção e verificação. Um conceito importante que se deve ter ao modelar é de que os trabalhos de simulação devem partir de modelos simples para os mais complexos. Segundo PIDD (1997), devemos aprender o máximo possível com esse modelo simples que foi construído, e depois na medida do necessário vai-se acrescentando refinamento.

Se o modelador começar a modelagem a partir de modelos simples, e for incrementando-o à medida que os estudos de simulação vão caminhando, haverá não somente ganho no tempo total de trabalho de modelagem, quanto também na fase de verificação em o que os erros de programação são corrigidos. Dessa forma, durante o decorrer do estudo vai se refinando esse modelo inicial, até que atenda aos objetivos propostos.

### **7.2.2. Fiscalizar nível de detalhamento**

A modelagem é uma atividade que demanda tempo, e quanto maior for o nível de detalhamento, maior será o tempo de modelagem, e maiores serão as necessidades de dados para a construção do modelo. Segundo DIETZ (1992), um modelo excessivamente detalhado pode não somente reduzir sua performance, bem como, pode obscurecer ou turvar os resultados.

Ao se definir o nível de detalhamento do modelo não se pode perder de vista o objetivo específico da modelagem. Assim sendo, se o objetivo do estudo é por exemplo o de se verificar o efeito da compra de mais uma máquina operatriz para dobrar meios desse recurso gargalo, há que se analisar com cuidado se há necessidade de modelar todo o sistema de manufatura ou só parte deste; se é interessante introduzir variáveis relacionadas ao custo do produto ou mesmo ao estoque em processo; se há possibilidade de redução dos dados a serem coletados; se os tempos de parada dos operadores ou equipamentos são significativos para melhorar a precisão da análise. Como já foi citado anteriormente, tanto a coleta de dados quanto a modelagem são atividades dispendiosas, que envolvem também gasto de tempo, desta forma é imperativo que o modelo seja o mais simples possível.

### **7.2.3. Dividir o modelo**

Se o modelo for grande, é aconselhável também sua partição em um conjunto de modelos menores, relacionando-os às áreas lógicas do sistema (DIETZ, 1992). Esses modelos serão mais simples de serem construídos e interpretados. Assim, num processo produtivo em que se tem vários estágios de fabricação, ou a peça passa por diversas células de fabricação, é interessante, caso se tenha que modular todo o processo, que se faça por partes. Cada um desses módulos que constituirá o modelo total, será verificado separadamente, as correções serão feitas e após serão agrupados novamente.

#### 7.2.4. Verificação e correção dos erros

A correção dos erros cometidos durante a programação, será tanto mais fácil quanto menor for o modelo, daí a vantagem em subdividi-lo. Alguns softwares possuem dispositivos que permitem a verificação e correção de erros (debug) com mais facilidade. É importante salientar que a recomendação de se partir de modelos mais simples, decorre também da facilidade que se tem para se verificar e corrigir erros nesses modelos, e à medida que essas incorreções forem sendo eliminadas, o modelador pode ir adicionando ao modelo maiores detalhes de roteamento, introduzindo variáveis que vão proporcionar mais informações, adicionando equipamentos, sofisticando a animação (se houver), introduzindo novos dados do processo, construindo múltiplos cenários, etc. O importante é ter em mente que a verificação e correção de erros, pode ser uma etapa demorada na modelagem, ao se tentar ganhar tempo iniciando-a com modelos complexos e muito grandes.

#### 7.3. Uso do Diagrama do Ciclo de Atividades (DCA)

Uma das maiores dificuldades que o modelador e principalmente o usuário vão enfrentar é o entendimento da lógica do sistema a ser modelado, pois como já foi explanado o sistema pode ser complexo no sentido de que pode haver várias entidades dele participando e há necessidade de se entender perfeitamente qual o relacionamento entre elas, ao mesmo tempo é preciso identificar perfeitamente quais são as filas de espera desse sistema, para que se possa analisá-lo. Neste caso o uso do DCA (*Activity Cycle Diagrams*), pode ajudar no entendimento como o sistema funciona, criando uma interface favorável para a construção do modelo, ao mesmo tempo permitindo que o modelador explique ao usuário a lógica da simulação numa linguagem acessível.

Na simulação por eventos discretos, as entidades do sistema são aqueles componentes que dele participam e necessitam estar inter-relacionados, para que o sistema cumpra um determinado propósito. No caso da área de manufatura, em uma célula de produção por exemplo, as entidades seriam as máquinas, as peças, os operadores, os postos de inspeção de qualidade e etc. Cada uma dessas entidades têm atributos a elas relacionadas, os quais prestam informações sobre suas propriedades. Assim sendo, por exemplo, um dos atributos de uma máquina no sistema produtivo é se está ocupada ou desocupada. Uma peça pode ter a ela associada o atributo de tempo de espera de usinagem ou um número associado às suas características físicas.

As entidades também podem ser permanentes ou temporárias (GORDON, 1969). São permanentes quando pertencem ao sistema, como por exemplo as máquinas, os operadores e os postos de inspeção numa linha de produção. As entidades permanentes não mudam suas quantidades durante o decorrer da simulação. As entidades são temporárias quando entram e saem do sistema durante a simulação, e seu número é variável, como por exemplo as peças que serão usinadas em uma célula de fabricação. Um sistema em que se tem a participação de entidades temporárias é dito “sistema aberto”, ao contrário, se o sistema só tiver entidades permanentes é dito “sistema fechado”.

O DCA é basicamente constituído de dois estados e símbolos correspondentes, que vão representar as entidades no diagrama: o estado ativo e estado passivo.

**Estado ativo (atividade) (active state):** nesse estado a entidade está em atividade, portanto, o momento do início dessa atividade, bem como seu término será caracterizado como um evento. Assim, se acaso se tomar como exemplo uma máquina operatriz, a atividade poderia ser *usinagem da peça* e a **tabela 7.1** mostra os dois eventos que caracterizam o fim e término desse estado. O símbolo usado para as entidades cujo estado é ativo é um retângulo, como mostra a **figura 7.1**:

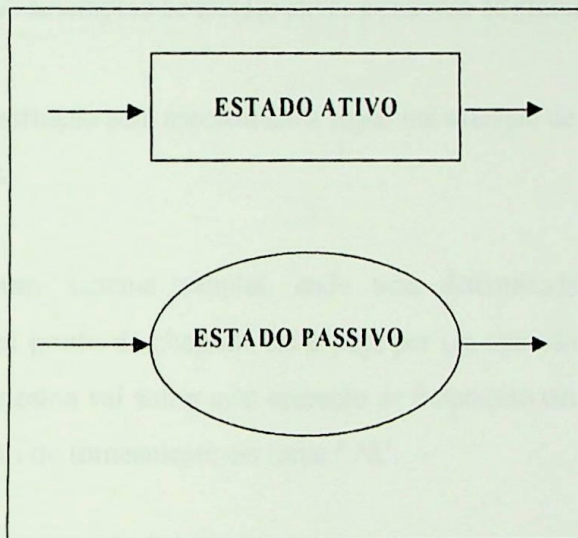
Evento 1	Início da operação de usinagem
Evento 2	Fim da operação de usinagem

**Tabela 7.1:** Eventos que caracterizam início e fim de uma atividade

O intervalo de tempo decorrente entre os eventos 1 e 2, que corresponde ao tempo que dura a atividade, ou o tempo em que a entidade máquina operatriz está ativa, é conhecido e vai ser um dado de entrada do programa. Esse tempo poderá ser de natureza estocástica, conforme seja informado ao programa como um número aleatório que pertence a uma determinada distribuição de probabilidades, por exemplo um tempo de usinagem com distribuição de probabilidades normal, com os parâmetros: média igual a 8,5 min e desvio padrão igual a 1,7 min. Poderá ser também de natureza determinística se for informado como um determinado tempo, como por exemplo o tempo de operação é de 8 min.

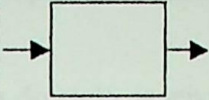

**Estado passivo (fila) (dead state):** nesse estado a entidade está aguardando alguma disponibilidade para entrar em atividade. Sua característica principal é de que esse tempo em que a entidade permanece no estado passivo, ou o tempo que ela passa na fila, é uma decorrência dos tempos dos estados ativos que a antecedem e sucedem. Assim se uma peça está em estado passivo, tendo saído de uma operação de usinagem e está aguardando uma operação de inspeção, o tempo em que essa peça permanecerá na nessa fila será uma decorrência dos tempos da operação de usinagem pela qual ela já passou, e dos tempos de inspeção, pela qual ela passará.

O símbolo usado para entidades cujo estado é passivo é um círculo como mostrado na *figura 7.1*.



**Figura 7.1:** Símbolos do estado ativo e passivo do DCA

A *tabela 7.2* mostra alguns exemplos de estados ativos e inativos a que podem estar sujeitas as entidades de um sistema de fabricação em lotes. É importante ressaltar que para facilidade de modelagem, é interessante que se junte atividades vizinhas, desde de que sejam possíveis de serem agregadas e que não haja necessidade de ser estudada de forma independente. Por exemplo, se ao término de cada operação uma peça necessita ser inspecionada, e não se necessita estudar os tempos de inspeção separadamente, essa atividade denominada inspeção pode simplesmente ser agregada à atividade denominada operação. Desta forma, o tempo de operação será acrescido do tempo de inspeção e não haverá necessidade de se representar mais entidades no modelo, simplificando-o.

ESTADO	SÍMBOLO	EXEMPLOS
ATIVO		Operação de usinagem
		Operação de tratamento térmico ou superficial
		Inspeção visual
		Inspeção de calibração
		Rebarbação
		Máquina em reparo
		Quebra inopinada de máquina
		Parada para troca de ferramentas
		Operador ou mecânico ativo
		Aguardando usinagem
PASSIVO		Aguardando tratamento térmico ou superficial
		Aguardando inspeção
		Mecânico aguardando tarefa
		Posto de inspeção aguardando peça
		Operador aguardando tarefa

**Tabela 7.2:** Exemplos de estados ativos e passivos da produção por lotes

A título de ilustração será apresentado a seguir um exemplo de aplicação do DCA para a fabricação em lotes.

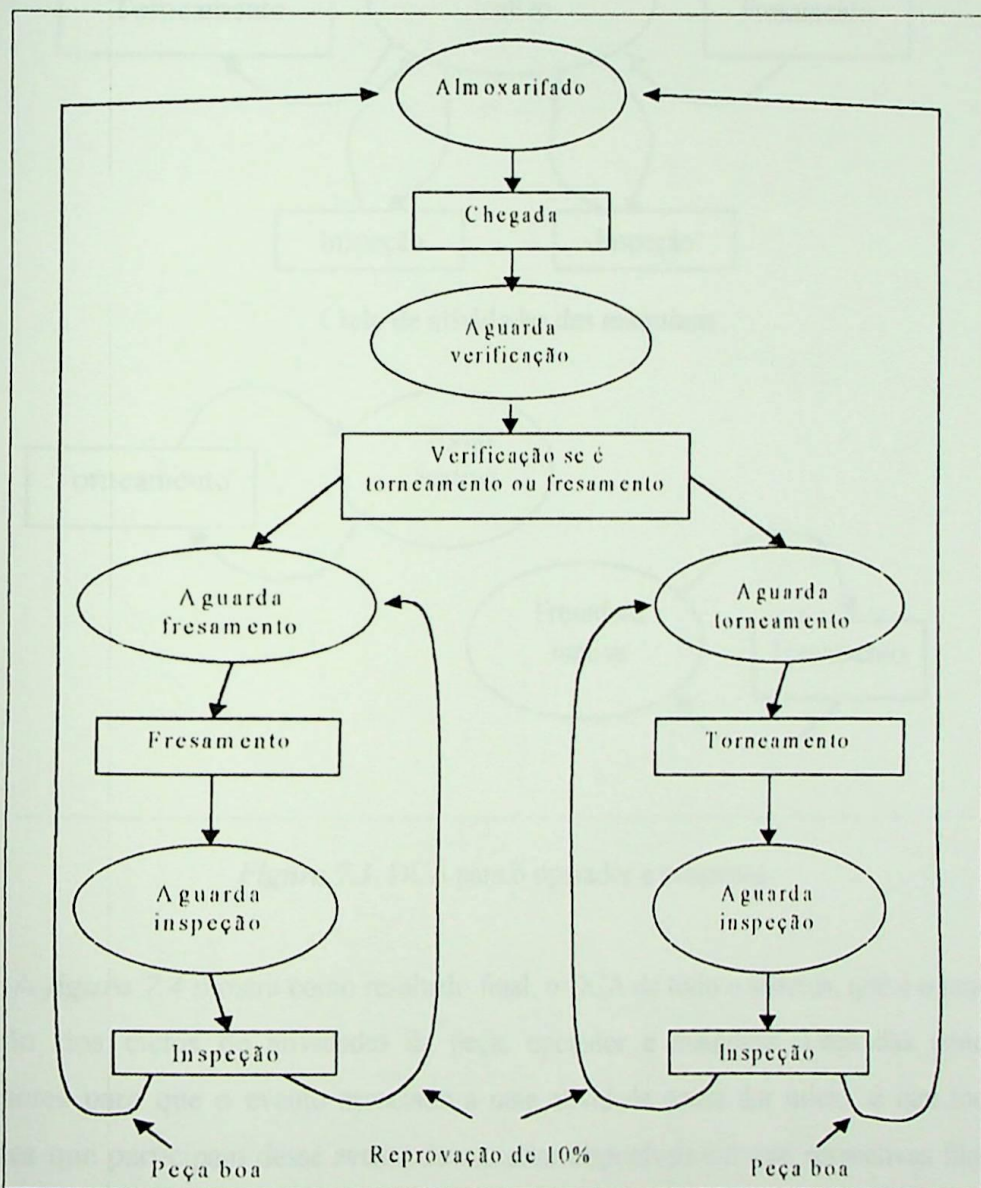
Suponha-se um sistema simples, onde uma determinada peça venha de um almoxarifado para um ponto de chegada, daí é pega por um operador, que vai verificar pela forma da peça, se a mesma vai sofrer uma operação de fresamento em um centro de usinagem CNC ou uma operação de torneamento em torno CNC.

Uma vez selecionada a máquina, a peça será presa no dispositivo fixado na mesa da fresadora ou na placa do torno e as máquinas são ligadas, liberando o operador para outras tarefas. Depois de torneada ou fresada, a peça será retirada da máquina e sofrerá uma operação de inspeção, se acaso for rejeitada numa determinado calibre, terá que sofrer um retrabalho, isto acontece em 10% das vezes, se for aprovada, será considerada produto acabado e retorna ao almoxarifado.

No caso do exemplo, a peça é uma entidade temporária, pois entra e sai do sistema. As máquinas CNC e o operador são entidades permanentes pois são partes integrantes do sistema e têm suas quantidades prefixadas: tem-se um torno CNC, um centro de usinagem e um operador para realizar todas as tarefas. O sistema é aberto pois as peças, são entidades temporárias e pertencem ao sistema.

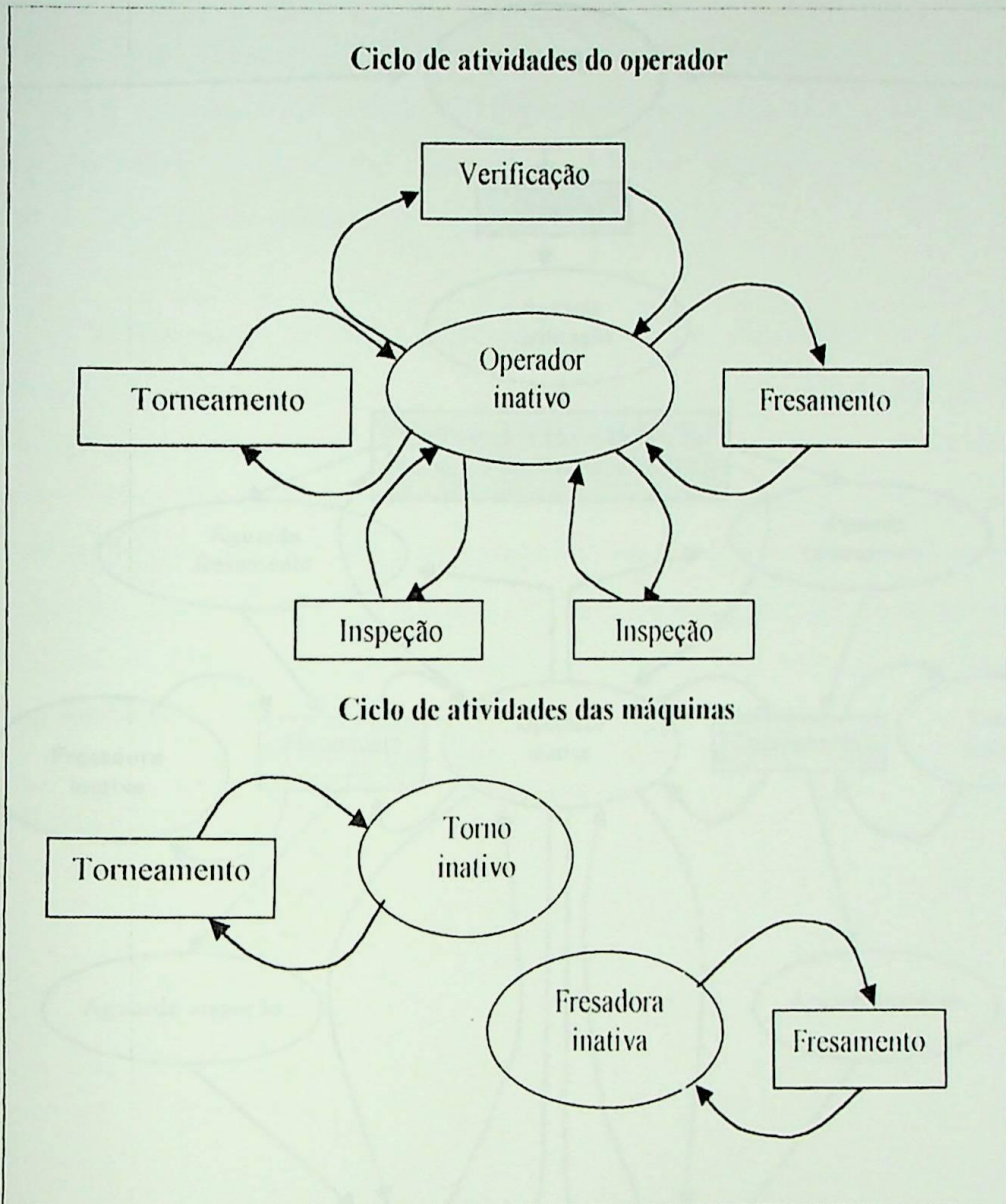
É interessante que se desenvolva o diagrama de ciclo de atividades por partes, para facilidade de raciocínio. Primeiro desenvolve-se o ciclo de atividades da peça, em seguida o ciclo de atividades do operador e das máquinas, mesclando-se todos ao final.

Na construção do ciclo de atividades da peça, mostrado na *figura 7.2*, verifica-se que os estados ativos se alternam com os estados passivos, ou seja antes de cada estado ativo existe uma fila, aguardando que a entidade seguinte fique disponível, e que haja a entidade operador também esteja disponível. O tempo em que a peça aguarda o fresamento, é uma consequência da duração do estado ativo anterior que é o tempo de verificação e da duração do estado ativo posterior que é o tempo de fresamento.



*Figura 7.2:* DCA para as peças

A **figura 7.3** mostra qual será o ciclo de atividades para o operador e para as máquinas. Observar que todos os ciclos de atividade formam ciclos fechados, em que os estados ativo e passivo se revezam.



**Figura 7.3:** DCA para o operador e máquinas

A **figura 7.4** mostra como resultado final, o DCA de todo o sistema, que é o resultado da fusão dos ciclos de atividades da peça, operador e máquinas. Uma das condições importantes para que o evento associado a uma atividade possa dar início, é que todas as entidades que participam desse evento devem estar disponíveis em suas respectivas filas. Por exemplo, a atividade torneamento, só poderá dar início se a máquina torno CNC estiver

disponível, se houver ao menos uma peça na fila já verificada e aguardando ser torneada e se o operador estiver disponível.

