

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA
TESE DEFENDIDA POR ROSANA BEATRIZ.....
BAPTISTA HADDAD..... E APROVADA
PELA COMISSÃO JULGADORA EM 16.10.2005.....

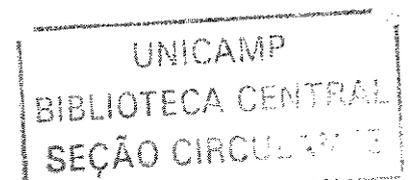
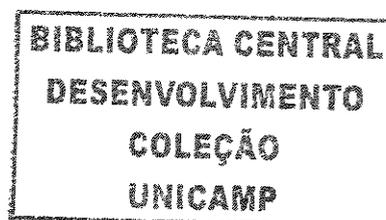
Marcus Fabius

ORIENTADOR

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

Desenvolvimento de um Modelo de Capacitação do ERP por meio de Programação Matemática: Uma Aplicação na Indústria de Autopeças

Autora: Rosana Beatriz Baptista Haddad
Orientador: Marcus Fabius Henriques de Carvalho



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

Desenvolvimento de um Modelo de Capacitação do ERP por meio de Programação Matemática: Uma Aplicação na Indústria de Autopeças

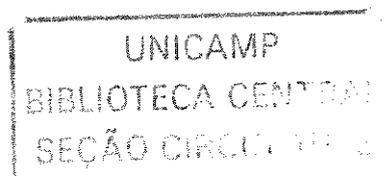
Autora: Rosana Betraiz Baptista Haddad
Orientador: Marcius Fabius Henriques de Carvalho

Curso: Engenharia Mecânica
Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação

Tese de doutorado apresentada à comissão de Pós-graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Campinas, 2005
SP – Brasil

1.



UNIDADE	BC
Nº CHAMADA	T/UNICAMP
	H117d
V	EX
TOMBO BC/	66213
PROC.	16-P-00086-01
C	<input type="checkbox"/>
D	<input checked="" type="checkbox"/>
PREÇO	11,00
DATA	09/01/05
Nº CPD	

Bit ID 373842

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

H117d Haddad, Rosana Beatriz Baptista
Desenvolvimento de um modelo de capacitação do ERP por meio de programação matemática: uma aplicação na indústria de autopeças / Rosana Beatriz Baptista Haddad.--Campinas, SP: [s.n.], 2005.

Orientador: Marcius Fabius Henriques de Carvalho.
Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Controle de produção. 2. Planejamento da produção. 3. Agenda de execução (administração). 4. Teoria dos grafos. 5. Heurística. 6. Programação linear. 7. Otimização matemática. I. Carvalho, Marcius Fabius Henriques de. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

Titulo em Inglês: The development of a capacity model for ERP through mathematical programming: application to an auto parts industry.

Palavras-chave em Inglês: Production control, Production planning, Scheduling, Graph theory, Heuristics, Linear programming e Mathematical optimization

Área de concentração: Materiais e Processos de Fabricação

Titulação: Doutora em Engenharia Mecânica

Banca examinadora: Antonio Batocchio, Paulo Corrêa Lima, Aurélio Ribeiro Leite de Oliveira e Antonio Freitas Rentes.

Data da defesa: 16/05/2005

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

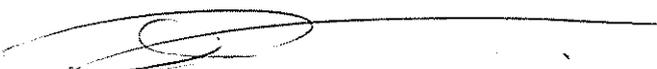
TESE DE DOUTORADO

**Desenvolvimento de um Modelo de Capacitação
do ERP por meio de Programação Matemática:
Uma Aplicação na Indústria de Autopeças**

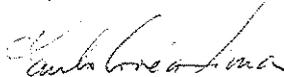
Autor: Rosana Beatriz Baptista Haddad
Orientador: Marcius Fabius Henriques de Carvalho



Prof. Dr. Marcius Fabius Henriques de Carvalho, Presidente
Instituição FEM/UNICAMP



Prof. Dr. Antonio Batocchio
Instituição DEF/FEM/UNICAMP



Prof. Dr. Paulo Corrêa Lima
Instituição DEF/FEM/UNICAMP



Prof. Dr. Aurélio Ribeiro Leite de Oliveira
Instituição IMECC/UNICAMP



Prof. Dr. Antonio Freitas Rentes –
Instituição EESC-USP

Campinas, 16 de Maio de 2005

DEDICATÓRIA:

À minha família

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que de alguma forma me ajudaram na elaboração deste trabalho.

Agradeço especialmente à Olga, Koyama, Edeneziano, João, Wagner, Fátima Artemis, Beto e Maria Marta pelas sugestões, paciência, disponibilidade e apoio.

Ao Anibal, pela colaboração e apoio.

Agradeço a todos os meus colegas do CenPRA, pelo incentivo.

Ao CenPRA, pelo apoio institucional.

À LOGOCENTER, pelo software LOGIX™ que possibilitou a elaboração deste trabalho.

Ao CNPq e à FAPESP, pelas bolsas de estudo que possibilitaram a contratação de estagiários.

Ao Marcius, pela orientação e estímulo.

À Therezinha, Piera e Nora pelo carinho e cuidados.

À minha família, minha mãe Anna, Tia Salma, Tio José, Claudia, Célio, Patrícia, Luiz, Cristina, Alice, André e Victória, pela compreensão, apoio, paciência e carinho.

O Senhor.... Mire veja: o mais importante e bonito, do mundo, é isto: que as pessoas não estão sempre iguais, ainda não foram terminadas – mas que elas vão sempre mudando. Afinam ou desafinam. Verdade maior. É o que a vida me ensinou. Isso que me alegra, montão.

João Guimarães Rosa - Grande Sertão: Veredas

RESUMO

HADDAD, Rosana Beatriz Baptista, Desenvolvimento de um Modelo de Capacitação do ERP por meio de Programação Matemática: Uma Aplicação na Indústria de Autopeças, Universidade Estadual de Campinas, 2005. 124 p. Tese (Doutorado)

Este trabalho apresenta um estudo de caso real para problemas de seqüenciamento de lotes numa indústria de autopeças. Nele é proposta a adição de um módulo de Capacitação a um software de ERP de forma que o Módulo de MRP deste passe a respeitar os limites de capacidade de recursos considerados críticos. Para isso, o problema de seqüenciamento de produção nos recursos críticos é modelado como problema de fluxos em redes com restrições adicionais. É sugerido também um procedimento para transformar o problema com restrições adicionais em um grafo. As práticas correntes na empresa teste foram consideradas no modelo, formalizando procedimentos que até então aconteciam de forma oficiosa. A grande vantagem do método está na visão temporal do sistema, que permite antecipações ou atrasos de lotes de fabricação – desde que exista capacidade disponível - sempre que houver sobrecarga. O método permite ainda a análise de diferentes cenários.

Palavras Chave

- ERP, Seqüenciamento, Programação Matemática, Grafo, Fluxo em Redes, Heurística

ABSTRACT

HADDAD, Rosana Beatriz Baptista, The Development of a Capacity Model for ERP through Mathematical Programming: Application to an Auto Parts Industry, Universidade Estadual de Campinas, 2005, 124p. Tese (Doutorado).

This work presents a scheduling problem case study of a in an auto parts industry. It proposes the integration of a capacity module to an ERP off the shelf. The objective of this integration is to improve the MRP module of the ERP in such way that it recognizes capacity limits of critical resources. Critical resources at shop floor are modeled as a network flow problem with additional constraints. A procedure to transform the problem into a simple network is also suggested. The heuristics used in the shop floor are considered and added to the model. The main contribution of this method is the temporal view of the scheduling problem which allows overcoming overloaded situations. This method allows also the analysis of several scenarios. The results presented in this study were obtained using real data.

