

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

***Análise de Margem de Contribuição e
Capacidade Produtiva por Programação Linear
e Simulação para Apoio à Tomada de Decisão
num Sistema de Manufatura***

Autor: Alexandre Yamasaki Nakayama
Orientador: Prof. Sérgio Tonini Button

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO

***Análise de Margem de Contribuição e
Capacidade Produtiva por Programação Linear
e Simulação para Apoio à Tomada de Decisão
num Sistema de Manufatura***

Autor: Alexandre Yamasaki Nakayama
Orientador: Prof. Sérgio Tonini Button

Curso: Engenharia Mecânica- Mestrado Profissional
Área de Concentração: Planejamento e Gestão Estratégica da Manufatura

Trabalho Final de Mestrado Profissional apresentada à comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para a obtenção do título de Mestre Profissional em Engenharia Mecânica.

Campinas, 2005
S.P. – Brasil

DE 56
MADA
EX
BC/ 68851
6.123-06
☐ D ☒

09/06/06

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

N145a Nakayama, Alexandre Yamassaki
Análise de margem de contribuição e capacidade
produtiva por programação linear e simulação para apoio
à tomada de decisão num sistema de manufatura /
Alexandre Yamasaki Nakayama, SP: [s.n.], 2005.

Orientador: Sergio Tonini Button
Dissertação (mestrado profissional) - Universidade
Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia
Mecânica.

1. Pesquisa operacional. 2. Sistemas flexíveis de
fabricação. 3. Simulação (Computadores). 4.
Programação linear. I. Button, Sergio Tonini. II.
Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de
Engenharia Mecânica. III. Título.

Título em Inglês: Contribution margin and productive capacity analysis through linear
programming and simulation for decision support in a manufacturing
system

Palavras-chave em Inglês: Operational research, Manufacturing system, Simulation,
Linear programming.

Área de concentração: Planejamento e Gestão Estratégica da Manufatura

Titulação: Mestre em Engenharia Mecânica

Banca examinadora: Antonio Batocchio e Íris bento da Silva

Data da defesa: 29/07/2005

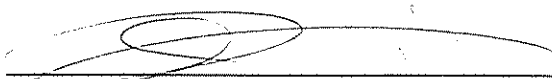
**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

Trabalho final de Mestrado Profissional

**Análise de Margem de Contribuição e Capacidade Produtiva
por Programação Linear e Simulação para Apoio à Tomada
de Decisão num Sistema de Manufatura**

Autor: Alexandre Yamasaki Nakayama
Orientador: Prof. Dr. Sergio Tonini Button

**Prof. Dr. Sergio Tonini Button, Presidente
FEM/UNICAMP**



**Prof. Dr. Antonio Batocchio
FEM/UNICAMP**



**Prof. Dr. Íris Bento da Silva
UNIMEP**

Campinas, 29 julho 2005

Resumo

NAKAYAMA, Alexandre Yamasaki, *Análise de Margem de Contribuição e Capacidade Produtiva por Programação Linear e Simulação para Apoio à Tomada de Decisão num Sistema de Manufatura*, Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2005. 85p. Trabalho Final de Mestrado Profissional.

A competição cada vez mais acirrada do mundo globalizado exige das empresas o estudo e uso de ferramentas, teorias e conceitos que auxiliem no aumento de produtividade. Dentre os muitos sistemas administrativos e métodos de auxílio de aumento de produtividade, a Pesquisa Operacional tem se mostrado bastante eficiente e difundida pelos tomadores de decisões. Na Pesquisa Operacional, destacam-se especialmente as técnicas de Simulação e Programação Linear, técnicas que se desenvolveram em paralelo ao desenvolvimento da informática, esta tão presente no mundo atual. Este trabalho tem o objetivo principal de comparar a abordagem de um problema de programação da manufatura por estas técnicas distintas em um ambiente produtivo responsável pela fabricação de peças forjadas e usinadas para o setor automobilístico. O resultado esperado deste estudo é facilitar o entendimento e explicitar a diferença das duas técnicas englobando principalmente a aquisição e tratamento dos dados para uma escolha mais apurada.

Palavras chave: Pesquisa Operacional, Sistema de Manufatura, Simulação, Programação Linear.

Abstract

NAKAYAMA, Alexandre Yamasaki, *Contribution Margin and Productive Capacity Analysis through Linear Programming and Simulation for Decision Support in a Manufacturing System*, Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2005. 85p. Trabalho Final de Mestrado Profissional.

The increasingly competitiveness in a globalization world demands from companies the study and use of tools, theories and concepts to provide productivity increase. Among the management tools and methods, the Operational Research has been largely diffused due to its efficiency. Especially emphasized are the Operational Research techniques of Simulation and Linear Programming that have been developed in parallel with Informatics. This research work has the main objective of comparing the application of both techniques in a manufacturing programming problem. The techniques were applied at a system responsible for manufacturing of components for the auto industry. The expected result of this study is to facilitate and explicitate the differences between the two techniques with approach to data acquisition and treatment and provide better information for a more accurate choice.

Key words: Operational Research, Manufacturing System, Simulation, Linear Programming.

Sumário

Lista de figuras	iii
Lista de tabelas	iv
Nomenclatura	vi
1 Introdução	1
1.1 Contexto e Justificativa do Trabalho	1
1.2 Objetivo	6
1.3 Estrutura do trabalho	7
2 Revisão bibliográfica	8
2.1 Sistemas de Manufatura	8
2.2 Arranjo Físico	9
2.3 Tópicos de Matemática Aplicada	15
2.4 Programação Linear	18
2.5 Simulação	21
2.6 Planejamento e controle da produção	28
3 Apresentação do problema	31
3.1 Descrição do Problema	31
3.2 Contabilidade de Custos, Receitas e Recursos Disponíveis	39

3.3 Metodologia para Abordagem do Problema por Programação Linear	43
3.4 Metodologia para abordagem do Problema por Simulação	44
4 Abordagem do problema	47
4.1 Abordagem pela Técnica de Programação Linear	47
4.2 Abordagem pela Técnica de Simulação	59
5 Considerações finais	69
5.1 Conclusões	69
5.2 Recomendações para Trabalhos Futuros	70
Referências bibliográficas	71
Anexo I	79

Lista de figuras

2.1 Definição de sistema de manufatura	9
2.2 Arranjo físico funciona	11
2.3 Arranjo físico em linha	13
2.4 Célula de manufatura	14
3.1 <i>Lay-out</i> esquemático do sistema de manufatura	32
4.1 Fluxo de materiais e informações entre os setores da cadeia produtiva	52
4.2 Diagrama de fluxo para produção da peça 20.03.0781	53
4.3 Diagrama de fluxo para produção das demais peças da família	53
4.4 Criação dos locais de processamento e armazenamento no ambiente ProModel	63
4.5 Criação da entidade processada no ambiente ProModel	64
4.6 Definição dos processos no ambiente ProModel	65
4.7 Definição da chegada de entidades no ambiente ProModel	66

Lista de tabelas

1.1 Grau de uso de técnicas diversas	5
1.2 Uso e familiaridade com técnicas de Pesquisa Operacional	5
3.1 Etapas operacionais	33
3.2 Seqüência de operações para produção de cada peça	33
3.3 Demanda por produto	35
3.4 Tempo de <i>setup</i> para faceamento + furação	36
3.5 Tempo de <i>setup</i> para rebaixo do furo	36
3.6 Tempo de <i>setup</i> para usinagem do alívio	36
3.7 Tempo de <i>setup</i> para rosca de conexão	37
3.8 Tempo de <i>setup</i> para canal de retenção	37
3.9 Tempo de ciclo	37
3.10 Manutenções corretivas (<i>Dayna Myte 3300</i>)	38
3.11 Manutenções corretivas (<i>Index 170</i>)	38
3.12 Manutenções corretivas (furadeira de coluna)	39
3.13 Manutenções correntivas (<i>Brother TC-324</i>)	40
3.14 Preço unitário de cada produto	42
3.15 Custo unitário da matéria-prima	43
3.16 Custo de mão-de-obra direta, tempo de processamento total e custo/peça	48

4.1 Margem de Contribuição Unitária de cada peça	49
4.2 Tempo de Operação Mensal Total no ano de 2003	50
4.3 Tempo de Manutenção Preventiva de cada máquina	58
4.4 Quantidade mínima de disponibilidade de cada recurso para produção do mix ótimo e o excesso de disponibilidade	58
4.5 Valores dos limites inferior e superior para as Margens de Contribuição Unitária para o período de Novembro	58
4.6 Solução ótima do modelo para os demais períodos	59
4.7 Atividade custeável, direcionador de custo e custo variável relacionado	62
4.8 Custo variável do lote de cada peça	67
4.9 Tempos de utilização de cada recurso	67
4.10 Comparação entre os tempos de utilização e de disponibilidade de cada recurso	67
4.11 Tempo de utilização de cada recurso considerando incremento de 10% da demanda	68
4.12 Comparação entre os tempos de utilização e de disponibilidade de cada recurso	68

Nomenclatura

Abreviações

PCP – Planejamento e Programação da Produção

MCU – Margem de Contribuição Unitária

PU – Preço Unitário

CMP – Custo de Matéria-Prima

MOD – Custo da Mão-de-Obra Direta

CF – Custo de Ferramental

TMO - Tempo Mensal Disponível de Operação

TOT - Tempo de Operação Mensal Total

TMP - Tempo de Manutenção Preventiva

TMC - Tempo de Manutenção Corretiva

TSP - Tempo Total para preparação

TPR - Tempo de Permissão

TPQ - Tempo de Perdas por Qualidade

Capítulo 1

Introdução

1.1 Contexto e Justificativa do Trabalho

Ao se observarem as transformações ocorridas nas empresas nos últimos anos, constata-se que as novas políticas industriais, assim como a globalização de mercados, têm impelido o desenvolvimento e a utilização de novas tecnologias e sistemas administrativos. Essa modernização faz parte de uma evolução lógica e exigida pelas condições de competitividade de mercado ocorrida nos sistemas e nas filosofias administrativas das empresas (Guerrini, 1999).

Sobre a evolução e as transformações administrativas, Bolwijn & Kumpe (1990) comentam que, historicamente, o mercado está em constante mudança. Segundo estes autores, até 1960 o mercado mundial era caracterizado pelo aumento quantitativo da produção onde pode-se dizer que tudo o que se produzia podia ser vendido e, nesta época, embora o preço fosse um fator para se aumentar as vendas, a pressão que se exercia não era muito grande.

A partir de então esta situação começa a mudar. Para continuarem crescendo, as empresas necessitavam estender seus braços para outras regiões ou países. Iniciou-se uma competição por preços fazendo com que muitas empresas fossem reestruturadas, até mesmo mudassem de região ou país. O preço se tornou um fator importante para o sucesso visto que os clientes podiam selecionar preços comparando produtos feitos em diversos países.

No final dos anos 60 a competição mudou novamente. Os consumidores passaram a se questionar sobre a qualidade, tempo gasto no conserto, etc. dos produtos adquiridos. Eles passaram a prestar mais atenção na qualidade dos produtos comprados, fazendo com que isto se tornasse um importante fator para o sucesso de uma empresa.

Uma nova mudança se iniciou no final dos anos 70 onde os consumidores passaram a exercer o poder de escolha e a capacidade das empresas aparentemente excedia a demanda. As empresas tiveram que se modernizar, reduzir o intervalo de tempo entre o lançamento de novos produtos para poderem conquistar um público mais exigente em várias partes do mundo.

Dos anos 90 em diante passa a ter importância um novo fator: inovação, a habilidade de renovar rapidamente e não apenas de se adaptar.

Para que uma empresa mantenha-se integrada às constantes mudanças do mercado, esta deve adotar uma estratégia competitiva contínua e iterativa. Particularmente em relação às empresas voltadas para a manufatura, Muscat & Fleury (1993) classificam as estratégias competitivas em cinco tipos:

- custos: adequada apenas nos casos de produtos cujos mercados apresentam pequenas competições; os produtos são padronizados e há baixo nível de exigência por parte dos clientes;
- qualidade: adequada quando a satisfação das necessidades dos clientes é vista como primordial;
- tempo: comporta duas possibilidades básica: (a) assegurar qualidade aos clientes no menor prazo possível; e (b) atender aos clientes dentro de uma faixa de tempo, com a menor variação possível;
- flexibilidade: diz respeito à capacidade de mudança do que é oferecido pelo sistema de produção ao cliente, para atender as suas necessidades que se alteram no curto prazo;
- inovação: estratégia utilizada pelas empresas de manufatura que desejam estar sempre à frente de seus competidores em termos de produto diferenciado e com características sem precedentes.

De acordo com pesquisa realizada pela Fundação Vanzolini (Muscat & Fleury, 1993), por força das condições que prevaleceram no mercado brasileiro, as empresas multinacionais estavam em geral preocupadas com o monitoramento de seus custos. Também foi observado que as empresas brasileiras estavam mais preocupadas com questões de qualidade, mesmo sabendo que a melhoria dos custos era essencial para a sua competitividade.

Este quadro reflete o protecionismo praticado através de altas taxas alfandegárias impostas aos produtos importados, reduzindo sua competitividade devido ao seu alto custo de aquisição por parte dos clientes e possibilitando que as empresas no Brasil pudessem postergar a sua modernização, seja em termos tecnológicos, seja em termos de gestão.

No atual ambiente de crescente globalização, a acelerada difusão de novas tecnologias, conceitos e técnicas de organização empresarial tem provocado acirrada concorrência tanto no mercado interno como no externo, impelindo as empresas brasileiras a buscarem competitividade para a manutenção da sobrevivência (Wolff, 2001). Porém, Junqueira (2000) destaca que enquanto as empresas estrangeiras estão entrando na era da competição por inovação, a maioria das empresas no Brasil está num processo de transição da era da qualidade para a era do tempo, sendo que muitas ainda não se encontram suficientemente capacitadas em custos para garantir uma maior competitividade.

Outro ponto destacado por Prince & Kay (2003) é que muitas empresas não conseguem atingir as competências necessárias para serem competitivas após a abertura dos mercados e entram em processo de sucateamento. Estas empresas passam a incorporar filosofias estratégicas em relação ao tempo e custos sem terem consolidada a capacitação de flexibilidade e qualidade exigida pelo mercado altamente dinâmico.

Diante deste mercado altamente dinâmico e competitivo, Zhang, Vonderembse & Lim, (2003) constataam que as empresas são forçadas a se tornarem especialmente ágeis. Agilidade esta que, no contexto da manufatura, requer a integração de tecnologias flexíveis de produção com a

habilidade baseada no conhecimento dos trabalhadores e estruturas flexíveis de gerenciamento que estimulem iniciativas de cooperação entre setores.

Dentro deste contexto, este trabalho enfoca o problema de programação da manufatura de uma família de produtos utilizando técnicas de Pesquisa Operacional, especificamente a Programação Linear e Simulação Discreta. Pela natureza dinâmica da programação da manufatura na busca da otimização dos recursos produtivos, o uso de modelos para avaliação e teste de diversas situações enfatiza a flexibilidade como estratégia competitiva.

A abordagem do problema de programação da produção por técnicas de Pesquisa Operacional foi escolhida devido ao alto grau de desenvolvimento da informática e a difusão dos programas comerciais de simulação. Como Barrella (2000) afirma: “o desenvolvimento da informática vem fazendo com que os engenheiros deixem paulatinamente de apenas realizar cálculos, repetitivos e demorados e sejam colocados novamente em atividades de pesquisa e desenvolvimento de novos e melhores métodos de manufatura, assim como, na busca de metodologias modernas e que satisfaçam à necessidade do mercado”.

Ainda, a literatura nas classes da Programação Linear e Simulação é particularmente rica, sendo a crescente publicação de artigos e pesquisas evidência de grande utilização dos modelos de pesquisa operacional nas indústrias de transformação. Cabe citar como exemplos da ampla aplicação da programação linear e simulação nos diversos setores industriais, o dimensionamento e otimização de cargas de fornos em fundições (Araújo & Arenales, 2003, Santos-Meza et al, 2002), otimização das operações de polidutos (Magatão et al, 2001), minimização de troca de ferramentas em máquinas de usinagem (Yanasse & Pinto, 2001), análise do sistema de produção e distribuição de suco congelado de laranja (Munhoz & Morabito, 2001) e resolução de problemas de mistura de minérios e alocação de equipamentos em minas (Merschmann & Pinto, 2001).

Moreira (1996) cita uma pesquisa quantitativa que revela o uso disseminado de análise estatística, programação linear, simulação e PERT/CPM (*Programm Evaluation and Review Technique/Critical Path Method*) como técnicas de auxílio no processo de tomada de decisão e a

popularidade da programação linear e da simulação nas indústrias. A tabela 1.1 mostra o grau de uso e a tabela 1.2 o grau de familiaridade de técnicas de pesquisa operacional na indústria.

Tabela 1.1 – Grau de uso de técnicas diversas

Técnica	Nunca usada				Uso freqüente
	1	2	3	4	5
Análise de Regressão	9,5%	2,7%	17,6%	21,6%	48,6%
Programação Linear	15,4%	14,1%	21,8%	16,7%	32,0%
Simulação	11,4%	15,7%	25,7%	24,3%	22,9%
Modelos de Rede	39,1%	29,0%	15,9%	10,1%	5,8%
Teoria das Filas	36,6%	39,4%	16,9%	5,6%	1,4%
Teoria dos Jogos	69,7%	25,4%	8,9%	6,0%	0,0%

Tabela 1.2 – Uso e familiaridade com técnicas de Pesquisa Operacional

Fonte: adaptado de Moreira (1996)

Técnica	Ordem de familiaridade	Uso (% de respondentes)
Programação Linear	1	83,8%
Simulação	2	80,3%
Modelos de Rede	3	58,1%
Teoria das Filas	4	54,7%
Teoria da Decisão	5	54,7%

A simulação de eventos discretos tem sido amplamente aplicada na análise de problemas ligados a operações de manufatura. Porém, esta técnica, em sua forma tradicional, é inerentemente avaliativa, isto é, são escolhidos valores para os parâmetros de controle do sistema em estudo e os dados de saída da simulação são analisados para estimar o comportamento do sistema. A determinação do melhor conjunto de valores dos parâmetros é feita de forma iterativa onde os dados de saída da simulação são os guias para novos valores que melhorem o

desempenho do sistema. O processo de avaliação envolve muitas iterações além de esforço humano, mas o resultado obtido não é garantia de desempenho ótimo do sistema.

Uma outra alternativa de abordagem dos problemas de manufatura é por métodos gerativos ou determinísticos como a programação matemática. Neste método, especifica-se o critério a ser otimizado e os limites dos valores para os parâmetros de controle, aplicando-se em seguida uma técnica de otimização. O resultado obtido é seguramente o conjunto de valores dos parâmetros que resultam no desempenho ótimo do critério especificado (Rogers, 2002).

Neste trabalho, o sistema de manufatura usado para exemplificar a aplicação das técnicas de Pesquisa Operacional faz parte de uma organização industrial que fornece peças para o setor automotivo. A seleção de uma empresa do setor automotivo para exemplificação fundamentou-se na alta exigência de flexibilidade e o tipo de produção intermitente deste setor.

1.2 Objetivo

O objetivo principal deste trabalho é a análise da abordagem do problema de programação da manufatura por duas técnicas de Pesquisa Operacional, a simulação e programação linear, como meios de apoio à decisão tendo como parâmetros a margem de contribuição e a capacidade produtiva do ambiente de manufatura. A técnica de simulação, particularmente a simulação de eventos discretos, e a técnica de programação linear são aplicadas na definição de um programa de manufatura de uma família de produtos em um sistema real de modo a maximizar sua eficiência tendo como orientação os custos de manufatura e a eficiência produtiva do sistema.

A realização de uma revisão bibliográfica sobre tópicos de matemática aplicada, técnicas de simulação e programação linear, sistemas de manufatura e planejamento e controle da produção além da identificação de vantagens e desvantagens da aplicação das técnicas de simulação e programação linear ao problema proposto foram os objetivos específicos.

1.3 Estrutura do trabalho

Este trabalho é estruturado em cinco capítulos:

Capítulo 2: resumo da revisão bibliográfica dos temas pertinentes ao trabalho. Os temas são: tópicos de matemática aplicada, programação linear, simulação, sistemas de manufatura e programação da produção.

Capítulo 3: apresentação do problema e descrição da metodologia para abordagem do problema para cada técnica.

Capítulo 4: aplicação das técnicas ao problema e apresentação dos resultados.