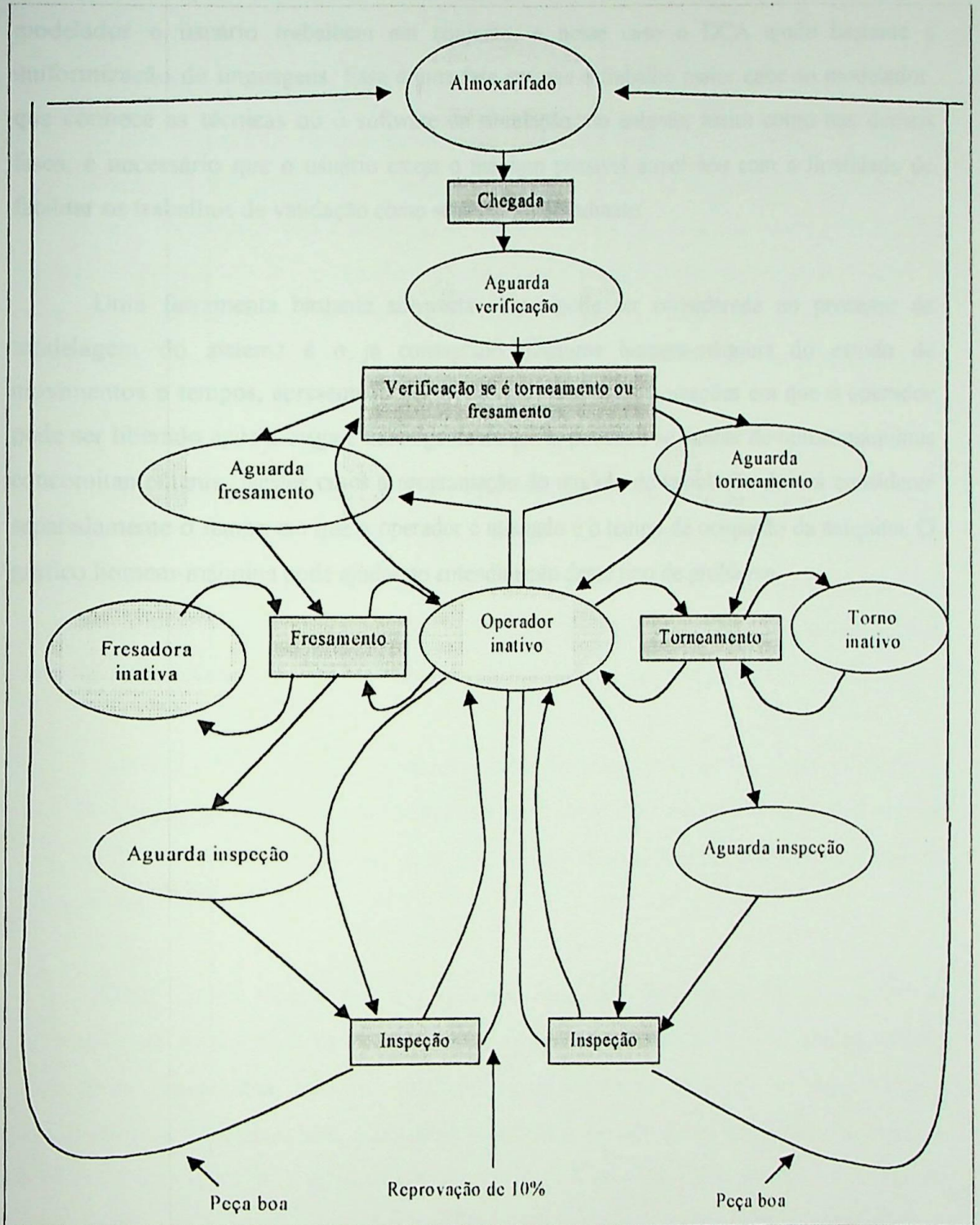


Figura 7.4: DCA para o sistema a ser modelado

#### 7.4. Considerações finais

Como visto, existem algumas regras básicas para a construção do modelo, que tem que ser observada pelo modelador. Nesta fase da simulação também é importante que o modelador e usuário trabalhem em conjunto, e nesse caso o DCA ajuda bastante a uniformização de linguagens. Essa é uma fase em que o trabalho maior cabe ao modelador, que conhece as técnicas ou o software de simulação, no entanto, assim como nas demais fases, é necessário que o usuário esteja o máximo possível envolvido com a finalidade de facilitar os trabalhos de validação como será visto mais adiante.

Uma ferramenta bastante adequada e que pode ser considerada no processo de modelagem do sistema é o já consagrado diagrama homem-máquina do estudo de movimentos e tempos, apresentado por BARNES (1963). Há operações em que o operador pode ser liberado após a carga e descarga da máquina, podendo se ocupar de outras máquinas concomitantemente. Nestes casos a programação do modelo de simulação deverá considerar separadamente o tempo em que o operador é utilizado e o tempo de ocupação da máquina. O gráfico homem-máquina pode ajudar no entendimento desse tipo de problema.

## 8. VALIDAÇÃO

### 8.1. Considerações iniciais

Uma vez que o sistema foi modelado e foi verificado, ou seja, todos os erros de programação foram eliminados, o programa estará em condições de rodar sem problemas. O próximo procedimento será a validação do modelo. A validação vem a ser uma avaliação de o quanto o modelo que foi construído é semelhante ao sistema real que se pretendeu simular, no aspecto de se questionar se esse modelo atende ou não, às finalidades para as quais foi construído, ou seja, se está dando resposta conveniente ao problema que foi levantado ao se iniciar o projeto de simulação.

O simples fato de a validação ser uma avaliação de semelhança, dificulta essa fase, e também gera uma certa incerteza quanto entendimento claro do quanto o modelo está correspondendo ao sistema real. Segundo NAYLOR et al (1971) a validação de modelos computacionais é difícil e dentre todas as complexidades que a envolvem, de ordem prática, teórica e estatística, existe até mesmo uma complexidade de natureza filosófica na validação.

BRATLEY et al (1987) explicam que não há uma receita para se fazer validação, e que devido às aproximações que foram feitas ao se construir o modelo, já seria de se esperar que os dados que o modelo vai gerar não tenham estatisticamente exatamente o mesmo comportamento do sistema.

Desta forma, mesmo que não houvesse limite de tempo disponível, bem como de recursos para se trabalhar na modelagem, e mesmo que os trabalhos de simulação tenham sido bem conduzidos, não há possibilidade de validação absoluta, ou seja, existem circunstâncias do sistema real, que podem acontecer e que não foram previstas no simulador. NEELANKAVIL (1987), apud PROMODEL USER'S GUIDE, 1997, afirma: "*A validação verdadeira é uma impossibilidade filosófica e tudo o que nos podemos fazer é invalidar ou falhar ao invalidar*".

## 8.2. Objetivo e propostas para se validar o modelo

O principal objetivo da validação, já que não existe fórmula que ajude a se concluir se o modelo é ou não válido, seria o de se determinar a utilidade do modelo ou não. Desta forma, se o modelo atende os objetivos que foram propostos, mesmo que não tenha semelhança absoluta com o sistema real que foi simulado, o modelo será útil e vai dar respostas que ajudem a empresa em suas decisões. Segundo LAW e KELTON (1982), é preferível se considerar o quanto o modelo está de acordo com o sistema modelado, do que se referir à sua absoluta validade ou invalidade.

O tempo destinado à construção do modelo é um dos fatores limitantes. Ao se elaborar modelos por demais complexos, na tentativa de imitar exatamente o comportamento do sistema, o que estará ocorrendo é uma perda inútil de tempo e recursos, predestinando o estudo de simulação ao insucesso. Dependendo das respostas que se quer obter, uma linha de produção pode ser modelada em uma semana ou demorar meses, se acaso se exigir níveis de detalhamento exagerados. Mesmo que se leve muito tempo modelando o sistema, como já foi visto anteriormente, a validação verdadeira poderia ser impossível.

Desta forma, nessa etapa de validação, não se pode perder de vista os objetivos do estudo da simulação. Uma vez que esses objetivos podem ser cumpridos com o modelo existente, a etapa de validação está terminada. De acordo com a importante observação de CARSON apud KLEINDORFER et al. (1998), é necessário que o trabalho de validação não seja feito somente pelo modelador, mas que haja participação do usuário para que a mesmo ganhe credibilidade.

Apesar de ser uma etapa do estudo de simulação, isto não significa que o modelador, bem como o usuário, devam se preocupar com a validade somente após modelar todo o sistema. Assim, ao se definir o problema, esboçar layout, coletar os dados e na modelagem propriamente dita, a preocupação com a validação deverá estar presente, isto posto, é natural que após o modelo estar concluído, a validação será uma fase muito mais fácil de ser executada, pois os dados que fizeram parte do estudo têm consistência com o sistema a ser modelado.

Apesar de não haver uma metodologia que garanta a hipótese de que o sistema seja válido para os objetos propostos, existem algumas propostas que ajudam na tomada de

decisão e podem reduzir as probabilidades de que se esteja tomando a decisão errada, validando um modelo que vai gerar resultados não confiáveis, ou invalidando um modelo bom, ocasionando perda inútil de tempo. Essas propostas estão enumeradas a seguir.

### **8.2.1. Mudança dos parâmetros de entrada**

Segundo HARREL et al. (1996), um teste que pode ser feito para validação do modelo é o de mudar os dados de entrada e verificar se as respostas que serão fornecidas serão próximas às respostas que o sistema real daria. A recomendação é de que se varie somente os dados de entrada que serão avaliados, os demais deverão permanecer constantes. Este teste também vai realizar uma análise de sensibilidade, de modo a indicar ao modelador quais são os parâmetros para os quais se deve dar maior atenção na coleta de dados, tendo em vista o seu nível de influência nas saídas do programa.

Assim por exemplo se o sistema que se está modelando é simples, como uma célula de fabricação envolvendo apenas três ou quatro máquinas, poder-se-ia testar uma mudança de frequência de entrada das peças na linha, ou mesmo a quantidade com que estas peças entram por vez, lembrando que só se deve mudar um desses parâmetros por vez. Isto ocasionaria uma variação do WIP, que poderia ser facilmente medido na célula de fabricação e comparado com o resultado fornecido pelo modelo. Poder-se-ia também aumentar propositalmente um tempo de operação e verificar-se qual o efeito causado no estoque intermediário entre essa operação e a posterior, desta forma também se pode avaliar a importância dessa informação para a precisão das respostas.

### **8.2.2. Turing test**

De acordo com sugestão de HARREL et al. (1996), pode ser realizado o *Turing test*. Nesse teste as respostas dadas pelo modelo e as respostas que são dadas pelo sistema modelado, são ambas entregues a pessoas que conheçam o sistema. A essas pessoas não é dito quais são as respostas do sistema e do modelo, para que não sejam influenciadas em sua opinião. Se acaso essas pessoas conseguirem distinguir entre os dois conjuntos dados, devem explicar ao modelador que distinção encontraram.

Essas diferenças são então analisadas uma a uma, juntamente com o modelador, que dessa forma poderá implementar mudanças no modelo de maneira a aproximar os resultados.

### **8.2.3. Desenvolver o modelo juntamente com o usuário**

LAW e KELTON (1982) sugerem que no desenvolvimento do modelo é imprescindível que haja envolvimento tanto das pessoas que conhecem o sistema a ser modelado, quanto a interação com aqueles que vão tomar as decisões. Essa medida vai propiciar tanto o aumento da validade do modelo, quanto a percepção dessa validade por parte daqueles que vão tomar decisões.

Apesar dessa ser uma atividade típica do modelador como será sugerido no *quadro 10.1*, quando a linha de produção estiver sendo modelada, é interessante que o gerente da área de produção, os técnicos da área, até mesmo em certas circunstâncias, os operadores tomem parte na modelagem.

Os modernos softwares de simulação possibilitam a animação. Através dessa animação, o modelador pode interagir facilmente com as pessoas que conhecem o sistema, além de motivá-las para o envolvimento com o estudo de simulação. A velocidade de animação pode ser aumentada ou diminuída, de modo a se observar detalhadamente, momento a momento, quais são os eventos que estão ocorrendo na simulação, quais os percursos que o operador está fazendo, quais suas decisões, a quebra das máquinas, etc.

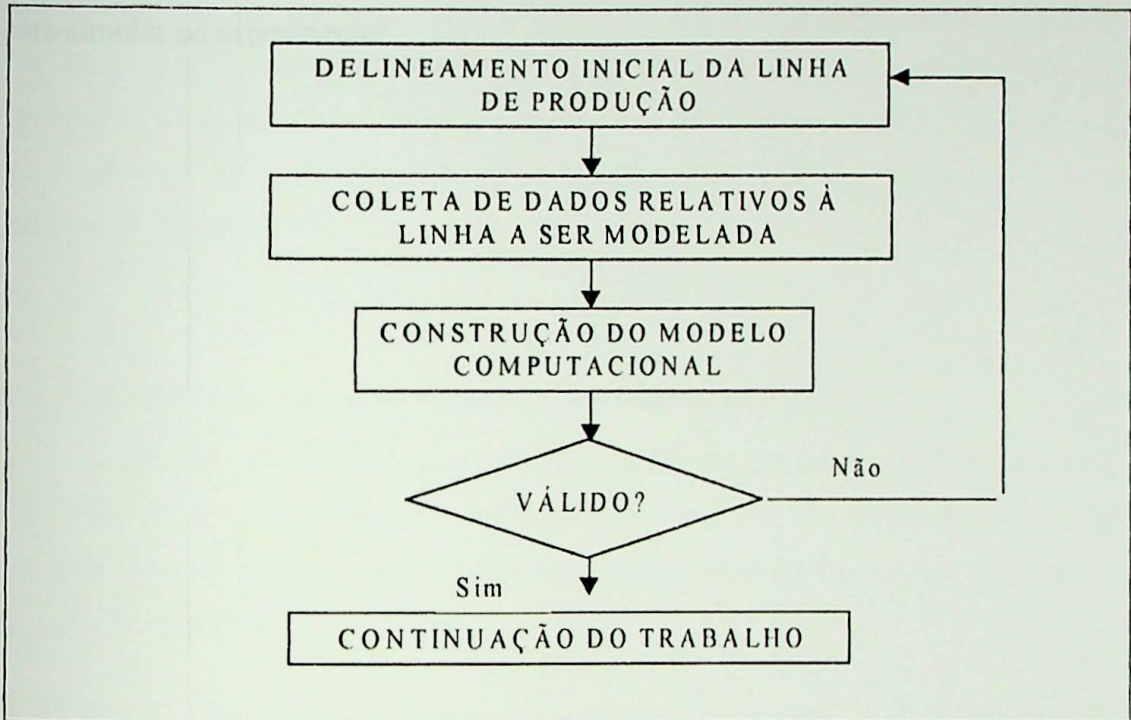
### **8.2.4. Recorrer a especialistas**

Em muitas circunstâncias, não se tem o sistema a ser modelado, neste caso, segundo HARREL et al. (1996), o modelador poderá recorrer ao auxílio de pessoas que conheçam um sistema similar, ou mesmo dos fornecedores de equipamentos.

É normal que os fornecedores de equipamentos possuam dados que possam ajudar na modelagem. Um fornecedor de torno CNC por exemplo, pode até mesmo realizar uma determinada operação para que se obtenha os tempos de troca e operação. Um fornecedor de fornos de tratamento térmico, pode fornecer, através dos dados a respeito da peça a ser tratada, qual o rendimento de uma determinada operação.

A validade nesses casos pode até mesmo ser verificada através de outros sistemas similares existentes, ou mesmo que não se tenha o sistema todo, mas apenas uma parte deste, a validação através da comparação com o sistema real poderia ser feita somente para aquele determinado módulo que se tem.

Se a conclusão for aquela de que o modelo não é válido, haverá necessidade de se rever os passos anteriores conforme a *figura 8.1*. Essa revisão deve ser feita juntamente com o usuário. O esboço do layout deverá ser revisado, tendo em vista se verificar se ele realmente está correspondendo à linha de produção que foi modelada. Poderá ter havido incorreção ao se lançar as distâncias percorridas, caminhos percorridos pelos operadores, posição ou seqüência das máquinas e dados de balanceamento de linha.



*Figura 8.1:* Revisão do trabalho em caso de não validação

Deve-se verificar se a coleta de dados foi realizada criteriosamente. Podem não estar correspondendo ao sistema real. A metodologia de coleta de dados pode não ter sido a mais correta para aquela determinada máquina ou operação. Se não houve simplificações exageradas, de modo que tempos importantes tenham sido esquecidos.

Mesmo que o programa esteja rodando bem, ou seja foi verificado, isto não quer dizer que todas as variáveis deram entrada no programa de maneira correta, em conseqüência devem ser verificadas novamente, principalmente quanto às distribuições de probabilidades que estão associadas a cada um dos conjuntos de dados que foram coletados.

### 8.3. Considerações finais

Neste capítulo foram apresentadas algumas maneiras de se validar um modelo, onde deve ser enfatizado que o comprometimento do usuário e a interação deste com o modelador no decorrer de todo o trabalho de simulação é fundamental para que ao final da modelagem se tenha o modelo validado.

Após o modelo estar validado, pode-se passar à próxima etapa que é a de utilizá-lo para simular os experimentos.

#### 3.3. Definição do período de equilíbrio (warm-up period)

Como já explicado anteriormente, a simulação não termina, a menos que se pare de monitorar em que estágio se encontra o modelo e/ou seu comportamento em um estado. A fase inicial de uma simulação é o período inicial e o período subsequente é o período de equilíbrio.

Muita gente acha que a simulação não se inicia a menos que se tenha um ponto de partida definido, mas não é isso que acontece. A simulação começa no momento em que se começa a coletar dados, mesmo que a quantidade de dados que se coleta seja pequena. Portanto, a fase inicial de uma simulação é o período de equilíbrio.

Os dados coletados para validar o modelo validado são o comportamento do sistema durante o estado estacionário (steady-state). O problema não é como se determina o tempo em que o modelo atinge esse estado. Isso depende de se determinar a partir de qual ponto se começa a coletar dados e de qual ponto se começa a coletar dados para validar o modelo.

Pode-se usar uma técnica de teste e analisar por exemplo, no caso de um sistema, o tempo de espera, tempo de fila, tempo de processamento, tempo de serviço, tempo de espera e assim por diante, para verificar se os dados coletados são consistentes com o estado estacionário.

## 9. SIMULANDO EXPERIMENTOS

### 9.1. Considerações iniciais

A proposta deste capítulo é de dar uma orientação de como se deve conduzir a experimentação na simulação. Esse trabalho é feito após o modelo estar pronto, tendo sido verificado e solucionado qualquer erro de programação e após ter sido julgado válido. É necessário então se estabelecer critérios de como os experimentos devem ser conduzidos de modo que os resultados obtidos para análise, não gerem deduções errôneas por parte do modelador e usuário.

### 9.2. Definição do período de aquecimento (*warm-up period*)

Como já explanado anteriormente, a simulação não terminante, é aquela que a partir do momento em que atingir um determinado estado estável, seu comportamento vai ser estudado. A esse período entre o início da simulação e o estado estável é que se chama de período de aquecimento.

Numa linha de fabricação, ao se iniciar a simulação, nem todos os postos de trabalho estão com suas filas (ou estoques intermediários) cheias. A saída de peças também só vai ocorrer depois de um certo tempo de simulação, bem como a quantidade de peças que sairão por uma determinada unidade de tempo, só se estabilizará a partir de um determinado período de simulação.

Os dados coletados para análise só terão validade após o comportamento do sistema adquirir o estado estável (*steady-state*). O problema está em como se determinar o instante em que o modelo atinge esse estado. Esse instante pode ser determinado a partir do momento que algumas variáveis de saída do sistema forem analisadas e adquirirem estabilidade.

Pode-se tomar uma máquina da linha e analisar por exemplo sua taxa de ocupação, tempo de espera, tempo em que permaneceu bloqueada, tempo de parada, tempo de setup e neste caso o estado estável será atingido quando os valores dessas variáveis se tornarem

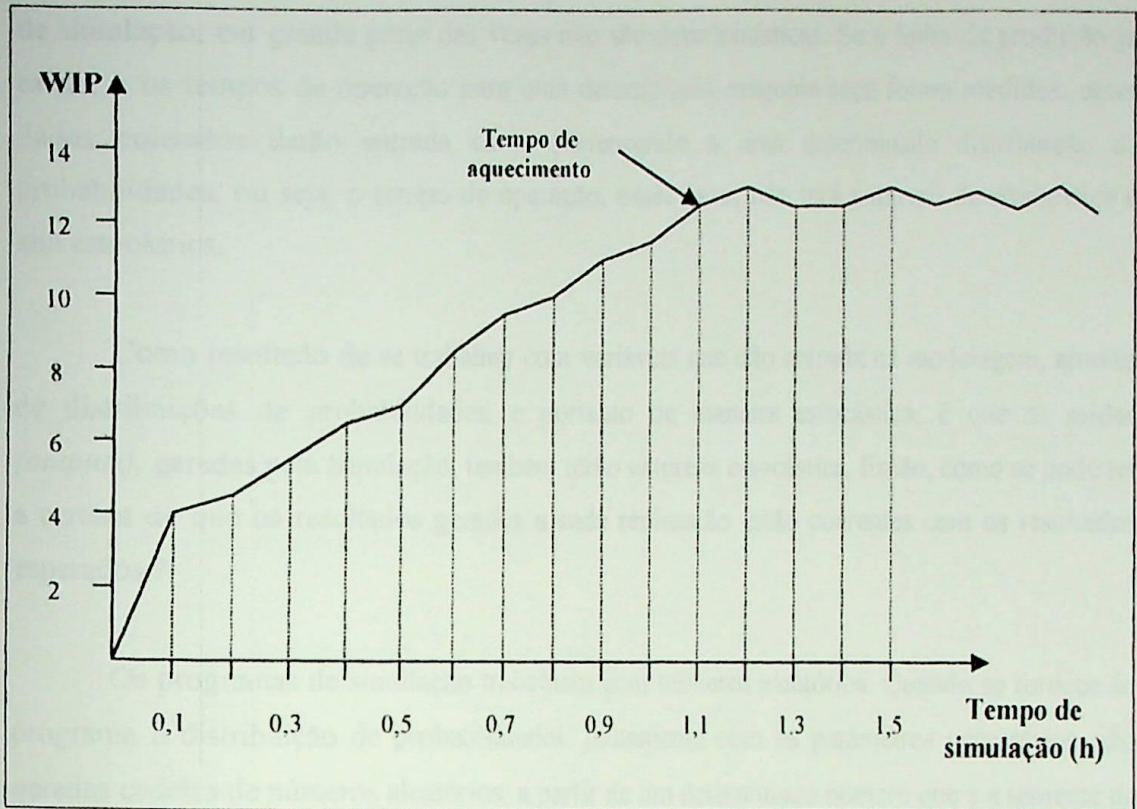
estáveis. Outras variáveis inseridas no programa também podem ser utilizadas, como: valor do estoque em processo (WIP); o próprio estoque em processo quando a linha de produção for cativa de apenas uma peça; a taxa de utilização dos operadores.