Key Words

ERP, Scheduling, Mathematical Programming, Heuristics, Network flow, Graph

ÍNDICE

DEDICATÓRIA:	I
AGRADECIMENTOS	II
RESUMO	IV
ABSTRACT	V
ÍNDICE	VI
LISTA DE FIGURAS	IX
LISTA DE TABELAS	XII
INTRODUÇÃO	1
1.1.O Problema	3
1.1.1. Objetivo Geral	4
1.2.Organização do trabalho	5
SISTEMA DE PRODUÇÃO DISCRETA: ASPECTOS CONCEITUAIS	9
2.1. A abordagem Hierárquica para o Problema	11
2.1.2 Sistemas Hierárquicos de Administração da Produção	14
2.1.2.1 O MRP	14
2.1.2.2. O MRPII	17
2.1.2.3. O ERP	20
2.1.2.4. O APS	23
2.2. A Teoria das Restrições	25
2.3. Conclusão do Capítulo 2	29

MODELAGEM E ABORDAGENS DE SOLUÇÃO PARA O PROBLEMA DO SEQÜENCIAMENTO DE LOTES	31
3.1. Abordagens para Otimização	33
3.1.1. Abordagem para Otimização na Fabricação de Um Item	34
3.1.2. Abordagem para Otimização na Fabricação de Vários Itens	37
3.1.3. Abordagem para Otimização na Fabricação e Montagem de Um Item	39
3.1.4. Abordagem para Otimização na Fabricação e Montagem de Vários Itens	41
3.2. A Abordagem Heurística	42
3.2.1. Modelagem como Grafo de um Problema com Restrições Conjuntas de Produção – Método de Zahorik et al. (1984)	44
3.2.2. Extensão do Método de Zahorik et al. (1984) considerando ordens em atraso, taxas de produção constantes e mais do que três períodos de planejamento	50
3.2.3. Extensão do Método de Zahorik et al. (1984) considerando diferentes taxas de produção e mais do que três períodos de planejamento	58
3.3. Definição da Modelagem Respeitando as Características de cada Problema	62
3.4. Conclusão do Capítulo 3	62
INTEGRAÇÃO: PRÁTICAS INDUSTRIAIS E OTIMIZAÇÃO	65
4.1. Adição do Módulo de Capacitação ao MRP	69
4.2. Modelagem do Problema	71
4.3. Estrutura para Integração	75
4.4. Conclusão do Capítulo 4	77
ESTUDO DE CASO	78
5.1. Aplicação do Módulo de Capacitação	87
5.1.1 Recupera dados das Tabelas EXCEL™	89
5.1.2 Recupera dados da Base de dados do LOGIX™	90
5.1.3 Monta as famílias de Produtos	90
5.1.4 Gera Grafos de Entrada	90
5.1.4.1 Gera Grafos de Entrada – Problema modelado com Restrições adicionais	91
5.1.4.2 Gera Grafos de Entrada – Problema modelado como Grafo	91
5.1.5 Otimização	92
5.1.5.1 Programação Linear com Restrições Adicionais	92
5.1.5.2 Grafos	92
5.1.6 Analisa Resultados	92

5.1.7 Apresenta Resultados	93
5.2. Comparação entre as duas abordagens para as Etapas Gera Grafos de Entrada e MRP Capacitado	97
5.3. Conclusão do Capítulo 5	99
CONCLUSÕES	101
Propostas de trabalhos futuros	104
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	106
DADOS TÉCNICOS SOBRE O PROGRAMA TRADUZ	111
A.1. Arquivos de Entrada, necessários à execução da rotina TRADUZ	111
A.1.1 Arquivos PRINCIPA.EXE e CFG.TXT	112
A.1.2 Arquivo FAMILIA.TXT	114
A.1.3 Arquivo TROCA.TXT	115
A.1.4 Arquivo DEMANDA.TXT	115
A.1.5 Arquivo SC.EXE ou GRAFO.exe	116
A.1.6 Arquivo INTER.EXE e NREESCRE.EXE	116
A.1.7 Arquivo LIMPA.EXE	117
A.2. Arquivos Intermediários gerados durante a execução da Rotina TRADUZ	117
A.2.1 Arquivo TEMP001.TXT	117
A.2.2 Arquivo LOGIXDAz.TXT	117
A.2.3 Arquivo TEMP123.TXT	118
A.2.4 Arquivo RESULTz.CSV	118
A.2.5 Arquivo FALTAN.TXT	119
A.3. Arquivos de Saída da Rotina TRADUZ	119
A.3.1 Arquivo DEMPxyz.OUT	119
A.3.2 Arquivo TRAPxyz.DAT	120
A.3.3 Arquivo TRAPxyz.OUT	120
A.3.4 Arquivo RESPxyz.OUT	121

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Parâmetros a serem considerados na alocação de carga aos recursos	3
Figura 1.2 – Exemplo de Grafo para um produto, considerando dois períodos	7
Figura 2.1 - Sistema de Produção Discreta (extraída de Carvalho et al. –1998)	9
Figura 2.2 - Diagrama de Gantt	11
Figura 2.3 – Hierarquia para Planejamento (extraída de Carvalho et al. – 1998)	13
Figura 2.4 - Conjunto Básico do MRP	16
Figura 2.5 - Evolução do MRP	17
Figura 2.6 - Modelo de MRPII (adaptado de Laurindo e Mesquita, 2000)	18
Figura 2.7 - Evolução do Sistema ERP (adaptada de Watson e Schneider, 1999)	20
Figura 3.1 - Exemplo de um item com processamento possível em dois equipamentos	32
Figura 3.2 - Linha de produção serial (extraída de Carvalho et al. – 1998)	34
Figura 3.3 - Linha de produção com três estágios e cinco períodos (Carvalho et al. – 1998)	35
Figura 3.4 - Representação por grafo do sistema produtivo (extraída de Carvalho et al. – 1998)	36
Figura 3.5 – Árvore de Produto para um item com duas operações de montagem e sete de fabricação	40
Figura 3.6 – Representação por Fluxo em Redes do sistema da Figura 3.5, para três períodos de tempo	40
Figura 3.7 - Exemplo de montagem – Quatro rodas para cada carro	41

Figura 3.8 - Exemplo com um estágio de produção disputado por três itens, em dois períodos	47
Figura 3.9 - Restrições de capacidade conjunta de produção para três itens em dois períodos	47
Figura 3.10 - Restrições de capacidade conjunta de armazenagem para 3 itens em 2 períodos	48
Figura 3.11 – Representação reduzida da Matriz de Incidência	48
Figura 3.12 - Estrutura de A_{12}	49
Figura 3.13 - Estrutura de A_{41} e de A_{32}	49
Figura 3.14 – Representação de adaptação da Matriz de sugerida por Zahorik et al. (1984)	51
Figura 3.15 - Duas possíveis estruturas para ordem em atraso e armazenagem	52
Figura 3.16 - Matriz de transformação	53
Figura 3.17 – 2 itens, 5 períodos e armazenagem e ordem em atraso nos 3 primeiros períodos	54
Figura 3.18 - Diagrama de Fluxo para a Matriz da Figura 3.17	55
Figura 3.19 – Fluxo em Redes simples, resultante de operação entre T e M	56
Figura 3.20 – Diagrama de Fluxo para a matriz da Figura 3.19	57
Figura 3.21 - Matriz de transformação T1	59
Figura 3.22 - Matriz de transformação T2	59
Figura 3.23 – Matriz M1, considerando 2 itens, 5 períodos e armazenagem nos 3 primeiros períodos. Ordens em atraso não são consideradas	60
Figura 3.24 – Fluxo em Redes simples, resultante de operação entre T1, T2 e M1	61
Figura 4.1 - Exemplo de carga de trabalho em duas semanas	66
Figura 4.2 - Paralelismo tratado como máquina-equivalente	68
Figura 4.3 – Matriz de Restrições para o exemplo de Modelagem	73
Figura 4.4 – Resolução do Problema	74
Figura 4.5 - Duas Formas de Estrutura para Capacitação do MRP	75
Figura 4.6 - Configuração de um MRPII integrado a um Módulo de Capacitação	76
Figura 4.7 - Esquema de integração entre os softwares	77