Capítulo 5: considerações finais, conclusões e apresentação de propostas para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Revisão bibliográfica

2.1 Sistemas de manufatura

Sistema, para Black (1998), é a palavra usada para definir ou ilustrar de uma maneira abstrata, uma montagem (ou arranjo físico) complexa que possui elementos físicos caracterizados por parâmetros mensuráveis. O sistema de manufatura segue esta filosofia. Dentre os elementos físicos importantes na manufatura destacam-se: pessoas, processos, equipamentos, estoque e manuseio de materiais. Dentre os parâmetros mensuráveis destacam-se: taxa de produção, estoque em processo, custo total ou unitário, entre outros.

Atualmente, algumas mudanças têm sido observadas no projeto de sistemas de manufatura. Tais mudanças são, segundo Black (1998), motivadas pelas seguintes tendências:

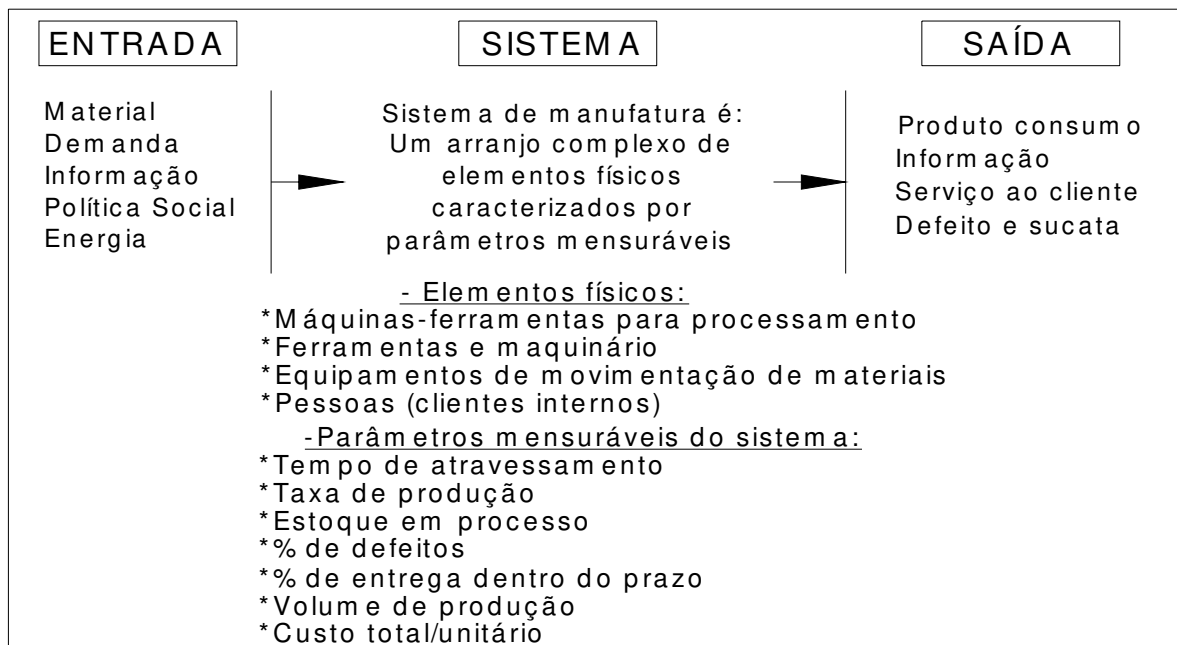
- aumento do número e da variedade de produtos causando uma queda no tamanho de lote;
- pedidos de exatidão e precisão de produtos para uma melhoria de qualidade;
- aumento do número de processos de fabricação devido ao aumento da variedade de materiais;
- redução do tempo entre o projeto do produto e sua fabricação graças aos esforços da engenharia simultânea;
- produtos globais para mercados globais.

Tais tendências, ainda segundo Black (1998), exigirão as seguintes respostas dos sistemas de manufatura:

- reestruturação dos sistemas de manufatura devida à melhoria dos produtos;
- os sistemas de manufatura deverão entregar produtos com qualidade superior, com um custo unitário menor e dentro de um prazo de entrega pré-estabelecido para seus clientes;
- o sistema deve ser projetado de maneira compreensível, flexível e confiável.

Figura 2.1 – Definição de Sistema de Manufatura

Fonte: adaptado de Black (1998)



2.2 Arranjo físico

Arranjo físico pode ser definido das seguintes formas:

“Arranjo físico é a disposição de máquinas, equipamentos e serviços de suporte em uma determinada área com o objetivo de minimizar o volume de transporte de materiais no fluxo produtivo de uma fábrica” (Francischini & Fegyveres, 1997).

“Arranjo físico se refere ao planejamento do espaço físico a ser ocupado e representa a disposição de máquinas e equipamentos necessários à produção dos produtos/serviços de empresa” (Chiavenato, 1991).

O arranjo físico exerce grande importância nas decisões devido à diversos aspectos. Primeiramente, a definição do arranjo físico é uma atividade difícil e de longa duração devido às dimensões físicas dos recursos de transformação movidos dentro do arranjo. Outro aspecto é que uma mudança no arranjo físico pode ser difícil e cara, sendo que, quando se toma uma decisão errônea sobre o arranjo físico, tem-se como consequência um efeito considerável de longo prazo na operação. Sendo assim, os gerentes que irão tomar a decisão sobre o projeto do arranjo físico não podem errar em sua definição (Slack et al, 2002).

Os arranjos físicos podem ser classificados em quatro tipos principais: arranjo físico funcional, arranjo físico em linha, arranjo físico de posição fixa e arranjo físico de processo contínuo (Gonçalves Filho, 2001; Black, 1998; Slack et al, 2002; Francischini & Fegyveres, 1997). Apesar da mesma conceituação, estes autores apresentam em suas obras algumas nomenclaturas diferentes.

2.2.1 Arranjo físico funcional ou por processo

É o tipo mais comum encontrado nas indústrias. Sua característica principal é a produção de uma grande variedade de produtos resultando em pequenos lotes de produção. Pode ser definido também, como aquele que representa as diversas seções (ou máquinas e equipamentos) e o fluxo que o processo segue desde a matéria-prima inicial até o produto acabado. Assim as seções (ou máquinas e equipamentos) figuram como elementos básicos do arranjo físico, enquanto os produtos seguem trajetórias diferentes (Chiavenato, 1991).

Para Francischini & Fegyveres (1997), as características do arranjo físico funcional são:

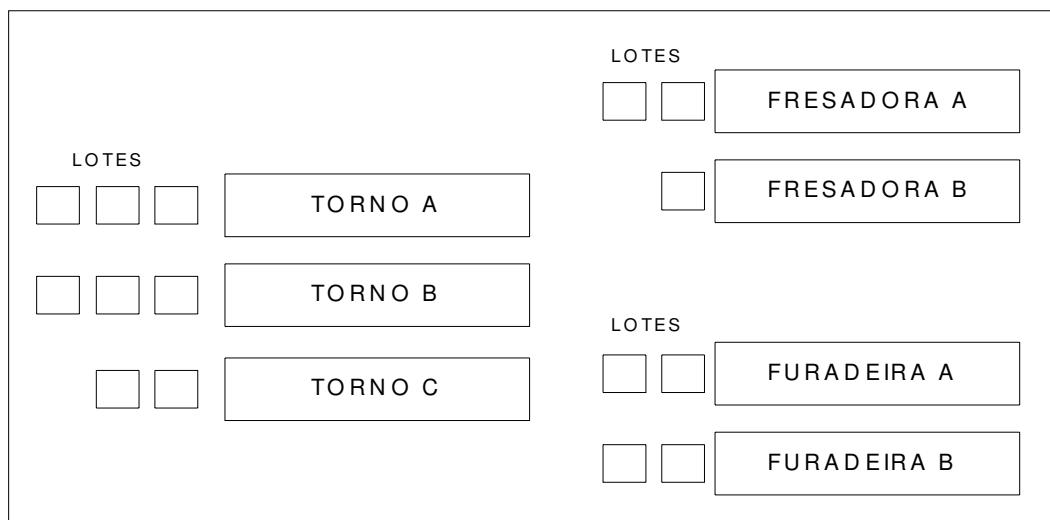
- máquinas e equipamentos ficam fixos e o produto se movimenta;

- as máquinas e equipamentos são agrupados por função;
- grande variabilidade de produtos;
- usado em sistema de produção intermitente (por lote);
- complexo sistema de PCP (Planejamento e Controle da Produção);
- sistema formador de filas de lotes nas máquinas;
- os equipamentos são de média flexibilidade.

Gonçalves Filho (2001) realça a complexidade do arranjo físico funcional devido ao grande número de alternativas possíveis na sua configuração. Mark, Aquilano & Chase (2001) destacam ainda que o arranjo físico funcional depende bastante do planejamento e habilidade profissional dos empregados em todos os níveis.

Figura 2.2 – Arranjo Físico Funcional

Fonte: adaptado de Francischini & Fegyveres (1997)



2.2.2 Arranjo físico em linha ou por produto

O arranjo físico em linha reúne os operários e os equipamentos de acordo com a sequência de operações realizada no produto ou cliente, fazendo uso de transportadores e equipamentos

automatizados para produzir grandes volumes de relativos poucos itens. O trabalho flui de modo tipicamente contínuo e orientado por instruções padronizadas (Martins & Laugen, 2002).

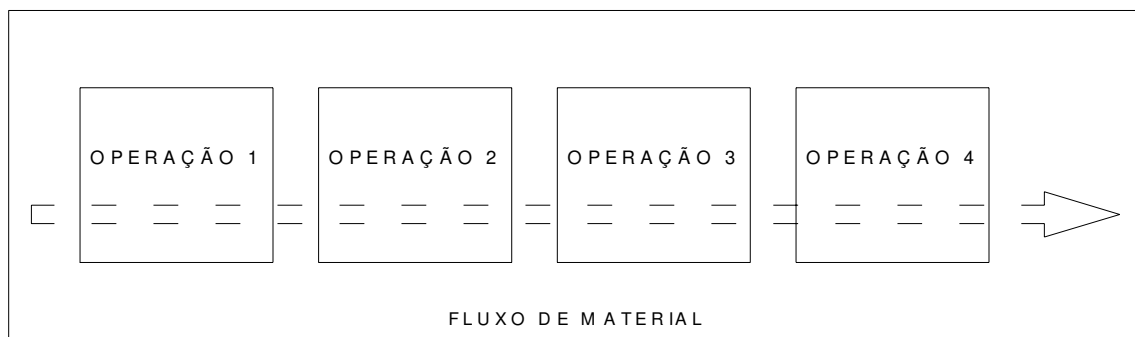
É o tipo de arranjo caracterizado por grandes lotes de produção e máquinas para fins específicos. Possui menor variabilidade de produtos e maior mecanização. São contínuos ou interrompidos. Quando contínuos produzem um item complexo em grande quantidade. Quando o volume se torna muito grande, em especial em uma linha de montagem, o arranjo físico em linha é chamado de produção em massa. Este sistema pode ter altas taxas de produção (Black, 1998).

Para Francischini & Fegyveres (1997), as características do arranjo físico em linha são:

- exige grande investimento em máquinas e equipamentos;
- produtos fabricados em grande quantidade e semelhantes entre si;
- utilizado em processos de produção contínua;
- exige balanceamento de linha;
- equipamentos dispostos de acordo com a seqüência de operações.

Figura 2.3 – Arranjo Físico em Linha

Fonte: Francischini & Fegyveres (1997)



2.2.3 Arranjo físico de posição física ou posicional

Mark, Aquilano & Chase (2001) relatam que o arranjo físico de posição física é um típico sistema voltado para o projeto. O produto permanecer em uma posição fixa durante a fabricação

devido ao seu peso/tamanho. Os recursos, como pessoas, materiais, máquinas são trazidas para o local em que as operações de fabricação serão realizadas.

As características:

- os produtos são fabricados em pequenas quantidades e em grandes dimensões;
- os equipamentos possuem alta flexibilidade.

2.2.4 Arranjo físico de processo contínuo

No arranjo físico de processo contínuo o produto flui fisicamente. Os produtos realmente fluem porque são líquidos, gasosos ou pós. Este tipo de arranjo físico é o mais eficiente, porém o menos flexível sistema de manufatura. Possui o mais enxuto e simples sistema de produção, pois, tem o menor estoque em processo tornando-se fácil de ser controlado (Black, 1998).

2.2.5 Arranjo físico celular

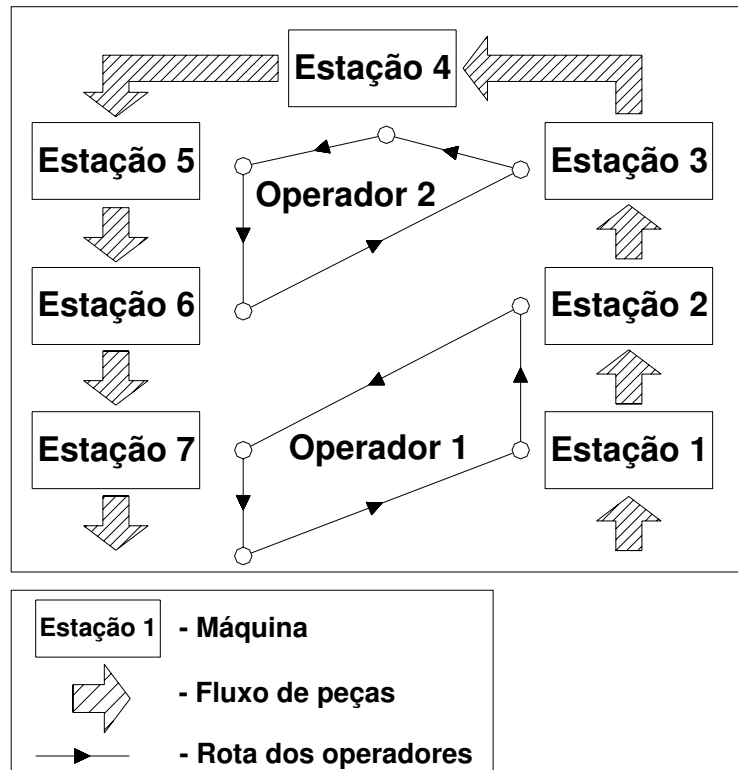
Black (1998), Francischini & Fegyveres (1997) e Slack et al. (2002) definem o arranjo físico celular como um tipo de arranjo físico com o objetivo de montar minifábricas para diferentes famílias de produtos. Tais famílias são grupos de produtos com características semelhantes entre si, tais como: semelhança geométrica e semelhança de processo de fabricação.

Para Martins & Laugen (2002) o arranjo físico celular é um arranjo orientado para o produto que coloca as várias máquinas na sequência necessária para processar uma família de peças; as máquinas e a família de peças são baseadas na análise de tecnologia de grupo (TG). As células estão freqüentemente em formato de U para minimizar a movimentação entre processos.

Black (1998) destaca também que a disposição é projetada, muitas vezes, em forma de U para permitir às pessoas movimentação de uma máquina para outra, carregando e descarregando peças, acrescentando ainda que a disposição dos recursos no arranjo celular se assemelha com o arranjo físico em linha, porém com flexibilidade maior.

Figura 2.4 – Célula de manufatura

Fonte: Taj et al. (1998).



Para Black (1998) e Francischini & Fegyveres (1997), o arranjo físico celular possui as seguintes características:

- lotes de tamanho médio;
- produtos e roteiros variados;
- agrupamento, geralmente em forma de U das máquinas e equipamentos necessários para a produção da família;
- ajusta-se ao *just-in-time*.

Para Francischini & Fegyveres (1997) as vantagens do arranjo físico celular são:

- possuem características de mutualidade, ou seja, podem ser alteradas em intervalos adequados, tornando-se minifábricas de novos produtos de acordo com a época e a demanda. Ainda, se necessário a célula pode voltar a fabricar os produtos originais com a mesma facilidade com que mudou de produto;
- nas células as máquinas podem ser dispostas de modo a permitir aos operadores controlar várias delas ao mesmo tempo, inclusive aquelas com longo tempo de processamento;
- permite um controle produtivo mais simplificado e também mais eficaz, devido ao fluxo de material mais organizado.

2.3 Tópicos de Matemática Aplicada

2.3.1 Vetores

A indicação de um vetor $\mathfrak{R}^n$ será dada por:

$$x = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix}$$

onde $x_i \in \mathfrak{R}$ para $i=1,2,\dots,n$ são as i -ésima componentes do vetor em relação a uma base pré-definida.

Diz-se que os vetores $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, onde $x_i \in \mathfrak{R}^n$ para $i=1,2,\dots,m$, são linearmente independentes (LI) se $a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2 + \dots + a_m \cdot x_m$ implicar em $a_1 = a_2 = \dots = a_n = 0$, caso contrário são linearmente dependentes (LD).

2.3.2 Matrizes

Uma matriz $\mathfrak{R}^{m \times n}$ será indicada por:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix}$$

onde m é o número de linhas da matriz e n é o número de colunas.

As propriedades e notações de matrizes:

- A^T matriz transposta de $A = [a_{ij}]$, onde $A^T = [a_{ji}]$;

- I matriz identidade, onde: $\begin{cases} a_{ij} = 1 & \text{se } i = j \\ a_{ij} = 0 & \text{se } i \neq j \end{cases}$;

- A^{-1} matriz inversa de A ;

- A é uma matriz quadrada simétrica se: $a_{ij} = a_{ji}$ para todo i e j ;

- A é uma matriz semi-definida positiva se: $x^T \cdot A \cdot x \geq 0 \quad \forall \quad x \in \Re^n$;

- A é definida positiva se e somente se: $\begin{cases} x^T \cdot A \cdot x \geq 0 \quad \forall \quad x \in \Re^n \\ x^T \cdot A \cdot x = 0 \Leftrightarrow x = 0 \end{cases}$

2.3.3 Convexidade

Um conjunto de vetores m -dimensionais é convexo se para dois vetores quaisquer do conjunto o segmento de reta entre estes vetores também pertencer ao conjunto.

Diz-se que um conjunto não vazio ψ em $\mathfrak{R}^n$ é convexo se para dois pontos quaisquer $x_1, x_2 \in \mathfrak{R}^n$ o ponto $\lambda \cdot x_1 + (1 - \lambda) \cdot x_2 \in \psi$, para todo $0 \leq \lambda \leq 1$.

Uma função real $f(x)$ definida em um conjunto convexo ψ em $\mathfrak{R}^n$, diz-se convexa se para dois pontos quaisquer $x_1, x_2 \in \psi$ e qualquer λ real, $0 \leq \lambda \leq 1$ tem-se $f(\lambda \cdot x_1 + (1 - \lambda) \cdot x_2) \leq \lambda \cdot f(x_1) + (1 - \lambda) \cdot f(x_2)$.

2.3.4 Sistemas de equações lineares

Defini-se equações lineares as equações do tipo $a \cdot x = b \Rightarrow x = \frac{b}{a}$, $a \neq 0$.

Da mesma forma que para as equações lineares, pode-se definir um sistema de equações lineares da seguinte forma:

$$A \cdot x = b \Rightarrow x = A^{-1} \cdot b, \det(A) \neq 0$$

onde A é uma matriz quadrada $n \times n$.

Um sistema de equações lineares pode ser representado da seguinte forma:

$$\begin{cases} a_{11} \cdot x_1 + a_{12} \cdot x_2 + \cdots + a_{1n} \cdot x_n = b_1 \\ a_{21} \cdot x_1 + a_{22} \cdot x_2 + \cdots + a_{2n} \cdot x_n = b_2 \\ \vdots \\ a_{n1} \cdot x_1 + a_{n2} \cdot x_2 + \cdots + a_{nn} \cdot x_n = b_n \end{cases}$$

Existem diversos métodos para solução tais sistemas, que podem ser classificados como:

- Métodos diretos:

x é encontrado após um número previsível de operações

Ex.: método de Crout, método de Choleski entre outros.

- Métodos indiretos:

x é encontrado após um número não previsível de operações

Ex.: método de Jacobi, método de Gauss-Seidel entre outros.

2.4 Programação linear

Um problema de otimização envolve a escolha de valores para um conjunto de variáveis inter-relacionadas, com o objetivo de alcançar um determinado objetivo. Esses problemas se caracterizam pelo grande número de soluções que satisfazem as condições impostas. A escolha de uma determinada solução como a melhor de todas depende do objetivo que se quer atingir e, esse objetivo determina a qualidade dessa escolha (Donato, 2002).