Tomando-se como exemplo o estoque em processo de uma linha de produção que seja cativa de apenas uma peça. Suponha-se que as quantidades de estoque em processo sejam tomadas a cada décimo de hora, para cada simulação, e que se faça quatro replicações para cada um desses tempos. Serão feitas quinze simulações, e os resultados dessas simulações são os mostrados na *tabela 9.1*. Depois calcula-se a média para cada um dos tempos de simulação.

Tempo (hora)	Replicação 1	Replicação 2	Replicação 3	Replicação 4	média
0,1	5	4	3	5	4,3
0,2	4	4	5	5	4,5
0,3	7	4	6	6	5,8
0,4	7	7	8	6	7,0
0,5	8	7	8	7	7,5
0,6	10	9	9	8	9,0
0,7	10	9	10	9	9,5
0,8	11	10	9	10	10,0
0,9	10	12	11	10	10,8
1,0	11	12	11	12	11,5
1,1	13	12	12	14	12,8
1,2	14	13	13	12	13,0
1,3	13	12	14	12	12,8
1,4	14	12	12	13	12,8
1,5	13	12	14	13	13,0

*Tabela 9.1:* Estoque em processo existente na linha

De posse desses resultados pode-se traçar uma curva onde no eixo das ordenadas está o estoque em processo, e no eixo das abscissas está o tempo decorrido de simulação. O ponto em que o formato da curva se estabilizar será aquele em que o sistema atingiu seu estado estável, e portanto é o período de aquecimento. Como visto na *figura 9.1*, o tempo de aquecimento seria de 1,1 horas, que corresponde ao tempo em que o gráfico se estabiliza.



*Figura 9.1:* Tempo de aquecimento

É interessante lembrar, que os tempos de parada de máquina para manutenção, os tempos de setup e os turnos de trabalho podem influenciar na determinação do tempo de aquecimento. Suponha-se que a primeira parada de máquina para manutenção está prevista para ocorrer após três horas de simulação, se acaso se determinar que o tempo de aquecimento é menor que esse, torna-se evidente que não terá ocorrido nenhuma parada de máquina.

No caso de se trabalhar em turnos, haverá necessidade de uma análise mais profunda. Talvez haja necessidade de se determinar que o tempo de aquecimento, neste caso, seja maior do que um dia completo de simulação, pois qualquer tempo menor do que este, será influenciado pela instabilidade inicial. Isto significa que ao se determinar um período de aquecimento menor que um dia, os resultados da simulação para os dias subsequentes poderão não ser estatisticamente comparáveis com o resultado do primeiro dia.

### 9.3. Número de replicações e estimação dos resultados

Um dos problemas que o modelador e usuário vão ter na simulação, é o de analisar os resultados gerados pela simulação. Como já foi visto, as variáveis que dão entrada no modelo

de simulação, em grande parte das vezes não são determinísticas. Se a linha de produção já existe, e os tempos de operação para uma determinada máquina/peça foram medidos, esses dados coletados darão entrada como pertencendo a uma determinada distribuição de probabilidades, ou seja, o tempo de operação, nesse caso, não terá natureza determinística e sim estocástica.

Como resultado de se trabalhar com variáveis que dão entrada na modelagem, através de distribuições de probabilidades, e portanto de maneira estocástica, é que as saídas (*outputs*), geradas pela simulação, também terão natureza estocástica. Então, como se pode ter a certeza de que os resultados gerados a cada replicação estão coerentes com os resultados esperados?

Os programas de simulação trabalham com números aleatórios. Quando se fornece ao programa a distribuição de probabilidades, juntamente com os parâmetros necessários, são geradas cadeias de números aleatórios, a partir de um determinado número que é a semente de números aleatórios. A cada simulação, novas cadeias de números aleatórios são geradas, a partir de novas sementes de números aleatórios. Esses números gerados, vão ser relacionados com aquela distribuição de probabilidades fornecida, gerando assim resultados diferentes à cada simulação.

### 9.3.1. Definição do número de replicações necessárias:

A definição do número de replicações necessárias pode ser feita a partir da análise de intervalo de confiança, utilizando-se a distribuição *t* de *Student*. Essa distribuição é a mais apropriada para pequenas amostras ( $N < 30$ ) e também porque o desvio padrão da população  $\sigma$ , é desconhecido.

A equação que fornece o intervalo de confiança é mostrada em (9.1), onde  $(\alpha - 1)100$  representa o intervalo de confiança (probabilidade) para a diferença entre a média encontrada  $\bar{X}$  e a verdadeira média  $\mu$ . A amostra considerada tem tamanho  $n$ , portanto com  $n - 1$  graus de liberdade, e o desvio padrão dessa amostra é  $S$ .

$$P \left[ -t_{\alpha/2, n-1} \frac{S}{\sqrt{n}} \leq \bar{X} - \mu \leq t_{\alpha/2, n-1} \frac{S}{\sqrt{n}} \right] = 1 - \alpha \quad (9.1)$$

Da equação (9.1), obtém-se o valor de  $n$  em (9.2), que é o número de replicações que devem ser executadas para que se obtenha uma diferença desejada entre a média da amostra  $\bar{X}$  e a verdadeira média  $\mu$ .

$$n = \left( t_{\alpha/2; n-1} \frac{S}{\bar{X} - \mu} \right)^2 \quad (9.2)$$

Suponha-se que para um determinado modelo de simulação, se tenha feito 10 replicações. Os valores retirados a cada replicação para os valores médios de estoque em processo (WIP) são apresentados na *tabela 9.2*. Esses valores como explicado, serão diferentes a cada replicação.

Replicação	Valor médio do WIP (X)	$(X - \bar{X})$	$(X - \bar{X})^2$
1	11,05	-0,63	0,40
2	12,09	0,41	0,17
3	13,28	1,60	2,56
4	10,38	-1,30	1,69
5	10,25	-1,43	2,04
6	11,21	-0,47	0,22
7	12,39	0,71	0,50
8	10,51	-1,17	1,37
9	12,31	0,63	0,40
10	13,32	1,64	2,69
<b>média</b>	11,68		12,04

*Tabela 9.2:* Valores médios de WIP para 10 replicações

O que se pretende obter é o número de replicações que serão necessárias, tendo em vista essa amostra, para que se obtenha 95% de confiança de que a diferença entre a média dos resultados obtidos  $\bar{X}$  e a verdadeira média  $\mu$  não seja maior que uma peça.

Calculando-se o desvio padrão  $S$  da amostra de acordo com (9.3), tem-se 1,157.

$$S = \sqrt{\frac{\sum (X - \bar{X})^2}{n - 1}} = \sqrt{\frac{12,04}{9}} = 1,157 \quad (9.3)$$

Como  $(\alpha - 1)100 = 95$ , tem-se que  $\alpha = 0,05$

Da tabela de distribuição  $t$ , obtém-se que  $t_{0,025,9} = 2.262$ .

Substituindo-se esses valores na equação (9.2), considerando-se que a diferença máxima que se quer entre  $\bar{X}$  e  $\mu$  é de uma unidade ( $\bar{X} - \mu = 1$ ), tem-se (9.4).

$$n = \left( 2,262 \frac{1,157}{1} \right)^2 = 6,8 \cong 7 \quad (9.4)$$

Como conseqüência, ao se fazer 7 replicações, tem-se 95% de confiança de que a média verdadeira vai diferir da média encontrada por não mais de uma peça.

### 9.3.2. Estimação dos resultados

Um outro problema que se encontra na simulação, é de se avaliar se os resultados que foram obtidos nas várias replicações são compatíveis com os esperados. O que se vai obter como resultado de uma determinada variável ou algum tempo que se queira analisar, é um conjunto de números, que se não forem analisados estatisticamente, podem gerar poucas informações, ou informações pobres, ao modelador e usuário, dificultando assim a tomada de decisão.

Desta forma, uma das maneiras de se verificar um conjunto de valores que compõem o resultado, é o de se analisar o intervalo de confiança que contém a verdadeira média. Desta maneira os resultados serão mais bem entendidos e poderão ser utilizados para a análise e tomada de decisão.

Da equação (9.1), deduz-se o limites superior e inferior de confiança, para uma confiança de  $(\alpha - 1)100$ , uma amostra de tamanho  $n$  ( $n - 1$  graus de liberdade), desvio padrão  $S$  e com média amostral  $\bar{X}$ . Esses limites de confiança são dados pela equação (9.5), e a distância entre esses limites é o intervalo de confiança.

$$\bar{X} \pm t_{\alpha/2, n-1} \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (9.5)$$

Analisando-se os resultados da *Tabela 9.2*, que fornece os valores médios dos estoques em processo a cada replicação, o que se pretende saber ao analisar esses resultados, que são de natureza estocástica, é: qual o intervalo de valores, para um determinado grau de certeza que se pretende, que contém a verdadeira média.

Suponha-se que se deseje um grau de certeza de 95%. Como já foi visto, neste caso  $\alpha$  será igual a 0,05. O valor do desvio padrão amostral  $S = 1,157$ . A média da amostra  $\bar{X} = 11,68$ . O tamanho da amostra  $n = 10$ . Substituindo-se esses valores na equação (9.6), tem-se como resultado (9.7).

$$\bar{X} \pm t_{0,025;9} \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (9.6)$$

$$11,68 \pm 2,262 \frac{1,157}{\sqrt{10}} = 11,68 \pm 0,83 \quad (9.7)$$

Esse resultado está informando que pode-se estar 95% confiante de que a média verdadeira encontra-se entre  $(11,68 + 0,83)$  12,51 peças e  $(11,68 - 0,83)$  10,85 peças, como apresentado em (9.8).

$$10,85 < \mu < 12,51 \quad (9.8)$$

Portanto, o intervalo de confiança é de 10,85 a 12,51 peças, e com 95% de certeza pode-se afirmar que a média verdadeira das peças em processo na linha de produção encontra-se nesse intervalo. Essa é uma informação é portanto bem mais completa, e fácil de ser analisada do que o conjunto de números que são gerados pelas diversas replicações, como os da *Tabela 9.2*.

#### 9.4. Considerações finais

Neste capítulo foi visto como se deve conduzir as experimentações de simulação computacional procurando-se utilizar exemplos da área de fabricação em lotes. Foi explanado como se deve deduzir o período de aquecimento, pois todos os resultados estatísticos do modelo só devem ser coletados após esse período, sendo portanto fundamental que o



modelador saiba determiná-lo. Foi também exemplificado como se deve definir o número de replicações necessárias para se chegar a resultados estatisticamente conclusivos, isto quando os dados que dão entrada na modelagem têm natureza estocástica. Por último foi apresentada a maneira de se estimar os resultados, pois a cada replicação o dado que se deseja estimar vai ser diferente.

### 10.1. Considerações finais

Após se simular experimentos com o modelo, sempre enfatizando que é importante o envolvimento de ambos, modelador e usuário, nesta fase do projeto, os resultados que foram obtidos já podem ser analisados e posteriormente apresentados.

Concluiu-se este trabalho com a finalidade de apresentar ao usuário uma abordagem sistemática que deve ser adotada nas etapas de desenvolvimento de um modelo de simulação de eventos discretos.

Após a análise dos resultados obtidos devem ser apresentados ao usuário de uma maneira acessível e precisa, de modo que não haja nenhuma dúvida.

### 10.2. Análise de resultados

Para a análise dos resultados de um modelo de simulação devem ser adotados critérios claros e objetivos, como por exemplo, os critérios 4.1 e 4.2, para determinar a quantidade de dados para cada replicação, de modo que se possa obter resultados satisfatórios. É importante que esta análise estatística seja feita de modo que se leve em consideração todos os parâmetros importantes para a análise, como foi feito no Capítulo anterior, a exemplo da tabela de dados para o modelo de simulação.

Nesta etapa do trabalho o modelador deve realizar de modo a interpretação da interpretação estatística dos dados gerados, mas ao mesmo tempo, juntamente com o usuário não podem se esquecer do objetivo principal do estudo de simulação, ou seja, o objetivo principal do trabalho não é a de se interpretar resultados estatísticos, mas sim a de se resolver o problema inicialmente proposto.

Uma proposta interessante feita por DRETTZ (1992) é a de se fazer análises e comparações de cada uma das 100 replicações que se fez com o modelo. Esta medida tem por objetivo se avaliar, para cada uma das 100 replicações, a respeito de cada uma das características do modelo, bem como

## 10. ANÁLISE E APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

### 10.1. Considerações iniciais

Ao longo de todo o trabalho, o que se pretendeu foi estabelecer uma metodologia para que se possa chegar a resultados confiáveis, evitando-se um gasto desnecessário de tempo e recursos. Nesta fase o modelador e usuário já terão um modelo verificado e válido, estarão conduzindo experimentos e para cada um desses experimentos, estarão obtendo informações que deverão ser analisadas, interpretadas e servirão como base para a tomada de decisão.

Após a análise os resultados obtidos devem ser apresentados na forma de um relatório e serão expostos àqueles que vão tomar as decisões.

### 10.2. Análise dos resultados

Para a análise dos resultados os softwares mais recentes emitem relatórios completos e gráficos, como foi visto nas *figuras 4.1 e 4.2*. Esses relatórios apresentam os dados para cada replicação, de maneira que se possa analisá-los estatisticamente. É importante que essa análise estatística seja feita, e que se leve em consideração todos os parâmetros importantes para a análise, como visto no capítulo anterior, a exemplo da média, desvio padrão e intervalo de confiança.

Nessa etapa do trabalho o modelador deve mostrar ao usuário a importância da interpretação estatística dos dados gerados, mas ao mesmo tempo, juntamente com o usuário não podem se esquecer do objetivo principal do estudo da simulação, ou seja, o objetivo principal do trabalho não é o de se interpretar resultados estatísticos, mas sim o de se resolver o problema inicialmente proposto.

Uma proposta interessante feita por DIETZ (1992), e o de se fazer anotações a respeito de cada uma das experimentações que se fizer com modelo. Essa medida tem por objetivo se manter uma memória a respeito de cada uma das modificações feitas no modelo, bem como

dos resultados gerados. Essas anotações também devem ser mantidas de maneira a possibilitar que todo o desenrolar da análise possa ser reconstituído se necessário.

Dessa forma, de acordo com o problema definido inicialmente, pode-se dar a seguir algumas sugestões para essa análise.

### **10.2.1. Aumento da linha de produção para atender acréscimo de demanda**

Para este caso, todos os meios produtivos que se julga serem capazes de atender à nova demanda devem ser colocados no modelo. A quantidade de peças produzidas é reportada a cada experimentação, dessa forma é fácil para o usuário concluir quantas máquinas, operadores e etc, vai precisar.

A simulação propicia a possibilidade de se observar imediatamente qual o efeito sobre o número de peças produzidas de algumas experimentações, como por exemplo pode-se adicionar um operador à linha de produção e verificar se proporcionalmente houve um incremento na saída de peças que justifique essa decisão. Pode-se adicionar uma máquina à linha e verificar se é justificada sua aquisição. Pode-se trocar simplesmente as máquinas de posição e se verificar qual o efeito.

### **10.2.2. Análise de gargalos**

Essa análise pode ser feita pela observação das taxas de utilização dos equipamentos ou introduzindo-se pulmões intermediários, que seriam estoques de peças entre operações ou filas entre operações. Aquelas máquinas ou equipamentos cujos pulmões estão sendo acumulados de peças, são candidatos a gargalo. Segundo BORENSTEIN (1998), esses gargalos podem ser aceitos até o ponto em que a quantidade de peças produzidas numa unidade de tempo (produtividade), seja aquela pretendida.

O usuário deve então analisar como eliminar esse gargalo, essa decisão pode ser passar pela melhoria do processo de modo a diminuir os tempos de operação como: utilização de ferramentas mais adequadas, treinamento do operador, utilização de paletes para diminuir os tempos de colocação e retirada de peças dos dispositivos, ou mesmo a aquisição de outro equipamento. A vantagem da simulação neste tipo de análise, é que se pode observar os resultados de imediato, e para cada uma das decisões tomadas quais seriam os *outputs* gerados.

### **10.2.3. Análise de layout**

Na análise de layout os recursos de animação serão bastante úteis, pois permitirão pela maior interação com o usuário, que este veja literalmente quais as mudanças de layout que poderão ser feitas de maneira a melhorar o desempenho da produção. Assim, poderá verificar quais as distâncias percorridas pelos operadores para cada uma das alternativas, mudar a posição das máquinas, aumentar ou diminuir os espaços das instalações, verificar quais as áreas de circulação necessárias, qual a movimentação das peças e etc. Todas essas mudanças geram variação nos *outputs*, como no throughput da peças, WIP, taxa de ocupação dos equipamentos e etc.

### **10.2.4. Análise de material em processo e lead-time**

O material em processo (WIP) pode ser introduzido no programa como uma variável, assim sendo, a cada uma das experimentações, e a cada uma das replicações o WIP poderá ser analisado. Assim sendo, todas as mudanças que fizerem na linha de produção relacionadas com a redução de lead-time, afetarão o WIP e em conseqüência serão imediatamente reportadas. Desta forma, mesmo que o problema não seja especificamente o de se analisar o WIP e lead-time, a simulação pode sempre gerar resultados, que permitem a análise desses parâmetros.

Assim sendo, o WIP e lead-time serão afetados por: todos os acréscimos de máquinas ou operadores; qualquer ganho de tempo que se obtiver em redução da movimentação pelo estudo do layout; tempos de inspeção; tempos em que as peças estão aguardando a operação; redução nos tempos de operação; redução nos tempos de parada das máquinas e etc.

É importante salientar o estudo que deve ser feito sobre os tempos de operação, onde um estudo aprofundado é necessário tendo em vista principalmente:

- a redução dos tempos de troca de ferramentas pela utilização de ferramentas de metal duro, ferramentas de aço rápido revestidas, melhoria na afiação de ferramentas, reprojeto ferramentas com corte inadequado, utilização de fluidos de corte e etc;
- uma revisão nos parâmetros de usinagem, onde se vai verificar se estão de acordo com a máquina e com o material que está sendo usinado;
- revisão nos dispositivos de fixação, onde se deve considerar o melhor aproveitamento possível da máquina e redução dos tempos de montagem e desmontagem pelo operador.

### 10.3. Apresentação dos resultados

Nessa última fase do estudo de simulação, os resultados da simulação normalmente são apresentados à alta gerência para tomada de decisão. Essa apresentação poderá ser feita através de um relatório e de uma exposição em conjunto.

O relatório com os resultados da simulação deve conter todos os dados que o modelador e o usuário julgem ser importantes para demonstrar e apoiar as alternativas para tomada de decisão. Como o relatório será o documento que vai permanecer como um registro de todo o trabalho é interessante que seja o mais completo possível, e que em sua conclusão as alternativas para tomada de decisão estejam bem claras.

Um dos aspectos que deve ser considerado na apresentação dos resultados é que a apresentação tem que ser feita de maneira a ser entendida pelos responsáveis pela tomada de decisão. Neste aspecto, segundo GAZZINELLI et al. (1996), a animação vai se constituir num recurso fundamental por auxiliar tanto na apresentação quanto no convencimento quanto aos resultados obtidos.

Como sugestão, alguns itens que poderiam constar do relatório seriam:

- como foram coletados os dados e quais foram os dados coletados, julgados importantes para a construção do modelo. Talvez seja importante que as planilhas utilizadas sejam conservadas para futuras consultas;
- em que base foi construído o modelo;
- como se chegou à conclusão que o modelo é válido. Essa informação é importante para a tomada de decisão;
- é importante anexar um sumário das experimentações, que constituirão um histórico do estudo e também vão ajudar na tomada de decisão e talvez em uma possível necessidade de reconstituição;
- os resultados dos estudos de cada uma das alternativas, bem como um sumário de cada um dos relatórios gerados, também poderão ser úteis no caso de se precisar recorrer a novas propostas de estudo.

Se o estudo de simulação foi conduzido juntamente com o usuário, e sua participação foi bastante interativa com o modelador, a fase da apresentação dos resultados será mais fácil, constituindo-se simplesmente na exposição formal dos resultados. Se a gerência que tomará as

decisões não pertenciam à equipe de estudo, é interessante que periodicamente, durante o desenvolvimento dos trabalhos, esta seja informada de modo a acompanhar o andamento do processo, assim, ao final a apresentação dos resultados será melhor entendida e não gerará frustrações.

É interessante também, que haja uma exposição para a gerência envolvida. Nessa exposição, bem como no relatório, recomenda-se que seja explicada a terminologia técnica utilizada na simulação, e que se use somente aquela que seja imprescindível ao entendimento do que está sendo proposto. Os softwares que dispõem de animação serão bastante úteis nessa fase, pois os gerentes envolvidos poderão literalmente ver quais são as alternativas possíveis e quais são os outputs gerados por cada uma dessas alternativas, auxiliando na tomada de decisão.