Figura 5.1 - Exemplo processamento de 6 itens nas 3 prensas do centro de trabalho gargalo	79
Figura 5.2 – Determinação das Famílias de Produtos, pelo uso do ferramental	80
Figura 5.3 - Arranjo da Ferramenta para processamento da família F1	81
Figura 5.4 -Tempos de produção (34h e 40min) e setup (52 h) numa determinada semana	82
Figura 5.5 -Tempos de produção e setup respeitando-se a seqüência de processamento sugerida	82
Figura 5.6 - Comparação entre tempos de processamento e setup, por item.	83
Figura 5.7 – Simulação de carga nas prensas, para três períodos	88
Figura 5.8 – Funcionalidade do Programa TRADUZ	89
Figura 5.9 – Situação da Figura 5.7 depois da otimização	93
Figura 5.10 – Representação por fluxo em redes para modelagem com restrições adicionais	98
Figura 5.11 – Representação por fluxo em redes para o problema transformado em grafo	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1-Dados de Produção	10
Tabela 4.1-Possíveis alocações de recursos nas diversas operações de COMP	66
Tabela 4.2 :Exemplo de demanda para dois itens em dois períodos	72
Tabela 4.3 :Taxas de processamento das máquinas 1 e 2 para os itens F1 e F2	72
Tabela 4.4 :Comparação entre Demandas e Quantidades produzidas	74
Tabela 5.1-Sequência sugerida para processamento da família	84
Tabela 5.2-Tempos de troca entre itens.	84
Tabela 5.3-Demanda de itens por período.	85
Tabela 5.4-Exemplo do procedimento de criação de famílias na Etapa Monta Famílias	87
Tabela 5.5-Cenário estudado – porcentagens das famílias processadas em cada período	95
Tabela 5.6-Cenário estudado – tempo de processamento para cada família, por período	96
Tabela 5.7-Cenário estudado- Totalização de horas alocadas, por prensa	96

Capítulo 1

Introdução

A produção em massa exerceu domínio incontestado durante o seu florescimento, pelas mãos de Henry Ford e seus Engenheiros de Produção, nas décadas de 20 e 30, quando o mercado consumidor tinha características distintas das atuais: sendo mais homogêneo, demandava itens padronizados. Desenvolveu-se o conceito de que a produção em grandes quantidades diminuiria o custo dos produtos tornando sua aquisição viável a um maior número de consumidores. Este fato incentivou a criação de grandes empresas que se dedicavam à produção de grande quantidade de uma pequena variedade de produtos.

A partir da década de 70, quando muitos mercados começaram a amadurecer ou saturar e novas tecnologias passaram a minar com grande intensidade produtos antigos já estabelecidos, o conceito de customização, ou seja, a oferta de produtos diferenciados para atendimento às necessidades específicas do cliente, passou a ganhar importância, privilegiando a variedade e mesmo a personalização dos produtos, em detrimento da quantidade (Pine II, 1993). No cenário que se desenvolve desde então, a satisfação do cliente passa a ser peça fundamental no sucesso de qualquer empresa. Porém, se nesta corrida pelo cliente, a variedade de opções ganha importância fundamental, ela também transtorna o dia a dia da empresa.

No mercado da produção em massa, bastava acrescentar capacidade ao recurso gargalo para que uma quantidade maior de um determinado produto chegasse ao mercado.

Contudo, os desafios atuais para qualquer empresa que deseje se manter competitiva num mercado a cada dia mais globalizado, diferentemente do que ocorria no passado, colocam as

necessidades do cliente como um dos principais objetivos a serem alcançados. No cenário atual, busca-se oferecer aos clientes opções de escolha. Com esta política os recursos fabris são disputados por diversos produtos, tumultuando o chão de fábrica e dificultando o gerenciamento da produção. Neste sentido, os sistemas de gerenciamento da manufatura aparecem como peça fundamental, tanto na racionalização dos recursos disponíveis, o que melhora o desempenho produtivo, quanto no gerenciamento dos estoques e do atendimento às demandas, o que minimiza a entrega de produtos em atraso.

Dentre as atribuições do gerenciamento da manufatura, este trabalho visa particularmente o Planejamento e a Programação. Estas são atividades que consideram o melhor uso dos recursos produtivos a fim de satisfazer os objetivos da produção para um certo período, denominado horizonte de planejamento (Karimi et al. 2003). São atividades complexas para a grande maioria das empresas, abrindo espaço para o desenvolvimento de ferramentas que auxiliem na busca de soluções satisfatórias para os problemas relacionados ao planejamento e à programação da produção. Neste sentido, existem no mercado ferramentas destinadas a facilitar o trabalho do planejador, sendo que os pacotes de ERP (*Enterprise Resource Planning* ou Planejamento dos Recursos da Empresa) são os mais utilizados. Estes sistemas, apoiados por uma base de dados, têm como principais módulos a Contabilidade Financeira, as gerências de Material, Investimentos, Qualidade, Pessoal e Recursos Humanos, Manutenção, Previsão de Vendas, Vendas e Planejamento Operacional, e o Módulo de Manufatura. Este último é composto pelo Planejamento Mestre de Produção, Planejamento dos Requisitos de Material, Planejamento dos Requisitos de Capacidade e Acompanhamento do Chão de Fábrica.

O Módulo de Manufatura, ou MRP, é um dos focos deste trabalho. Este módulo estabelece quantidades e datas dos itens a serem manufaturados ou montados. Sua filosofia é a de produzir na data mais tarde possível, mas de forma que as demandas sejam atendidas nos prazos combinados. Contudo, existe limitação na maneira como são equacionadas as questões da produção. O MRP não considera os limites reais da capacidade instalada, gera ordens de fabricação para serem executadas no chão de fábrica tomando como base as datas de entrega dos pedidos, assumindo que a capacidade do sistema é suficiente para atender estes requisitos de produção e que haverá disponibilidade de materiais. Em problemas reais a suposição de capacidade infinita pode levar à sobrecarga de equipamentos e, na ocorrência de sobrecarga, o

planejador deverá decidir, baseando-se na sua experiência, quais pedidos serão atendidos no prazo, quais serão atrasados ou adiantados, quando possível, e quais deixarão de ser atendidos. A quantidade de parâmetros envolvidos torna impossível ao planejador, utilizando somente sua experiência, solucionar esta questão de forma adequada.

1.1.O Problema

A tarefa básica do planejador no chão da fábrica é atender aos pedidos de clientes, com datas e quantidades específicas. Na ocorrência de sobrecarga em algum recurso, a realocação de ordens é complexa e envolve muitos parâmetros, como exemplifica a Figura 1.1.

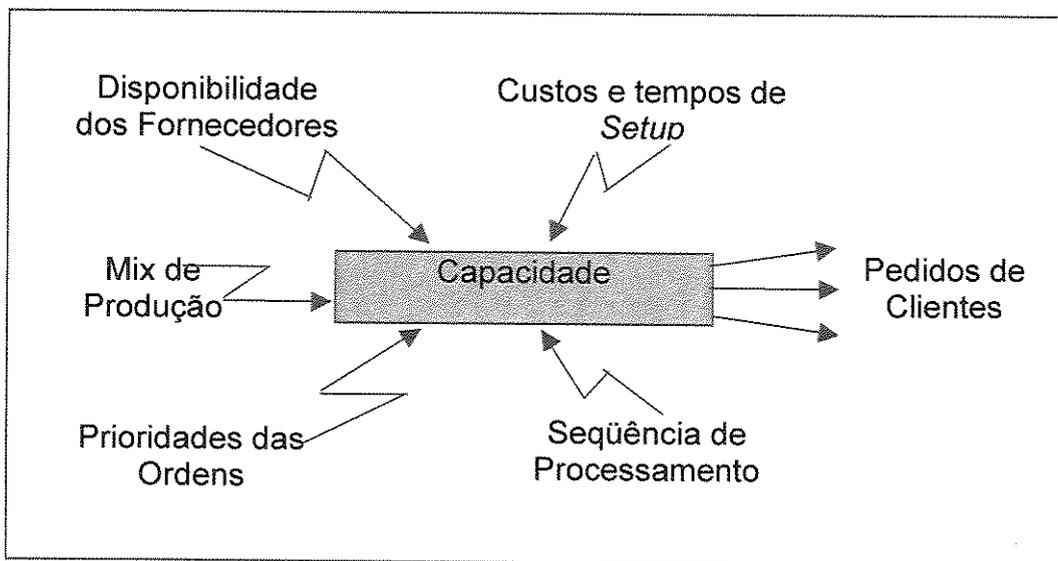


Figura 1.1 – Parâmetros a serem considerados na alocação de carga aos recursos

A disponibilidade de fornecedores o mix da produção destinada a um determinado recurso, os custos e tempos de *setup* para as ordens a serem executadas, prioridades de entrega e seqüência de processamento são alguns dos fatores a serem levados em consideração se houver necessidade de adiantar ou atrasar a produção de algum item. Levando-se em conta que deve-se ainda considerar os múltiplos estágios de produção de cada item, o compartilhamento dos recursos por vários itens e ainda os múltiplos períodos de planejamento, conclui-se que este é um

problema de difícil solução se o planejador não contar com alguma ferramenta que o auxilie nesta tarefa.