Os problemas de programação linear são um tipo de problema de otimização e referem-se à distribuição eficiente de recursos limitados entre atividades competitivas com a finalidade de atender a um determinado objetivo. Em se tratando de programação linear, esse objetivo será expresso por uma função linear, à qual dá-se o nome de função objetiva. As informações de proporção de consumo e designação de recursos consumidos são fornecidas por equações ou inequações lineares que são chamadas restrições (Puccini, 1981).

Os problemas de programação linear são os mais utilizados dentre os problemas de otimização (Dongarra & Sullivan, 2000) e sua forma geral normal é:

$$\text{Otimizar } x_0 = \sum_{j=1}^n c_j \cdot x_j$$

sujeito a :

$$\sum_{j=1}^n a_{ij}x_j \geq d_i \quad i = 1, 2, \dots, p$$

$$\sum_{j=1}^n a_{ij}x_j = d_i \quad i = p+1, p+2, \dots, m$$

$$x_j \geq 0, \quad j = 1, 2, \dots, q$$

$$x_j \in \Re, \quad j = q+1, q+2, \dots, n$$

A otimização (maximização ou minimização) da função objetiva está sujeita a algumas restrições que limitam o conjunto de valores que as variáveis podem assumir, sendo o conjunto de restrições representado matematicamente como um sistema de equações lineares. A solução que satisfaz o conjunto de restrições do problema e que otimiza (maximiza ou minimiza) a função objetiva é denominada solução ótima.

Uma medida para determinar a complexidade de um problema de programação linear é seu tamanho, que pode ser medido em termos do número de variáveis e restrições envolvidas (Donato, 2002). Segundo Prado (1999), os problemas de otimização podem ser divididos, de acordo com seu tamanho, em três grupos distintos: pequeno, médio e grande porte. Devido à diversidade de técnicas existentes para resolução de tais problemas, e também ao avanço da tecnologia computacional atual, não se pode citar com precisão parâmetros que permitam diferenciar um grupo do outro.

A grosso modo, pode-se dizer que problemas de pequeno porte são aqueles cuja resolução pode ser facilmente acompanhada passo a passo, problemas de médio porte são aqueles cuja resolução necessita do auxílio do computador, mas sem aplicação de qualquer técnica ou equipamento especial e problemas de grande porte caracterizam-se por necessitarem de estrutura matemática particular e alto esforço computacional para resolução. O algoritmo utilizado neste trabalho para resolução do problema proposto é o Simplex que é adaptável e eficiente para resolução de problemas de todos os portes.

Goldbarg & Luna (2000) destacam ainda a extrema importância da programação linear devido à eficiência dos algoritmos de solução existentes e a possibilidade da transformação dos modelos de programação não-linear em modelos de programação linear.

2.4.1 Método Simplex

O método Simplex foi desenvolvido por Dantzig em 1947 para resolver problemas de programação linear. O Simplex é um algoritmo, isto é, um procedimento que termina em um número finito de operações (Nash & Sofer, 1996).

O algoritmo Simplex se utiliza de um ferramental baseado na álgebra linear para determinar, por um método iterativo, a solução ótima e tem sido citado como um dos dez algoritmos de maior influência no desenvolvimento e prática da ciência e da engenharia no século vinte (Yarnish, 2002).

Em linhas gerais, o algoritmo Simplex parte de uma solução viável do sistema de equações que constituem as restrições do problema e, a partir desta solução inicial, novas soluções viáveis são identificadas de valor igual ou melhor que a corrente. O algoritmo possui um critério de escolha que permite encontrar sempre novos e melhores vértices da envoltória convexa do problema, e um outro critério que consegue determinar se o vértice escolhido é ou não um vértice ótimo (Goldbarg & Luna, 2000).

Considere um modelo de programação linear na forma matricial ou padrão:

$$\text{otimizar : } z = C^T X$$

$$\text{sujeito a : } AX = B$$

$$\text{com : } X \geq 0$$

$$\text{onde : } B \geq 0$$

começando de uma solução básica viável X_0 , o método Simplex localiza sucessivamente outras soluções básicas viáveis acarretando melhores valores para a função objetivo até ser obtida a solução ótima.

O funcionamento do método Simplex descrito baseia-se nos seguintes teoremas fundamentais (Puccini, 1981):

Teorema 1: o conjunto de todas as soluções compatíveis do modelo de programação linear é um conjunto convexo.

Teorema 2: toda solução compatível básica do sistema $AX = B$ é um ponto extremo do conjunto das soluções compatíveis.

Teorema 3: se a função objetivo possui um máximo (mínimo) finito, então pelo menos uma solução ótima é um ponto extremo do conjunto convexo das soluções compatíveis. Se a função objetivo assume máximo (mínimo) em mais de um ponto extremo, então ela toma o mesmo valor para qualquer combinação convexa desses pontos extremos.

2.5 Simulação

2.5.1 Introdução

Simulação pode ser definida das seguintes formas:

Simulação é uma técnica usada por computadores para imitar, ou simular as operações ou processos de várias espécies do mundo real (Law & Kelton, 1991).

Simulação é a imitação de operações de um processo ou sistema real (Banks, 1996).

Simulação é um processo de experimentação com um modelo detalhado de um sistema real para determinar como o sistema responderá a mudanças em sua estrutura, ambiente ou condições de contorno (Harrel, 2002).

Devido ao caráter multidisciplinar da simulação, Protil (2001) destaca que foram encontradas 22 definições diferentes de simulação em língua inglesa e que seus métodos encontram aplicações em campos como: informática, engenharia da produção, ciências administrativas, pesquisa operacional estatística, biologia, etc.

Ingalls (2001) destaca que a propriedade da simulação de *imitar* a dinâmica dos sistemas reais é, não apenas uma grande vantagem em relação aos pacotes (programas de computador) comerciais de otimização, mas também responsável pela sua maneira singular de análise de resultados.

Para Lobão & Porto (1997) a simulação permite:

- identificação de problemas;
- comparação com o desempenho de outros sistemas;
- estudos sobre a utilização da capacidade instalada, níveis de inventário, lógica de controle, refinamento de projeto, integração, seqüenciamento, gargalos do sistema, melhor arranjo físico e melhores índice de produtividade dos funcionários;
- treinamento de operadores, testes de inicialização de equipamentos, etc..

A comunicação através da visualização e quantificação do que está acontecendo no sistema estudado são, segundo Law & McComas (2001), os objetivos primordiais da simulação.

2.5.2 Conceitos e estrutura da simulação

Dentre os conceitos ligados à simulação Banks, Carson & Nelso (1996) destacam: sistema, modelos de sistema, simulação de eventos discretos e contínuos.

- Sistema: grupo de objetos que são agrupados com a finalidade de interação e interdependência voltadas para a realização de um propósito.
- Modelos de sistema: representação de um sistema real, com o propósito de estudo deste sistema.
- Simulação de eventos discretos: o estado do sistema muda de acordo com um número finito de mudanças no tempo. Mudanças no status do sistema ocorrem somente em pontos isolados no tempo.

A simulação de eventos discretos começa a partir de uma definição matemática e lógica de como o estado do sistema irá mudar no tempo. As variáveis de estado são estabelecidas para coletar as estatísticas sobre o desempenho do sistema. Um relógio simula o tempo decorrido, no qual com o decorrer do tempo de simulação, ocorrem processamentos de acordo com um calendário de eventos que contém uma listagem de quando cada tipo de evento irá ocorrer no sistema. Tais eventos podem ser as chegadas de material, início das operações, fim das operações, quebras de máquinas entre outros. Um gerador de números aleatórios gera os valores de acordo com uma distribuição de probabilidade previamente especificada.

- Simulação de eventos contínuos: o estado do sistema muda continuamente no tempo.

Para Ingalls (2001) os programas comerciais de simulação apresentam em sua estrutura os seguintes componentes:

- entidade: objeto que possui interesse no sistema (pessoas, máquinas etc.);
- atributos: propriedade da entidade;
- atividades e eventos: atividades são os processos e a lógica da simulação. Eventos são as condições que causam uma mudança no estado do sistema;
- recursos: representam a restrição de capacidade de alguma entidade;
- estado: é o conjunto de variáveis necessárias do sistema para descrever o sistema em um tempo particular relativo aos objetos de estudo;
- calendário: lista dos eventos que estão programadas para serem executadas no modelo;
- medidor de tempo: relógio que mede o tempo corrente na simulação;

- gerador de números aleatórios: gera os valores que estabelecem a ocorrência de determinados eventos;
- coletor de dados estatísticos: coleta os valores estatísticos de certos estados do sistema baseados nos atributos das entidades.

2.5.3 Simulação na manufatura

A simulação tem sido freqüentemente usada como ferramenta de auxílio na tomada de decisões estratégicas relacionadas com os processos produtivos. Modelos de simulação são muito úteis para examinar o rendimento de configurações e procedimentos de operação alternativos de sistemas de manufatura (Barton , 2001).

O’Kane, Spenceley & Taylor (2000) afirmam que no ambiente da manufatura, a simulação é usada em situações em que o experimento em situação real é muito caro ou difícil. A possibilidade de experimento dos modelos variando-se os parâmetros críticos é de extrema utilidade, pois pode-se analisar os efeitos de mudanças sem o risco de construção de um sistema real equivocado.

Muitos trabalhos têm sido produzidos sobre o uso da simulação para planejamento e implementação da manufatura celular (FMC – *Flexible Manufacturing Cell*), para análise de custos da produção e para análise da movimentação e alocação de recursos no processo produtivo.

A seguir são apresentados alguns exemplos de estudos do emprego da simulação em sistemas de manufatura:

- Farahmand (2000) descreve um estudo sobre o uso da simulação para justificar a substituição de um sistema produtivo em linha por um sistema produtivo celular. A avaliação das melhorias da mudança de *lay-out* foi feita em função de parâmetros como: tempo de processamento e fluxo de material, nível de estoque em processo e nível de utilização de recursos.

As análises dos dados de saída das simulações resultaram que o sistema produtivo celular apresentou uma redução do tempo de fluxo de saída de material, números de operadores necessários e estoque em processo.

A simulação dos modelos proporcionou ainda uma melhor compreensão do processo de planejamento do sistema produtivo celular. Elementos críticos para o processo foram identificados e o projeto do sistema celular foi facilitado pela visualização da célula e das soluções propostas. A solução considerada ótima foi atingida após modificações sucessivas no modelo original.

Este estudo mostra também que a simulação é de muita valia no planejamento de desenvolvimentos futuros do sistema, pois através dos modelos testados pode-se prever o rendimento e possíveis problemas que podem ocorrer.

- Montevechi et al. (2003) descrevem o uso da simulação para reduzir o custo de produção, sem afetar negativamente a produtividade, de um sistema de manufatura em lotes do ramo de componentes automotivos. Neste caso a simulação demonstrou a viabilidade da compra de mais uma máquina e a adição de mais um operador ao sistema com aumento global de performance da ordem de 24%.

- Taj et al. (1998) descrevem o uso da simulação para verificar a viabilidade de implantação do sistema de manufatura celular em uma indústria do ramo automotivo. No caso apresentado, as células deveriam ser compostas combinando-se máquinas novas com outras já existentes no sistema corrente (arranjo funcional).

O aumento da flexibilidade da produção e a diminuição do tempo de fluxo de materiais eram os principais objetivos da implantação do sistema celular no caso estudado.

Devido aos diferentes tempos de processamento das máquinas existentes (de 6 segundos por peça para o processo mais rápido até 200 segundos por peça para o mais lento) e longos tempos

de *setup* e manutenção, os resultados das simulações mostraram que para algumas peças não era viável a implantação de células de manufatura.

Outros problemas menos evidentes foram identificados através da simulação, como por exemplo o tamanho das máquinas existentes. Estas não foram projetadas tendo-se em mente a produção celular sendo que suas grandes dimensões resultariam em grandes distancias a serem percorridas pelos operadores e as pesadas fundações de concreto necessárias resultariam em grandes custos para relocação.

- Takakuwa (1997) e Spedding & Sun (1999) examinam o uso da simulação na implantação do sistema de custeio baseado em atividades (ABC) em sistemas de manufatura celular e em linha. O uso da simulação viria a corrigir a falta de precisão dos métodos tradicionais de contabilidade na descrição e alocação dos custos em um processo produtivo.

O procedimento de análise dos custos com o auxílio da simulação mostrou-se eficiente não apenas sob o ponto de vista da eficiência do processo, mas também sob o ponto de vista econômico. Através da dinâmica da simulação foi possível desenvolver um procedimento que incluísse além dos aspectos operacionais do sistema, variáveis financeiras. Também foi demonstrada a precisão da contabilidade dos custos da simulação quando comparada com a performance do sistema real.

2.5.4 Programas de simulação

O surgimento dos computadores foi um grande impulso para o desenvolvimento e popularização da simulação. A análise de sistemas passou a ser feita também através da imitação de seu funcionamento em ambiente virtual, e não apenas através de fórmulas matemáticas.

Como resultado do constante desenvolvimento da simulação computacional, surgiu na década de 80 a técnica de simulação visual, onde programas são capazes de gerar na tela de um computador imagens que lembram exatamente o processo que está sendo simulado. Atualmente

existem vários programas de simulação, tais como: ARENA, TAYLOR, PROMODEL, AUTOMOD entre outros (Prado, 1999).

Além dos programas para simulação visual citados por Prado (1999), Black (1998) destacam duas outras categorias de programas para simulação: as linguagens de programação de uso geral (FORTRAN, C, C++, etc.) e as linguagens de programação de simulação (GPSS/H, SIMAN etc.).

O desenvolvimento acelerado da simulação visual de alta fidelidade, isto é, com excepcional qualidade gráfica e precisão na emulação dos sistemas modelados, é uma tendência da simulação (Banks, Carson & Nelso, 1996). Por esta razão, a simulação visual é empregada neste trabalho.

2.5.5 Programa de simulação ProModel

O ProModel é uma ferramenta de simulação e animação projetada para modelar sistemas de manufatura dos mais diversos tipos de modo rápido e preciso. Utiliza o ambiente Windows e apresenta facilidades para a modelagem, depuração, visualização da execução, análise estatística de resultados e geração de relatórios, assim como a maioria dos programas disponíveis. Uma característica importante é a facilidade na definição de cenários para o sistema estudado, possibilitando a simulação simultânea e a comparação dos resultados obtidos (Harrel, 2002).

O programa possui várias funções lógicas e booleanas acopladas além do *Sat::Fit*, um recurso que ajuda o usuário a selecionar a distribuição estatística mais apropriada para os dados de entrada. Sub-rotinas externas programadas em outra linguagem de programação, como o C ou o Visual Basic, podem ser ligadas dinamicamente ao modelo podendo ser acessadas a qualquer tempo (Harrel & Price, 2003).

Harrel & Price (2003) também destacam que o desenvolvimento dos modelos é completamente gráfico e orientado a objetos. Todos os dados de entrada são fornecidos graficamente com as informações sendo agrupadas por tipo de objeto e apresentadas de forma tabular para um acesso rápido e intuitivo. O Promodel segue o padrão de Interface Gráfica com o Usuário (GUI – *Graphical User Interface*) permitindo aos usuários familiarizados com outros

programas para ambiente *Windows* a minimização da curva de aprendizagem e maximização da eficiência na modificação de modelos complexos.

2.6 Planejamento e controle da produção

A programação da produção foi desde seu início uma das funções do departamento de planejamento e controle da produção (PCP), junto a atividades como controle central da produção e preparação das ordens de fabricação, essa função é o planejamento a mais curto prazo e determina quanto, quando e onde se deve fazer, diferente do planejamento que determina o que se deve fazer (Lucero, 2001).

Um sistema de planejamento e controle de produção fornece informações para um gerenciamento eficiente do fluxo de materiais, uma utilização eficaz de recursos, uma coordenação das atividades internas com fornecedores e uma comunicação com os clientes sobre os requisitos de mercado (Mark, Aquilano & Chase, 2001).

Vários termos são freqüentemente utilizados em língua portuguesa para tratar o mesmo assunto, tais como: gestão da produção, gerenciamento da produção, administração da produção e planejamento e controle da produção (Corrêa et al. 2001).

Corrêa et al. (2001) destacam as principais atividades inerentes ao PCP independente do sistema produtivo:

- Previsão de vendas e/ou carteira de pedidos: o planejamento praticamente se inicia com os dados da área de vendas. Normalmente, estes dados dizem respeito ao que produzir, em quais quantidades e em que prazo.
- Planejamento agregado da produção: consiste no estabelecimento dos níveis gerais de produção e capacidade de um prazo de médio/longo prazo. Nesse nível de planejamento, uma macro comparação da carga de trabalho com a capacidade permite antecipar a tomada de decisões, tais como novos investimentos.

- Programa mestre de produção: consiste em um referencial básico para a produção, estabelecendo quando e em que quantidade cada produto deverá ser produzido dentro de um certo horizonte de planejamento. Na elaboração deste programa, as limitações impostas pela capacidade são verificadas em um nível macro, ou seja, é a etapa onde verificações mais detalhadas da capacidade podem nivelar a produção por restrições organizacionais e/ou econômicas.
- Planejamento das necessidades dos materiais: calcula as chamadas necessidades líquidas para cada produto ou componente a ser produzido. Essas necessidades líquidas são calculadas com base nas necessidades brutas vindas da lista de materiais, pelas exigências impostas pelo programa mestre e pelas informações do controle de estoque.
- Controle de estoque: trata basicamente sobre todos os itens fabricados, comprados e utilizados pela indústria para a produção de seus produtos. O controle de estoques visa trabalhar com dois objetivos aparentemente conflitantes: minimizar os investimentos em estoques e maximizar os níveis de atendimento aos clientes e a produção da indústria.
- Programação da produção: consiste em determinar os prazos de entrega para os itens definidos, respectivamente como comprados e fabricados. Para os itens fabricados, muitas vezes são definidos também o centro produtivo e a sequência das operações a serem realizadas. As restrições a esta tarefa são impostas pela capacidade disponível do centro produtivo, para o período em questão, bem como pelas exigências tecnológicas colocadas nos roteiros de produção.
- Planejamento e controle da capacidade: estipula quais devem ser os níveis de produção máximos que os centros produtivos devem ter em um certo horizonte de planejamento. Cuida das providências para que a capacidade planejada seja realizada e das informações a serem utilizadas por outras atividades do PCP.
- Controle da produção: consiste em acompanhar a fabricação e compra dos itens planejados, com o objetivo de que os prazos sejam cumpridos. O controle da produção costuma também atuar colhendo dados importantes para o sistema de custos, tomando decisões típicas de chão-de-fábrica (como mudança de prioridades, necessidade de horas extra, etc.) e alimentando informações ao controle de estoques.

Segundo Corrêa & Giansesi (1993), os sistemas de planejamento e controle da produção são elaborados, geralmente, com fundamento em um dos três métodos de administração da produção mais conhecidos: Manufacturing Resources Planning – MRP II, Just-in-Time – JIT, e Optimized Production Technology – OPT. Estes métodos, por sua vez, têm origem nas três principais filosofias ou linhas de pensamento da administração da produção: filosofia tradicional baseada na concepção fordista, que deu origem ao MRP II; o sistema Toyota de produção, que deu origem ao JIT; e teoria das restrições que deu origem ao OPT.