#### 10.4. Considerações finais

Neste capítulo foi visto como se deve conduzir a análise dos resultados, também foram dadas algumas sugestões de análises que podem ser conduzidas na área de fabricação em lotes. Foram também apresentadas algumas sugestões de itens que poderiam constar do relatório final, bem como a respeito de como se proceder à apresentação final.

Durante o decorrer de todo o trabalho ficou evidenciada a importância da interação entre o modelador e usuário durante o decorrer de todo o projeto de simulação. Sem o envolvimento do usuário a validação se torna mais difícil e os resultados podem não ser convincentes. Sem o envolvimento do modelador o conhecimento do sistema e conseqüentemente sua representação através do modelo podem ser prejudicados.

Com o objetivo de quantificar a intensidade dessa relação entre o usuário e o modelador ao longo dos trabalhos, o *quadro 10.1*, apresenta uma sugestão do grau de envolvimento do modelador e usuário em cada uma das fases do projeto de simulação, onde a participação de um ou outro foi classificada como intensa (I) ou moderada (M).

Etapa do projeto	Participação do Modelador	Participação do Usuário
Definição do problema e de um plano de estudo	I	I
Delineamento inicial da linha de produção	I	I
Coleta de dados relativos à linha a ser modelada	M	I
Análise dos dados coletados	I	M
Construção do modelo computacional	I	M
Verificação do modelo	I	M
Validação do modelo	I	I
Experimentação (definição do período de aquecimento)	I	M
Experimentação (definição do número de replicações)	I	M
Experimentação (estimativa dos resultados)	I	I
Análise e apresentação dos resultados	I	I

**Quadro 10.1:** Grau de envolvimento do usuário e modelador nas fases do projeto de simulação

## 11. EXEMPLO DE APLICAÇÃO

### 11.1. Considerações iniciais

O objetivo do presente capítulo é o de apresentar um problema de estudo de simulação hipotético referente à instalação de uma ou mais linhas de produção para fabricação de um determinado produto. Neste exemplo, a empresa necessitaria fazer uma análise de investimento para saber se a aquisição de equipamentos, bem como a contratação do pessoal, necessário à fabricação de mais um produto é viável economicamente. O ponto de partida para a análise dessa viabilidade é determinar quais e quantos são esses equipamentos e quantos operadores seriam necessários.

A resposta a esse tipo de problema envolve um grande número de variáveis e dados, os quais teriam que ser reunidos e analisados, para que a empresa obtivesse a resposta necessária e possa tomar sua decisão. Exatamente devido essa complexidade, como exposto no início deste trabalho, a simulação computacional aparece como uma das ferramentas apropriadas, podendo proporcionar uma resposta bastante confiável num prazo reduzido de tempo.

Para esse estudo de simulação será utilizada a metodologia exposta nos capítulos anteriores, sempre levando em consideração o tipo de problema que está sendo analisado. A seqüência utilizada no estudo vai ser a mesma proposta na *figura 3.1*.

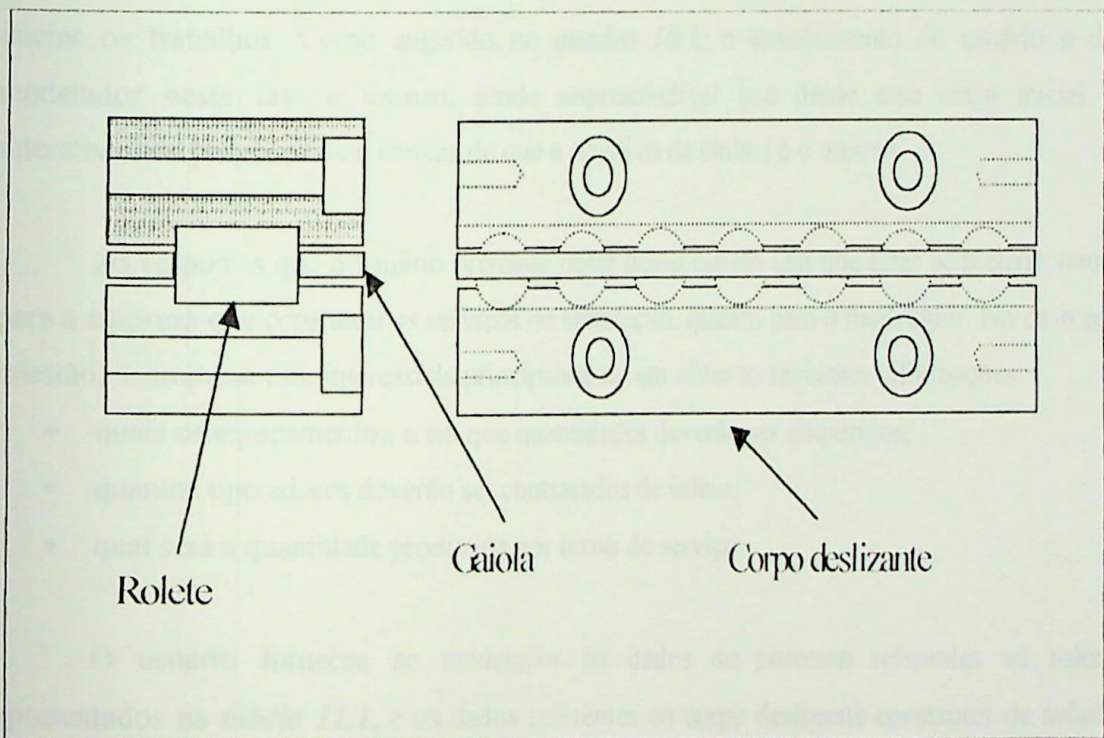
Para estudo de simulação foi utilizado o software PROMODEL na sua versão 4.0, da PROMODEL CORPORATION, licenciado para uso da ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ, no Departamento de Produção.

O produto a ser fabricado seria um rolamento deslizante exposto na *figura 11.1*. A produção mínima desejada pela empresa é de 80 unidades por turno de produção. É importante esclarecer que a produção desejada pela empresa é um dado que servirá de base para o início dos trabalhos, mas poderá vir a sofrer modificações, para mais ou para menos, de acordo com a decisão do usuário. Essa decisão poderá ocorrer, por exemplo, se no decorrer da

simulação descobrir-se que para atingir essa produção será necessário adquirir um equipamento cujo valor torne inviável o acréscimo de produção. Por outro lado, pode-se concluir que com menos máquinas seria possível obter uma produção maior que essa, desde que haja demanda para isso.

Todas essas decisões são tomadas pelo usuário, daí a importância da plena interação entre este e o modelador. Como vai ser demonstrado no decorrer do presente exemplo de aplicação é muito importante que o usuário participe de todas as fases dos trabalhos de simulação, de modo que ao final do projeto, o processo de validação seja efetivo e a simulação traga benefícios reais à empresa.

O rolamento é composto de três peças principais: o corpo deslizante, roletes e gaiola. As linhas de produção seriam destinadas ao corpo deslizante e roletes, sendo que a gaiola é terceirizada.



*Figura 11.1:* Rolamento deslizante

É importante esclarecer que não houve preocupação com a precisão nas especificações, projeto, dimensionamento, processo de fabricação, etc, do rolamento deslizante, tendo em vista que não é esse o objetivo do presente trabalho, mas sim o do estudo

da simulação. Portanto, os dados utilizados se prestam somente à finalidade de mostrar as diversas etapas da metodologia.

Outro aspecto importante é o de que a apresentação do presente exemplo de aplicação é resumida, não tendo a pretensão de esgotar o assunto, tendo em vista que um projeto de simulação real para estudo de um problema semelhante seria bem mais extenso e profundo, podendo por si constituir objeto de um outro trabalho de dissertação.

## 11.2. Definição do problema e de um plano de estudo

O problema a ser estudado é muito comum na conjuntura atual, trata-se de saber quais serão os meios necessários para a instalação de uma ou mais linhas de produção tendo em vista atender a uma nova demanda imposta pelo mercado. O modelador deverá discutir com o usuário a definição exata do problema, quais são os dados de que precisa, qual o tempo destinado aos trabalhos de simulação e quais são outras informações importantes para se iniciar os trabalhos. Como sugerido no *quadro 10.1*, o envolvimento do usuário e do modelador nesta fase é intenso, sendo imprescindível que desde essa etapa inicial a interatividade proporcione a certeza de que o objetivo de ambos é o mesmo.

As respostas que o usuário pretende obter desse estudo têm que estar bem claras tanto para a empresa que contratou os serviços de simulação, quanto para o modelador. No caso em questão, a empresa está interessada principalmente em obter as seguintes informações:

- quais os equipamentos, e em que quantidades deverão ser adquiridos;
- quantos operadores deverão ser contratados de início;
- qual será a quantidade produzida por turno de serviço.

O usuário forneceu ao modelador os dados de processo referentes ao rolete apresentados na *tabela 11.1*, e os dados referentes ao corpo deslizante constantes da *tabela 11.2*. A gaiola será confeccionada por terceiros, devendo ser entregue nas quantidades e prazos impostos pela fábrica. A tabela fornece uma descrição da operação, a máquina em que é feita, o tempo de operação em minutos e quantas peças são usinadas ao mesmo tempo naquela determinada operação.

OP	DESCRIÇÃO	MÁQUINA	Tempo (min)	Qt por operação
10	Torneamento	Torno CNC c/ alimentador de barra	0,5	1
20	Tratamento térmico em meio gasoso	Fornos de tratamento térmico	225	400
30	Retífica cilíndrica	Retífica centerless	0,17	1
40	Retificar no comprimento	Retificadora plana vertical	16	100
50	Inspeção	Bancada	15	100

Tabela 11.1: Dados referentes ao rolete

OP	DESCRIÇÃO	MÁQUINA	Tempo total	Tempo homem	Tempo máquina	Qt por operação
10	Cortar no comprimento	Serra automática	82	20	62	6 barras/ 246 pç
20	Usinar uma face	Fresadora vertical 1	23	15	8	40
30	Usinar um lado	Fresadora vertical 2	2,4			6
40	Usinar o outro lado	Fresadora vertical 3	2,4			6
50	Usinar os topos	Fresadora horizontal duplex	2,9			6
60	Usinar outra face e rasgar	Centro de usinagem CNC 1	5,9	0,5	5,4	6
70	Furar e rebaixar	Centro de usinagem CNC 2	16	1,0	15	10
80	Furar e roscar (2 lados)	Centro de usinagem CNC 3	8	2,0	6,0	12
90	Tratamento térmico em meio gasoso	Fornos de tratamento térmico	220			300
100	Retificar as faces (ambas)	Retificadora plana vertical 1	23,4			20
110	Retificar um lado	Retificadora plana vertical 2	2,7			6
120	Retificar o outro lado	Retificadora plana vertical 3	14,5			40
130	Retificar ambos os topos	Retificadora plana vertical 4	12			20
140	Retificar o rasgo	Retificadora plana tangencial	7,5			5
150	Inspeção	Bancada	2,0			1
160	Montagem	Bancada	0,4			1

Tabela 11.2: Dados referentes ao corpo deslizante

Quando a operação não necessitar do emprego do operador durante o tempo total de sua execução, foi feito o desmembramento em tempo homem e tempo máquina. Tomando

como exemplo a operação 70 que é de furar e rebaixar, esta será executada no centro de usinagem 2, o tempo total de operação é de 16 minutos para usinagem de 10 peças por vez. Esse tempo total engloba o carregamento e descarregamento das peças, que é executada pelo operador em um minuto mais a operação de usinagem que é executada pela máquina em 15 minutos. Esse tempo pôde ser desmembrado tendo em vista não haver necessidade do operador dar assistência à máquina enquanto está sendo executada a usinagem, ou seja, o recurso operador durante o tempo em que a máquina está trabalhando está liberado para executar outras tarefas.

### 11.3. Confeção do esboço do layout a ser modelado

O layout a ser adotado será o por produto, ou seja o layout em linha, tendo em vista tratar-se de uma produção seriada e repetitiva que vai gerar grande volume de produção, como o usuário deseja. Pela própria natureza do produto, a decisão mais coerente será a de se adotar duas linhas de produção independentes, uma para o rolete e outra para o corpo deslizante.

Nessa fase do trabalho o modelador vai aproveitar para aprofundar seus conhecimentos a respeito do sistema a ser modelado, e juntamente com o usuário conhecedor do processo, vão definir o melhor layout. Por essa razão o envolvimento de ambos, como sugere o *quadro 10.1*, deve ser intenso nessa fase.

O esboço do layout a ser adotado vai depender como já visto anteriormente do balanceamento da linha, que vai determinar através do número de peças que se deseja produzir por turno e dos tempos destinados a cada operação, o número de estações de trabalho e, em conseqüência, o arranjo físico das máquinas em cada uma dessas estações de trabalho. Esse balanceamento servirá de base para o início do trabalho de modelagem, naturalmente que poderá sofrer alteração no decorrer do trabalho porque a metodologia utilizada para determiná-lo não leva em consideração os tempos de movimentação e os tempos de espera devido a um determinado recurso estar ocupado.

Uma das preocupações que o usuário e modelador devem ter é de que o layout seja compatível com a configuração áreas existentes, ou caso não existam, que sejam compatíveis com as áreas disponíveis para construção das instalações. Poderá haver necessidade por exemplo de se dividir uma linha de produção pela impossibilidade de se reunir todas as

máquinas necessárias em uma mesma instalação. Mais uma vez se enfatiza a importância da participação do usuário na modelagem.

Uma das decisões que o usuário pode tomar no início do trabalho é de que o tratamento térmico, a exemplo do que acontece normalmente, vai se constituir numa unidade a parte, pois por sua natureza decidiu-se que não fará parte do layout das linhas de produção, mas sim se constituirá em um setor prestador de serviços. Apesar de não pertencer à linha de produção, o tratamento térmico tem que ser considerado durante os trabalhos de simulação, e será modelado juntamente com as linhas.

### ***11.3.1. Linha de produção dos corpos deslizantes***

Escolheu-se como ponto de partida para o estabelecimento do layout a linha de produção do corpo deslizante, por ser essa peça a de fabricação mais complexa, envolvendo um número maior de operações e máquinas, sendo portanto, a peça que vai determinar o ritmo de produção, ou seja, a linha de roletes vai ter que acompanhar o número de corpos deslizantes produzidos.

Para a linha de produção dos corpos deslizantes, o tempo por peça será calculado considerando-se um turno de trabalho de 480 minutos (turnos de 8 horas), sendo que a quantidade de peças necessárias por turno será de 160 corpos deslizantes (80 rolamentos vezes 2 corpos deslizantes por rolamento).

Assim sendo, o tempo por peça será de 3 min/peça, conforme (11.1).

$$\text{tempo por peça} = \frac{480}{160} = 3 \text{ min/peça} \quad (11.1)$$

Se o tempo por peça é de 3 min, o somatório dos tempos de cada estação de trabalho não deve exceder esse valor. A *tabela 11.3* mostra como seriam distribuídas essas estações de trabalho.

Um problema que se pode observar nesse balanceamento inicial é que a estação número 1 é constituída por 6 operações, isto significa que ao se alocar um operador para essa estação, o mesmo teria que cuidar de 6 máquinas ao mesmo tempo, e como o tempo de

movimentação entre máquinas ainda não foi considerado, isto daria uma sobrecarga a esse operador, o que transformaria essa estação num gargalo. Em consequência, com o objetivo de se dar uma divisão mais prática às estações de trabalho, decidiu-se passar a operação 60 para a estação 2. Desta forma também se estaria agrupando os três centros de usinagem dando mais coerência ao balanceamento. A *tabela 11.4* mostra a distribuição final das estações de trabalho.

Estação de trabalho	Operação	Máquina	Tempo por operação	Quantidade por operação	tempo/peça	Tempo da estação de trabalho
1	10	Serra automática	20	246	0,08	2,92
	20	Fresadora vertical 1	23	40	0,58	
	30	Fresadora vertical 2	2,4	6	0,40	
	40	Fresadora vertical 3	2,4	6	0,40	
	50	Fresadora hor duplex	2,9	6	0,48	
	60	Centro de usinagem CNC 1	5,9	6	0,98	
2	70	Centro de usinagem CNC 2	16	10	1,60	2,27
	80	Centro de usinagem CNC 3	8	12	0,67	
3	100	Retificadora plana vert 1	13,4	20	0,67	1,48
	110	Retificadora plana vert 2	2,7	6	0,45	
	120	Retificadora plana vert 3	14,5	40	0,36	
4	130	Retificadora plana vert 4	12	20	0,60	2,10
	140	Retificadora plana tang	7,5	5	1,50	

*Tabela 11.3:* Distribuição inicial das estações de trabalho no balanceamento

Estação de trabalho	Operação	Máquina	Tempo por operação	Quantidade por operação	Tempo por peça	Tempo da estação de trabalho
1	10	Serra automática	20	246	0,08	1,94
	20	Fresadora vertical 1	23	40	0,58	
	30	Fresadora vertical 2	2,4	6	0,40	
	40	Fresadora vertical 3	2,4	6	0,40	
	50	Fresadora hor duplex	2,9	6	0,48	
2	60	Centro de usinagem CNC 1	5,9	6	0,98	3,25
	70	Centro de usinagem CNC 2	16	10	1,60	
	80	Centro de usinagem CNC 3	8	12	0,67	
3	100	Retificadora plana vert 1	13,4	20	0,67	1,48
	110	Retificadora plana vert 2	2,7	6	0,45	
	120	Retificadora plana vert 3	14,5	40	0,36	
4	130	Retificadora plana vert 4	12	20	0,60	2,10
	140	Retificadora plana tang	7,5	5	1,50	

*Tabela 11.4:* Distribuição final das estações de trabalho no balanceamento

O tempo da estação de número 2, que é o grupamento de centros de usinagem, ultrapassou o tempo por peça. Durante o trabalho de simulação esse problema poderá ser contornado, isto porque os tempos homem e máquina para esses equipamentos são diferentes, e também há a possibilidade de se acrescentar mais uma máquina à linha.

Utilizando-se o PROMODEL para construção do layout, tem-se a distribuição das estações de trabalho que serão mostradas posteriormente na fase de modelagem. Como será visto o tratamento térmico não será considerado como uma estação de trabalho, pelas razões já levantadas anteriormente.

Apesar de serem previstas operações de montagem e inspeção, não se considerou esses postos no balanceamento da linha de corpos deslizantes, isto devido ao reduzido o tempo de montagem e inspeção que é de 2,4 min. Se houver necessidade, na fase de experimentação simplesmente se poderá acrescentar mais um posto de trabalho envolvendo essas operações, caso o operador do posto 4 não possa realizá-las, por restringir as quantidades requeridas.

### 11.3.2. Linha de produção dos roletes

A linha de produção dos roletes em sua versão final, será função da produção de corpos deslizantes, no entanto, para se estabelecer o ponto de partida, o balanceamento terá como base a produção de 560 peças (80 rolamentos vezes 7 roletes por rolamento). Desta forma o tempo por rolete será de 0,86 minutos por peça, com indicado em (11.2).

$$\text{tempo por peça} = \frac{480}{560} = 0,86 \text{ min/peça} \quad (11.2)$$

Como o os tempos de cada estação de trabalho, não podem exceder a 0,86 minutos, a **tabela 11.5**, mostra o cálculo do número de estações de trabalho para o rolete. Neste caso a inspeção será considerada, tendo em vista que o mesmo operador que executa as demais operações poderá fazê-la. O tempo total da estação de trabalho excedeu em 0,12 min o tempo por peça, significando provavelmente que serão necessários dois operadores para essa estação de trabalho.

Estação de trabalho	Operação	Máquina	Tempo por operação	Quantidade por operação	tempo/peça	Tempo da estação de trabalho
1	10	Torno CNC	0,5	1	0,5	0,98
	30	Retífica centerless	0,17	1	0,17	
	40	Retificadora plana vertical	16	100	0,16	
	50	Inspeção	15	100	0,15	

**Tabela 11.5:** Distribuição das estações de trabalho no balanceamento da linha do rolete

#### 11.4. Coleta de dados

Como se trata do estudo de simulação para fabricação de um produto ainda inexistente, e cujas linhas de produção também não estão implantadas, os dados referentes ao processo, como: operações, tempos, máquinas mais indicadas, seqüência das operações, quantidade a ser usinada por vez, etc, seriam coletadas com especialistas da área de produção.

Se a modelagem fosse feita sobre um sistema já existente, haveria necessidade de se coletar vários dados junto à linha de produção. Como sugerido no *quadro 10.1*, apesar dessa coleta de dados ser feita normalmente pelo usuário, o modelador tem que dela participar para assegurar que os dados foram coletados da maneira correta. Por sua vez, apesar da análise dos dados ser essencialmente estatística, portanto é tarefa do modelador, é interessante que o usuário dela participe, de maneira a tomar conhecimento de como é feita essa análise, e também de participar na interpretação de seus resultados.

Alguns dados podem ser coletados com os fabricantes dos equipamentos, a exemplo das máquinas CNC, cujos representantes podem fornecer dados importantes como faixa de rotação, potência, velocidade de troca de ferramentas e etc. Os fabricantes de pastilhas de metal duro poderão fornecer dados para o processo como diâmetro de ferramenta, velocidade de corte e etc.