1.1.1. Objetivo Geral

Considerando-se que os pacotes de ERP são práticas industriais amplamente empregadas no planejamento da produção discreta, e portanto uma realidade na maioria das empresas com este perfil e, considerando-se além disso, que estes sistemas não levam em conta as restrições de capacidade de seus recursos quando fazem a alocação de carga por período, este trabalho propõe a adição de um módulo de capacitação como elemento complementar a um ERP existente no mercado. A finalidade da adição deste módulo ao pacote de ERP é dar subsídios que auxiliem o planejador no que se refere às tomadas de decisão de curto prazo.

Embora a proposta apresentada seja geral, o LOGIXTM, um dos *softwares* de ERP disponíveis atualmente no mercado, foi tomado como referência para este estudo. Este software foi desenvolvido de maneira modular e busca atender a todas as áreas funcionais da empresa. É apoiado por uma base de dados que garante acesso rápido às informações além da eliminação de redundâncias e inconsistências.

Para o módulo de Capacitação duas possibilidades foram consideradas:

Um software de Programação Linear desenvolvido no CenPRA que explora as características de Fluxo em Redes com Restrições Adicionais, presentes na modelagem do problema, e
Um software de Programação Linear, também desenvolvido no CenPRA, que trata o problema de Grafo.

A segunda possibilidade teve como inspiração uma abordagem sugerida por Zahorik et al. (1984). Segundo afirmação dos autores, respeitando-se algumas condições na modelagem do problema, é possível, através de simples operações nas linhas da matriz de incidência, transformar um problema de Fluxo em Redes com Restrições Adicionais em um Grafo. Reconhecendo as vantagens da resolução de um grafo sobre a resolução de um problema com restrições adicionais, a proposta aqui apresentada amplia as possibilidades nas condições de modelagem sugeridas por Zahorik et al. (1984).

Para validar a integração, foi feito um estudo de caso real, numa indústria de autopeças. A empresa, que serviu de piloto neste estudo, é fornecedora de autopeças para as maiores montadoras do país. Trabalha com o ERP LOGIX™ e, assim como qualquer empresa usuária destes pacotes, enfrenta dificuldades na alocação das tarefas aos recursos disponíveis.

Para contornar os problemas de seqüenciamento de lotes, a Empresa desenvolveu algumas tabelas com dados obtidos empiricamente. Estas tabelas foram consideradas na integração dos *softwares*, trazendo para o sistema a valiosa experiência do planejador. Desta forma, também as heurísticas praticadas no chão de fábrica foram incorporadas na modelagem do problema.

Portanto esta proposta reúne a experiência do planejador, a prática do ERP e a programação matemática.

1.2.Organização do trabalho

Com a finalidade de atender ao objetivo proposto – a adição de um módulo de capacitação de chão de fábrica a um ERP disponível no mercado, especificamente para uma empresa com produção discreta – foram identificados alguns pontos a serem estudados, para dar embasamento ao trabalho.

O primeiro ponto leva em consideração a produção discreta. O Capítulo 2 deste trabalho é dedicado à apresentação de alguns aspectos conceituais destes sistemas; é dada ênfase à abordagem da hierarquização da produção, utilizada em diversos trabalhos e adotada também pelos sistemas MRP. São descritos brevemente os Sistemas de Administração da Produção que trabalham com a filosofia de empurrar a produção, mais especificamente os sistemas MRP. É apresentada a evolução cronológica desde a concepção destes sistemas em 1966 até os dias de hoje com os ERP's, que integram todos os dados da empresa numa única base de dados. Finalmente, é lembrada a tendência atual das empresas vendedoras de ERP de incluírem em seus pacotes ferramentas que utilizam Pesquisa Operacional. Os sistemas APS, sigla em inglês para *Advanced Planning and Scheduling*, surgiram para sanar a lacuna existente no funcionamento dos ERP's, no que se refere à consideração dos limites de capacidade dos recursos da empresa.

Este capítulo apresenta também um breve resumo da teoria das restrições e princípios básicos que regem o OPT. Consideramos interessante a abordagem deste tema já que a essência desta tecnologia é o gerenciamento de recursos gargalo, ponto importante no estudo de caso apresentado no Capítulo 6 e discutido posteriormente.

Um segundo ponto estudado é o da modelagem do problema através da programação matemática. Este ponto foi considerado para estudo porque o módulo de capacitação, a ser disponibilizado, faz uso de algoritmo de Programação Matemática. Seu objetivo é atender às demandas, seqüenciando os lotes para fabricação. Para tanto leva em conta os limites da capacidade instalada e os custos de produção e estoque. Este módulo tem a visão temporal do problema e define necessidades de armazenagem interestágios, antecipando ou atrasando no tempo a produção para o atendimento a uma demanda preestabelecida e considerando a disponibilidade temporal de recursos e custos. O módulo de capacitação foi desenvolvido para atender a um sistema de produção multi produto, multi período, multi estágio, como um problema de fluxo em redes com restrições lineares adicionais. Como exemplificado na Figura 1.1, o modelo define um grafo para cada produto com um nó de origem associado à injeção de matéria prima e um nó destino associado à demanda. Os arcos são capacitados e representam matéria prima injetada por período, máquinas, demanda atendida por período, estoques inter períodos, atrasos e demanda não atendida. O grafo terá tantos estágios quantos forem os processos de produção considerados na modelagem e tantos ramos horizontais quantos forem os períodos estudados. O problema terá tantos grafos quantos forem os produtos estudados.

A Figura 1.2 refere-se a um único produto, com dois estágios produtivos. O horizonte de tempo estudado é de dois períodos. As máquinas M1, M2 e M3 referem-se ao primeiro estágio de processamento e podem apresentar diferentes taxas de produção. As máquinas M4, M5 e M6 referem-se ao segundo estágio no processamento deste produto, sendo que no segundo período M6 não está disponível.

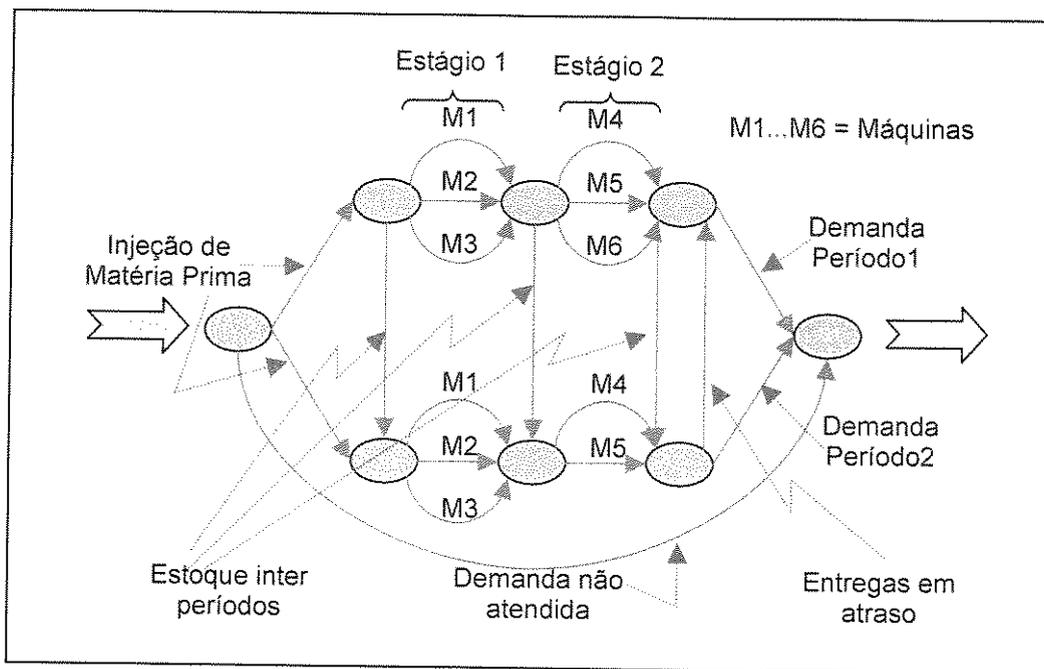


Figura 1.2 – Exemplo de Grafo para um produto, considerando dois períodos

O Capítulo 3 deste trabalho trata de métodos de otimização, com enfoque principal na teoria de Grafos, para a solução do problema do seqüenciamento de lotes. É considerada a modelagem de um sistema com um único item. Este estudo é a seguir estendido para sistemas multi itens. Finalmente é dada ênfase a um trabalho em particular: Zahorik et al. (1984) desenvolveram uma metodologia para transformar um problema de fluxo em rede com restrições adicionais, em grafo. Este trabalho foi estudado detalhadamente e estendido para situações mais gerais.