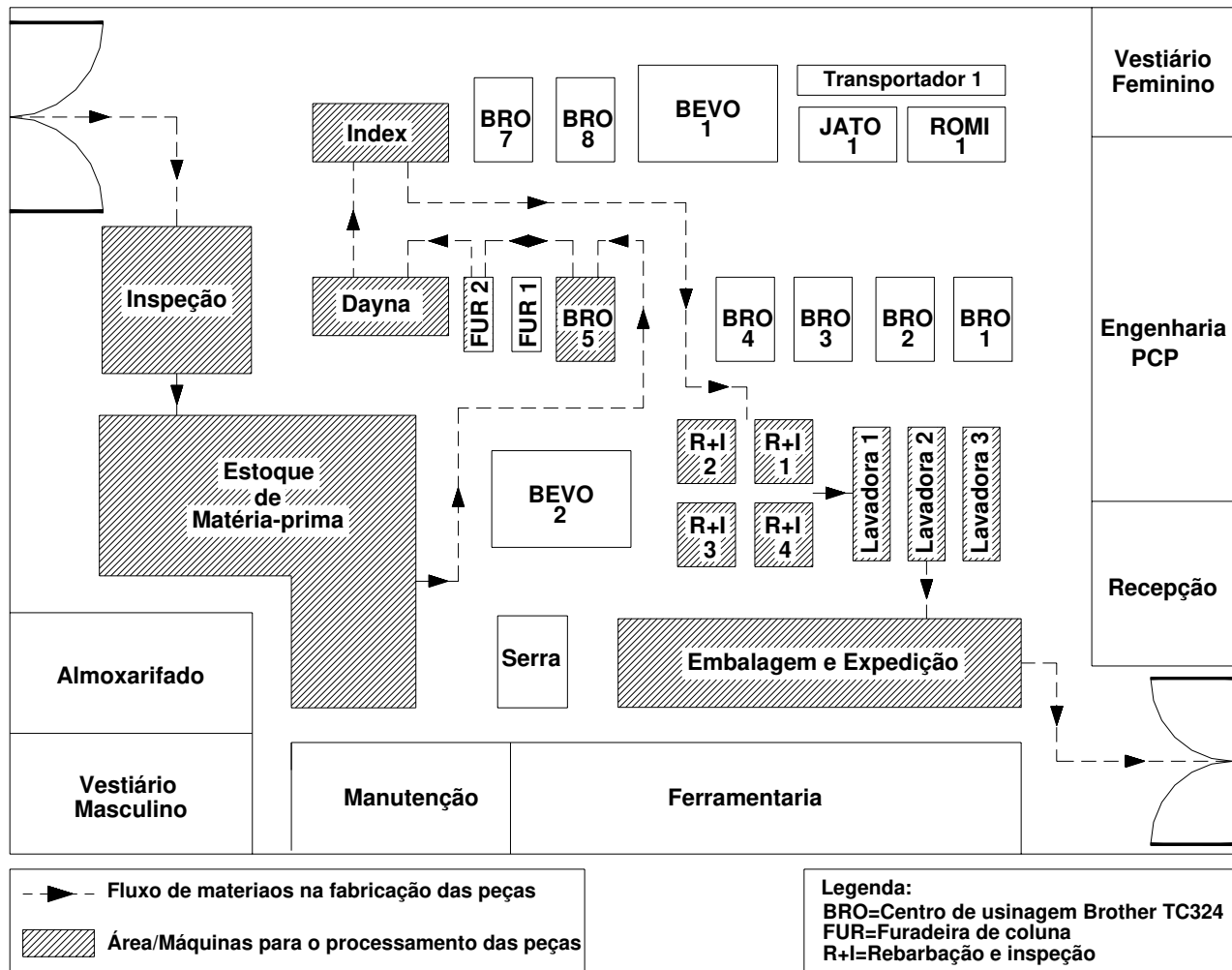
Capítulo 3

Apresentação do Problema

3.1 Descrição do problema

O projeto a ser abordado neste trabalho é o processamento de uma família de cinco produtos em um sub-sistema de manufatura composto por máquinas diferentes dispostas em arranjo físico funcional. O sistema de manufatura do qual o sub-sistema em estudo faz parte, é responsável pela fabricação de diferentes famílias de produtos, como válvulas, conectores e pistões, componentes de sistemas de ar-condicionado automotivos. O *lay-out* esquemático do sistema de manufatura pode ser visualizado na figura 3.1.

Figura 3.1: *lay-out* esquemático do sistema de manufatura



A produção é caracterizada pela produção em lotes sendo, portanto intermitente. As máquinas são compartilhadas durante o processo de fabricação conforme necessidades de produção pré-estabelecidas. O problema de programação deste trabalho é estabelecer as quantidades ótimas de cada lote dos cinco diferentes produtos processados pelo sub-sistema de modo a maximizar a Margem de Contribuição Total ao lucro perante as várias limitações dos recursos. As várias limitações dos recursos referem-se à disponibilidade de produção de tais recursos em relação à demanda.

A matéria-prima dos produtos fabricados pelo sub-sistema de manufatura em estudo é componentes forjados provenientes de um fornecedor externo e estes componentes passam progressivamente por uma série específica de operações até o produto final. Os produtos passam basicamente por oito estágios operacionais mais estágios de inspeções, embalagem e estocagem. Cada estágio operacional é executado em máquina dedicada com uso de dispositivos de fixação apropriado. Para a família em estudo, a tabela 3.1 mostra as operações e as máquinas necessárias para fabricação dos produtos e a tabela 3.2 mostra as operações requeridas para produção de cada produto.

Tabela 3.1: etapas operacionais

No da operação	Descrição da operação	Máquina/Modelo
10	Faceamento	Centro de usinagem/Brother TC-324
20	Furação	Centro de usinagem/Brother TC-324
30	Rebaixo do furo	Furadeira de coluna
40	Usinagem alívio	Centro de usinagem/Brother TC-324
50	Rosca conexão	Torno CNC/Dayna Myte 3300
60	Canal de retenção	Torno CNC/Index 170
70	Rebarbação + Inspeção	Manual
80	Lavagem	Lavadora

Tabela 3.2: seqüência de operações para produção de cada peça.

Peça	Seqüência de operações
20.03.01.1560	10; 20; 30; 50; 70; 80
20.03.01.0781	10; 20; 30; 40; 50; 60; 70; 80
20.03.01.1010	10; 20; 30; 50; 60; 70; 80
20.03.01.0760	10; 20; 30; 50; 60; 70; 80
20.03.01.1000	10; 20; 30; 50; 60; 70; 80

Para todos os produtos da família, as operações de estocagem e inspeção de recebimento precedem a operação 10 e após a operação 80 é executada a embalagem. Um operador é responsável pelas operações 10 e 20 que são executadas por um centro de usinagem CNC. O operador carrega e descarrega as peças na máquina e durante o tempo de ciclo da peça carregada,

executa a rebarbação e inspeção dos furos com dispositivo passa-não passa da peça descarregada. As peças, neste centro de usinagem, são processadas e acondicionadas em recipientes com capacidade para 150 peças. Estes recipientes contendo o lote executado são levados manualmente até a próxima etapa pelo operador responsável pelas operações 10 e 20.

A operação 30 é executada por um operador em uma furadeira de coluna que está posicionada próxima às máquinas que executam as operações 50 e 60. Da operação que envolve o uso da furadeira, as peças são transportadas manualmente nos recipientes para as operações seguintes pelo próprio operador da furadeira.

Os tornos CNC que executam as operações 50 e 60 estão posicionados de modo a minimizar a movimentação de material, pois salvo uma exceção (peça 20.03.01.1560) a operação 50 precede a operação 60. Há um operador responsável pela operação 50 e outro pela operação 60 que, além de carga e descarga de peças na máquina, também executam inspeção visual e com instrumentos dos componentes que passam pelo processo.

Na fabricação da peça 20.03.0781 ocorre um contrafluxo. Após as operações 10 e 20 que são executadas pelo centro de usinagem e a operação 30 que é executada na furadeira de coluna, a peça deve retornar ao centro de usinagem para a operação 40. Este processo requer uma nova preparação do centro de usinagem.

As peças são levadas para a operação 70 em recipientes pelos operadores dos estágios precedentes. A operação 70 é realizada manualmente por quatro operadores que além da rebarbação executam inspeção visual e com instrumentos das peças. Assim como em todas as outras operações do sub-sistema, as peças, na situação real, são submetidas à operação 70 seguindo predominantemente a regra de prioridade de que o primeiro lote a chegar é o primeiro lote a ser processado (*First In First Out - FIFO*).

As lavadoras (existem três máquinas que atendem ao sistema completo) que realizam a operação 80 estão posicionadas perto das estações da operação 70 e um operador é responsável pela carga, descarga e operação das lavadoras, bem como pelo transporte do material da operação

precedente. Outros dois operadores são responsáveis pela embalagem das peças, identificação das caixas e transporte das embalagens até a área de despacho. Os operadores que realizam a rebarbação + inspeção, lavagem e embalagem das peças atendem, não apenas ao sub-sistema em estudo, mas ao sistema completo.

A matéria-prima (forjados) é adquirida e a demanda é estipulada mensalmente. O lote mínimo de aquisição de material forjado especificado pelo fornecedor é de 500 peças. A tabela 3.3 mostra a demanda dos produtos da família em estudo.

Tabela 3.3: demanda por produto (unidades)

Mês / Peça	20.03.01.1560	20.03.01.0781	20.03.01.1010	20.03.01.0760	20.03.01.1000
dezembro-02	585	610	1310	5850	1450
janeiro-03	504	560	1450	5198	1220
fevereiro-03	476	420	1100	4250	1185
março-03	559	560	1340	5240	1360
abril-03	482	515	1640	4920	1155
maio-03	470	515	1250	5320	1360
junho-03	547	500	1730	5745	1295
julho-03	588	560	1348	4950	1310
agosto-03	565	590	1590	5723	1360
setembro-03	550	510	1707	4878	1155
outubro-03	480	610	1100	5946	1428
novembro-03	720	780	2600	6079	1460
dezembro-03	620	560	1100	5300	1230

A quantidade de produção exigida para cada produto varia mensalmente em função da demanda. Para manufatura dos produtos há compartilhamento de recursos e necessidade de preparação de máquina e trocas de ferramentas, o que ocasiona interrupção da produção e, por conseguinte, limitação da flexibilidade da manufatura. As tabelas 3.4, 3.5, 3.6, 3.7 e 3.8 mostram os tempos de *setup*, isto é, tempos de troca de ferramenta, ajustes e reinício de produção com qualidade, em cada máquina para cada produto e a tabela 3.9 os tempos de ciclo de cada operação.

O tempo de ciclo, segundo Bockerstette & Moura (1995), é o tempo total exigido por um processo para entregar um produto acabado que satisfaz as necessidades do cliente. Os valores da tabela 3.9 incluem o tempo de transporte das peças da operação anterior, tempo de carga e descarga da máquina e o tempo de processamento.

Os valores indicados nas tabelas representam os valores médios das observações, sendo considerados os valores mais prováveis dos tempos. Estes valores foram informados pelo setor responsável pela programação e controle da produção e foram adotados porque supõe-se que a habilidade de operação e fixação das peças nas máquinas é igual para todos os operadores em todas as máquinas .

Tabela 3.4: tempo de *setup* para faceamento + furação (hora/*setup*)

Peça	20.03.01.1560	20.03.01.0781	20.03.01.1010	20.03.01.0760	20.03.01.1000
Operação	10+20	10+20	10+20	10+20	10+20
Máquina	<i>Brother TC-324</i>	<i>Brother TC-324</i>	<i>Brother TC-324</i>	<i>Brother TC-324</i>	<i>Brother TC-324</i>
Setup (h)	00:45	00:40	00:40	00:50	00:45

Tabela 3.5: tempo de *setup* para rebaixo do furo (hora/*setup*)

Peça	20.03.01.1560	20.03.01.0781	20.03.01.1010	20.03.01.0760	20.03.01.1000
Operação	30	30	30	30	30
Máquina	<i>Furadeira</i>	<i>Furadeira</i>	<i>Furadeira</i>	<i>Furadeira</i>	<i>Furadeira</i>
Setup (h)	00:10	00:10	00:10	00:10	00:10

Tabela 3.6: tempo de *setup* para usinagem do alívio (hora/*setup*)

Peça	20.03.01.1560	20.03.01.0781	20.03.01.1010	20.03.01.0760	20.03.01.1000
Operação	-	40	-	-	-
Máquina	-	<i>Brother TC-324</i>	-	-	-
Setup (h)	-	00:30	-	-	-

Tabela 3.7: tempo de *setup* para rosca de conexão (hora/*setup*)

Peça	20.03.01.1560	20.03.01.0781	20.03.01.1010	20.03.01.0760	20.03.01.1000
Operação	50	50	50	50	50
Máquina	<i>Dayna Myte 3300</i>	<i>Dayna Myte 3300</i>	<i>Dayna Myte 3300</i>	<i>Dayna Myte 3300</i>	<i>Dayna Myte 3300</i>
Setup (h)	00:50	00:50	00:50	00:50	00:50

Tabela 3.8: tempo de *setup* para canal de retenção (hora/*setup*)

Peça	20.03.01.1560	20.03.01.0781	20.03.01.1010	20.03.01.0760	20.03.01.1000
Operação	60	60	60	60	60
Máquina	<i>Index 170</i>	<i>Index 170</i>	<i>Index 170</i>	<i>Index 170</i>	<i>Index 170</i>
Setup (h)	-	00:45	00:50	00:45	00:45

Tabela 3.9: tempo de ciclo (segundo)

Peça / Operação	10+20	30	40	50	60	70	80
20.03.01.1560	110	95	-	152	-	110	90
20.03.01.0781	115	104	110	155	120	110	90
20.03.01.1010	110	97	-	140	98	110	90
20.03.01.0760	100	90	-	125	90	110	90
20.03.01.1000	110	90	-	123	85	110	90

Para as operações 70 e 80, rebarbação + inspeção e lavagem respectivamente, não há *setup* para o processamento das diferentes peças e a embalagem para todas as peças é processada a uma taxa de 300 peças por hora.

Os operadores do sub-sistema são responsáveis pela limpeza e organização do ambiente de trabalho, além da qualidade dos componentes, sendo que para isso eles dispõem de instrumentos adequados. A responsabilidade de coordenar o chão-de-fábrica diretamente é do setor de planejamento e controle da produção. Este setor é responsável pelo monitoramento do estoque, recebimento de pedidos, envio de ordens de produção e definição de prioridades. O sub-sistema totaliza 10 operadores, porém este número pode variar, pois pode haver relocações de funcionários dentro da fábrica.

A manutenção preventiva (parada programada) das máquinas do sub-sistema em estudo é realizada anualmente. No centro de usinagem Brother TC-324 a manutenção preventiva é executada no mês de outubro e tem duração de oito horas, no torno Dayna Myte 3300 em novembro com duração de seis horas, no torno Index 170 em dezembro com duração de seis horas e na furadeira de coluna em janeiro com duração de duas horas. Em relação à manutenção corretiva, foram coletados dados no histórico de quebras de máquina e respectivos tempos de serviço de reparação. As tabelas 3.10, 3.11, 3.12 e 3.13 mostram as manutenções corretivas (paradas não-planejadas) das máquinas nos meses de março, abril, maio, junho, julho, agosto, setembro, outubro e novembro de 2003. A lavadora não registrou necessidade de manutenção corretiva.

Tabela 3.10: manutenções corretivas (Dayna Myte 3300)

Máquina:Dayna Myte 3300		
Data	Duração (h:min)	Motivo
6/mar	00:40	Problema na pinça de fixação
10/abr	00:55	Substituição da mangueira pneumática
14/mai	00:45	Mal contato nos conectores
1/jun	00:55	Entupimento da mangueira de óleo de corte
20/ago	01:30	Desalinhamento da torre
24/set	00:50	Substituição da mangueira de óleo de corte
10/out	00:50	Ajuste do sensor
29/out	00:30	Porta fusível quebrado

Tabela 3.11: manutenções corretivas (Index 170)

Máquina: Index 170		
Data	Duração (h:min)	Motivo
20/abr	00:40	Substituição de fusível
15/mai	00:45	Suporte do sensor
2/jul	00:50	Ajuste do sensor
4/jul	00:55	Ajuste da placa
22/ago	01:15	Referência da torre
3/set	00:40	Desalinhamento do acoplamento
6/out	00:50	Ajuste devido à queda de energia
8/out	00:50	Substituição do acoplamento

Tabela 3.12: manutenções corretivas (furadeira de coluna)

Máquina: Furadeira de Coluna		
Data	Duração (h:min)	Motivo
7/jun	00:20	Tubulação do óleo de corte
20/out	01:15	Ajuste do mandril

Tabela 3.13: manutenções correntivas (Brother TC-324)

Máquina: Brother TC-324		
Data	Duração (h:min)	Motivo
03/mar	00:30	Substituição do conector
12/abr	00:20	Fixação da mangueira
05/mai	00:25	Ajuste do sensor de segurança
16/jun	00:30	Problema na porta
08/jul	01:00	Quebra de peça (spindle) devido à colisão com o dispositivo
16/ago	00:30	Ajuste devido à queda da rede geral de energia
23/set	01:00	Problema no sistema elétrico/eletrônico
24/out	00:45	Substituição do sensor
25/out	00:35	Mal contato nos conectores
11/nov	00:45	Ajuste sistema pneumático

3.2 Contabilidade de Custos, Receitas e Recursos Disponíveis

Para a aplicação dos modelos de Programação Linear e Simulação usou-se o enfoque de Custeio Variável onde, dos preços unitários (à vista, sem IPI e sem ICMS) deduzem-se os custos diretos com matérias-primas, materiais diretos e outros custos indiretos variáveis, obtendo-se a Margem de Contribuição Unitária (Carastran, 1993).

Segundo Al-Aomar (2000), a aplicação da Programação Linear em problemas de mix de produção exige as seguintes informações:

1. Receita obtida pela venda de uma unidade de cada produto.
2. Custo variável para produção de uma unidade de cada produto.
3. Nível de produção mínimo de cada produto no horizonte de planejamento.

4. Potencial máximo de vendas de cada produto no período de planejamento.
5. Recursos necessários para produção de uma unidade de cada produto.
6. Quantidade de cada recurso disponível durante o período de planejamento.

A receita obtida pela venda de cada produto é indicada pela tabela 3.14:

Tabela 3.14: preço unitário de cada produto

Peca	20.03.01.1560	20.03.01.0781	20.03.01.1010	20.03.01.0760	20.03.01.1000
Preços Unitários	R\$ 6,95	R\$ 7,50	R\$ 6,80	R\$ 6,90	R\$ 6,90

Os custos de manufatura, segundo Takakuwa (1997), consistem em custos diretos e indiretos: diretos são aqueles que podem ser associados diretamente ao produto, conhece-se exatamente quanto cada produto absorveu de custo e os indiretos são aqueles que não podem ser associados diretamente ao produto, é necessário algum critério de divisão proporcional para saber quanto cada produto absorveu de custo.

Lima (2002) observa que em alguns casos o custo pode ser tratado como direto ou indireto, como, por exemplo, os insumos utilizados. Quando seu custo é pequeno e o esforço para realizar a medição de consumo é alto, a melhor saída é considerá-lo como custeio indireto. A energia elétrica é um exemplo, ela só pode ser considerada como custo direto se houver relógios de marcação do consumo do equipamento. No caso de se considerar a potência instalada da máquina, estaria se fazendo um rateio da conta de energia, portanto, a energia elétrica, seria tratada como um custo indireto.

Segundo a modelagem de Takakuwa (1997), os custos de manufatura diretos são matérias-primas e mão-de-obra direta e os custos indiretos são materiais indiretos (óleo de corte e ferramentas), mão-de-obra indireta, energia elétrica, taxas e depreciação.

Segundo Iudícibus (1980) os custos podem ainda ser classificados em variáveis e fixos: os custos variáveis são os custos que variam na mesma proporção das alterações no nível de

atividades da empresa em uma determinada unidade de tempo e os custos fixos são os custos que permanecem inalterados, dentro de certos limites, apesar das alterações no nível de atividades da empresa, em uma determinada unidade de tempo.

Como afirmado anteriormente, o enfoque utilizado será o de Custeio Variável, portanto serão considerados neste trabalho os custos variáveis diretos e os custos variáveis indiretos. A parcela de custo variável de manufatura, segundo Colmanetti (2001), é constituída de:

- Custo de mão-de-obra direta: além do salário base a legislação prevê que a empresa assuma outros custos que podem ser subdivididos em adicionais e encargos. Existem também compensações financeiras como incentivo à produção e participação nos lucros. Estes custos vão ser calculados como salário-hora e se constituem em: período de férias, adicional de férias, décimo terceiro salário, participação nos lucros e diversas taxas e impostos que recaem diretamente sobre a folha de pagamento.
- Custo de energia elétrica.
- Custo de ferramentas: é composto pelo custo de depreciação, custo de substituição e afiação das ferramentas.
- Custo de matéria-prima.

Ainda segundo Colmanetti (2001), a parcela correspondente ao custo fixo de produção é constituída de:

- Custo de materiais indiretos: abrange os custos de lubrificantes, parafusos e outros produtos de consumo geral ou que entram na produção em proporções diminutas ou indefinidas.
- Mão-de-obra indireta: abrange os custos da equipe envolvida com a produção, mas que não constitui a mão-de-obra diretamente ali utilizada. Envolve, entre outros, os custos do gerente e supervisor de produção, equipes de limpeza e programadores da produção.
- Custo de conservação: inclui manutenção predial, manutenção de equipamentos de movimentação e armazenamento de material e manutenção de equipamentos de suporte.
- Custo de depreciação: edificação, máquinas e equipamento.