Neste caso em particular, é interessante lembrar que todos os dados serão determinísticos, diferente dos dados que seriam coletados para estudo de uma linha de fabricação já existente. Como os dados que entram na modelagem não são de natureza estocástica, os resultados da simulação também não o serão, isto vai influenciar na

experimentação do modelo, pois não haverá necessidade de replicações, já que o resultado de todas elas seria o mesmo.

Apesar dessa característica do exemplo de aplicação, em que os dados que dão entrada no modelo são determinísticos, a título de ilustração o tempo da operação 40 do rolete (retificar no comprimento), será introduzido também de forma estocástica. Esse caso será apresentado no item 11.7.4 (efeito da introdução de dados estocásticos na linha do rolete), para que se possa observar quais os efeitos sobre os resultados e também para demonstrar como se determinar o número de replicações necessárias se acaso os dados dessem entrada de forma estocástica.

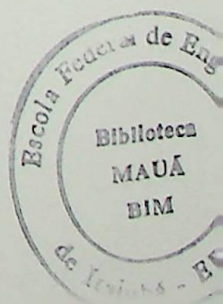
### 11.5. Construção do modelo computacional

Uma das premissas básicas é a de que o modelo deve ser o mais simples possível. No caso em questão uma decisão que simplifica bastante a modelagem é a de estudar separadamente a linha de produção do rolete e do corpo deslizante. Essa simplificação tornou-se possível porque a partir das quantidades produzidas de corpos deslizantes, a produção de roletes será uma conseqüência, portanto não há necessidade de se fundir as duas linhas, o que poderia tornar a modelagem mais trabalhosa e demorada.

Como sugerido no *quadro 10.1*, esta é uma fase em que o modelador vai atuar intensamente, pois é dele a tarefa de construir o modelo computacional, no entanto, é necessário que o usuário também seja envolvido nessa etapa.

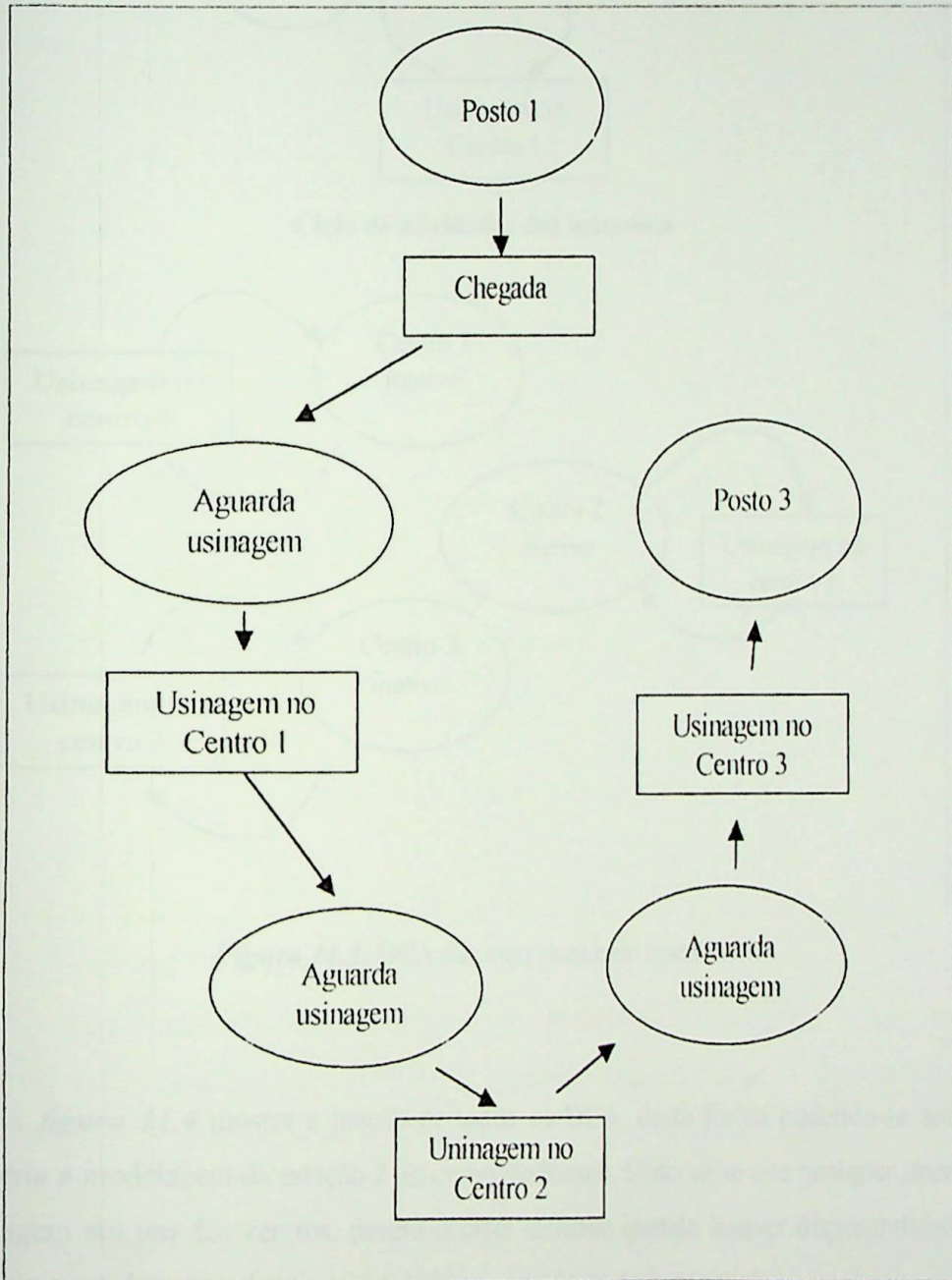
Como visto no capítulo <sup>7</sup> o DCA (diagrama do ciclo de atividades) é uma das maneiras que o modelador tem para facilitar a comunicação com o usuário, de modo que ambos possam utilizar-se de uma linguagem comum que seja de fácil entendimento e que possibilite principalmente ao usuário a compreensão da lógica da simulação. A título de ilustração para este exemplo de aplicação, será construído o DCA para a estação de trabalho 2 da linha de produção dos corpos deslizantes.

Como explanado anteriormente, o DCA deve ser construído por partes. Os centros de usinagem 1, 2 e 3, bem como o operador, são as entidades permanentes da estação 2, ou seja, são partes integrantes do sistema. A entidade temporária, aquela que entra e sai do sistema, é



a peça denominada corpo deslizante. O sistema é classificado como aberto em consequência de admitir entidades temporárias.

Os diagramas de ciclo de atividades da peça corpo deslizante, das máquinas e do operador podem ser vistos nas *figuras 11.2 e 11.3* respectivamente. Os retângulos representando o estado ativo e as elipses representando os estados passivos.



*Figura 11.2:* DCA do corpo deslizante

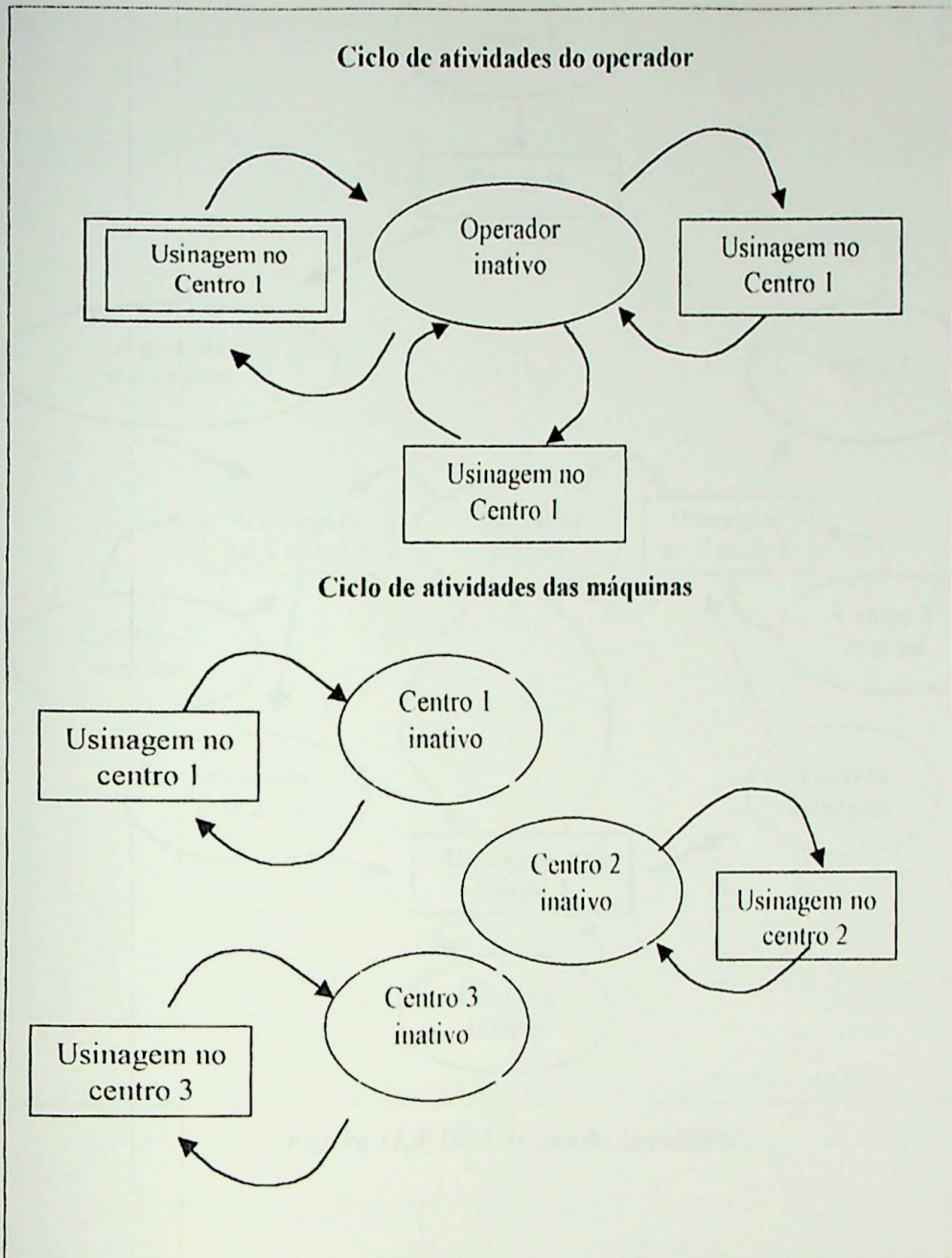


Figura 11.3: DCA das máquinas e do operador

A *figura 11.4* mostra a junção de todos os DCA, desta forma podendo-se analisar como seria a modelagem da estação 2 do corpo deslizante. Observa-se que qualquer operação de usinagem em um dos centros, deverá ocorrer somente quando houver disponibilidade de máquina e operador, e também a quantidade prevista de peças para aquela operação.

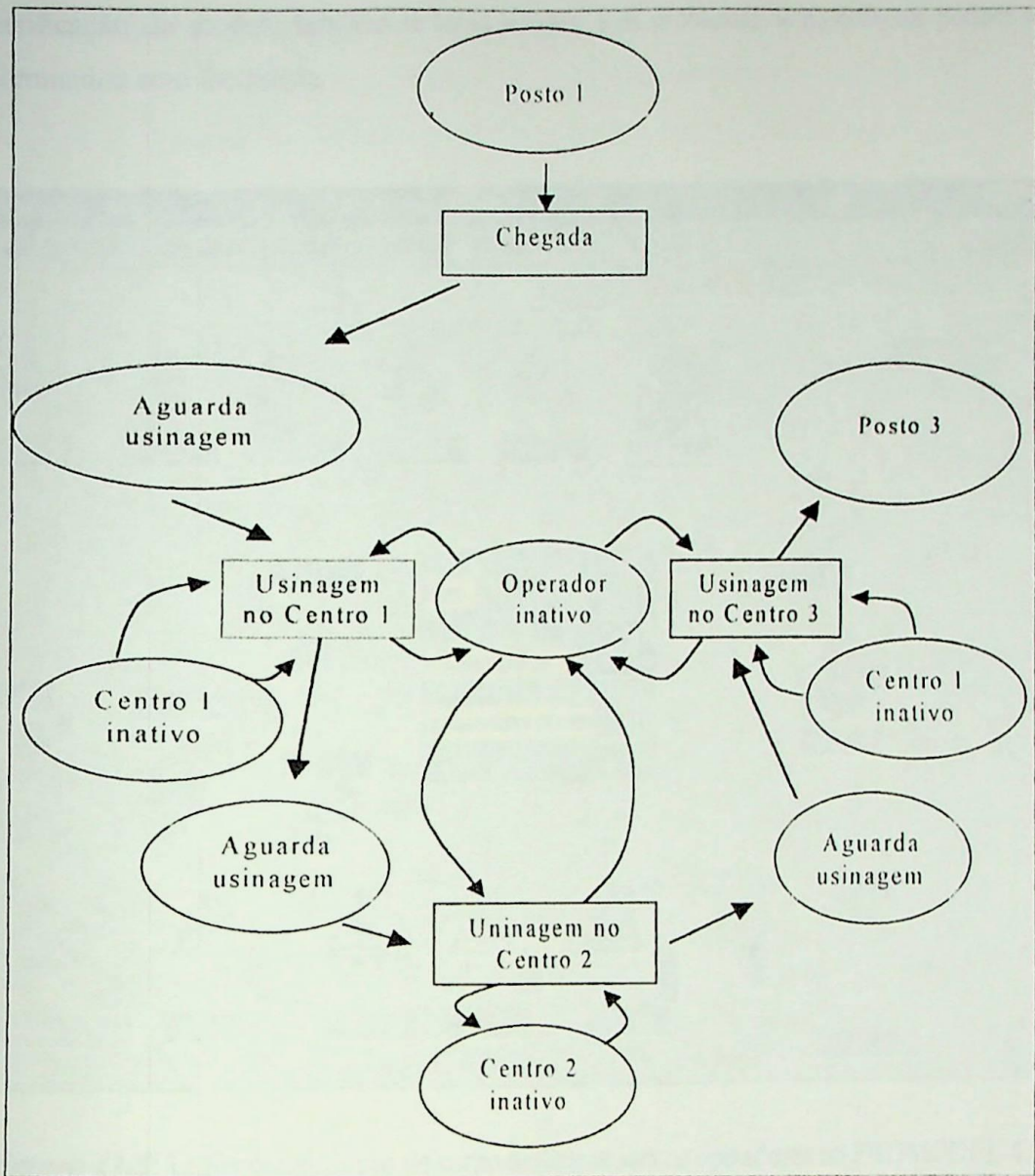


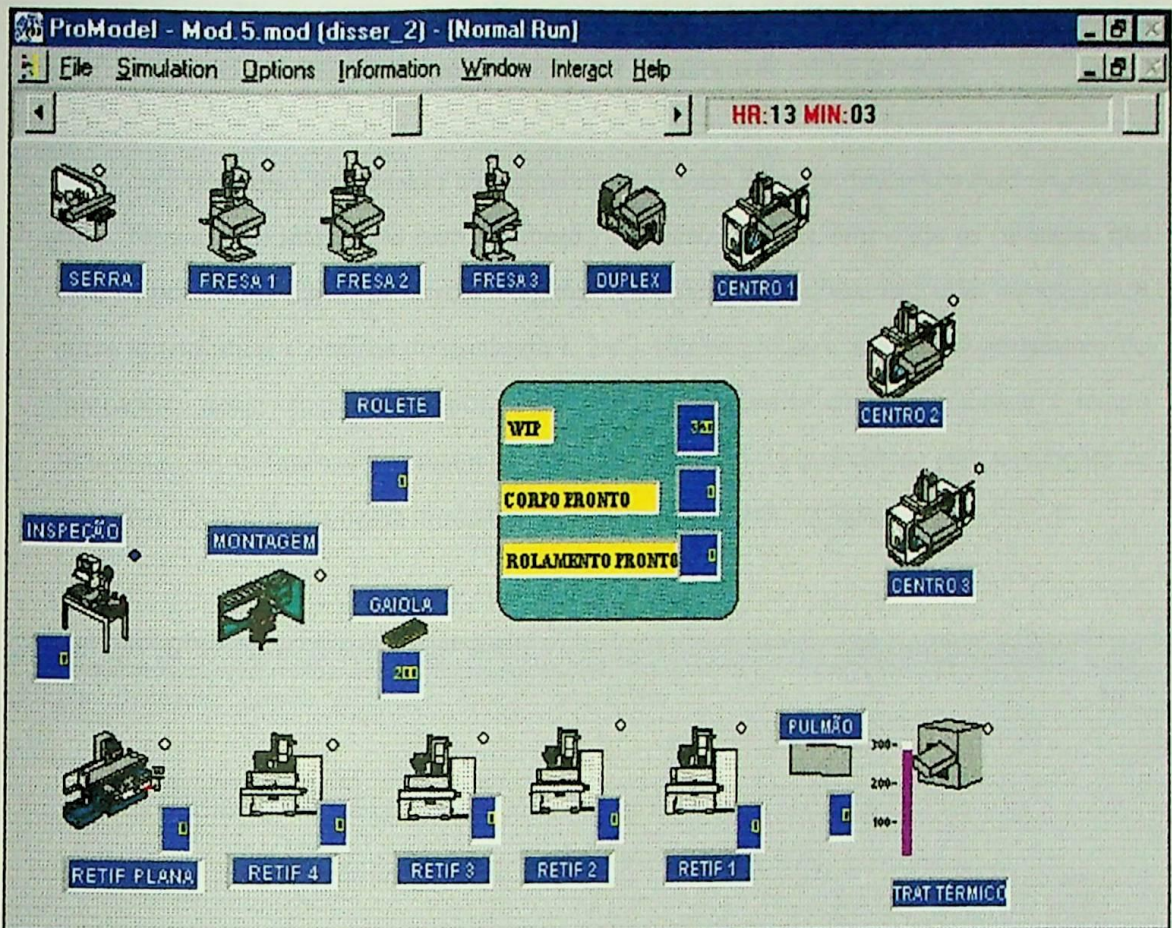
Figura 11.4: DCA da estação de trabalho 2

### 11.5.1. Modelagem da linha de produção do corpo deslizante

A modelagem do sistema foi feita com o software PROMODEL, que é bastante amigável, e é importante que comece de maneira bastante simples, como já explanado anteriormente, e aos poucos se vá adicionando outras entidades ao modelo.

A modelagem inicial da linha de produção do corpo deslizante, mostrada na *figura 11.5*, não possui operadores, ou seja, está operando sem os tempos mortos e de trânsito que seriam advindos da presença de operadores na linha. A linha foi modelada com uma unidade de cada máquina necessária. Como sua construção é simples, a consequência é que a etapa de

verificação do modelo também se torna simples, e os problemas de modelagem podem ser eliminados com facilidade.



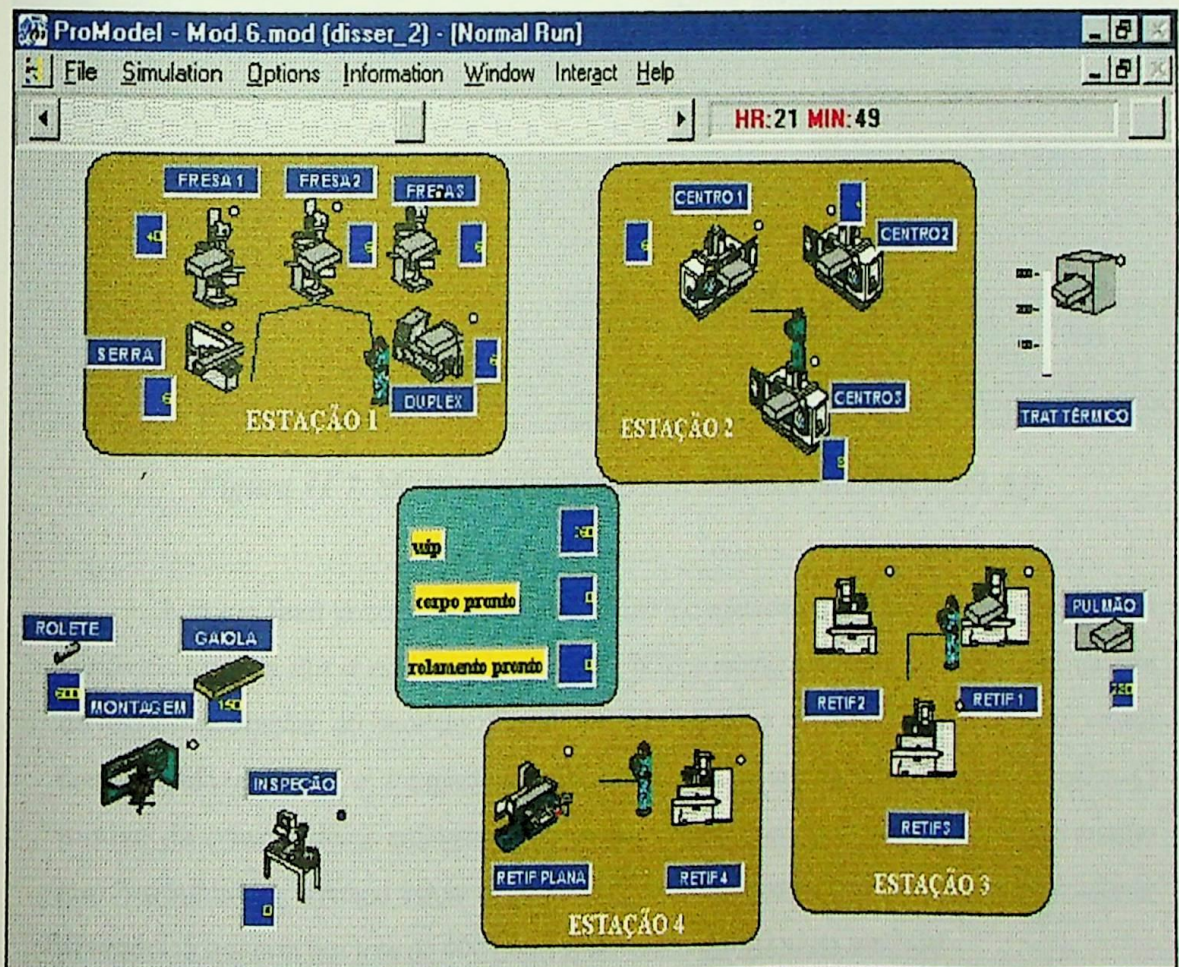
**Figura 11.5:** Linha de produção do corpo deslizante sem os operadores no PROMODEL 4.0

Observar que foi adicionada uma entidade virtual denominada PULMÃO, a finalidade dessa entidade é a de evitar o bloqueio da entidade tratamento térmico. O tratamento térmico realiza a operação de 300 corpos deslizantes por vez, e só pode ser reabastecido quando estiver totalmente desocupado. Desta forma toda linha após o tratamento térmico ficaria parada até que essa entidade estivesse vazia, para evitar que isto aconteça, criou-se uma entidade virtual denominada pulmão, com capacidade para 300 peças, a qual vai receber a descarga de todas as peças do tratamento térmico ao final da operação. O acréscimo de outro pulmão antes do tratamento térmico foi testado e não contribuiu para o aumento das quantidades produzidas, quer seja para o modelo com uma unidade de cada máquina ou na experimentação de duplicação.