O Capítulo 4 trata especificamente da integração das práticas industriais com os métodos de otimização, ou seja, da adição do módulo de Capacitação ao ERP. É demonstrado neste capítulo o inconveniente da abordagem dos ERP's quando não consideram as capacidades individuais dos recursos disponíveis para produção. É sugerida a adição de um módulo de capacitação do chão de fábrica ao ERP sendo apresentadas duas possíveis formas para esta integração. A estratégia usada no estudo da viabilização da integração entre os dois *softwares* é também apresentada. Os testes foram efetuados com cada um dos dois *softwares* executados de

forma estanque, ou seja, os dados foram extraídos de um sistema e inseridos no outro. A base de dados do ERP não chegou a ser adaptada ao novo módulo.

O Capítulo 5 tem por finalidade validar o modelo. A validação é feita através de um estudo de caso real. Com base na realidade presente na empresa, foram tomadas medidas visando viabilizar a implementação do modelo. Devido à grande quantidade de dados existentes tanto na modelagem quanto na análise dos resultados, a estratégia adotada foi a de focar o estudo num centro de trabalho considerado gargalo pela empresa. Além disso, foram aproveitadas para o módulo de capacitação, algumas heurísticas já usadas na empresa. Estas heurísticas são explicadas no capítulo. A seguir são apresentados alguns resultados das simulações feitas a partir da base de dados cedida pela empresa.

Finalmente, no Capítulo 6 são apresentadas conclusões sobre o estudo e sugestões de trabalhos futuros.

Capítulo 2

Sistema de Produção Discreta: Aspectos Conceituais

Um sistema de manufatura é composto por itens a serem processados em centros de produção, com uma ou mais unidades processadoras. O item flui pelo sistema produtivo sofrendo transformações, segundo uma seqüência tecnológica pré determinada, até se tornar produto final. A Figura 2.1(a) mostra um sistema com três centros produtivos e um roteiro de produção. A capacidade máxima de produção deste sistema é igual a menor capacidade entre as capacidades máximas de todos os estágios de produção. Este seria um sistema de fácil gestão caso considerasse um único produto, com demanda conhecida e determinística, além de disponibilidade infinita de matéria prima.

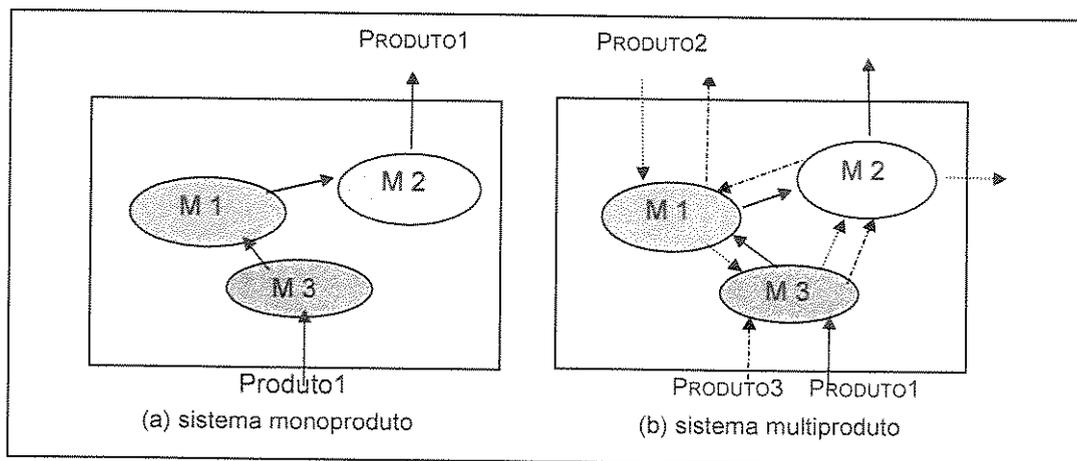


Figura 2.1 - Sistema de Produção Discreta (extraída de Carvalho et al. –1998)

A extensão para o processamento de vários produtos faz com que um mesmo recurso seja requisitado por mais de um produto como mostra a Figura 2.1(b). Agora a determinação da

capacidade de produção vai depender de vários fatores entre eles: o mix (proporcionalidade) entre produtos, seqüência de produção, taxa de compartilhamento de recursos e o perfil temporal da demanda de cada produto. Desta forma o problema de planejamento evolui para a gestão temporal de recursos compartilhados (Carvalho et al., 1999). Nestas circunstâncias, o grande desafio que se apresenta é planejar adequadamente a produção de forma competitiva, num mercado fortemente orientado à satisfação do cliente. A busca da vantagem competitiva, perante o cliente depende de uma série de exigências que devem ser consideradas de forma ponderada: custo/preço, qualidade, flexibilidade e desempenho nas entregas.

Segundo Graves (1991), o planejamento da produção tem por finalidade a alocação dos recursos disponíveis de produção, ao longo do tempo, para um conjunto pré estabelecido de objetivos. A alocação de recursos é influenciada por uma série de fatores como: capacidade das máquinas, regras de precedência, requisitos e disponibilidade de recursos, níveis de produção, prioridades, datas e custos. Os critérios de desempenho ou a determinação de prioridades envolvem compromissos conflitantes entre níveis de produção, freqüências de variações da produção e grau de atendimento às datas de entrega. Assim sendo, torna-se essencial o estabelecimento de um plano de produção que leve à finalização do produto, estabelecendo as necessidades de recursos (tanto de matéria prima quanto de fabricação) e determinando o tempo de início e fim de cada operação que atenda aos objetivos gerais do empreendimento.

Para ilustrar o problema da alocação, considere o exemplo abaixo. A Tabela 2.1 fornece os dados de rota e os tempos de processamento para três produtos a serem processados por três máquinas. Neste exemplo, a primeira operação do Produto 1 ocorre na Máquina M3 e requer 1 unidade de tempo de processamento. A segunda operação deste produto acontece na Máquina M1 e demanda 7 unidades de tempo. Finalmente, para a terceira operação são necessárias 6 unidades de tempo na Máquina M2. As rotas estão mostradas na Figura 2.1(b).

Tabela 2.1-Dados de Produção

Operação	Prod1	Prod2	Prod3
1	1/M3	6/M1	3/M3
2	7/M1	5/M3	6/M2
3	6/M2	3/M2	10/M1

A Figura 2.2 apresenta o diagrama de Gantt para uma possível alocação da produção. Sob a suposição de que todos os itens estão disponíveis no início do processo e que as operações não

possam ser repartidas, a alocação proposta resulta no mínimo tempo para processamento de todos os produtos, preservando-se as seqüências de operação.

Levando-se em conta que numa situação real usualmente existem mais que três produtos distintos disputando recursos e que outros fatores como datas de entrega e disponibilidade temporal diferenciada, devem ser considerados, conclui-se que este é um problema complexo e de difícil solução, demandando por ferramentas de apoio que auxiliem o planejador na tomada de decisões.

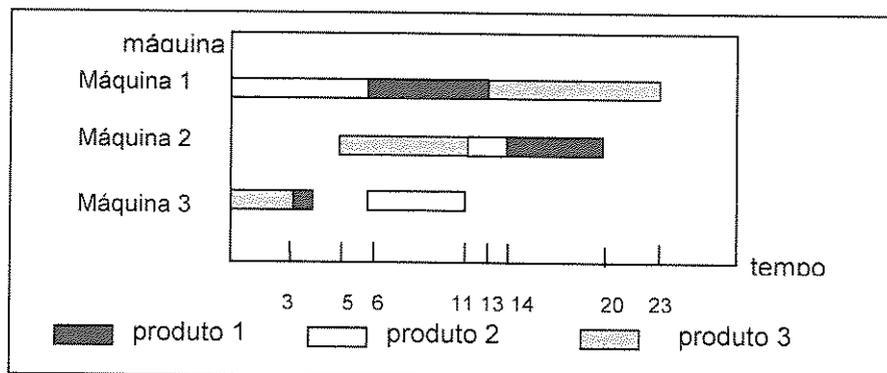


Figura 2.2 - Diagrama de Gantt

Existem diferentes ferramentas para a solução de problemas de planejamento e programação da produção. Algumas utilizam a programação matemática, como por exemplo, técnicas de programação linear e inteira, *branch and bound*, programação dinâmica e Teoria de Grafos. Outras utilizam as práticas industriais com técnicas de empurrar ou puxar a produção, ou ainda um misto (puxa-empurra) focado nos gargalos (Carvalho et al., 1998). A escolha de qual a melhor ferramenta depende de situações específicas de cada caso, sendo que fatores como a quantidade de variáveis, definida pelo número de produtos, estágios de produção recursos e períodos de planejamento e número de restrições, definida por características específicas de cada caso, são determinantes nesta decisão.