- Custo de seguro.
- Custo de impostos: abrange os impostos não incidentes na folha de pagamento, mas principalmente aqueles que são baseados no faturamento e lucro da empresa, bem como impostos de valor fixo.
- Custo de transporte indireto: abrange principalmente os custos operacionais dos equipamentos de movimentação e armazenamento de materiais.

A modelagem seguirá as definições de custos de Iudícibus (1990), Takakuwa (1997) e Colmanetti (2001), exceto pela desconsideração do custo de energia elétrica (custo variável indireto) devido à dificuldade de contabilizá-lo. A dificuldade em se fazer o rateio da energia elétrica reside no fato de que a conta de eletricidade da indústria em estudo é única, isto é, engloba o consumo de todo o sistema de manufatura, equipamentos de apoio (compressores, ventilação, iluminação), escritórios, metrologia, refeitório e vestiários. Portanto, determinar um critério de rateio seria muito dificultoso.

As tabelas 3.15 e 3.16 indicam os custos variáveis diretos, isto é, os custos de matéria-prima e os custos de mão-de-obra direta (MOD). A tabela 3.16 também indica o tempo total de processamento de cada peça.

Tabela 3.15: custo unitário da matéria-prima (peça forjada).

Peça	20.03.01.1560	20.03.01.0781	20.03.01.1010	20.03.01.0760	20.03.01.1000
Custo matéria-prima	R\$ 2,85	R\$ 3,00	R\$ 2,45	R\$ 2,45	R\$ 2,55

Na indústria em estudo, para efeito de custo, o valor médio aproximado do salário-hora da mão-de-obra empregada na produção dos produtos da família em estudo é de R\$7,50 por hora (ou R\$0,0021 por segundo).

Tabela 3.16: custo de mão-de-obra direta (R\$/hora), tempo de processamento total (s) e custo/peça (R\$/peça)

Peça	Mão-de-obra direta (custo)	Tempo de processamento (s)	Custo / Peça
20.03.01.1560	R\$ 7,50 / hora	569	R\$ 1,185
20.03.01.0781	R\$ 7,50 / hora	816	R\$ 1,700
20.03.01.1010	R\$ 7,50 / hora	657	R\$ 1,369
20.03.01.0760	R\$ 7,50 / hora	617	R\$ 1,285
20.03.01.1000	R\$ 7,50 / hora	620	R\$ 1,292

Como custo variável indireto, será considerado o custo do ferramental. Este custo é calculado da seguinte maneira: gasto mensal com afiação, aquisição e depreciação do ferramental para as máquinas em estudo dividido pela média mensal de peças produzidas pelo sub-sistema. Para efeito de modelagem, este custo equivale à R\$ 0,015 por peça.

Em relação à disponibilidade de recursos, o sub-sistema opera em três turnos diários em seis dias por semana para a produção da família de peças em estudo. Se necessário, há possibilidade de turnos extras aos domingos. O tempo mensal disponível para produção é o tempo total de operação mensal subtraído de um valor devido à manutenção preventiva, de um valor devido à ocorrências de quebras das máquinas e seus respectivos tempos de serviço (manutenção corretiva), de um valor referente aos setups necessários, de um valor referente à produção de peças defeituosas e que não atendem aos padrões mínimos de qualidade (refugo), além de um valor referente à chamada permissão, isto é, uma porcentagem de tempo extra para descanso e necessidades pessoais do trabalhador durante o seu turno de serviço.

3.3 Metodologia para abordagem do problema por Programação Linear

Este trabalho segue a metodologia sugerida por Goldbarg & Luna (2000) para abordagem do problema por programação linear. Esta metodologia para análise quantitativa consiste em seguir uma seqüência de cinco passos:

- 1- Definição do problema: estabelecimento de forma clara e precisa dos objetivos que se pretende com a solução, como as restrições que acercam o problema.
- 2- Preparação dos dados: estabelecer as variáveis de decisão (cujo valor pode ser determinado pelo analista do problema) e as variáveis não controladas (cujo valor são definidas pela situação, estrutura, e características do problema). Este passo ainda envolve definições como unidade de medida adotada para cada atividade do problema e relacionamento entre atividades e recursos em termos de recursos necessários por unidade de atividade produzida.
- 3- Desenvolvimento do modelo: representação simplificada da situação real por meio de relações matemáticas passíveis de manipulação na busca da solução do problema. Conforme Moreira (1996), um modelo não é igual à realidade, mas suficientemente similar para que as conclusões obtidas através de sua análise possam ser estendidas à realidade. Este passo envolve algumas definições como: das atividades que compõem o problema, dos insumos disponíveis (que estão sendo usados ou produzidos pelas atividades) e das condições externas do modelo (limite dos recursos a serem disponibilizados ao sistema).
- 4- Solução do modelo: especificação de valores das variáveis que forneçam a melhor saída do modelo seguindo critérios pré-definidos.
- 5- Relatório de resultados: organização dos dados de forma inteligível para futura implementação dos resultados.

3.4 Metodologia para abordagem do problema por simulação

A simulação é amplamente reconhecida como uma valiosa ferramenta para os gestores industriais, mas a sua completa adoção continua um desafio. A maneira como uma nova tecnologia a qual uma companhia não está habituada é introduzida, exercerá grande influencia no sucesso de sua adoção. Sem um planejamento cuidadoso, a simulação não mostrará claramente seus benefícios na gestão de recursos e se mostrará como uma despesa desnecessária (Al-Mubarak , Canel & Khumawala, 2003).

Knoll & Heim (2000) destacam que uma empresa deve considerar o uso de um pacote comercial (*software*) de simulação quando não há uma documentação formal nos processos dentro da empresa e quando as operações internas e externas se tornam muito complexas envolvendo um grande número de variáveis de decisão.

Este trabalho segue a metodologia apresentada por Barton (2001) que consiste em um processo de cinco passos que sistematiza os processos de definição e melhoria do projeto. Os cinco passos são:

- 1- definição dos objetivos do projeto: reconhecimento dos reais motivos que levam à construção do modelo;
- 2- identificar e esclarecer as variáveis dependentes e independentes: variáveis independentes são as que podem ser mudadas e controladas pelos gestores (turnos de trabalho, número de trabalhadores etc.) e variáveis dependentes são os valores resultantes da performance do sistema;
- 3- formulação dos modelos: define a hipótese a ser testada;
- 4- definição dos modelos: determinação de quantos modelos diferentes do problema serão testados;
- 5- avaliação dos resultados: relação de fidelidade dos resultados obtidos com o modelo construído e o modelo real.

Além do processo de sistematização do processo de simulação descrita acima, são encontrados na literatura vários outros processos de sistematização, como as propostas por Banks et al. (1996) e Lobão (2000). Todas as propostas pesquisadas apresentam similaridades com o processo científico de investigação que é um processo cíclico das seguintes etapas:

- 1- exposição da hipótese a ser avaliada;
- 2- planejamento de um experimento para testar a hipótese;
- 3- realização do experimento;
- 4- análise dos dados do experimento realizado. Este passo geralmente leva a modificações da hipótese inicial, retornando-se ao passo 1 e executando-se novamente o processo.

Para efeito de comparação, segue a metodologia proposta por Porto (1990) e Lobão (1997):

A proposta de Porto (1990) consiste dos seguintes passos:

- 1- identificação do problema;
- 2- planejamento do estudo;
- 3- formulação do modelo;
- 4- construção de um programa de computador para o modelo;
- 5- especificação dos valores das variáveis;
- 6- corridas de simulação;
- 7- avaliação dos resultados;
- 8- proposição de novos experimentos.

A sistematização de Lobão (2000) é a seguinte:

- 1- definição do problema e dos objetivos do estudo;
- 2- elaboração de um primeiro modelo;
- 3- aquisição de dados;
- 4- validação e verificação de dados;
- 5- construção de um modelo para realização da simulação;
- 6- verificação e validação do modelo;
- 7- projetar o experimento;
- 8- executar o experimento e analisar os resultados;
- 9- refinar o projeto do experimento;
- 10- análise dos resultados e documentação do processo.

Capítulo 4

Abordagem do Problema

4.1 Abordagem pela técnica de programação linear

4.1.1 Definição do objetivo e preparação dos dados

A função objetiva, maximização da Margem de Contribuição Total (MCT), é definida como o produto da Margem de Contribuição Unitária (MCU) pela quantidade produzida de cada produto. A Margem de Contribuição Unitária (contribuição de uma unidade de cada produto ao lucro) é:

$$MCU_x = PU_x - [(CMP_x + MOD_x) + CF_x] \quad (1)$$

onde:

MCU_x = Margem de Contribuição Unitária da peça x.

PU_x = Preço Unitário da peça x.

CMP_x = Custo de Matéria-Prima para produção da peça x

MOD_x = Custo da Mão-de-Obra Direta para produção da peça x.

CF_x = Custo de ferramental para produção da peça x.

Convém lembrar que o Preço Unitário é referente ao preço à vista e não considera o Imposto sobre Produtos Industrializados (IPI), Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços

(ICMS) ou qualquer outro imposto ou taxa e o Custo de Matéria-Prima é referente à peça forjada. A tabela 4.1 indica a Margem de Contribuição Unitária (MCU) de cada peça.

Tabela 4.1: Margem de Contribuição Unitária (MCU) de cada peça (R\$).

Peça	PU _x	CMP _x	MOD _x	CF _x	MCU _x
20.03.01.1560	R\$ 6,95	R\$ 2,85	R\$ 1,185	R\$ 0,015	R\$ 2,900
20.03.01.0781	R\$ 7,50	R\$ 2,95	R\$ 1,700	R\$ 0,015	R\$ 2,835
20.03.01.1010	R\$ 6,80	R\$ 2,45	R\$ 1,369	R\$ 0,015	R\$ 2,966
20.03.01.0760	R\$ 6,90	R\$ 2,45	R\$ 1,285	R\$ 0,015	R\$ 3,150
20.03.01.1000	R\$ 6,90	R\$ 2,55	R\$ 1,292	R\$ 0,015	R\$ 3,043

A disponibilidade de recursos foi baseada no conceito do OEE (*Overall Equipment Effectiveness* – Eficácia Global do Equipamento). O OEE é um método que mede a capacidade produtiva de um equipamento em um tempo programado através da identificação e quantificação das perdas englobando três atributos: a eficácia, o desempenho e a qualidade (Dal & Tugwell, 2000).

A eficácia é relativa às perdas de produção por indisponibilidades causadas por manutenção (programa e não programada), fatores externos (falta de água, vapor, energia, etc.) e para restabelecimento de condições operacionais (tempo de *setup* e reinício de produção). O desempenho é relativo à perdas por velocidade de operação e a qualidade é relativa à quantidade de produção abaixo de um certo nível de exigência. Deste modo, a disponibilidade do recurso ou seu Tempo Mensal Disponível de Operação (TMO) dentro do horizonte de planejamento é definida como:

$$TMO_x = [TOT - (TMP_x + TMC_x + TSP_x + TPR + TPQ)] \cdot n_x \quad (2)$$

onde:

TMO_x = Tempo Mensal Disponível de Operação do recurso x.

TOT = Tempo de Operação Mensal Total.

TMP_x = Tempo de Manutenção Preventiva do recurso x.

TMC_x = Tempo de Manutenção Corretiva do recurso x.

TSP_x = Tempo Total para preparação (*setup*) do recurso x.

TPR = Tempo de Permissão.

TPQ = Tempo de Perdas por Qualidade.

n_x = quantidade de recursos x.

O Tempo de Operação Mensal Total (TOT) equivale ao tempo total disponível em um mês de operação da fábrica:

$$TOT = N \cdot h \cdot D \quad (3)$$

onde:

N = número de turnos de operação por dia.

h = tempo de trabalho por turno.

D = dias de trabalho no mês.

A tabela 4.2 indica o Tempo de Operação Total (TOT) tendo como base o ano de 2003. A fábrica em estudo opera, conforme descrito no capítulo 3, em três turnos diários de oito horas (sendo uma hora por turno destinada às refeições) em seis dias por semana (de segunda-feira à sábado).

Tabela 4.2: Tempo de Operação Mensal Total (TOT) no ano de 2003 (h).

Mês	Dias de trabalho	Tempo de Operação Mensal Total (h)
Dezembro (2002)	22	462
Janeiro	26	546
Fevereiro	24	504
Março	23	483
Abril	23	483
Maio	26	546
Junho	24	504
Julho	27	567
Agosto	26	546
Setembro	26	546
Outubro	27	567
Novembro	25	525
Dezembro	22	462

A Manutenção Preventiva para as máquinas do sub-sistema é realizada anualmente e o tempo para realização desta manutenção depende do tipo de cada máquina. O Tempo de Manutenção Preventiva da máquina x (TMP_x) equivale ao tempo total de manutenção preventiva rateado igualmente ao longo do ano e para efeito de modelagem equivale a:

$$TMP_x = \frac{t_x}{12} \quad (4)$$

onde:

t_x = tempo anual para manutenção preventiva da máquina x .

A tabela 4.3 indica o Tempo de Manutenção Preventiva (TMP) das máquinas do sub-sistema.

Tabela 4.3: Tempo de Manutenção Preventiva (TMP) de cada máquina (h).

Máquina	Tempo Anual para Manutenção (t_x) (h)	TMP_x ($t_x/12$) (h)
Centro de Usin. Brother TC-324	8	0,667
Torno CNC Dayna Myte 3300	6	0,500
Torno CNC Index 170	6	0,500
Furadeira de Coluna	2	0,167

A ocorrência de quebras de máquinas implica a necessidade de manutenção corretiva e conseqüentemente interrupção do processo produtivo. Com base no histórico de ocorrência de quebras e respectivos tempos de serviços (tabelas 3.10, 3.11 e 3.12), para efeito de modelagem, será considerado para cada máquina a ocorrência de uma quebra por mês com tempo de serviço equivalente à média dos valores do histórico.

A necessidade de *setup* das máquinas (programação da máquina CNC, troca de ferramentas , troca de dispositivo e reinício de produção) implica também em interrupção do processo de produção. Na modelagem, conforme a política de produção da empresa, não haverá mais de um *setup* para cada produto dentro do horizonte de planejamento. As tabelas 3.4, 3.5, 3.6, 3.7 e 3.8 apresentadas no capítulo 3, indicam os tempos de *setup* em cada máquina para o processamento de cada produto.

O Tempo de Permissão (TPR) equivale a 11,1% do Tempo de Operação Mensal Total (TOT). Este valor foi calculado utilizando as tabelas clássicas do estudo de tempos e métodos (Borba, 1998).

O sub-sistema produz 0,09% de peças com alguma não conformidade em relação aos padrões de qualidade exigido pelo cliente. Este valor é uma média anual em relação à produção total do sub-sistema e para o processo de modelagem o Tempo de Perda por Qualidade (TPQ) equivale à 0,09% do tempo disponível para produção de cada máquina. O tempo disponível para produção de cada máquina é o Tempo Mensal de Operação Total (TOT) subtraído da sua indisponibilidade por manutenção, indisponibilidade por operação e indisponibilidade por setup e reinício de produção.

Foram obtidos dados reais de demanda para os produtos da família em estudo e os valores indicados na tabela 3.3 representam quantidades de peças por unidade de tempo (mês). A quantidade mínima de produção baseia-se na demanda de cada produto observada na tabela 3.3 e o potencial máximo de vendas baseia-se na demanda projetada. A administração considera para demanda projetada de cada produto um incremento de vendas de 10% em relação ao período observado na tabela 3.3, portanto, a demanda mínima de cada produto, considerando o ano seguinte, é definida como o valor indicado na tabela 3.3 e o potencial máximo de vendas é definido com acréscimo de 10% sobre o valor mínimo.

4.1.2 Desenvolvimento e solução do modelo

No problema de planejamento da produção, considera-se as características do sistema produtivo e as políticas de produção e armazenagem para gerar um conjunto de decisões que atenda aos objetivos definidos. Um caminho para modelar e resolver este tipo de problema passa pela observação de que o processo produtivo pode ser visto como um fluxo de itens (matéria-prima, produtos semi-acabados etc.) que passam por operações de fabricação, montagem ou transporte em cada período de tempo, até se tornarem produtos acabados para o atendimento dos clientes (Takahashi, 2000).

O desenvolvimento do modelo envolve todo o sub-sistema, sendo as operações de produção o nível de detalhamento. A partir da definição dos objetivos e do reconhecimento do sub-sistema foram construídos diagramas de blocos e fluxogramas que representam de forma concisa o funcionamento do problema. A figura 4.1 representa o fluxo de material e de informações entre os setores da cadeia produtiva, enquanto a figura 4.2 representa o diagrama de fluxo do sub-sistema para produção da peça 20.03.0781 e a figura 4.3 representa o diagrama de fluxo para produção das demais peça da família em estudo.

Figura 4.1: Fluxo de materiais e informações entre os setores da cadeia produtiva.

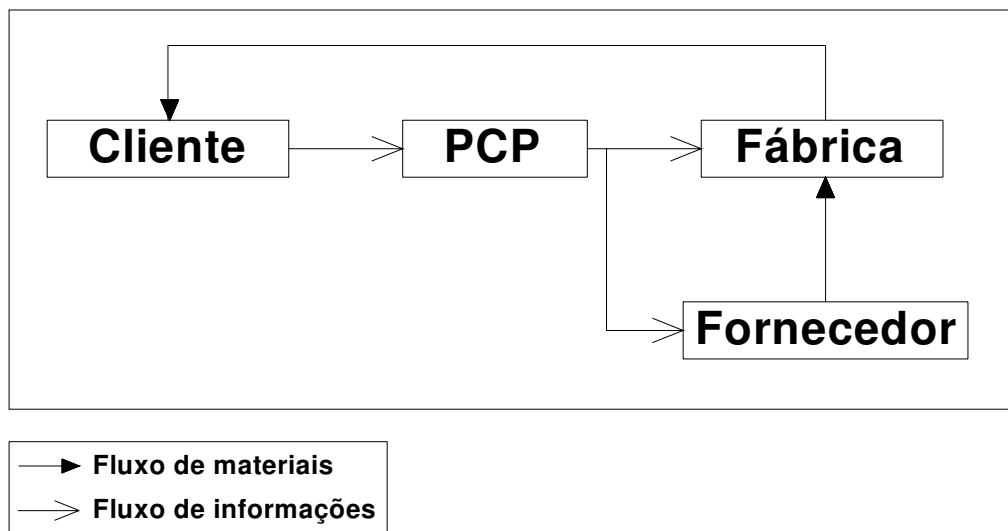


Figura 4.2: Diagrama de fluxo para produção da peça 20.03.0781.