Para essa simulação foram criadas três variáveis:

- *estoque em processo (wip)*: retrata a quantidade de peças existentes na linha;
- *corpo pronto*: retrata quantos corpos já foram produzidos pela linha;
- *rolamentos prontos*: retrata quantos rolamentos já foram montados (será a metade do número de corpos prontos e 1/7 do número de roletes prontos).

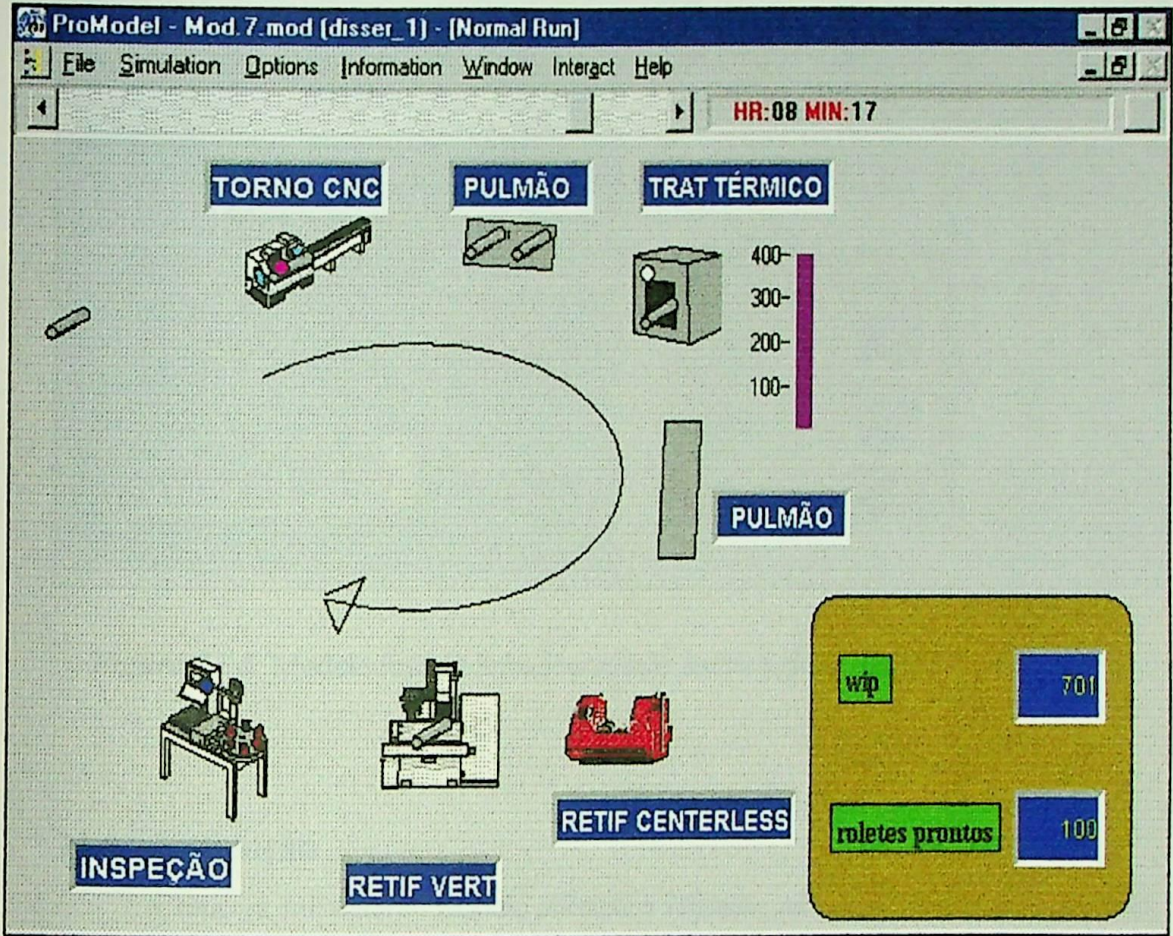
O próximo passo seria um aprimoramento dessa linha aproximando-a mais do sistema real. Nessa próxima etapa será adicionado o recurso operador bem como os percursos que esses operadores farão no layout. Algumas operações como aquelas realizadas nas máquinas serra automática e centros de usinagem 1, 2 e 3, não necessitam a intervenção permanente do operador, neste caso os tempos totais serão desmembrados em tempo homem e tempo máquina. As máquinas já estarão dispostas segundo o layout estabelecido para as estações de trabalho. O resultado dessa modelagem é aquele demonstrado na *figura 11.6*.



**Figura 11.6:** Modelo final do corpo deslizante elaborado no PROMODEL 4.0

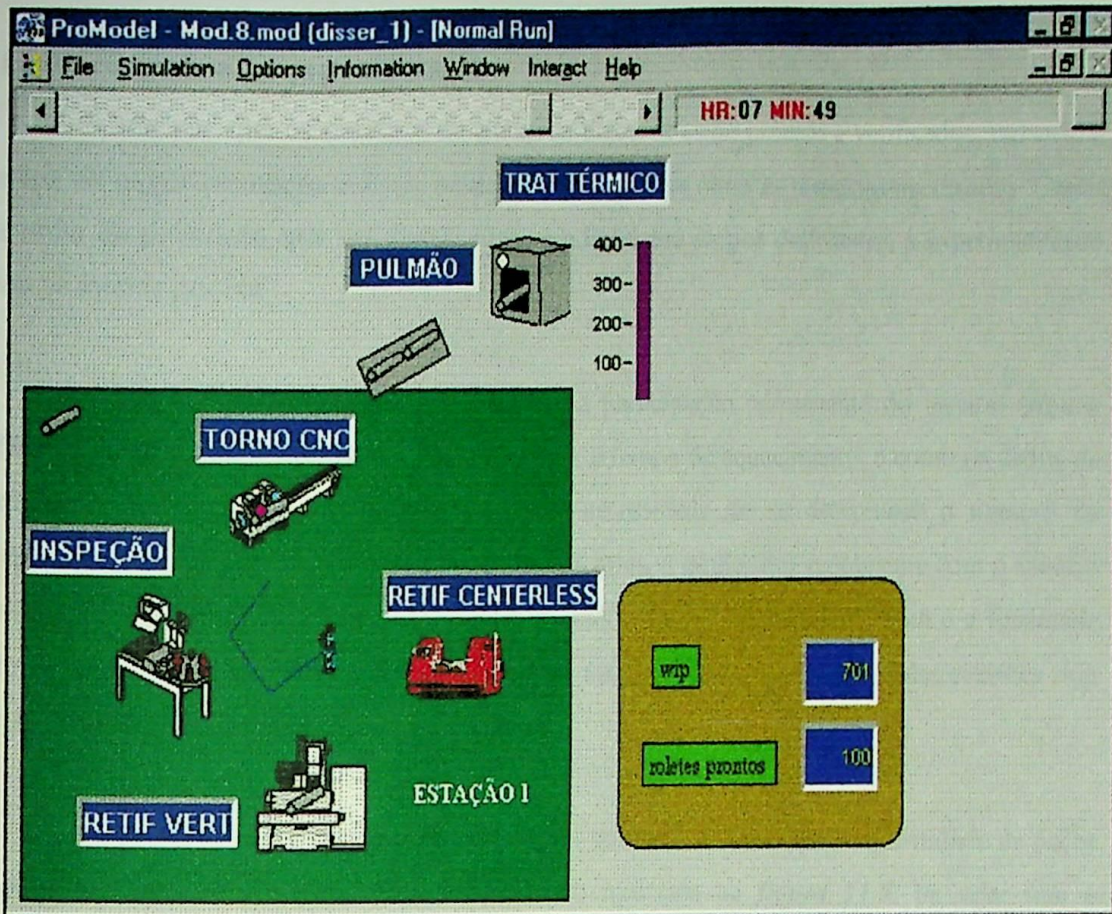
### 11.5.2. Modelagem da linha de produção do rolete

A modelagem da linha de produção do rolete da mesma forma que a do corpo deslizante, foi feita em duas etapas. A etapa inicial bastante simples e de fácil verificação é mostrada na *figura 11.7*.



**Figura 11.7:** Modelagem inicial do rolete elaborado no PROMODEL 4.0

A etapa final já com o layout estabelecido e o operador é mostrada na *figura 11.8*. As variáveis criadas são o *estoque em processo* (WIP) e *roletes prontos* que vão auxiliar na fase de experimentação do modelo. Como se pode observar foi criada uma entidade virtual denominada *pulmão*, e a capacidade dessa entidade é a mesma do tratamento térmico. O motivo da criação dessa entidade é o de permitir que o operador continue a produzir mesmo que o tratamento térmico esteja ocupado, dessa forma, quando o tratamento térmico estiver liberado já haveria um lote de 400 peças aguardando entrada nessa entidade.



**Figura 11.8:** Modelo final da linha de produção do rolete elaborado no PROMODEL 4.0

## 11.6. Validação

Como já foi visto no capítulo referente à validação, não há receita para essa etapa do trabalho, no entanto, a validação pode ser executada pelo próprio usuário, que através de seus conhecimentos a respeito do sistema e da experiência de outros colaboradores poderão comparar os resultados de sistemas similares já existentes com os do modelo.

Como todo o trabalho de simulação foi conduzido pelo modelador com a participação ativa do usuário, incluindo-se portanto a etapa de modelagem do sistema que a cada momento de seu desenvolvimento foi obtendo o aval do usuário, a etapa de validação terá grandes probabilidades de se desenvolver sem dificuldades.

Nesta etapa o modelador e o usuário, que já sabem quais informações são importantes para o estudo da viabilidade econômica, já terão uma boa idéia de quão representativo é o modelo, e estarão em condições de validá-lo.

### 11.7. Simulando experimentos

Uma vez que os modelos de ambas as linhas já estão prontos e verificados, passa-se à etapa de experimentação com os modelos, de modo a se obter as respostas necessárias. Como a linha de produção que vai ditar o ritmo é a linha dos corpos deslizantes, a experimentação vai se iniciar por ela.

Mais uma vez é necessário enfatizar a participação permanente do usuário (*figura 10.1*). Nessa etapa o modelador vai determinar o tempo de aquecimento, e como os dados de entrada são determinísticos, não vai haver necessidade de se determinar o número de replicações. Nas experimentações propriamente ditas, o modelador juntamente com o usuário vão definir se será necessário acrescentar operadores ou máquinas, tudo com o a finalidade de se alcançar os objetivos propostos. Em toda essa etapa estarão sendo tomadas decisões cuja viabilidade ou não é determinada pelo usuário.

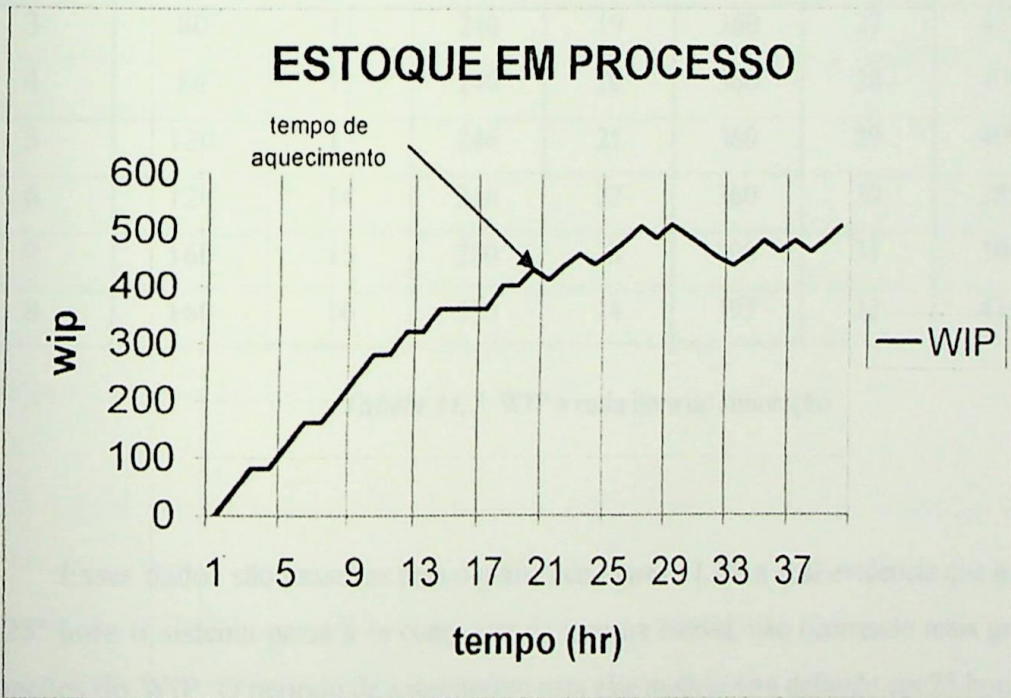
A primeira experimentação que se pode fazer é a de saber qual a quantidade de peças por turno, produzida pela linha de produção mostrada na *figura 11.5*, ou seja, sem a intervenção dos operadores. Dessa forma não se tem a restrição dos tempos de espera por operador e dos tempos de movimentação de peças, em consequência todos os tempos vão depender unicamente do estado da entidade máquina.

Para se saber qual a quantidade de peças produzidas em 8 horas de produção é necessário que as peças prontas sejam contadas após o tempo de aquecimento. A fim de se descobrir qual o período de aquecimento, ou seja, qual o tempo que deve ser desconsiderado porque a linha de produção está instável, tomar-se-á o valor da variável estoque em processo a cada hora, quando esta variável estiver estabilizada, isto significa que o sistema também estará. A *tabela 11.6* mostra quais as quantidades de peça existentes na linha para cada hora de simulação.

Colocando-se esses valores num gráfico, como mostra a *figura 11.9*, tem-se que a partir da 20ª hora o WIP começa a adquirir estabilidade. Não houve necessidade de se fazer replicações tendo em vista os dados que deram entrada serem determinísticos. Desta forma o tempo de aquecimento adotado será de 20 horas. Como o interesse é o saber qual a quantidade de peças produzida em um turno de 8 horas, a simulação será feita de 20 a 28 horas de trabalho.

Tempo (hr)	WIP	Tempo (hr)	WIP	Tempo (hr)	WIP	Tempo (hr)	WIP
1	0	11	280	21	411	31	470
2	40	12	320	22	435	32	450
3	80	13	320	23	456	33	435
4	80	14	360	24	437	34	455
5	120	15	360	25	458	35	480
6	160	16	360	26	480	36	460
7	160	17	360	27	505	37	480
8	200	18	400	28	484	38	460
9	240	19	400	29	508	39	480
10	280	20	430	30	489	40	505

**Tabela 11.6:** WIP a cada hora de simulação para a linha de corpos deslizantes sem operadores



**Figura 11.9:** Gráfico dos valores de WIP para cada hora de simulação

Executando-se a simulação, tem-se que com 20 horas de produção o número de rolamentos prontos é de 4 unidades (8 corpos). Para 28 horas de simulação o número de rolamentos produzidos foi de 77 unidades, em conseqüência tem-se que a quantidade de rolamentos produzidos por essa linha em um turno será de 73 unidades (77 - 4 unidades). Essa quantidade seria a produzida considerando-se uma unidade de cada uma das máquinas, um posto de inspeção e um de montagem.

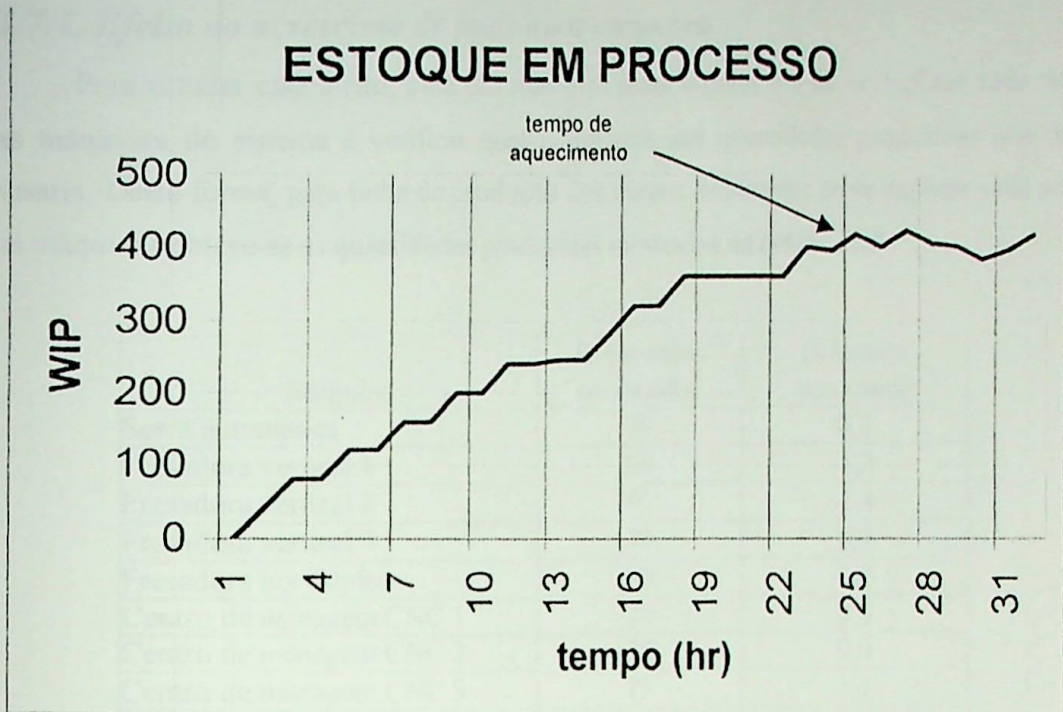
O próximo passo será o de introduzir os operadores em cada uma das estações de trabalho e ao mesmo tempo posicionar as máquinas de acordo com o layout estabelecido, como mostrou a *figura 11.6*.

Da mesma forma que anteriormente o período de aquecimento deve ser determinado. Para isso determina-se os WIP para cada hora de simulação. Os dados obtidos estão na *tabela 11.7*.

Tempo (hr)	WIP	Tempo (hr)	WIP	Tempo (hr)	WIP	Tempo (hr)	WIP
1	0	9	200	17	320	25	418
2	40	10	200	18	360	26	400
3	80	11	240	19	360	27	423
4	80	12	240	20	360	28	405
5	120	13	246	21	360	29	400
6	120	14	246	22	360	30	382
7	160	15	280	23	400	31	394
8	160	16	320	24	395	32	415

*Tabela 11.7:* WIP a cada hora de simulação

Esses dados são passados para o gráfico da *figura 11.10*, a qual evidencia que a partir da 25ª hora o sistema passa a se comportar de maneira estável, não ocorrendo mais grandes variações do WIP. O período de aquecimento para esse modelo será definido em 25 horas, em conseqüência somente a partir desse tempo os dados estatísticos a respeito do modelo estarão sendo computados pelo programa.



**Figura 11.10:** Gráfico dos valores de WIP para cada hora de simulação

Para se determinar a quantidade de rolamentos produzidos por essa linha, foram coletados os valores da variável *rolamentos prontos* na 25ª hora e na 33ª hora, ou seja, após um turno de trabalho. Na 25ª hora 10 rolamentos estavam prontos e na 32ª hora 80 unidades, isto equivale dizer que a capacidade de produção da linha tal como foi modelada é de 70 unidades/turno.

Essa capacidade de produção está aquém daquela desejada pelo usuário, desta forma alguma modificação deverá ser introduzida para que se ultrapasse os 80 rolamentos por turno desejados. Nesta fase do trabalho é possível avaliar uma das vantagens da simulação, que é a de responder às perguntas “o que aconteceria se”.