2.1. A abordagem Hierárquica para o Problema

Devido à grande dimensão dos problemas da produção, vários autores usam hierarquia como possível abordagem de solução. Esta abordagem permite tomadas de decisão em diferentes horizontes de tempo, e com diferentes níveis de precisão de dados. Para tanto, agrupam-se itens

com características afins. Estes grupos de itens são considerados para seqüenciamento nos níveis hierárquicos superiores, onde não é necessário o tratamento detalhado de dados da produção. Os grupos são desmembrados na medida em que a estrutura hierárquica é percorrida, quando passa a ser necessária a consideração detalhada dos dados. Dentre os autores que se valem da hierarquização como possível abordagem para a solução dos problemas da produção podemos citar Lasserre e Mercé (1990), Bitran et al. (1981a, 1981b), Dautère-Pérès e Lasserre (2002), Caravilla e Souza (1995), Özdamar et al. (1996) e Karimi et al. (2003).

Embora alguns autores considerem para hierarquização estruturas de dois níveis (Lasserre e Mercé-1990), muitos consideram estruturas de três níveis - estratégico, tático e operacional - cada um com características particulares. Dautère-Pérès e Lasserre (2002), Özdamar et al. (1996), Bitran et al. (1981a) e Karimi et al. (2003) são alguns desses autores. De acordo com Dautère-Pérès e Lasserre (2002), quanto mais alta a hierarquia, mais agregados são os modelos, com maior horizonte de planejamento e com decisões mais estratégicas. As decisões dos níveis mais altos tornam-se restrições ou objetivos a serem satisfeitos nos níveis inferiores.

A Figura 2.3, extraída de Carvalho et al. (1998), ilustra a integração entre os três níveis hierárquicos. O Planejamento estratégico passa para o Tático metas e objetivos a serem cumpridos. O planejamento tático decompõe estas metas, levando em consideração o tempo, os recursos e os produtos (agregados em famílias) e verificando a possibilidade de atendimento. Caso estas metas não possam ser atendidas, novos limites serão enviados ao planejamento Estratégico, para que novas metas sejam geradas. O mesmo procedimento ocorre entre os níveis Tático e Operacional. O planejamento operacional decompõe as metas enviadas pelo planejamento Tático em tarefas a serem cumpridas no curto prazo. No caso da impossibilidade de cumprimento, novos limites são enviados ao planejamento Tático para que novas metas sejam geradas.

Özdamar et al. (1996) e Bitran et al. (1981a e b), ressaltam que o primeiro nível na escala hierárquica envolve decisões agregadas de tipo de produto, como mix de produção, por período, decisões de inventário e de níveis de força de trabalho. Este nível agrupa em tipo de produto, famílias de produtos com custos de produção e sazonalidade de demanda similares. Caravilla e Souza (1995) e Karimi et al. (2003), Carvalho et al. (1998) denominam este nível como o das decisões estratégicas. Lembram que neste nível são adquiridos e desenvolvidos os recursos de

produção, são estabelecidas políticas de atendimento ao cliente e gerados planos agregados de produção baseados em previsões de demanda de longo prazo.

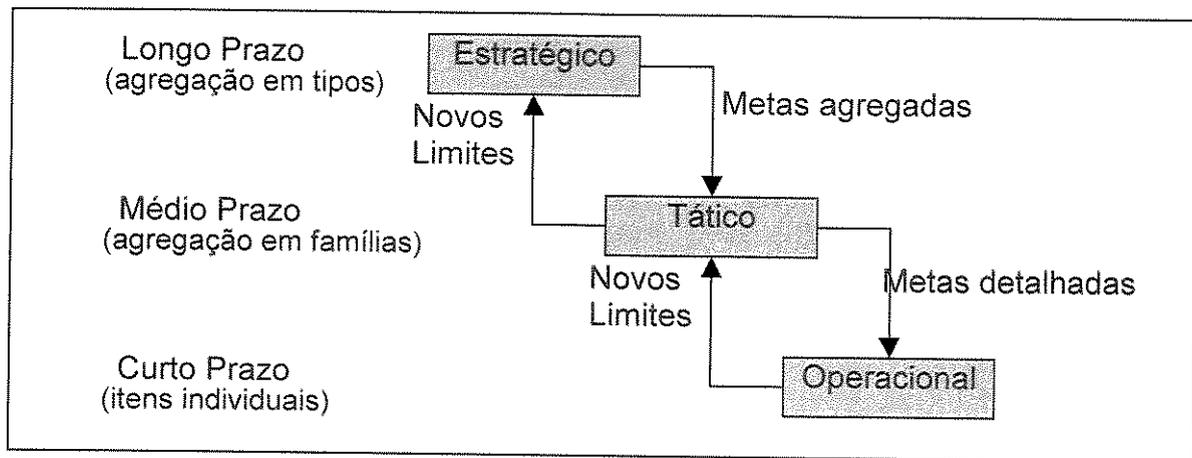


Figura 2.3 – Hierarquia para Planejamento (extraída de Carvalho et al. – 1998)

Carvalho et al. (1998) classificam o próximo nível como o das decisões táticas. Sua finalidade é desagregar as metas estabelecidas pelo planejamento estratégico em termos de tempo, recursos e produtos, estabelecendo políticas detalhadas de produção e utilização dos recursos. Neste nível da hierarquia são planejadas as famílias de produtos, que consistem de grupos de itens finais partilhando custos de *setup*. Isto significa que quando um equipamento é preparado para produzir um item de uma família, todos os itens da mesma família podem ser também produzidos com menores custos de *setup*. Caravilla e Souza (1995), lembram que este nível considera decisões de médio prazo como um planejamento grosseiro de níveis de horas extras e subcontratações. Karimi et al. (2003) lembram ainda que são consideradas as decisões sobre planejamento de materiais e determinação de quantidades de materiais e tamanhos de lotes para o período de planejamento considerado.

No nível operacional são consideradas as decisões de curto prazo. As famílias de produtos são desagregadas em itens finais, onde um maior nível de detalhes, tais como demanda e dados do processo, são considerados. Karimi et al. (2003) e Carvalho et al. (1996) ressaltam que as decisões deste nível usualmente envolvem decisões de seqüenciamento ou operações diárias e uma alocação clara das tarefas aos recursos disponíveis, com especificações de como e quando devem ser realizadas.

2.1.2 Sistemas Hierárquicos de Administração da Produção

Um sistema de administração da produção amplamente utilizado pelas empresas e que pode ser classificado como uma ferramenta com enfoque hierárquico é o ERP. Este sistema foi concebido para atender ao aumento da complexidade nos processos de gestão da produção, tornando-se viável com a evolução dos equipamentos de informática. É uma ferramentas que incorpora, em maior ou menor grau, recursos que visam a automatização das atividades de programação da produção e tornou-se peça fundamental para qualquer empresa que deseje manter-se competitiva.

Os ERP's, sigla em inglês para Planejamento das Necessidades da Empresa, são Sistemas que integram toda a empresa numa única Base de Dados e pode-se dizer que são uma evolução de sistemas mais simples que visavam apenas a área da manufatura, os MRP's.

O Módulo de Manufatura dos ERP's é o responsável pelo planejamento e gerenciamento da produção e procura produzir o mais tarde possível, sem que isto implique em violações das datas de entrega. Este, em geral, é um ponto crucial para as empresas, já que entregas no prazo resultam em satisfação de cliente e conseqüente ganho de competitividade (Haddad et al., 2004; Haddad e Carvalho, 2002).