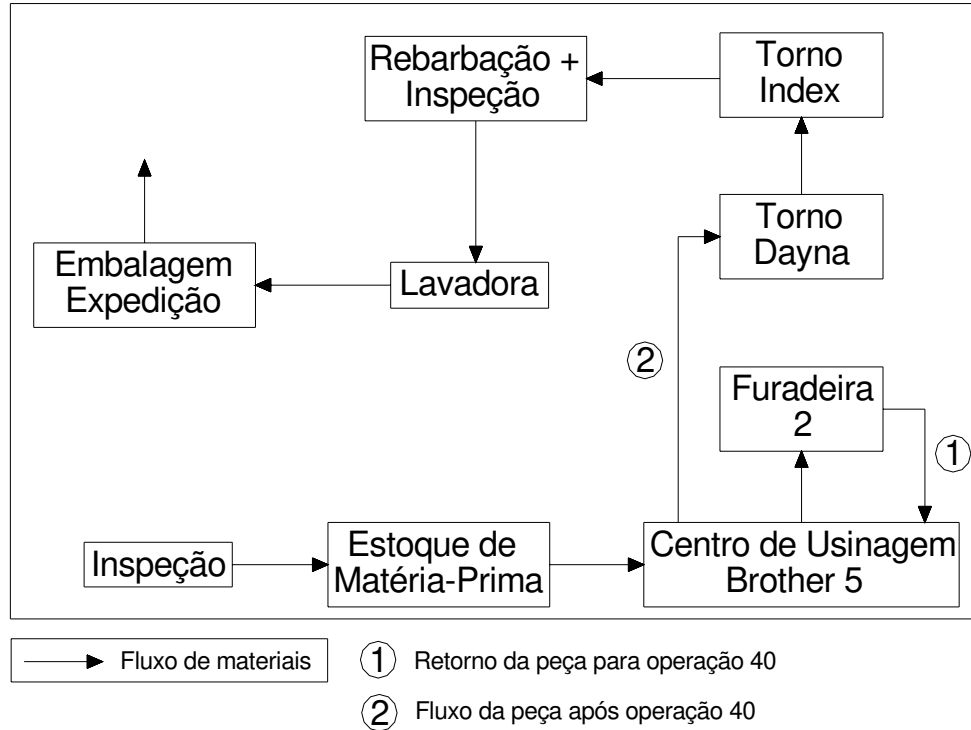
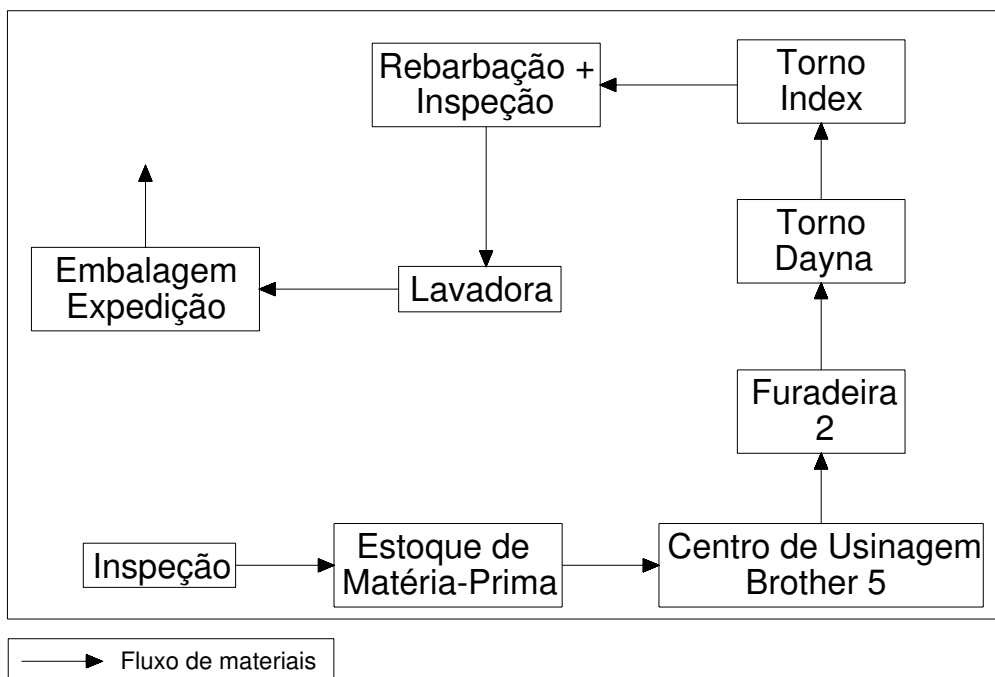


Figura 4.3: Diagrama de fluxo para produção das demais peças da família.



A programação de tarefas é, basicamente, a tomada de decisão de quanto e o que uma máquina deve executar quando ela acaba uma determinada operação (Togashi & Ronconi, 2001). Este tipo de tomada de decisão é inevitável no problema em estudo. Como afirmado anteriormente, a regra de prioridade de tarefas adotada pela administração do sub-sistema é o primeiro pedido recebido é o primeiro a ser executado (*FIFO – First In First Out*).

Para a viabilidade do processo de modelagem, algumas suposições foram necessárias. Estas suposições foram discutidas com a equipe responsável pelo planejamento e controle da produção da fábrica, sendo tomado todo o cuidado para que estas suposições não descaracterizassem o problema em relação aos objetivos determinados. As condições supostas foram as seguintes:

- O modelo não considera aspectos subjetivos na definição de prioridades em relação à programação de tarefas nem os pedidos urgentes de última hora.
- A matéria-prima para fabricação dos produtos foi considerada sempre disponível. Esta condição implica também que o modelo não considera a indisponibilidade de produção por fatores externos.
- Todos os operadores sabem operar todas as máquinas e têm a mesma habilidade de operação e fixação das peças na máquina.
- Não foram consideradas as linhas secundárias de produção, isto é, se em um determinado estágio de produção há necessidade de peças adicionais para fabricação do produto, foi suposto que estas estarão sempre disponíveis.
- Não existe retrabalho em nenhuma máquina.
- Os tempos de *setup* são independentes da sequência de produção.

Como o Tempo de Operação Mensal Total (TOT) do sub-sistema varia ao longo do ano e, em consequência, a disponibilidade de recursos, segue a análise integral (incluindo o teste de sensibilidade) apenas do período de Novembro. Este período foi escolhido por ser, historicamente, o de maior demanda. Quanto aos demais períodos, são apresentados os resultados da solução do modelo. Os tempos de disponibilidade dos recursos de produção, bem como os tempos de ciclo, estão expressos em segundos.

Função objetiva: maximização da Margem de Contribuição Total.

$$\text{Max } Z = 2,903x_1 + 2,838x_2 + 2,969x_3 + 3,153x_4 + 3,057x_5$$

Sujeito às restrições de recursos produtivos e demanda:

$$110x_1 + (115 + 110)x_2 + 110x_3 + 100x_4 + 110x_5 \leq 1.651.883,88 \quad (1)$$

$$95x_1 + 104x_2 + 97x_3 + 90x_4 + 90x_5 \leq 1.667.583,84 \quad (2)$$

$$152x_1 + 155x_2 + 140x_3 + 125x_4 + 123x_5 \leq 1.652.251,74 \quad (3)$$

$$120x_2 + 98x_3 + 90x_4 + 85x_5 \leq 1.656.218,4 \quad (4)$$

$$110x_1 + 110x_2 + 110x_3 + 110x_4 + 110x_5 \leq 2.229.091,2 \quad (5)$$

$$90x_1 + 90x_2 + 90x_3 + 90x_4 + 90x_5 \leq 1.671.818,4 \quad (6)$$

$$12x_1 + 12x_2 + 12x_3 + 12x_4 + 12x_5 \leq 1.114.545,6 \quad (7)$$

$$x_1 \geq 720 \quad (8)$$

$$x_1 \leq 792 \quad (9)$$

$$x_2 \geq 780 \quad (10)$$

$$x_2 \leq 858 \quad (11)$$

$$x_3 \geq 2600 \quad (12)$$

$$x_3 \leq 2869 \quad (13)$$

$$x_4 \geq 6079 \quad (14)$$

$$x_4 \leq 6687 \quad (15)$$

$$x_5 \geq 1460 \quad (16)$$

$$x_5 \leq 1606 \quad (17)$$

onde:

x_1 = quantidade da peça 20.03.01.1560.

x_2 = quantidade da peça 20.03.01.0781.

x_3 = quantidade da peça 20.03.01.1010.

x_4 = quantidade da peça 20.03.01.0760.

x_5 = quantidade da peça 20.03.01.1000.

A expressão (1) é a restrição em relação à disponibilidade do centro de usinagem Brother TC-324 que executa as operações de faceamento e furação em todos os produtos e a usinagem do alívio na peça 20.03.01.0781. A expressão (2) é a restrição em relação à disponibilidade da furadeira de coluna que executa a operação de rebaixo do furo em todos os produtos e a expressão (3) é a restrição em relação à disponibilidade do torno CNC Dayna Myte 3300 que executa a operação de usinagem da rosca de conexão em todos os produtos. (4) representa a restrição em relação ao torno CNC Index 170 onde é executada a usinagem do canal de retenção em todos os produtos, exceto em 20.03.01.1560, e (5), (6) e (7) respectivamente, expressam as restrições em relação à disponibilidade de recursos para a rebarbação+inspeção, lavagem e embalagem dos produtos. Os valores do lado direito das inequações (1), (2), (3), (4), (5), (6) e (7) indicam os recursos limitativos, isto é, o Tempo Mensal Disponível para Operação (TMO) de cada recurso do sub-sistema expresso em segundos.

Como os recursos das operações de rebarbação+ inspeção, lavagem e embalagem atendem ao sistema completo, não apenas ao sub-sistema em estudo, a disponibilidade foi rateada proporcionalmente em função da produção do sub-sistema em relação ao sistema completo. A produção, em unidades, do sub-sistema corresponde a aproximadamente um terço da produção total da fábrica, portanto, a disponibilidade destes recursos para atendimento da produção do sub-sistema corresponde a um terço do Tempo Mensal Disponível para Operação destes recursos.

As expressões (8) a (17) representam as restrições da demanda. (8), (10), (14) e (16) indicam as restrições em relação à quantidade mínima de produção e (9), (11), (13), (15) e (17) as restrições em relação à quantidade máxima de produção de cada produto. Os valores do lado direito destas expressões representam as quantidades de produção em unidades.

O algoritmo Simplex usado para resolução do problema de programação linear modelado (problema de maximização) segue a seguinte rotina usando-se o formato tabular (*full tableau*):

Passo 0: introduzir as variáveis de folga ou excesso de acordo com a desigualdade das inequações, transformando o problema da forma canônica para a forma padrão;

Passo 1: montar uma matriz com os coeficientes e respectivos sinais de todas as variáveis e na última linha incluir os coeficientes da função objetivo transformada;

Passo 2: estabelecer uma solução básica inicial;

Passo 3: escolher como a próxima variável a entrar na base aquela que oferece a maior contribuição para o aumento da função objetivo. A última linha da matriz indica a influência de cada variável na função objetivo. Se todas as variáveis não básicas tiverem coeficientes nulos ou positivos nesta última linha, a solução atual é ótima;

Passo 4: determinar a variável que deve deixar a base dividindo os elementos da última coluna (coeficientes independentes) pelos correspondentes elementos positivos da coluna da variável que vai entrar na base, caso não haja elemento algum positivo nesta coluna encerra-se o processo porque a solução seria ilimitada. O menor quociente indica a equação cuja respectiva variável básica deverá ser anulada, tornando-se não básica;

Passo 5: encontrar a nova solução transformando a matriz de modo que a coluna da nova variável básica se torne um vetor identidade onde o elemento 1 aparece na linha correspondente à variável que está sendo anulada;

Passo 6: retornar ao passo 3 para iniciar outra iteração.

A solução ótima obtida para o problema de maximização da Margem de Contribuição Total é a seguinte: $x_1^*=720$; $x_2^*=780$; $x_3^*=2774,99$; $x_4^*=6687$ e $x_5^*=1606$. O valor da Margem de Contribuição Total referente ao *mix* de quantidades ótimas para as atuais Margens de Contribuição Unitária é R\$ 38.446,74. Este valor significa quanto o *mix* ótimo solução para as peças da família 20.03.01.1560, 20.03.01.0781, 20.03.01.1010, 20.03.01.0760 e 20.03.01.1000 pode contribuir para cobrir os custos e despesas fixas totais no período em questão. A tabela 4.4 mostra a quantidade mínima de recursos produtivos (expressas em segundos) para produção *mix* ótimo.

Tabela 4.4: Quantidade mínima de disponibilidade de cada recurso para produção do mix ótimo e o excesso de disponibilidade (s).

Recurso	Quantidade mínima p/mix ótimo	Excesso
Centro de Usinagem Brother TC-324	1.522989.021 s	128.894,859 s
Furadeira de Coluna	1.165.064,090 s	502.519,750 s
Torno CNC Dayna Myte 3300	1.652.521,740 s	0
Torno CNC Index 170	1.103.889,150 s	552.329,250 s
Manual / Rebarbação+Inspeção	1.382.478,950 s	846.612,250 s
Lavadora	1.131.119,212 s	540.699,187 s
Manual / Embalagem	150.815,850 s	963.729,750 s

A tabela 4.5 mostra os parâmetros sobre os limites inferior e superior das Margens de Contribuição Unitária (MCU) obtidos pela análise de sensibilidade. Para a análise de sensibilidade foi considerada a influência da modificação do vetor Margem de Contribuição Unitária (MCU) na solução ótima obtida. A solução obtida com a mudança dos coeficientes de MCU ainda é factível, pois as restrições não foram alteradas.

Tabela 4.5: Valores dos limites inferior e superior para as Margens de Contribuição Unitária (MCU) para o período de Novembro.

Peça	Margem de Contribuição Unitária Atual	Limite Inferior	Limite Superior
20.03.01.1560	R\$ 2,803	sem limite	R\$ 3,223
20.03.01.0781	R\$ 2,838	sem limite	R\$ 3,287
20.03.01.1010	R\$ 2,969	R\$ 2,582	R\$ 3,467
20.03.01.0760	R\$ 3,153	R\$ 2,651	sem limite
20.03.01.1000	R\$ 3,046	R\$ 2,608	sem limite

Os dados da tabela 4.5 indicam que se as Margens de Contribuição Unitária (MCU) forem reduzidas ou aumentadas até os limites indicados, o *mix* ótimo, em unidades, não se altera. A análise de sensibilidade fornece a variação da Margem de Contribuição Unitária de cada peça de modo a apoiar a tomada de decisão dos gestores. A decisão quanto ao aumento ou diminuição da Margem de Contribuição Unitária deve levar em conta fatores como, por exemplo, política comercial e custos variáveis. Sempre é preciso considerar os valores gerados pelo modelo de

Programação Linear versus a realidade de mercado, porque esta restringe os resultados (Carastan, 1993).

A tabela 4.6 apresenta a solução ótima para o problema de maximização da Margem de Contribuição Total aplicado nos demais períodos.

Tabela 4.6: solução ótima do modelo para os demais períodos (unidades).

Mês / Peça	20.03.01.1560	20.03.01.0781	20.03.01.1010	20.03.01.0760	20.03.01.1000
dezembro-02	595	690	1693,45	6380	1573
janeiro-03	633	726	2035	6479	1452
fevereiro-03	655	765	2068	6446	1535
março-03	748	766,72	1986	6435	1513
abril-03	754	716,13	1997	6424	1568
maio-03	644	721	1892	5775	1524
junho-03	765	735,69	2415	6523	1568
julho-03	737	743	2046	6336	1551
agosto-03	743	682	1942	6215	1425
setembro-03	748	704	1878	5962	1447
outubro-03	732	798	2310	6541	1579
dezembro-03	690	715	1780	6296,93	1410

4.2 Abordagem pela técnica de simulação

4.2.1 Definição e identificação do problema

A abordagem do problema de programação da produção por simulação do sub-sistema em estudo é, assim como a abordagem por programação linear, orientada pelo custeio variável da manufatura da família de peças. Devido ao grande número de custos dentro da manufatura, para escopo desta modelagem será considerado apenas o custo efetivo de produção, que é composto pelo custo variável. O custo variável, que segue a modelagem de Colmanetti (2001) para a abordagem por simulação, é dado pela fórmula:

$$C_{Variávelx} = \left[\frac{n_x \cdot (MOD_x + CMP_x + CF_x)}{\eta_{refx}} \right] \quad (5)$$

onde:

$C_{Variávelx}$ = Custo variável da peça x.

MOD_x = Custo de mão-de-obra direta para produção da peça x.

CMP_x = Custo de matéria-prima para produção da peça x.

CF_x = Custo de ferramental para produção da peça x.

η_{refx} = Rendimento de refugo na produção da peça x.

n_x = Quantidade da peça x produzida.

x = 1 para a peça 20.03.01.1560.

x = 2 para a peça 20.03.01.0781.

x = 3 para a peça 20.03.01.1010.

x = 4 para a peça 20.03.01.0760.

x = 5 para a peça 20.03.01.1000.

O custo de mão-de-obra direta para fabricação de cada peça está exposto na tabela 3.16, o custo da matéria-prima de cada peça é indicado pela tabela 3.15 e o custo de ferramental equivale a R\$ 0,015 por peça fabricada conforme indicado no capítulo 3.

O rendimento de refugo na produção da peça x é dado pela fórmula:

$$\eta_{refx} = \left[1 - \left(\frac{nr}{np} \right) \right] \quad (6)$$

onde:

nr = número de peças refugadas no mês.

np = número de peças produzidas no mês.

Como afirmado anteriormente, o sub-sistema produz 0,09% de peças com alguma não conformidade em relação aos padrões de qualidade exigido pelo cliente sendo, deste modo, o

rendimento de refugo igual para todos os tipos de peças produzidos. O número de peças produzidas no mês (nr) considera as peças boas e o refugo.

A base de dados e as suposições necessárias para a abordagem por programação linear serão válidas para a abordagem por simulação para viabilidade do processo de modelagem. A definição dos limites do modelo constitui uma atividade essencial da fase inicial da modelagem. É preciso que se defina o escopo do modelo e o nível de detalhe. O nível de detalhe, conhecido também como nível de resolução, indica até que nível pretende-se modelar o sistema. No caso deste trabalho o nível de detalhe é o de operações. O sub-sistema responsável pela fabricação da família de peças é a abrangência do modelo.

4.2.2 Formulação do modelo:

Quanto ao processo de fabricação das peças, a modelagem deve possuir flexibilidade quanto aos processos de fabricação que se deseja seguir e quanto à definição de quantidade de peças. Quanto à programação da produção, a modelagem deve possuir um caráter de flexibilidade em relação à ordem de processamento dos lotes de peças, isto é, a ordem de entrada das famílias no sub-sistema.

O experimento a ser realizado com o modelo que representa o sub-sistema contém oito processos de fabricação, a quantidade de peças por lote (baseada na tabela 3.3), a seqüência de fabricação de cada peça (indicada pela tabela 3.2), transporte manual das peças, cinco máquinas, dez operadores e tempo total de disponibilidade de cada recurso. Como resultado da simulação do modelo obtém-se tempos relacionados com as atividades custeáveis relacionadas à equação 5 e indicadas pela tabela 4.7. A disponibilidade de cada recurso, ou o tempo disponível para operação (TMO), é determinada pela equação 2.

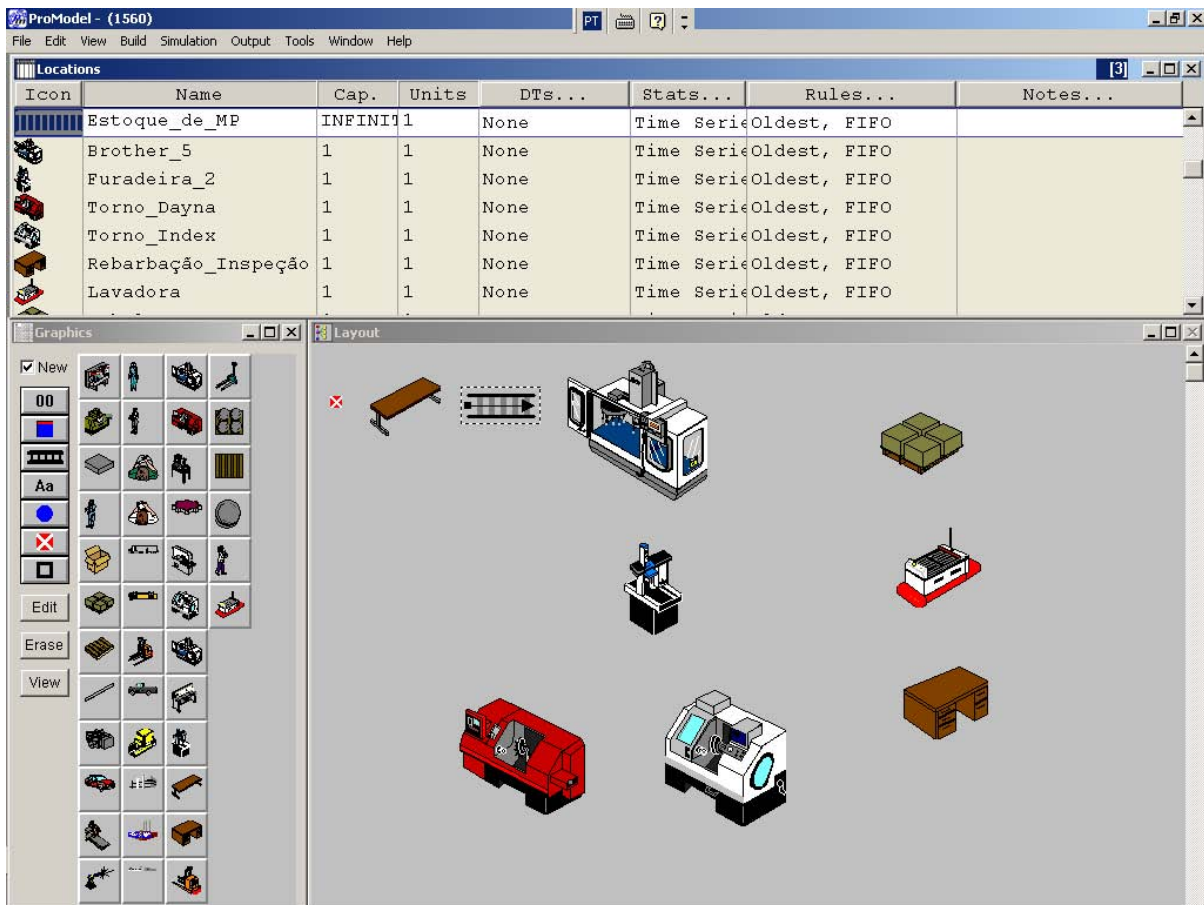
Tabela 4.7: Atividade custeável, direcionador de custo e custo variável relacionado.