Várias decisões poderiam ser tomadas, neste trabalho a título de ilustração vai-se analisar duas delas:

- O que aconteceria se mais um posto de inspeção fosse acrescentado?
- O que aconteceria se mais uma máquina fosse acrescentada?

### 11.7.1. Efeito do acréscimo de mais uma máquina

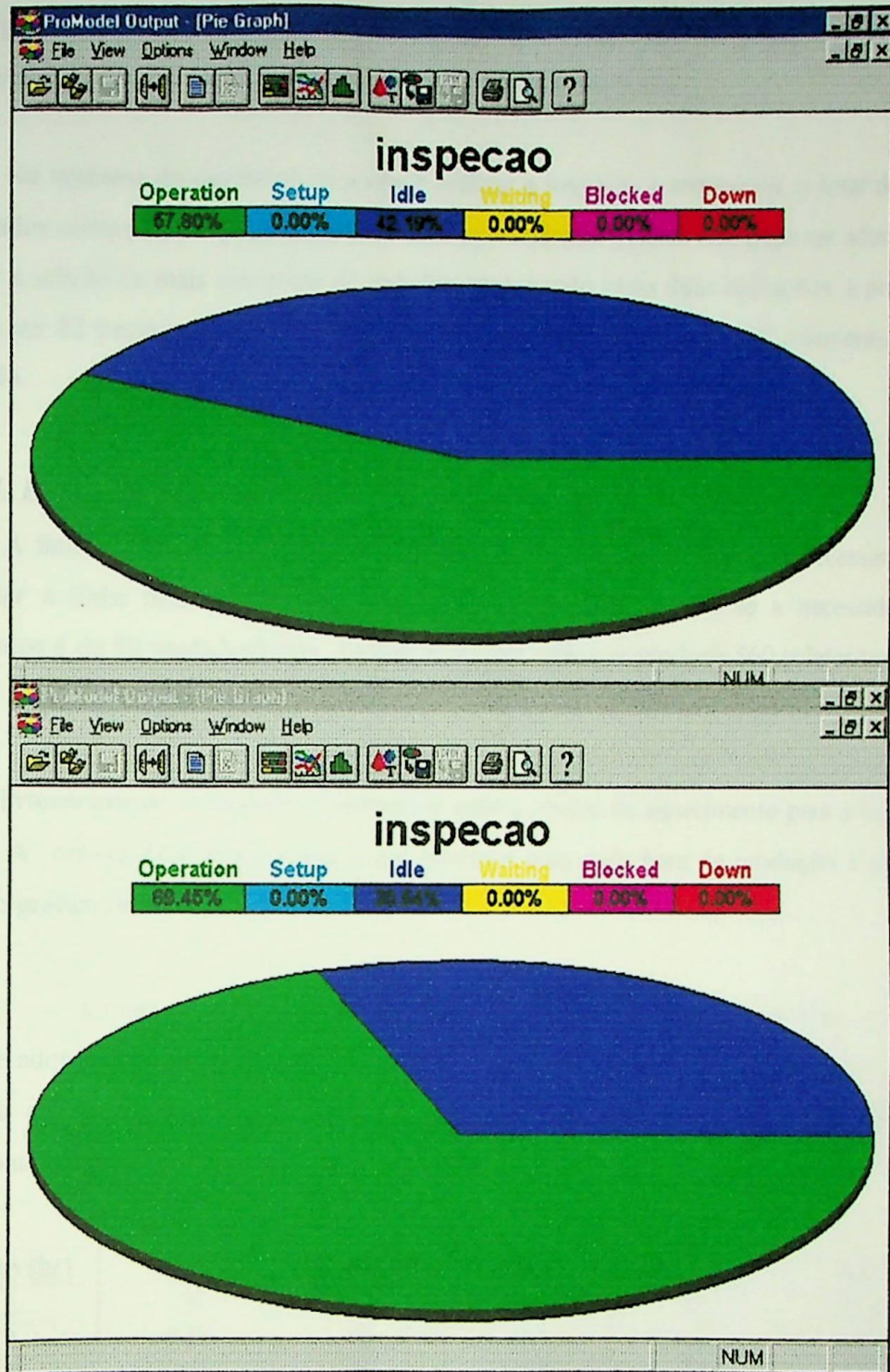
Para estudar esse efeito, uma das maneiras mais seguras é a de se duplicar cada uma das máquinas do sistema é verificar qual o impacto nas quantidades produzidas que isto causaria. Desta forma, para linha de produção dos corpos deslizantes ao se duplicar cada uma das máquinas obteve-se as quantidades produzidas mostradas na *tabela 11.8*.

Máquina	Rolamentos produzidos	Diferença percentual
Serra automática	70	0,0
Fresadora vertical 1	69	-1,4
Fresadora vertical 2	69	-1,4
Fresadora vertical 3	70	0,0
Fresadora hor duplex	70	0,0
Centro de usinagem CNC 1	70	0,0
Centro de usinagem CNC 2	70	0,0
Centro de usinagem CNC 3	71	1,4
Tratamento térmico	70	0,0
Retificadora plana vert 1	70	0,0
Retificadora plana vert 2	70	0,0
Retificadora plana vert 3	72	2,9
Retificadora plana vert 4	70	0,0
Retificadora plana tang	84	20,0

**Tabela 11.8:** Efeito da duplicação das máquinas sobre as quantidades produzidas

A decisão mais coerente seria a de se duplicar a retificadora plana tangencial, que proporcionaria 20 % de acréscimo nas quantidades produzidas. Assim sendo a produção seria de 84 rolamentos por turno, o que atenderia o pretendido pelo usuário. O relatório emitido pelo software PROMODEL fornece o percentual de utilização desse equipamento antes e após a duplicação. Antes da duplicação a máquina permanecia 89,53% do tempo ocupada. Após a duplicação a média de utilização das máquinas passa a ser 69,23%.

A decisão de duplicação dessa entidade implica necessariamente no aumento do tempo de fila da entidade posterior na seqüência da linha de produção da peça, o que vai trazer como consequência direta uma maior taxa de utilização do posto de inspeção. Como se verifica através da fatia verde na *figura 11.11*, a taxa de ocupação passou de 57,80 para 69,45% após a duplicação.



**Figura 11.11:** Gráfico do PROMODEL 4.0 relativo à taxa de ocupação do posto de inspeção antes e após a duplicação da retificadora

**11.7.2. Efeito do acréscimo de um posto de inspeção e montagem**

Como explicado na fase de balanceamento da linha, na fase de experimentação será decidido se haverá necessidade ou não de se acrescentar um posto de inspeção e montagem.

Serão feitas duas simulações, uma considerando que o operador do posto 4 realize estas operações e a outra considerando-se o acréscimo de mais um posto.

Na hipótese do operador do posto 4 realizar a inspeção e montagem, o total de peças produzidas cairia para 56 peças/turno, em consequência essa decisão não pode ser adotada. Se houver a adição de mais um posto de trabalho englobando essas duas operações, a produção passa a ser 82 peças/turno o que atende ao usuário por ser superior aos 80 rolamentos/turno desejado.

### 11.7.3. Experimentos com a linha do rolete

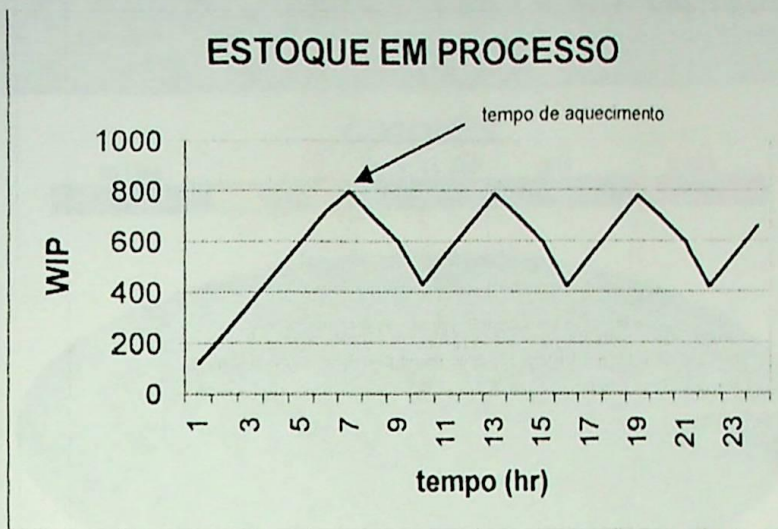
A linha de produção dos roletes vai ser determinada pela produção necessária para alimentar a linha principal, que é a de corpos deslizantes. Assim, se a necessidade de rolamentos é de 80 unidades/turno, a linha de roletes teria que produzir 560 roletes/turno (80 vezes 7 roletes por rolamento).

Primeiramente é necessário determinar qual o tempo de aquecimento para a linha dos roletes. A *tabela 11.9* mostra qual o em processo para cada hora de produção e a *figura 11.12*, o gráfico relativo.

Como se pode observar na *figura 11.12*, a partir da sétima hora o gráfico passou a adquirir o aspecto de dente de serra, isto porque os roletes começaram a sair prontos da linha em lotes de cem por vez, que é justamente a quantidade que é retificada e inspecionada por vez.

tempo (hr)	WIP	tempo (hr)	WIP	tempo (hr)	WIP
1	120	9	601	17	412
2	240	10	503	18	532
3	360	11	485	19	652
4	480	12	605	20	772
5	600	13	725	21	801
6	720	14	801	22	601
7	801	15	701	23	502
8	701	16	601	24	460

*Tabela 11.9:* WIP a cada hora para a linha dos roletes



**Figura 11.12:** Tempo de aquecimento para a linha dos roletes

Ao se tomar como período de aquecimento 7 horas, ou seja, o tempo em que o WIP inicia sua oscilação e ao mesmo tempo o primeiro lote de peças ainda não está pronto, tem-se que a quantidade produzida é de 500 roletes/turno nas primeiras 8 horas de simulação (um turno), no entanto, ao se simular 16 horas de produção (dois turnos) a quantidade produzida passa a ser de 1.100 peças, dando a produção de 550 roletes/turno. Essa oscilação se deve ao fato de que o tratamento térmico libera 400 peças a cada 3,75 horas, se o intervalo de turno a ser considerado for aquele menos favorável vai ocorrer uma queda significativa no número de peças prontas.

Uma das maneiras que se poderia utilizar para superar esse problema, seria o de simular 80 horas de produção com o período de aquecimento de 7 horas. Como o que se quer saber é a quantidade média por turno de 8 horas, basta dividir a quantidade produzida nessas 80 horas por 10. Ao se executar a simulação para esse tempo a quantidade produzida por turno foi de 480 peças, como a necessidade é de 560 peças, isto significa que a linha deve ser alterada.

Dentre as linhas de ação que poderiam ser tomadas para se eliminar essa diferença, optou-se por estudar a adição de mais um operador na linha. Esta decisão tem por base a análise do tempo de utilização do operador, que é mostrado no gráfico da *figura 11.13*. O operador está sendo utilizado em 98,80% do seu tempo, isto significa uma sobrecarga na utilização desse recurso, e possivelmente a adição de mais um operador à linha resolverá o problema.

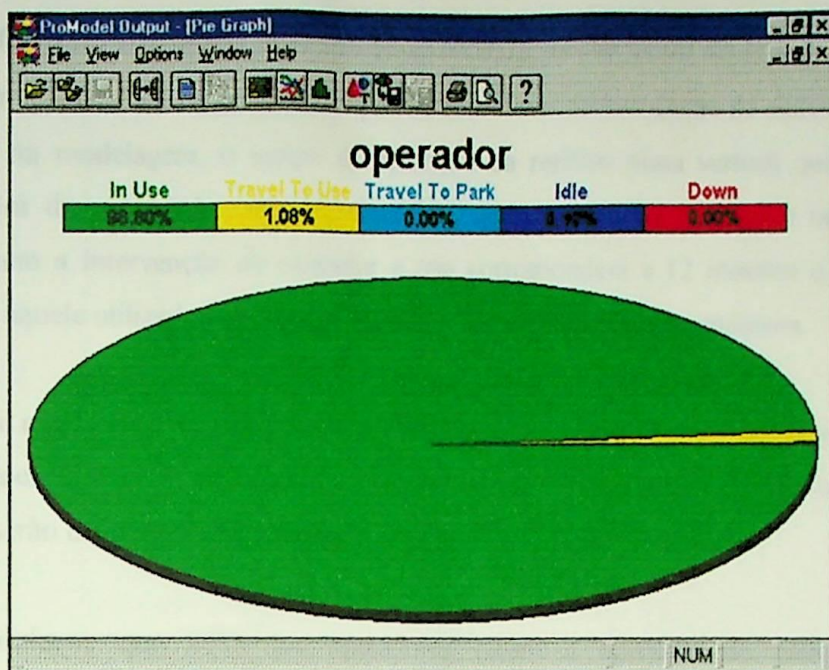


Figura 11.13: Gráfico do PROMODEL 4.0 referente à utilização do operador antes da duplicação (fatia verde)

Simulando-se modelo agora com dois operadores, o resultado foi uma produção média por turno de 560 roletes, atendendo assim as necessidades da empresa. A figura 11.14 mostra o gráfico de utilização dos operadores após a duplicação. A taxa média passou a ser de 57,37%, portanto, um resultado mais coerente.

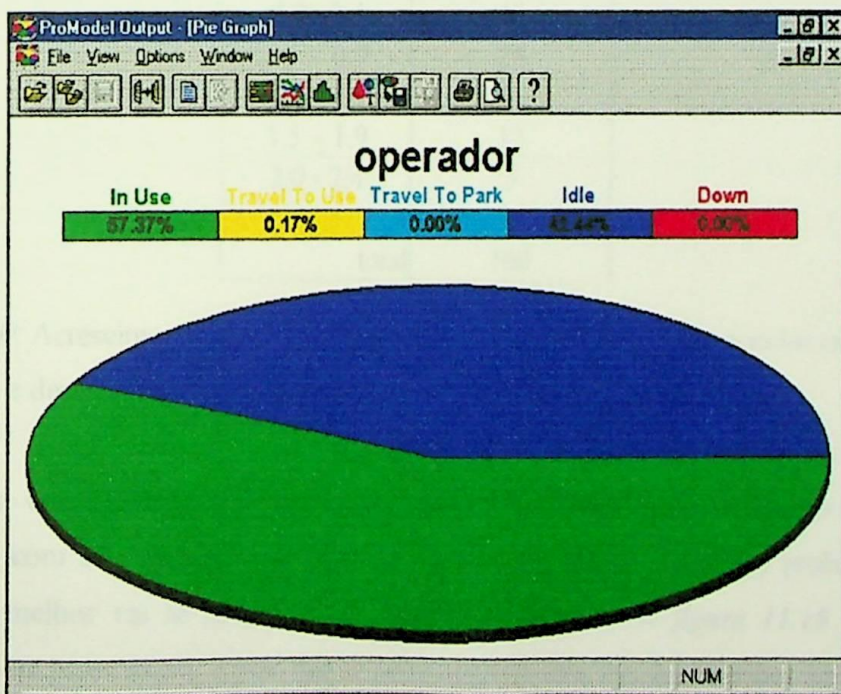


Figura 11.14: Gráfico do PROMODEL 4.0 referente à utilização do operador após da duplicação (fatia verde)

#### 11.7.4. Efeito da introdução de dados estocásticos na linha do rolete

Com a finalidade de demonstrar qual seria o efeito da introdução de dados de maneira estocástica na modelagem, o tempo de operação da retífica plana vertical que era de 16 minutos será desmembrado em tempo retífica, que será aquele em que a máquina está operando sem a intervenção do operador e que corresponderá a 12 minutos o restante do tempo será aquele utilizado pelo operador para carregar e descarregar a máquina.

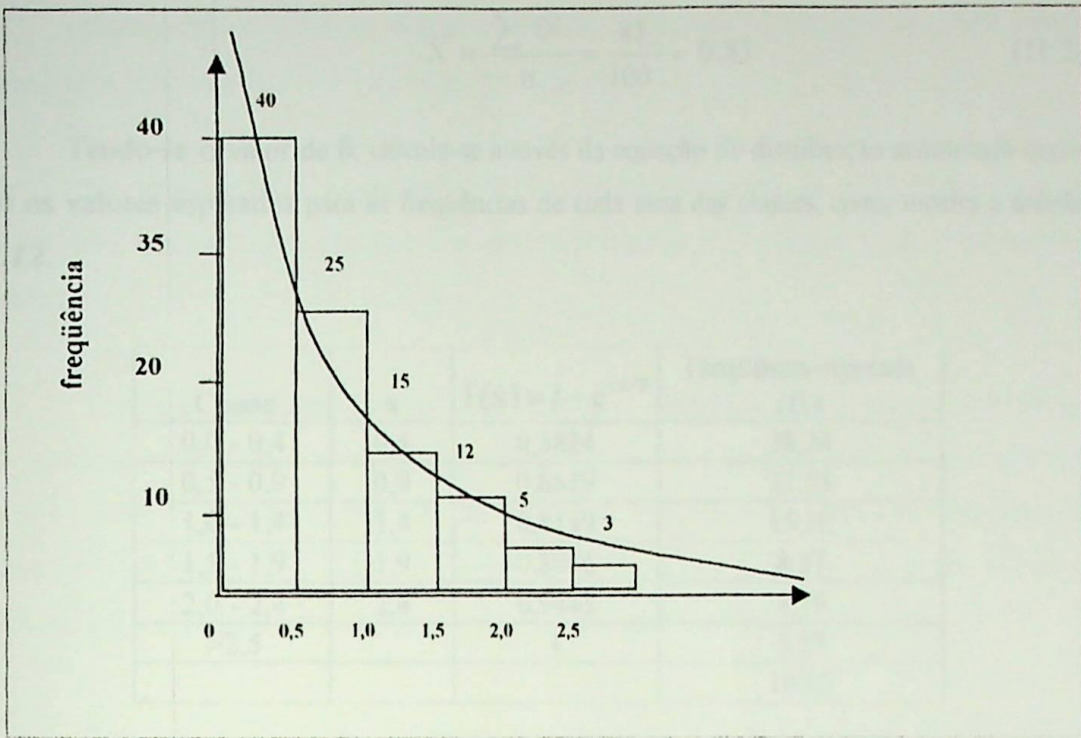
Para esse tempo de carga e descarga do operador será usada uma distribuição de probabilidades. Em consequência os dados referentes a essa operação e os resultados da simulação serão de natureza estocástica.

Suponha-se que 40% dos operadores façam a operação de carregamento e descarregamento entre 3 e 3,4 minutos, que 25% façam essa operação entre 3,5 e 3,9 minutos e assim por diante. Essa distribuição é apresentada na *tabela 11.10*. A tabela mostra o tempo que deve ser acrescentado aos 15 minutos de operação, em decorrência da maior demora do operador em carregar e descarregar. Exemplificando: 40% das vezes a operação vai durar entre 15 e 15,4 minutos, 25% das vezes vai durar entre 15,5 e 15,9 minutos e assim por diante.

Tempo (min)	Frequência
0,0 - 0,4	40
0,5 - 0,9	25
1,0 - 1,4	15
1,5 - 1,9	12
2,0 - 2,4	5
≥2,5	3
total	100

*Tabela 11.10:* Acréscimos ao tempo de operação devido à habilidade do operador em carregar e descarregar a máquina

Como visto no capítulo 5 o primeiro passo é a construção do histograma relativo a esses dados, com a finalidade de se descobrir qual curva de distribuição de probabilidades melhor vai se adaptar a esse conjunto de dados. A *figura 11.15* mostra o histograma para esses dados, e pelo que se pode observar uma das distribuições que pode ser analisada é a distribuição exponencial.



**Figura 11.15:** Histograma com a curva de distribuição exponencial

Para se verificar se a distribuição exponencial é aplicável a esse conjunto de dados, será executada a prova de aderência com o teste do qui-quadrado.

O valor de  $\beta$ , como mostrado na equação (6.5) é a média e a função de distribuição acumulada é dada pela equação (6.6).

Assim sendo, há necessidade de se calcular a média. A **tabela 11.11** mostra o cálculo da média para os dados grupados. E a equação (11.2) mostra o valor da média. Tem-se então que o valor de  $\beta$  é 0,83.

Classe	Frequência (f)	Ponto médio (x)	fx
0,0 - 0,4	40	0,2	8
0,5 - 0,9	25	0,7	17,5
1,0 - 1,4	15	1,2	18
1,5 - 1,9	12	1,7	20,4
2,0 - 2,4	5	2,2	11
>2,5	3	2,7	8,1
	100		83

**Tabela 11.11:** Cálculo da média

$$\bar{X} = \frac{\sum fX}{n} = \frac{83}{100} = 0,83 \quad (11.2)$$

Tendo-se o valor de  $\beta$ , calcula-se através da equação de distribuição acumulada quais são os valores esperados para as frequências de cada uma das classes, como mostra a *tabela 11.12*.