2.1.2.1 O MRP

De acordo com Plossl (1995), J. Orlicky, Oliver Wight e G. W. Plossl reuniram-se pela primeira vez numa conferência da APICS (*American Production and Inventory Control*), em 1966. Nesta ocasião começaram a trocar experiências sobre o Planejamento e controle da produção e no começo dos anos 70 passaram a dedicar-se à elaboração e difusão de um novo conceito, o MRP ou *Material Requirement Planning*. Laurindo e Mesquita (2000), destacam que até a década de 60, a gerência de estoques era baseada quase que exclusivamente em métodos estatísticos de reposição.

O enfoque destes sistemas é o de determinar as necessidades de materiais em função das estimativas de demanda, produzindo o mais tarde possível, sem que isto implique em violações das datas de entrega.

Além da data mais tarde, os sistemas procuram identificar a quantidade correta a ser produzida de cada item. Segundo Benton e Shin (1998), o principal objetivo de um sistema MRP é gerar informações detalhadas de inventário, para que sejam determinadas as quantidades corretas a serem fabricadas, nos tempos corretos. Isto é fundamental para a redução de estoques na empresa e conseqüente garantia de um melhor giro de inventário e de organização no chão de fábrica.

Em linhas gerais, um Sistema de MRP visa estabelecer o quê, quando e quanto produzir, reduzindo desta forma os custos de estoque, melhorando a eficiência da programação e permitindo rápidas reações às mudanças de mercado (Monks J. G. 1987).

O MRP dos anos 70 apresenta como elementos básicos o Programa Mestre de Produção, chamado de MPS (*Master Production Scheduling*), a lista de materiais, as quantidades em estoque e os tempos de reposição dos itens. Özdamar et al. (1996) classificam os MRP's como sistemas hierárquicos, com basicamente dois níveis: o do MPS, que trata dos itens finais e o da Árvore de Produto ou *Bill of Materials*, que faz a desagregação dos itens finais em componentes. A Figura 2.4 mostra o Conjunto Básico do MRP.

Baseando-se em pedidos de clientes ou em previsões de vendas, o MPS define as quantidades de cada produto final a serem produzidas em cada período no horizonte de planejamento. Estes produtos são denominados produtos com demanda independente, já que sua demanda depende do mercado e é definida externamente ao sistema produtivo. Por outro lado, a demanda de componentes e matéria-prima está ligada à programação da produção e é chamada de demanda dependente. Esta demanda, por ser previsível, passa a ser calculada pelo MRP e não mais estimada através de métodos estatísticos.

Com o Programa Mestre definido, calculam-se as necessidades de materiais. Com base na estrutura dos produtos, nas quantidades já existentes em estoques e nos tempos necessários para

produção e compras, determinam-se as quantidades e os instantes em que cada item deve ser comprado ou produzido.

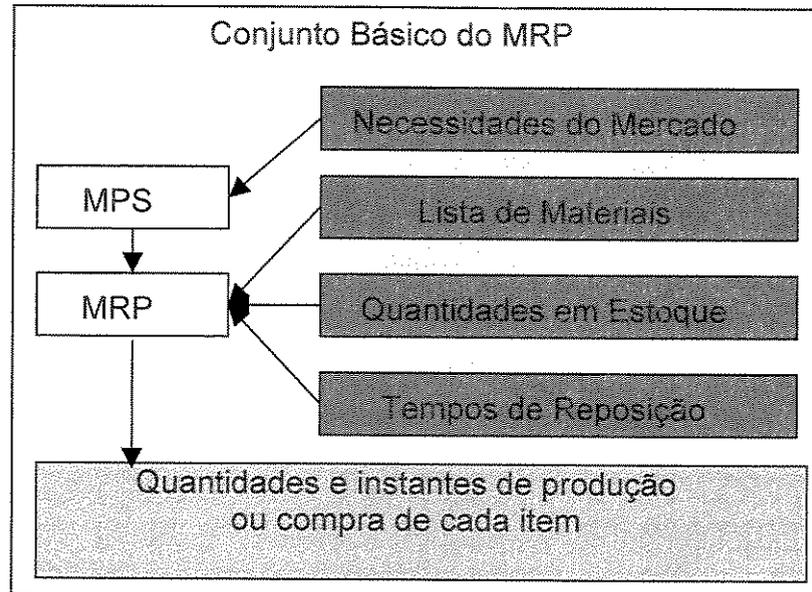


Figura 2.4 - Conjunto Básico do MRP

O surgimento dos sistemas MRP foi fundamental no auxílio à redução de inventários e *lead times* de processo e expedição. Esta redução acontece pela melhoria de coordenação entre as diversas atividades, melhorando a eficiência da fábrica. Contudo, esta primeira versão do MRP não leva em conta restrições de capacidade produtiva. A consideração destas restrições implica na necessidade de uma modelagem mais detalhada do processo produtivo. Segundo Laurindo e Mesquita (2000), esta necessidade introduziu o conceito de centros de produção, responsáveis pela execução de determinadas etapas do processo produtivo. De acordo com este conceito, cada centro possui uma capacidade de produção finita, que é definida em função da disponibilidade de máquinas, operários e/ou ferramentas.

Desta forma, o conjunto básico do MRP foi acrescido de um roteiro de produção (seqüências e tempos das diferentes tarefas necessárias à elaboração de um produto) e de cadastros dos centros de produção, com as respectivas capacidades.

A disponibilidade de capacidade para o programa de produção proposto é verificada em duas etapas diferentes. Na primeira delas, o *Rough Cut Capacity Planning*, ou RCCP, verifica, a

partir de dados do MPS, a viabilidade do programa proposto. A segunda etapa acontece após a execução do MRP. Nela, o *Capacity Requirement Planning*, ou CRP verifica a carga de trabalho proposta para cada um dos centros de trabalho e a apresenta ao planejador, possibilitando que as providências adequadas sejam tomadas, no caso de sobrecarga ou de algum outro problema. A Figura 2.5 ilustra esta evolução do sistema.

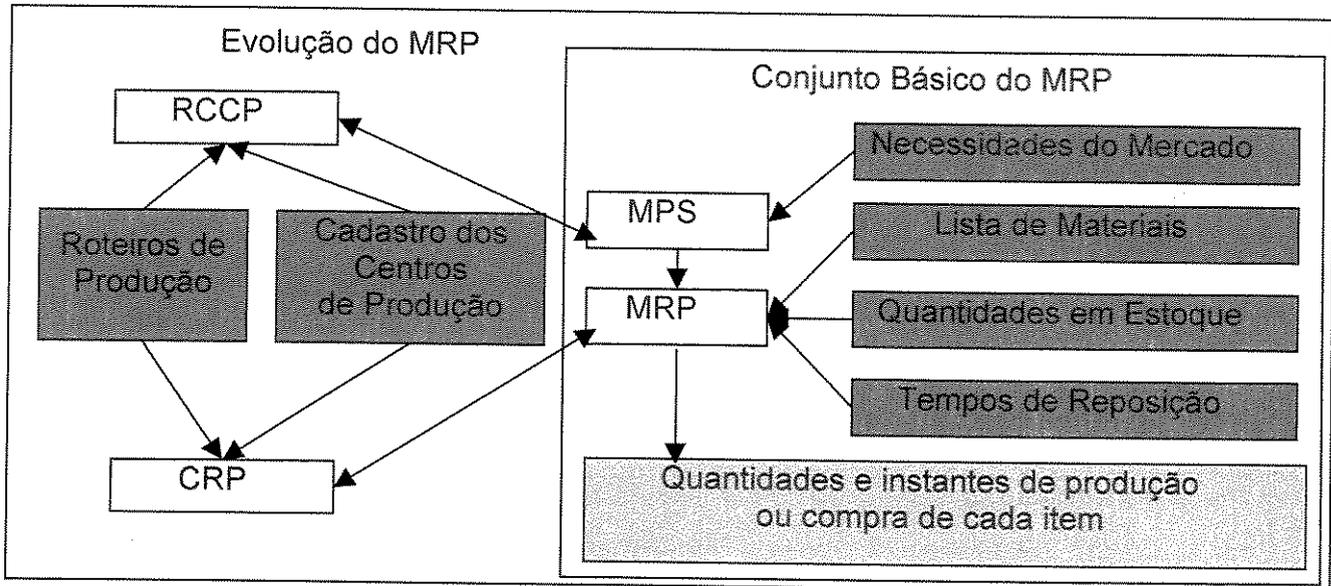


Figura 2.5 - Evolução do MRP

2.1.2.2. O MRPII

Segundo Plossl (1995), em 1981 Oliver Wight publicou o livro "*Manufacturing Resource Planning, MRPII*", onde é apresentada a nova geração dos MRP's. Neste novo sistema, diferentemente do MRP, são considerados os recursos globais da produção. Além do RCCP e do CRP são considerados também recursos humanos e orçamentários. Foram acrescentados os módulos de Controle de Chão da Fábrica (*Shop Floor Control* ou SFC) e Compras logo abaixo do módulo de MRP e, *Sales and Operations Planning* – S&OP - antes do módulo MPS. A Figura 2.6, extraída e adaptada de Laurindo e Mesquita, apresenta uma configuração de MRPII. Por ser mais abrangente que a geração anterior, seu nome mudou para Planejamento dos Recursos da Manufatura, ao invés de Planejamento das Necessidades de Materiais, como foi denominado seu antecessor.