Atividade custeável	Direcionador de custo	Custo variável
Usinar/Furar peça	Tempo de ciclo	Custo de mão-de-obra direta
Preparar máquina	Tempo de <i>setup</i>	Custo de mão-de-obra direta
Troca de ferramenta	Tempo de <i>setup</i>	Custo de mão-de-obra direta

O processo de se executar a modelagem de um sistema usando o ProModel exige a definição do que o programa denomina elementos de modelagem. Os elementos do problema a ser modelado são:

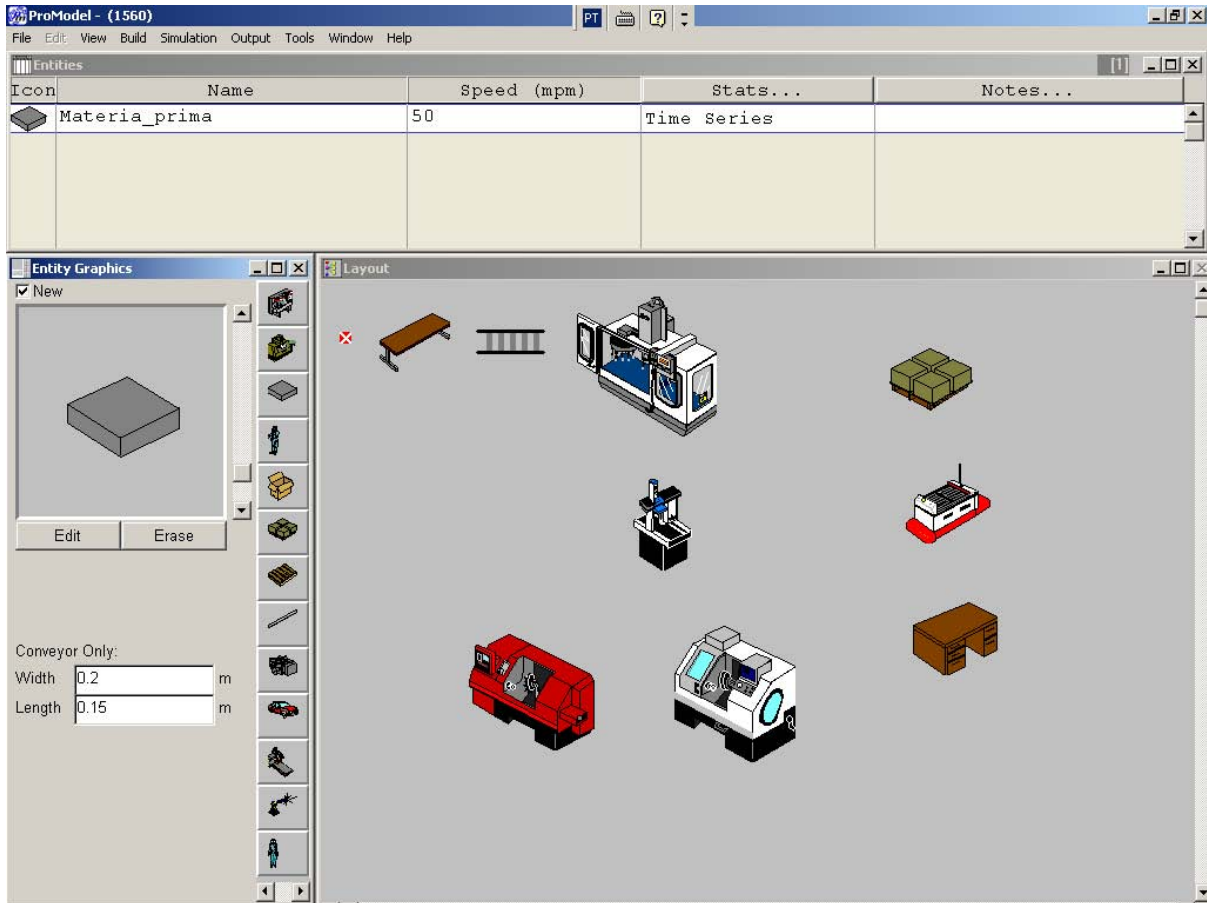
- Locais: local é um lugar imóvel de processamento ou armazenamento num sistema, para o qual as entidades são movidas para serem armazenadas, processadas ou tomar novo roteiro. Os locais podem ser simples (comportam apenas uma entidade de cada vez) ou múltiplos (comportam mais de uma entidade simultaneamente). Os locais podem possuir regras de entrada e saída: as regras de entrada são usadas para selecionar qual a próxima entidade a ser manipulada caso exista mais de uma destas com essa possibilidade, ao passo que as de saída são usadas num local de capacidade múltipla para determinar a ordem que deixarão o mesmo.

Figura 4.4: Criação dos locais de processamento e armazenamento no ambiente ProModel.



- Entidades: entidade é um item, como um produto em fabricação, que é processado no modelo. A dinâmica conferida pelo ProModel às entidades permite que estas sofram operações cujos resultados são novas entidades, como reunião, divisão e conversão. As entidades podem receber atributos, que podem ser testados para a tomada de decisão ou para se obter estatísticas específicas. A imagem que representa uma entidade pode ser trocada como resultado de uma operação para se ilustrar uma mudança física da entidade durante uma simulação.

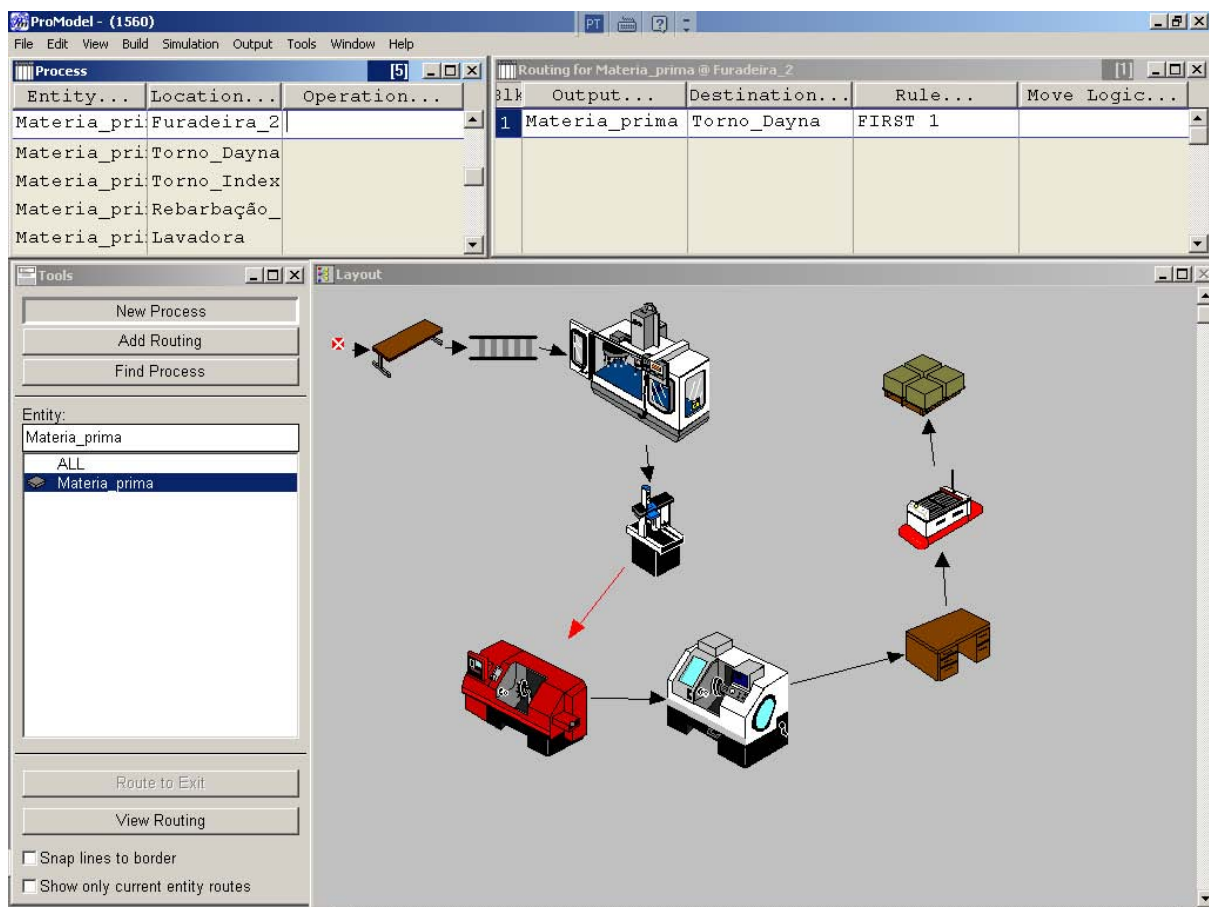
Figura 4.5: Criação da entidade processada no ambiente ProModel.



- Recursos: recursos podem ser pessoas, ferramentas, veículos ou qualquer outro objeto que possa ser usado para transportar materiais entre dois locais, realizar uma operação sobre um local ou realizar manutenção em um local ou em outro recurso que esteja quebrado. Recursos podem ser dinâmicos ou estáticos. O que difere estes dois tipos de recursos é o fato de o primeiro ser vinculado a uma rota e o segundo não. Regras de decisão podem ser utilizadas para alocar os recursos e priorizar os carregamentos e entregas. Características de movimentação dos recursos, como velocidades quando cheio e quando vazio, aceleração, desaceleração, tempo de carga e descarga, entre outros, podem ser especificados.

- Processo: a lógica de um processo define qual operação e o roteamento para cada tipo de entidade em cada local do sistema. Os tempos de operação ou serviço, requisições de recursos, lógicas de processamento, relações de entrada e saída, condições de roteamento e tempos de movimentação podem ser descritos. Os tempos de operação podem ser descritos por formas variadas como constantes, distribuições probabilísticas, resultados de funções, valores de atributos, resultados de sub-rotinas, etc., ou por uma expressão contendo uma combinação destas formas. Operações lógicas, malhas (*loopings*), além de expressões *booleanas* simplificam a lógica de programação e utilização de recursos.

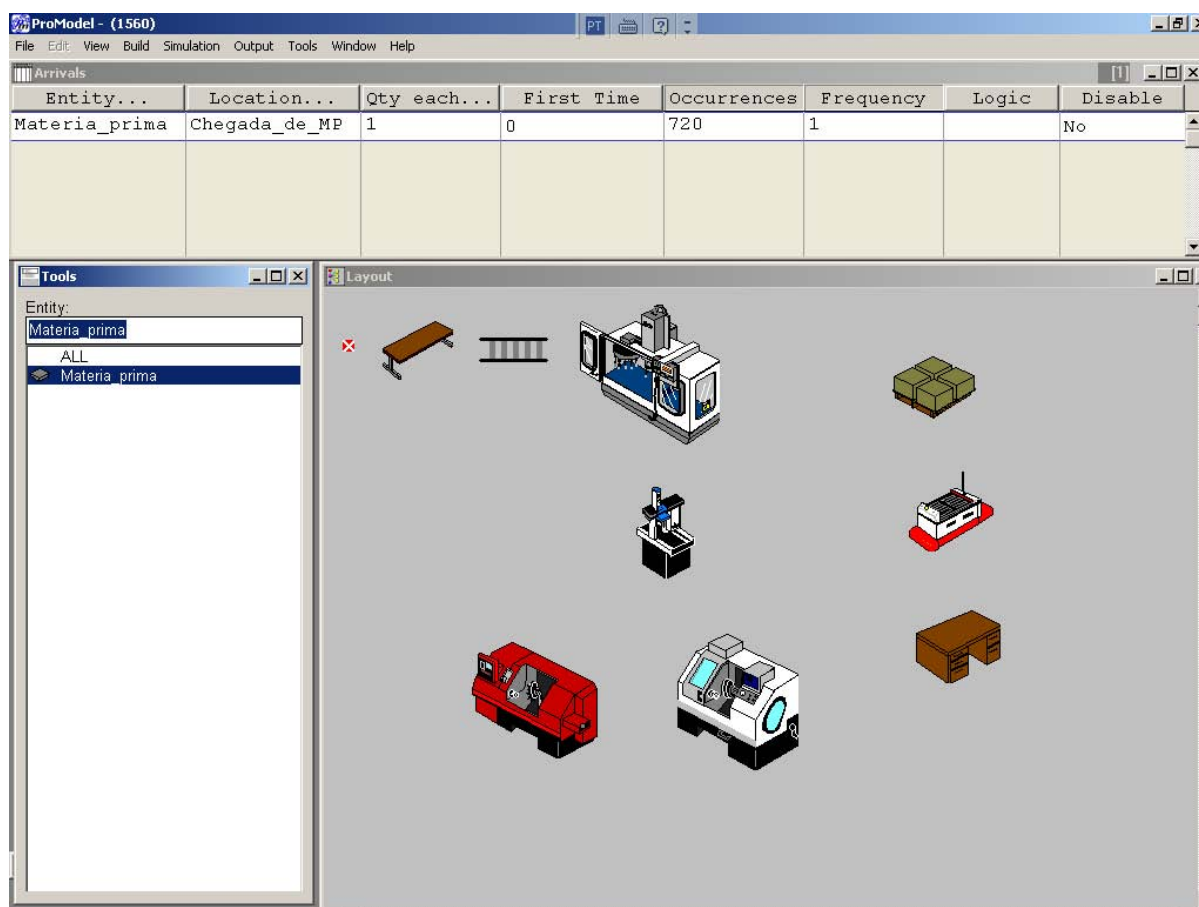
Figura 4.6: Definição dos processos no ambiente ProModel.



- Chegadas: neste elemento é definido o mecanismo de determinação dos momentos em que uma entidade é introduzida no sistema. Um registro de chegada é composto de:

número de novas entidades por chegada, frequência das chegadas, locais das chegadas, o instante da primeira chegada e o número total de ocorrências de chegadas. Chegadas podem ser determinísticas, condicionais ou estocásticas; neste último caso, podem-se utilizar tanto distribuições probabilísticas pré-definidas quanto personalizadas para definir horários e as quantidades das chegadas.

Figura 4.7: Definição da chegada de entidades no ambiente ProModel.



- Horário de trabalho: este elemento, que determina horários de funcionamento e paradas agendadas do sistema, é definido pela seleção de horas no dia e dias na semana. A cada horário de trabalho, podem ser associados recursos e locais.

A tabela 4.8 mostra os resultados associados ao experimento proposto e referem-se aos custos ocorridos com a simulação do modelo. Os dados da tabela 4.9 referem-se aos resultados da

simulação associados aos tempos de utilização de cada máquina a tabela 4.10 mostra a comparação com os respectivos tempos de disponibilidade. Os resultados apresentados nas tabelas 4.8, 4.9 e 4.10 referem-se ao período de Novembro. O anexo I apresenta os resultados referentes aos períodos de Julho, Agosto, Setembro e Dezembro.

Tabela 4.8: Custo variável do lote de cada peça.

Item	20.03.01.1560	20.03.01.0781	20.03.01.1010	20.03.01.0760	20.03.01.1000
Custo de mão-de-obra direta	R\$ 1,185	R\$ 1,700	R\$ 1,369	R\$ 1,285	R\$ 1,292
Custo de matéria-prima	R\$ 2,85	R\$ 2,95	R\$ 2,45	R\$ 2,45	R\$ 2,55
Custo de ferramental	R\$ 0,015	R\$ 0,015	R\$ 0,015	R\$ 0,015	R\$ 0,015
Tamanho do lote (unidades)	720	780	2600	6079	1460
Custo variável	R\$ 2.945,45	R\$ 3.675,45	R\$ 10.069,09	R\$ 23.026,52	R\$ 5.688,10

Tabela 4.9: Tempos de utilização de cada recurso.

Máquina	20.03.01.1560	20.03.01.0781	20.03.01.1010	20.03.01.0760	20.03.01.1000
Brother TC-324	79.200	175.500	286.000	607.900	160.600
Furadeira de coluna	68.400	81.120	252.200	547.110	131.400
Torno Dayna Myte 3300	109.440	120.900	364.000	759.875	179.580
Torno Index 170	0	93.600	254.800	547.110	124.100
Rebarbação + Inspeção	79.200	85.800	286.000	668.690	160.600
Lavadora	64.800	70.200	234.000	547.110	131.400
Tamanho do lote (unidades)	720	780	2600	6079	1460

Tabela 4.10: Comparação entre os tempos de utilização e de disponibilidade de cada recurso.

Máquina	Tempo de uso total	Disponibilidade
Brother TC-324	1.309.200	1.651.883,88
Furadeira de coluna	1.080.230	1.667.583,84
Torno Dayna Myte 3300	1.533.795	1.652.251,74
Torno Index 170	1.019.610	1.656.218,40
Rebarbação + Inspeção	1.280.290	2.229.091,20
Lavadora	1.047.510	1.671.818,40

Considerando-se como demanda futura um aumento de potencial de vendas de 10%, observa-se pelas tabelas 4.11 e 4.12 que a disponibilidade do recurso torno Dayna Myte 3300 no período não é suficiente para atender o incremento da demanda.

Tabela 4.11: Tempo de utilização de cada recurso considerando incremento de 10% da demanda.

Máquina	20.03.01.1560	20.03.01.0781	20.03.01.1010	20.03.01.0760	20.03.01.1000
Brother TC-324	87.120	193.050	315.590	667.800	176.660
Furadeira de coluna	75.240	89.232	278.293	601.020	144.540
Torno Dayna Myte 3300	120.384	132.990	401.660	834.750	197.538
Torno Index 170	0	102.960	281.162	601.020	136.510
Rebarbação + Inspeção	87.120	94.380	315.590	734.580	176.660
Lavadora	71.280	77.220	258.210	601.020	144.540
Tamanho do lote (unidades)	792	858	2869	6678	1606

Tabela 4.12: Comparação entre os tempos de utilização e de disponibilidade de cada recurso.

Máquina	Tempo de uso total	Disponibilidade
Brother TC-324	1.440.220	1.651.883,88
Furadeira de coluna	1.188.325	1.667.583,84
Torno Dayna Myte 3300	1.687.322	1.652.251,74
Torno Index 170	1.121.652	1.656.218,40
Rebarbação + Inspeção	1.408.330	2.229.091,20
Lavadora	1.152.270	1.671.818,40

Capítulo 5

Considerações Finais

5.1 Conclusões

Para enfrentar adequadamente e tirar proveito do atual ambiente de competição, as empresas necessitam de profissionais e técnicas capazes de transformar os desafios do mercado em oportunidades de negócio. Além do recurso estratégico do conhecimento, recurso este nas mãos e desenvolvido por profissionais capacitados, as técnicas de Pesquisa Operacional se apresentam como importante recurso de auxílio nas mudanças e adaptações organizacionais, na medida que permitem experimentar mudanças em modelos, e não no sistema real, contribuindo para a segurança na tomada de decisões.

Este trabalho teve o objetivo de comparar a abordagem de uma mesma situação de um ambiente de manufatura por duas técnicas distintas da Pesquisa Operacional: a simulação por eventos discretos e a programação linear. Estas técnicas foram escolhidas por serem as mais difundidas entre os tomadores de decisões na indústria.

Para tanto foi modelado um sistema de produção real do setor automotivo. O sistema de produção estudado foi escolhido por fazer parte de um setor globalmente competitivo, exigir constante atenção ao fator custo de produção além de possuir flexibilidade quanto ao produto manufaturado e postura de melhoria contínua, o que facilitou a comunicação e conseqüentemente o entendimento e desenvolvimento do modelo ao longo do projeto. Este sistema de manufatura

foi abordado pela análise da capacidade produtiva instalada e da contribuição ao lucro dos artigos produzidos.

As abordagens do sistema estudado alcançaram o objetivo do trabalho, pois explicitaram a natureza distinta de construção do modelo, obtenção e avaliação dos dados referentes às operações de manufatura, desde a chegada da matéria-prima até a embalagem. Em especial, pode-se destacar a natureza avaliativa da simulação por eventos discretos e a natureza de otimização da programação linear. Foi constatada ainda através da natureza dinâmica da programação da manufatura, a importância da flexibilidade nas atuais condições de competição global.