Classe	x	$F(x) = 1 - e^{-x/\beta}$	Frequência esperada ( $E_i$ )
0,0 - 0,4	0,4	0,3824	38,24
0,5 - 0,9	0,9	0,6619	27,95
1,0 - 1,4	1,4	0,8149	15,30
1,5 - 1,9	1,9	0,8986	8,37
2,0 - 2,4	2,4	0,9445	4,59
>2,5		1	5,55
			100,0

*Tabela 11.12:* Cálculo das frequências esperadas ( $E_i$ )

Como a condição  $E_i \geq 5$  não está sendo satisfeita pela classe de 2,0 - 2,4, grupa-se essa classe com a seguinte. A nova distribuição com essas classes combinadas fica sendo aquela mostrada na *tabela 11.13*. O teste de qui-quadrado resultou 2,42.

Classe	Frequência observada $O_i$	Frequência esperada $E_i$	$\frac{(O_i - E_i)^2}{E_i}$
0,0 - 0,4	40	38,24	0,081004
0,5 - 0,9	25	27,95	0,31136
1,0 - 1,4	15	15,30	0,005882
1,5 - 1,9	12	8,37	1,574301
>2,0	8	10,14	0,451637
	100	100,00	2,42

*Tabela 11.13:* Nova distribuição de frequências e teste do qui-quadrado

Utilizando-se o  $\alpha = 5\%$  de erro Tipo 1 (risco de 5% de se rejeitar a hipótese da curva ser normal, quando a hipótese é de fato verdadeira), e considerando-se o grau de liberdade igual a 3 ( $\nu = k - 1 - m = 5 - 1 - 1 = 3$ ), pois no caso em estudo tem-se 5 classes e usou-se um parâmetro que foi a média.

Consultado-se a tabela para os valores da distribuição  $\chi^2$  tem-se que o valor do qui-quadrado para erro de 5% e 3 graus de liberdade é 7,815.

Em conseqüência, como  $2,42 < 7,815$ , satisfazendo a expressão (6.21), tudo indica que a hipótese de que o conjunto de dados tem aderência com a distribuição exponencial pode ser aceita.

Uma vez que esses dados deram entrada no modelo de forma estocástica, os resultados da simulação também não serão mais determinísticos, isto quer dizer que a cada replicação que se fizer os resultados poderão ser diferentes. Tomando como exemplo o trabalho em processo (WIP) para a linha de roletes, considerando-se 2 operadores e um tempo de simulação total de 15 horas, sendo 7 horas de aquecimento e 8 horas de trabalho.

Fazendo-se 10 replicações tem-se que os valores médios de estoque em processo são apresentados na *tabela 11.14*. É importante salientar que os dados estatísticos, como no caso o valor médio do WIP, somente serão coletados a partir da sétima hora, pois foi esse o tempo definido para o aquecimento.

Replicação	Valor médio do WIP (X)	$(X - \bar{X})$	$(X - \bar{X})^2$
1	669,648	-0,493	0,24
2	669,363	-0,778	0,61
3	669,638	-0,503	0,25
4	671,797	1,656	2,74
5	670,455	0,314	0,10
6	668,77	-1,371	1,88
7	670,167	0,026	0,00
8	669,845	-0,296	0,09
9	671,216	1,075	1,16
10	670,512	0,371	0,14
<b>média</b>	670,141	soma	7,20

*Tabela 11.14:* Cálculo do valor médio de WIP em 10 replicações

$$S = \sqrt{\frac{\sum (X - \bar{X})^2}{n - 1}} = \sqrt{\frac{7,2}{9}} = 0,8946 \quad (11.3)$$

A média calculada foi de 670,141 peças e o desvio padrão de 0,8946, conforme a equação (11.3). Para que se tenha 95% de confiança de que a média verdadeira  $\mu$ , não dista de mais de uma peça da média obtida  $\bar{X}$ , com 9 graus de liberdade, tem-se que seriam necessárias 4 replicações conforme (11.4).

$$n = \left( t_{\alpha/2, n-1} \frac{S}{\bar{X} - \mu} \right)^2 = \left( 2,262 \frac{0,8946}{1} \right)^2 = 4,09 \cong 4 \text{ replicações} \quad (11.4)$$

### 11.8. Análise e apresentação dos resultados

Da maneira como se desenvolveu o exemplo de aplicação, a análise dos resultados fica bastante simplificada, pois para todas as etapas de modelagem e experimentações os resultados foram registrados e tabulados, de maneira que se possa analisá-los. Alguns exemplos dessas informações contidas no trabalho: estoques em processo para ambas as linhas a cada hora de simulação; efeito do acréscimo de mais uma máquina à linha; o que acontece ao se acrescentar mais um operador à linha, etc.

Quanto à apresentação dos resultados, o relatório teria aproximadamente a forma e o conteúdo do próprio exemplo de aplicação apresentado. Esse relatório teria que conter: a base de dados para o estudo; quais as decisões para a construção do modelo; como foi validado e quais os resultados de cada uma das experimentações.

Como foi visto no capítulo referente à apresentação dos resultados, como os trabalhos de simulação foram desenvolvidos juntamente com o usuário, esta fase de apresentação dos resultados vai ser mais fácil, bastando formalizá-los. A utilização do software com animação será bastante útil nessa fase, pois vai facilitar a interação com as gerências encarregadas de tomada de decisão.

### 11.9. Considerações finais

Acredita-se que o propósito do presente capítulo tenha sido atingido, ou seja, a apresentação de um exemplo onde a metodologia descrita no presente trabalho pudesse ser

aplicada. Como foi visto o trabalho de simulação, se conduzido adequadamente, pode trazer respostas adequadas ao objetivo proposto.

No decorrer do exemplo, procurou-se demonstrar a relevância da interação entre o usuário e o modelador. Em todas as fases da simulação o trabalho do modelador foi conjunto com o usuário, desta forma a validação será mais fácil de ser conduzida e provavelmente haverá mais consistência dos resultados.

O exemplo de aplicação também demonstra as possibilidades que a simulação computacional tem de lidar com problemas que envolvem uma grande complexidade. A outra vantagem da simulação que é a possibilidade de se responder a perguntas "o que aconteceria se", também foi demonstrada ao se dobrar número de máquinas ou operadores.

Como já explanado inicialmente, é necessário enfatizar que esse exemplo de aplicação é bastante resumido, tendo em vista os objetivos propostos. Um trabalho de simulação completo para um caso semelhante seria bem mais extenso, envolvendo outras variáveis, lidando com mais dados sobre as entidades que pertencem ao sistema, simulando mais experimentações, no entanto, acredita-se que um trabalho desse porte possa constituir-se em um outro trabalho de dissertação.

## 12. CONCLUSÕES

### 12.1. Considerações iniciais

O presente capítulo tem por objetivo apresentar as conclusões sobre o trabalho. Primeiramente serão feitos alguns comentários sobre os resultados que se espera obter com a utilização da metodologia ou sistematização da simulação para a produção em lotes. Após o que serão propostas algumas sugestões para trabalhos futuros que poderiam dar continuidade aos estudos de simulação e, por último, será feita a conclusão final.

### 12.2. Contribuições do trabalho

Como se procurou demonstrar nos capítulos introdutórios, a simulação vem tendo sua aplicação disseminada em diversas áreas de atividade, justamente pelas dificuldades de se testar na realidade a implementação dos sistemas reais, cada vez mais complexos. Outra razão importante do uso da simulação computacional é a necessidade de respostas rápidas, impostas pelo ambiente extremamente competitivo com que convivem as empresas.

Apesar da eficiência da simulação, há necessidade de se utilizá-la de forma sistemática com o objetivo de se chegar a resultados finais mais confiáveis e com maiores chances de serem implementados pela empresa. O presente trabalho foi elaborado tendo em vista essa sistematização no que diz respeito à atividade de produção específica para a fabricação em lotes, visando, neste tipo de atividade, aumentar a eficácia do estudo de simulação. Nesta sistematização também ficou evidenciada a necessidade de sinergia entre o usuário e modelador, e o trabalho procurou elucidar como essa interação pode ser conduzida ao longo de todo o projeto de simulação.

Nos capítulos de introdução e revisão bibliográfica buscou-se apresentar a proposta do trabalho e dar uma visão geral do que é a simulação, bem como sua evolução e aplicabilidade.

Nos capítulos referentes à sistematização propriamente dita buscou-se:

- Melhorar a interatividade entre o modelador que conhece sobre o software, estatística e simulação e o usuário que conhece o sistema, possibilitando que apesar das

- restrições de conhecimento de áreas específicas, ambos possam relacionar-se de modo a se chegar a bons resultados através do esforço conjunto e sistemático.
- Estabelecer uma disciplina de trabalho, de modo vencer o impulso de começar os trabalhos de simulação pulando etapas, com perda de tempo ao final e por vezes com resultados frustrantes. Desta forma o trabalho de simulação se inicia com o modelador e usuário discutindo qual o problema de fabricação em lotes a ser estudado, bem como qual seria o plano de estudo.
  - Como definir um esboço de layout antes de se iniciar modelagem. Com esses objetivos foram apresentados quais os tipos de layout. Também foi citado um método para balanceamento da linha do layout por produto, um exemplo de aplicação da tecnologia de grupo na definição de grupamento de máquinas e um exemplo de como seqüenciar a entrada de peças em produção.
  - Apresentar uma sistemática para uma das fases mais importantes da simulação que é a coleta de dados. Dentro dessa metodologia procurou-se exemplificar alguns dados importantes referentes à fabricação em lotes, de modo que o usuário e modelador tenham um ponto de partida para a modelação. Procurou-se também, ainda no contexto da coleta de dados, apresentar sumariamente a importância de se analisar esses dados estatisticamente de modo a se obter deles resultados confiáveis.
  - Demonstrar os princípios básicos de construção do modelo computacional, evitando o erro de se iniciar por modelos complexos e de se elevar o nível de detalhamento além do necessário. Nesta fase foi apresentado o diagrama do ciclo de atividades (DCA), que facilita o entendimento pelo usuário da lógica da simulação.
  - Propor algumas linhas de ação para validar o modelo, onde se deve realçar a importância da participação do usuário em todas as etapas da simulação para que essa fase seja o mais simples possível.
  - Explicar como os experimentos podem ser conduzidos, tendo sido demonstrado como se definir o tempo de aquecimento, número de replicações e como se analisar os resultados à luz da estatística.

- Explicar como os resultados da simulação devem ser apresentados de forma que todos os passos sejam registrados e haja facilidade para uma posterior consulta e tomada de decisões.

Finalizando o trabalho foi apresentado um exemplo de aplicação para avaliar necessidade de equipamentos e operadores. Esse exemplo procura evidenciar a necessidade da participação do usuário em todas as fases do projeto, tendo em vista as tomadas de decisões que serão necessárias ao longo do trabalho, bem como aumentar as possibilidades de que os resultados finais sejam confiáveis e passíveis de serem implementados.

Dentro do que cabia ao exemplo de aplicação, todas as condutas propostas na metodologia foram exploradas. Apesar do exemplo ser determinístico, foi introduzido a título de ilustração, um conjunto de dados estatísticos, de modo a se poder exemplificar quais seriam as análises pertinentes ao modelo se fosse constituído por dados de natureza estocástica.

Desta forma tem-se um trabalho que vai permitir que um projeto de simulação computacional por eventos discretos, específico para a área de fabricação em lotes, seja conduzido adequadamente.

### **12.3. Sugestões de trabalhos futuros**

Alguns trabalhos poderiam ser conduzidos de forma ou a dar continuidade à presente dissertação, ou mesmo como estímulo ao estudo da simulação. Dessa forma, poderia se propor os seguintes temas:

- Como foi visto no capítulo introdutório, a simulação tem aplicação em diversas áreas: na área de manufatura, logística, hospitalar, transportes, etc. A abordagem desse trabalho restringiu-se à área de manufatura, em conseqüência estudos semelhantes poderia ser feitos nas demais áreas.
- Um estudo de caso poderia ser desenvolvido de forma completa, detalhando cada um dos passos e com todas as análises possíveis.
- Simulação de sistemas que admitam lotes de peças distintas, de maneira a se poder analisar outras variáveis, como por exemplo o tempo de set up.

## 12.4. Considerações finais

O presente trabalho apresentou uma metodologia cujo objetivo é o de disciplinar e ao mesmo tempo facilitar os trabalhos de simulação computacional para fabricação em lotes. Todas as etapas a serem percorridas para se chegar a resultados mais consistentes foram demonstradas.

Ao final foi apresentado um exemplo de aplicação de maneira a se concluir ser possível conduzir o projeto de simulação utilizando-se a metodologia proposta, e que o modelador e o usuário devem interagir de modo a obter resultados mais confiáveis, com menores gastos em modelagem, e cujos resultados sejam passíveis de serem implementados, aumentando assim a eficiência e a capacidade de resposta das empresas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AKBAY, Kunter S. Using Simulation Optimization to Find the Best Solution. III Solutions, pg 24 – 29, mai 1996.
- BARNES, Ralph M. Estudo de Movimentos e de Tempos – Projeto e Medida do Trabalho. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, 1963.
- BORENSTEIN, Denis. Combinando simulação e sistemas baseados em conhecimento para projeto de sistemas avançados de manufatura. Revista Gestão & Produção, Vol 5, nº 2, pg 89-103, ago 1998.
- BOWKER, Albert H.; LIEBERMAN, Gerald J. Engineering Statistics. New Jersey: Prentice-Hall, Inc, 1972.
- BRATLEY, Paul; FOX, Bennett L.; SCHRAGE, Linus E. A Guide to Simulation. New York: Springer-Verlag, 1987.
- CASSEL, Ricardo Augusto; MÜLLER, Cláudio José. A simulação e os processos de mudança. ENEGEP, 1996.
- CASTRO, Antonio Orestes S.; FERREIRA FILHO, Virgílio José M. Utilização de simulador na previsão de produção e movimentação de petróleo. Rio de Janeiro: Workshop de Simulação, 1997.
- CERQUEIRA JUNIOR, Mário José B.; LUSTOSA, Leonardo J.; REGGIANI, Gibson B. Modelo de simulação da Operação do terminal de importação de granéis de Praia Mole. Rio de Janeiro: Workshop de Simulação, 1997.
- CORNÉLIO FILHO, Plínio; SCHAFRANSKI, Luiz E.; FREITAS FILHO, Paulo José; TUBINO, Dálvio F. O uso do software de simulação ARENA para desenvolvimento de jogos de empresas- o protótipo GPCP-1. ENEGEP, 1998.
- CHWIF, Leonardo. “Simulation Optimization”- Uma Introdução. Rio de Janeiro: Workshop de Simulação, 1997.
- DIEHL, Carlos Alberto; OLIVEIRA, Carmen Helena M. Estudo de Fluxo produtivo do setor de corte e vinco de uma empresa do ramo gráfico. ENEGEP, 1996.
- DIETZ, Mike. Outline of a sucessful simulation project. Industrial Engineering, Nov 1992.
- FERREIRA, Selma Cristina S.; RENTES, Antonio F.; IANNONI, Ana Paula; SOUZA, Fernando B. Desenvolvimento de um modelo didático para simulação de Sistemas Kanban. ENEGEP, 1998.

FLINK, Henrique W. S. Sistema de Simulação em Ambiente Computacional Gráfico e Interativo. Rio de Janeiro: Dissertação de Mestrado, IME, 1996.

GAZZINELLI, Alexandre; BENÍCIO, Aylton; PEIXOTO, Eduardo C.; AGANETE, Ricardo; RIBEIRO, Victor F. A Simulação como Instrumento para Tomada de Decisões um Caso Prático: A Decaparia da Belgo Mineira. ENEGEP, 1996.

GIANI, Eduardo P. ; DIETRICH, Fernanda; GEHLEN, Pedro R.; MELO, Rodrigo B. Aplicação conjunta do Pensamento Sistêmico e simulação computacional – Um estudo de caso em manufatura. ENEGEP, 1998.

GÔMES, Arthut Tôrgo. Simulação da Linha de Produção do Laboratório de Circuito Impresso do INPE. São José dos Campos: Anais do II Workshop Brasileiro de Simulação, 1988.

GORDON, Geoffrey. System Simulation. New Jersey: Prentice-Hall, Inc, 1969.

GROOVER, Mikell P. Artigo Automation, editado por DORF, Richard C. e KUSIAK, Andrew no livro Handbook of Design, Manufacturin and Automation. New York: Wiley-Interscience Publication, 1994.

HARREL, Charles R.; BATEMAN, Robert E.; GOGG, Thomas J.; MOTT, Jack R. A. System Improvement Using Simulation. Orem, Utah: PROMODEL Corporation. 1996.

HEARD, Ed.; PLOSSL, George. Lead Times Reviseted. Production And Inventory Management, Third Quarter, 1984.

HLUPIC, V.; PAUL, R.J. A critical evaluation of four manufacturing simulators. International Journal of Production Research. Vol 33, nº 10, pg 2757-2766, 1995.

KING, J. R. Machine Component Groupings in Production Flow Analysis: An Approach Using a Rank Order Clustering Algorithm. Int. J. Prod. Res 18 nº2, p 213-232, 1980.

KLEINDORFER, George B.; O'NEILL, Liam; GANESHAN, Ram. Validation in Simulation: Various Positions in the Philosophy of Science. Management Science, Vol 44, nº 8, ago 1998.

KRAJEWSKI, Lee J.; RITZMAN, Larry P. Operations Management, Strategy and Analysis. Reading, Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company, 1996

KUSIAK, Andrew. Intelligent Manufacturing Systems. New Jersey: Prentice-Hall, Inc, 1990.

KUSIAK, Andrew; CHOW, Wing S. Efficient Solving of the Group Technology Problem. Journal of Manufacturin Systems 6, nº2, p 117-124, 1987.

LAW, Averill M.; KELTON, W. David. Simulation Modeling and Analysis. New York: Mc Graw-Hill, 1ª ed., 1982.

LOBÃO, Elidio C.; PORTO, Arthur José V. Proposta para sistematização de estudos de simulação. ENEGEP, 1997.

McCORMICK JR, William T.; SCHWEITZER, Paul J.; WHITE, Thomas W. Problem Decomposition and Data Reorganization by a Clustering Technique. Operation Research 20 nº5, p 993-1009, 1972.

MENDES, André B.; SOUZA, Ricardo F.; BOTTER, Rui C. Redimensionamento de um Sistema de Distribuição de Suprimentos. Rio de Janeiro: Workshop de Simulação, 1997.

MONTEVECHI, José Arnaldo Barra. Métodos de formação de famílias de peças usados em tecnologia de grupo. Apostila para o curso de Tecnologia de Grupo. Itajubá: EFEL, 1996.

MUTHER, Richard. Planejamento do Layout: Sistema SLP. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, 1978.

NAYLOR, Thomas, H.; BALINTFY, Joseph, L.; BURDICK, Donald S.; CHU, Kong. Técnicas de Simulação em Computadores. São Paulo: Editora Vozes, 1971.

NAWAZ Muhammad; ENSCORE Jr, Emory; HAM, Inyong. A heuristic Algorithm for the m-Machine n-Job Flow-shop Sequencing Problem. International Journal of Management Science, Vol 11, nº 1, pg 91-95, 1983.

NEWMAN, S. T.; NEWNES, L. B.; BELL, R. A multi-level modeling system for the design of flexible machining installations. International Journal of Production Research. Vol 36, nº 9, pg 2355-2376. 1998.

PICCOLINI, Jacomo D. B; FIGUEIREDO, Reginaldo S. Simulação aplicada à análise de layout. ENEGEP, 1998.

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

PIDD, Michael; EGGLESE, Richard.; SILVA, F. Nishakumari. Using simulation to plan emergency evacuations. Rio de Janeiro: Workshop de Simulação, 1997.

PIDD, Michel. Five simple principles of simulation modelling. Rio de Janeiro: Workshop de Simulação, 1997.

PIMENTEL, Milton. Uma aplicação de simulação no dimensionamento de frota de caminhões em mineração. Rio de Janeiro: Workshop de Simulação, 1997.

PINHO, Alexandre F. Uma Contribuição para a Resolução de Problemas de Programação de Operações em sistemas de Produção Intermitente Flow-shop: a Consideração de Incertezas. Itajubá, MG: Dissertação de Mestrado, EFEI, 1999.

PROMODEL USER'S GUIDE. PROMODEL Corporation, 1997

RUSSEL, Roberta S.; TAYLOR III, Bernard W. Operations Management, Focusing on Quality and Competitiveness. New Jersey: Prentice Hall, Inc, 1998.

SALIBY, Eduardo. Tecnologia de informação: uso da simulação para obtenção de melhorias em operações logísticas. Revista Tecnológica, janeiro 1999.

SALIBY, Eduardo. Softwares de simulação. Rio de Janeiro: Workshop de Simulação, 1997.

SHANG, J.S.; TADIKAMALLA, P.R. Multicritéria design and control of a cellular manufacturing system through simulation and optimization. International Journal of Production Research. Vol 36, nº 6, pg 1515-1528, 1998.

SILVEIRA, João Antônio. Simulando Sistemas de Movimentação de Materiais. Revista Movimentação e Armazenagem – IMAM, nº 93, jul/ago 1996.

SUCOMINE, Regis K; RESENDE, Marino O. Uma proposta de estimativa e controle do lead time de manufatura. ENEGEP, 1996.

VAZ, Célio Costa; GILL, Walter. Planejamento de modelos de simulação de sistemas de aquecimento solar residencial. São José dos Campos: II Workshop Brasileiro de Simulação, 1988.

VAKHARIA, Asoo J.; SELIM, Hassan M. Artigo Group Technology, editado por DORF, Richard C. e KUSIAK, Andrew no livro Handbook of Design, Manufacturin and Automation. New York: Wiley-Interscience Publication, 1994.