5.2 Recomendações para trabalhos futuros:

Um sistema de manufatura como o estudado permite diversas abordagens e avaliações e como perspectivas para outros trabalhos pode-se citar:

- Avaliar o emprego de arranjo físico celular no sistema de manufatura permitindo comparação com o atual arranjo em termos financeiros, de acréscimo de flexibilidade e aproveitamento dos recursos;
- Inclusão do fator retrabalho;
- Ampliar a modelagem para outros setores da empresa com as interações entre o planejamento da produção e o chão-de-fábrica;
- Ampliar os custos a serem medidos.

Referências Bibliográficas:

Al-Aomar, R. *Product mix analysis with discrete event simulation*. In: Proceedings of the Winter Simulation Conference. 2000, pp 1385-1392.

Al-Mubarak, F., Canel, D., Khumawala, B. M. *A simulation study of focused cellular manufacturing as an alternative batch processing layout*. In: International Journal of Production Economics. 2003, pp 123-138.

Araujo, S. A., Arenales, M. N. *Dimensionamento de lotes e programação do forno numa fundição automatizada de médio porte*. In: Revista Pesquisa Operacional, v.23, (3), 2003, pp. 403-420.

Banks, J., Carson, J. S., Nelso, B. L. *Discrete-event system simulation*. New Jersey: Prentice Hall, 1996, 548p.

Barrela, W. D. *Sistemas especialistas modulados e abrangentes para a gestão de operações*. São Paulo: Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2000, 158p. Tese (doutorado).

Barton, R.R. *Designing simulation experiments*. In: Winter Simulation Conference. Proceedings. 2001, pp. 47-52.

Black, J.T. *O Projeto da Fábrica com Futuro*. Porto Alegre: Bookman, 1998, 288p.

Bockerstette, J. A., Moura, R. A. *Guia para redução do tempo de ciclo*. São Paulo: Editora IMAN, 1995, 70p.

Bolwijn, P., Kumpe, T. *Manufacturing in the 1990's – productivity, flexibility and innovation*. In: Long Range Planning, v.23, (4), pp. 44-57, 1990.

Bronson, R. *Pesquisa Operacional*. São Paulo: McGraw-Hill, 1985, 318p.

Carastran, J. T. *Uma análise da utilidade da programação linear sob o enfoque contábil-gerencial*. São Paulo: Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade, Universidade de São Paulo, 1993, 135p. Tese (doutorado).

Chiavenato, I. *Iniciação à Administração da Produção*. São Paulo: Makron, 1991, 145p.

Colmanetti, M. S. *Modelagem de sistemas de manufatura orientada pelos custos das atividades e processos*. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2001, 94p. Dissertação (mestrado).

Corrêa, H. L., Giansi, I. G. N. *Just in time, MRP II e OPT: um enfoque estratégico*. São Paulo: Atlas, 1993.

Corrêa, H. L., Giansi, I. G. N., Caon, M. *Planejamento, programação e controle da produção*. São Paulo: Atlas, 2001, 452p.

Dal, B., Tugwell, P. *Overall equipment effectiveness as a measure of operational improvement*. Bradford: MCB University. 2000.

Donato, A. A. *Aplicação do processamento paralelo na resolução de problemas de programação linear de grande porte utilizando o princípio de decomposição de Dantzig-Wolfe*. Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, 2002, 94p. Dissertação (mestrado).

Dongarra, J., Sullivan, F. *Guest editor's introduction: the top ten algorithms*. In: Computing in Science and Engineering. 2000, pp 22-23.

Farahmand, K. *Using simulation to support implementation of flexible manufacturing cell*. In: Winter Simulation Conference. Proceedings. 2000, pp. 1272-1281.

Fletcher, R. *Practical Methods of Optimization*. John Wiley & Sons Ltd., 1987, 436p.

Francischini, P. G., Fegyveres, A. *Arranjo Físico*. In: Contador, J. C. (Coordenador). *Gestão de Operações*. São Paulo: Edgar Blücher, 1997, Cap. 12, 591p.

Goldbarg, M. C., Luna H. P. L. *Otimização Combinatória e Programação Linear*. 2.ed. Rio de Janeiro: Campus, 2000, 649p.

Gonçalves Filho, E. V. *Arranjo físico da fábrica: um modelo para o processo de projeto e um algoritmo genérico para a formação de células de fabricação*. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2001, 133p. Tese (livre docência).

Guerrini, F. Um modelo integrado de administração de produção para empresas de construção civil. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1999, Tese (doutorado).

Harrel, C. R., Price, R. N. *Simulation modeling using ProModel technology*. In: Winter Simulation Conference: proceedings. 2003, pp. 175-181.

Harrel, C. *Simulação – otimizando sistemas*. São Paulo: IMAN, 2002, 120p.

Harrel, C., Ghosh, B., Bowden, R. *Simulation Using ProModel*. U.S.A: MacGraw-Hill, 2000, 320p.

Ingalls, R. G. *Introduction to simulation*. In: Winter Simulation Conference. Proceedings. 2001, pp. 7-16.

Iudícibus, S. *Curso de contabilidade para não contadores: para as áreas de administração, economia, direito e engenharia*. São Paulo: Atlas, 1990, 128p.

Junqueira, F. *Modelagem de sistemas flexíveis de movimentação de materiais através de redes de Petri interpretadas*. São Paulo: Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2000, 126p. Dissertação (mestrado).

Knoll, J. M., Heim, J. A. *Ensuring the successful adoption of discrete event simulation in a manufacturing environment*. In: Winter Simulation Conference. Proceedings. 2000, pp. 1297-1304.

Law, A. M., Kelton, W. D. *Simulation modeling and analysis*. USA: McGraw Hill, 1991, 759p.

Law, A. M., McComas, M. G. *How to build valid and credible simulation models*. In: Winter Simulation Conference. Proceedings. 2001, pp. 22-29.

Lima, P. C., *Gestão dos Custos de Sistemas de Manufatura*. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2002, 68p. Apostila.

Lobão, E. C. *Discussão, sistematização e modelamento do processo de realização de estudos de simulação*. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2000, 198p. Tese (Doutorado).

Lobão, E. C., Porto, A. J. V. *Proposta para sistematização de estudos em simulação*. In: Congresso Nacional de engenharia de produção. Anais. 1997.

Lucero, A. G. R. *Um método de otimização para programação da manufatura em pequenos lotes*. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2001, 115p. Dissertação (mestrado).

Magatão, L., Arruda, L. V. R., Neves, F. *Otimização das operações de um poliduto através de programação linear inteira mista*. In: Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional. 2001, pp. 1430-1441.

Mark, D., Aquilano, N., Chase, R. *Fundamentos da Administração da Produção*. Porto Alegre: Bookman Editora, 2001.

Martins, P. G., Laugen, F. P. *Administração da Produção*. São Paulo: Saraiva, 2002.

Merschmann, L. H. de C., Pinto, L. R. *Modelos de programação matemática para resolução de problemas de mistura de minérios e alocação de equipamentos em minas a céu aberto*. In: Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional. 2001, pp. 1401-1409.

Monks, J. G. *Administração da Produção*. São Paulo: McGraw-Hill, 1987, Cap. 7.

Montevecchi, J. A. B., Duarte, R., Nilsson, G. V. *O uso da simulação para análise do layout de uma célula de manufatura*. In: Revista Pesquisa e Desenvolvimento Engenharia de Produção, (1) 2003, pp. 15-29.

Moreira, D. A. *Administração da produção e operações*. São Paulo: Pioneira, 1996.

Munhoz, J. R., Morabito, R. *Um modelo baseado em programação linear e programação de metas para análise de um sistema de produção e distribuição de suco concentrado congelado de laranja*. In: Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional. 2001, pp. 1475-1482.

Muscat, A., Fleury, A. *Indicadores da qualidade e produtividade na indústria brasileira*. In: Revista Indicadores da Qualidade, (2), 1993, pp. 82-107.

Nash, S. G. , Sofer, A. *Linear and Nonlinear Programming*. McGraw-Hill International Editions, 1996, 692p.

O'Kane, J. F., Spenceley, J. R., Taylor, R. *Simulation as an essential tool for advanced manufacturing technology problems*. In: Journal of Processing Technology, v105, 2000, pp. 412-424.

Porto, A. J. V. *Desenvolvimento de um método de integração do planejamento e controle da produção baseado na flexibilidade do processo de fabricação*. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1990.

Prado, D. *Programação Linear*. Belo Horizonte: Editora Desenvolvimento Gerencial, 1999, 130p.

Prince, J., Kay, J. M. *Combining lean and agile characteristics: creation of virtual groups by enhanced production flow analysis*. In: International Journal of Production Economics. v.85, 2003, pp. 305-318.

Protil, R. M. *Otimização do processo decisório utilizando simulação computacional*. In: Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional. 2001, pp. 1535-1546.

Puccini, A. L. *Introdução à Programação Linear*. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1981, 252p.

Rogers, P. *Optimum-seeking simulation in the design and control of manufacturing systems: experience with Optquest for Arena*. In: Winter Simulation Conference. proceedings. 2002, pp. 1142-1150.

Santos-Meza, E., Santos, M., Arenales, M. *Lot sizing problem in an automated foundry*. In European Journal of Operations Research, v.139, 2002, pp. 490-500.

Slack, N., Chambers, S., Harland, C., Harrison, A., Johnston, R. *Administração da produção*. São Paulo: Atlas, 2002, 726p.

Spedding, T. A., Sun, G. Q. *Application of discret event simulation to the activity based costing of manufacturing systems*. In: International Journal of Production Economics, v.21, 1999, pp. 289-301.

Swets, R. J., Drake, G. R. *The Arena product family: enterprise modeling solutions*. In: Winter Simulation Conference. Proceedings. 2001, pp. 201-208.

Taj, S., Cochran, D. S., Duda, J. W., Linck, J. *Simulation and production planning for manufacturing cells*. In: Winter Simulation Conference. Proceedings. 1998, pp. 973-978.

Takakuwa, S. *The use of simulation in activity-based costing for flexible manufacturing systems*. In: Winter Simulation Conference. Proceedings. 1997, pp. 793-800.

Takahashi, M. T. *Planejamento de produção da manufatura: análise de desempenho de algoritmos em ambiente paralelizado*. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2000, 162p, Dissertação (mestrado).

Togashi, S. T., Ronconi, D. P. *Estudo de formulações inteiras mistas para problemas de programação no ambiente flowshop com datas de entrega*. In: Anais do XXXII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional. 2001, pp. 135-142.

Vilarinho, P. M., Ramos, A. L., Silva, L. *Using simulation for manufacturing process reengineering – a practical case study*. In: Winter Simulation Conference. Proceedings. 2000, pp. 1322-1328.

Wolff, G. *Integração vertical e terceirização: uma abordagem crítica focada nas questões estratégicas para a competitividade da manufatura*. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2001, 125p, Dissertação (mestrado).

Yanasse, H. H., Pinto, M. J. *O problema de minimização de troca de ferramentas: propostas para sua resolução*. In: Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional. 2001, pp. 1410-1419.

Yarmish, G. *A distributed implementation of the Simplex method*. New York: Polytechnic University, 2002, 178p, Thesis.

Zhang, Q., Vonderembse, M. A., Lim, J. *Manufacturing flexibility: defining and analyzing relationships among competence, capability and customer satisfaction*. In: Journal of Operations Management, v.23, 2003, pp. 173-191.

Anexo I

Resultados de experimentos

São apresentados os resultados das simulações para os períodos de Julho, Agosto, Setembro e Dezembro expressos em tempos (segundos) e custos (R\$).

Tempos e Custos da peça 20.03.01.1560

TAMANHO DO LOTE.....	= 588
TEMPO TOTAL DO LOTE	= 327.516 s
TEMPO TOTAL DE SETUP.....	= 6.300 s
TEMPO UNITÁRIO DA PEÇA	= 557 s
CUSTO DE MÃO-DE-OBRA DIRETA TOTAL	= R\$ 696,96
CUSTO VARIÁVEL TOTAL	= R\$ 2.405,45

Tempos e Custos da peça 20.03.01.1560

TAMANHO DO LOTE.....	= 565
TEMPO TOTAL DO LOTE	= 314.705 s
TEMPO TOTAL DE SETUP.....	= 6.300 s
TEMPO UNITÁRIO DA PEÇA	= 557 s
CUSTO DE MÃO-DE-OBRA DIRETA TOTAL	= R\$ 669,52
CUSTO VARIÁVEL TOTAL	= R\$ 2.311,36

Tempos e Custos da peça 20.03.01.1560

TAMANHO DO LOTE.....	= 550
TEMPO TOTAL DO LOTE	= 306.350 s
TEMPO TOTAL DE SETUP.....	= 6.300 s
TEMPO UNITÁRIO DA PEÇA	= 557 s
CUSTO DE MÃO-DE-OBRA DIRETA TOTAL	= R\$ 651,75
CUSTO VARIÁVEL TOTAL	= R\$ 2.250,00

Tempos e Custos da peça 20.03.01.1560

TAMANHO DO LOTE.....	= 620
TEMPO TOTAL DO LOTE	= 345.340 s
TEMPO TOTAL DE SETUP.....	= 6.300 s
TEMPO UNITÁRIO DA PEÇA	= 557 s
CUSTO DE MÃO-DE-OBRA DIRETA	= R\$ 734,70
CUSTO VARIÁVEL TOTAL	= R\$ 2.536,36

Tempos e Custos da peça 20.03.01.0781

TAMANHO DO LOTE.....	= 560
TEMPO TOTAL DO LOTE	= 450.240 s
TEMPO TOTAL DE SETUP.....	= 10.500 s
TEMPO UNITÁRIO DA PEÇA	= 804 s
CUSTO DE MÃO-DE-OBRA DIRETA TOTAL	= R\$ 952,00
CUSTO VARIÁVEL TOTAL	= R\$ 2.638,39

Tempos e Custos da peça 20.03.01.0781

TAMANHO DO LOTE.....	= 590
TEMPO TOTAL DO LOTE	= 474.360 s
TEMPO TOTAL DE SETUP.....	= 10.500 s
TEMPO UNITÁRIO DA PEÇA	= 804 s
CUSTO DE MÃO-DE-OBRA DIRETA TOTAL	= R\$ 1.003,00
CUSTO VARIÁVEL TOTAL	= R\$

Tempos e Custos da peça 20.03.01.0781

TAMANHO DO LOTE..... = 510
TEMPO TOTAL DO LOTE = 410.040 s
TEMPO TOTAL DE SETUP..... = 10.500 s
TEMPO UNITÁRIO DA PEÇA = 804 s
CUSTO DE MÃO-DE-OBRA DIRETA TOTAL = R\$ 867,00
CUSTO VARIÁVEL TOTAL = R\$ 2.403,18

Tempos e Custos da peça 20.03.01.1010

TAMANHO DO LOTE..... = 1.348
TEMPO TOTAL DO LOTE = 869.460 s
TEMPO TOTAL DE SETUP..... = 9.000 s
TEMPO UNITÁRIO DA PEÇA = 645 s
CUSTO DE MÃO-DE-OBRA DIRETA TOTAL = R\$ 1.845,41
CUSTO VARIÁVEL TOTAL = R\$ 5.220,45

Tempos e Custos da peça 20.03.01.1010

TAMANHO DO LOTE..... = 1.590
TEMPO TOTAL DO LOTE = 1.025.550 s
TEMPO TOTAL DE SETUP..... = 9.000 s
TEMPO UNITÁRIO DA PEÇA = 645 s
CUSTO DE MÃO-DE-OBRA DIRETA TOTAL = R\$ 2.176,70
CUSTO VARIÁVEL TOTAL = R\$ 6.157,64

Tempos e Custos da peça 20.03.01.1010

TAMANHO DO LOTE.....	= 1.707
TEMPO TOTAL DO LOTE	= 1.101.015 s
TEMPO TOTAL DE SETUP.....	= 9.000 s
TEMPO UNITÁRIO DA PEÇA	= 645 s
CUSTO DE MÃO-DE-OBRA DIRETA TOTAL	= R\$ 2.336,88
CUSTO VARIÁVEL TOTAL	= R\$ 6.610,75

Tempos e Custos da peça 20.03.01.1010

TAMANHO DO LOTE.....	= 1.100
TEMPO TOTAL DO LOTE	= 709.500 s
TEMPO TOTAL DE SETUP.....	= 9.000 s
TEMPO UNITÁRIO DA PEÇA	= 645 s
CUSTO DE MÃO-DE-OBRA DIRETA TOTAL	= R\$ 1.505,90
CUSTO VARIÁVEL TOTAL	= R\$ 4.260,00

Tempos e Custos da peça 20.03.01.0760

TAMANHO DO LOTE.....	= 4.950
TEMPO TOTAL DO LOTE	= 2.994.750 s
TEMPO TOTAL DE SETUP.....	= 9.300 s
TEMPO UNITÁRIO DA PEÇA	= 605 s
CUSTO DE MÃO-DE-OBRA DIRETA TOTAL	= R\$ 6.360,75
CUSTO VARIÁVEL TOTAL	= R\$ 18.750,00

Tempos e Custos da peça 20.03.01.0760

TAMANHO DO LOTE..... = 5.723
TEMPO TOTAL DO LOTE = 3.462.415 s
TEMPO TOTAL DE SETUP..... = 9.300 s
TEMPO UNITÁRIO DA PEÇA = 605 s
CUSTO DE MÃO-DE-OBRA DIRETA TOTAL = R\$ 7.354,05
CUSTO VARIÁVEL TOTAL = R\$ 21.678,03

Tempos e Custos da peça 20.03.01.0760

TAMANHO DO LOTE..... = 4.878
TEMPO TOTAL DO LOTE = 2.952.190 s
TEMPO TOTAL DE SETUP..... = 9.300 s
TEMPO UNITÁRIO DA PEÇA = 605 s
CUSTO DE MÃO-DE-OBRA DIRETA TOTAL = R\$ 6.268,23
CUSTO VARIÁVEL TOTAL = R\$ 18.477,27

Tempos e Custos da peça 20.03.01.0760

TAMANHO DO LOTE..... = 5.300
TEMPO TOTAL DO LOTE = 3.206.500 s
TEMPO TOTAL DE SETUP..... = 9.300 s
TEMPO UNITÁRIO DA PEÇA = 605 s
CUSTO DE MÃO-DE-OBRA DIRETA TOTAL = R\$ 6.810,50
CUSTO VARIÁVEL TOTAL = R\$ 20.075,76

Tempos e Custos da peça 20.03.01.1000

TAMANHO DO LOTE.....	= 1.310
TEMPO TOTAL DO LOTE	= 796.480 s
TEMPO TOTAL DE SETUP.....	= 9.000 s
TEMPO UNITÁRIO DA PEÇA	= 608 s
CUSTO DE MÃO-DE-OBRA DIRETA TOTAL	= R\$ 1.692,52
CUSTO VARIÁVEL TOTAL	= R\$ 5.103,71

Tempos e Custos da peça 20.03.01.1000

TAMANHO DO LOTE.....	= 1.360
TEMPO TOTAL DO LOTE	= 826.880s
TEMPO TOTAL DE SETUP.....	= 9.000 s
TEMPO UNITÁRIO DA PEÇA	= 608 s
CUSTO DE MÃO-DE-OBRA DIRETA TOTAL	= R\$ 1.752,12
CUSTO VARIÁVEL TOTAL	= R\$ 5.298,51

Tempos e Custos da peça 20.03.01.1000

TAMANHO DO LOTE.....	= 1.155
TEMPO TOTAL DO LOTE	= 702.240 s
TEMPO TOTAL DE SETUP.....	= 9.000 s
TEMPO UNITÁRIO DA PEÇA	= 608 s
CUSTO DE MÃO-DE-OBRA DIRETA TOTAL	= R\$ 1.492,26
CUSTO VARIÁVEL TOTAL	= R\$ 4.499,83

Tempos e Custos da peça 20.03.01.1000

TAMANHO DO LOTE.....	= 1.230
TEMPO TOTAL DO LOTE	= 747.800 s
TEMPO TOTAL DE SETUP.....	= 9.000 s
TEMPO UNITÁRIO DA PEÇA	= 608 s
CUSTO DE MÃO-DE-OBRA DIRETA TOTAL	= R\$ 1.589,16
CUSTO VARIÁVEL TOTAL	= R\$ 4.792,03