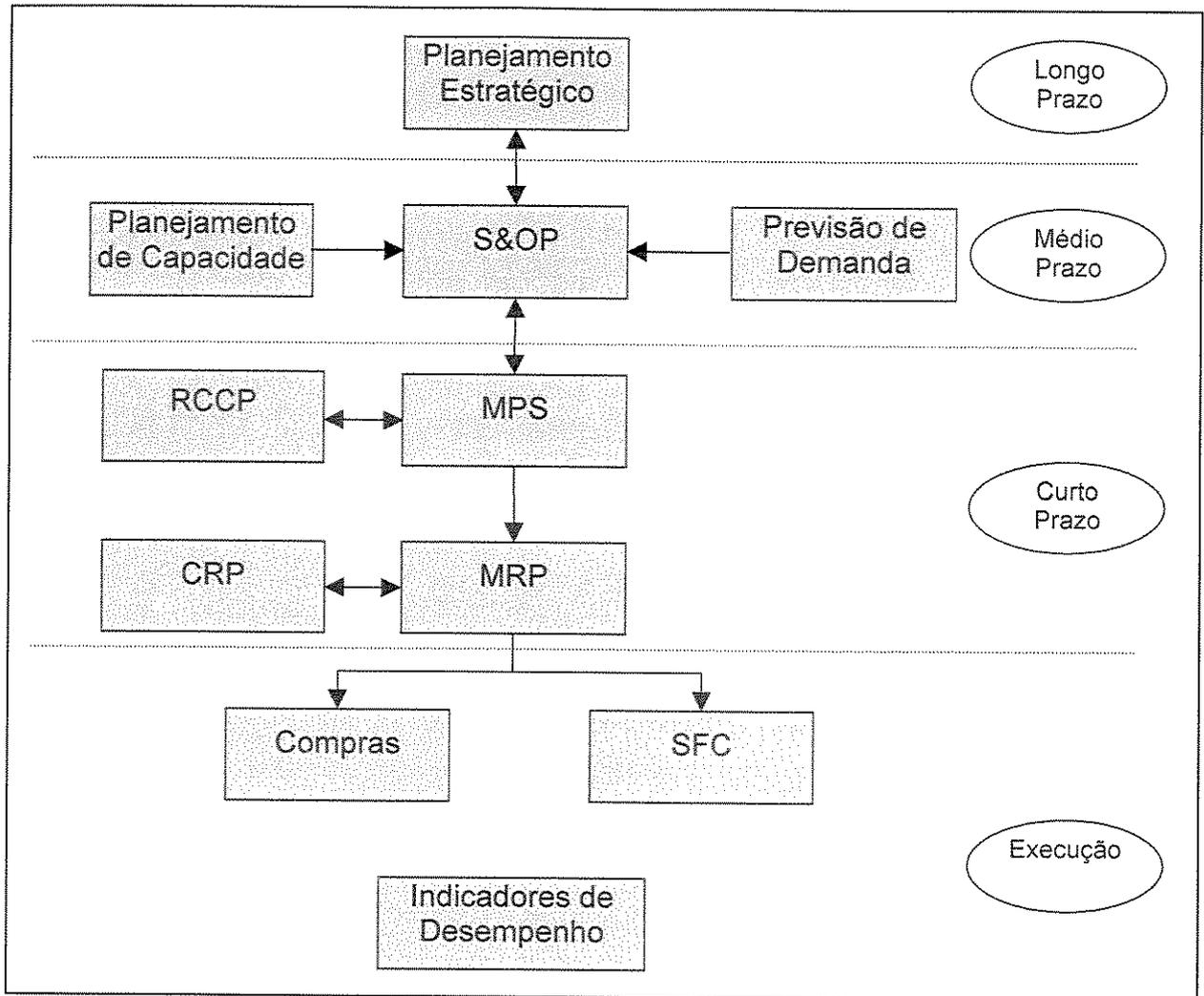


Figura 2.6 - Modelo de MRPII (adaptado de Laurindo e Mesquita, 2000)

Segundo o dicionário da APICS (1992), o MRPII é definido como “Um método para planejar efetivamente todos os recursos da Manufatura. Transforma o Plano Operacional em unidades, o Plano Financeiro em dólares e responde, por simulação, O Que e Quando produzir. É composto de várias funções interligadas entre si: Planejamento do Negócio, Planejamento Operacional, Planejamento Mestre, Planejamento de Materiais, Planejamento de Capacidade e execução do sistema para capacidade e prioridade. As saídas deste sistema podem ser integradas a relatórios financeiros, tais como Planejamento do Negócio, Relatórios de Compras, Expedição, Financeiro, Inventário, etc.”

Apesar de trazerem organização para a empresa e interligarem funções que antes eram tratadas de forma dispersa e independente, os MRPII têm um grande inconveniente. Eles assumem que as capacidades dos recursos são infinitas. Assim, apesar de possuírem dois módulos para auxiliarem o planejador a ajustar a capacidade com as necessidades produtivas, estes sistemas apresentam sérias limitações neste sentido. Isto ocorre porque os módulos de capacidade não têm a visibilidade do problema ao longo do tempo. Eles apenas indicam se há sobrecarga em algum dos recursos e não sugerem alternativas para resolver o problema. Caberá ao planejador encontrar a solução, manualmente, antecipando ou atrasando ordens ou ainda contratando horas extras, sendo que a avaliação do impacto de qualquer ação do planejador no sentido de contornar sobrecargas, problemas de expedição, quebra de máquina ou falta de material, implica no recálculo de todo MRP (Malik, 2004). Estes sistemas assumem que os *lead times* são fixos e dados de entrada. Não possuem um mecanismo para ajustar automaticamente as datas planejadas com base nas limitações de capacidade do chão de fábrica.

Uma característica dos MRP's é que estes sistemas desacoplam os pedidos de clientes das ordens de fabricação, quebrando os pedidos e agregando as partes em comum tanto quanto possível numa única O.F.. Usam este procedimento para reduzir a papelada que transita pela fábrica, além de indicar a possibilidade de se executar um lote econômico. Porém, se por um lado este procedimento otimiza a tramitação de papeis e reduz os tempos de *setup*, por outro inibe a visibilidade do Pedido do Cliente, tornando difícil seu acompanhamento já que sua integridade foi perdida. Este tipo de abordagem adequa-se bem a empresas com árvores de produto profundas e muitos componentes em comum. No caso de árvores achatadas e poucos componentes em comum, esta prática mostra-se inconveniente (Malik 2004).

Uma vez geradas as ordens de fabricação, são iniciados procedimentos tais como geração de pedidos de compra, estabelecimento de níveis de inventário e processamento e montagem de componentes, tendo como data base sempre a data mais tarde indicada pelo sistema, tudo sem levar em conta as restrições de capacidade.

2.1.2.3. O ERP

Os ERP's – *Enterprise Resource Planning*, ou Planejamento dos Recursos da Empresa – surgiram no início da década de 90 como uma solução integrada do *software* de manufatura (MRP II), com os de outras áreas da empresa. Esta nova geração abrange, além da Produção, as áreas Contábil, Financeira, Comercial, Recursos Humanos, Engenharia, Gerenciamento de Projetos, entre outras. Possuem uma arquitetura que facilita o fluxo de todas as informações na empresa. Utilizam-se de uma única base de dados e são suportados por um único ambiente de desenvolvimento (Watson e Schneider, 1999). Um ERP pode ser visto como uma extensão de um MRP II, já que é uma solução estratégica do negócio que integra todas as suas funções, incluindo manufatura, finanças e distribuição. A Figura 2.7, extraída e adaptada de Watson e Schneider (1999), ilustra a evolução do Sistema.

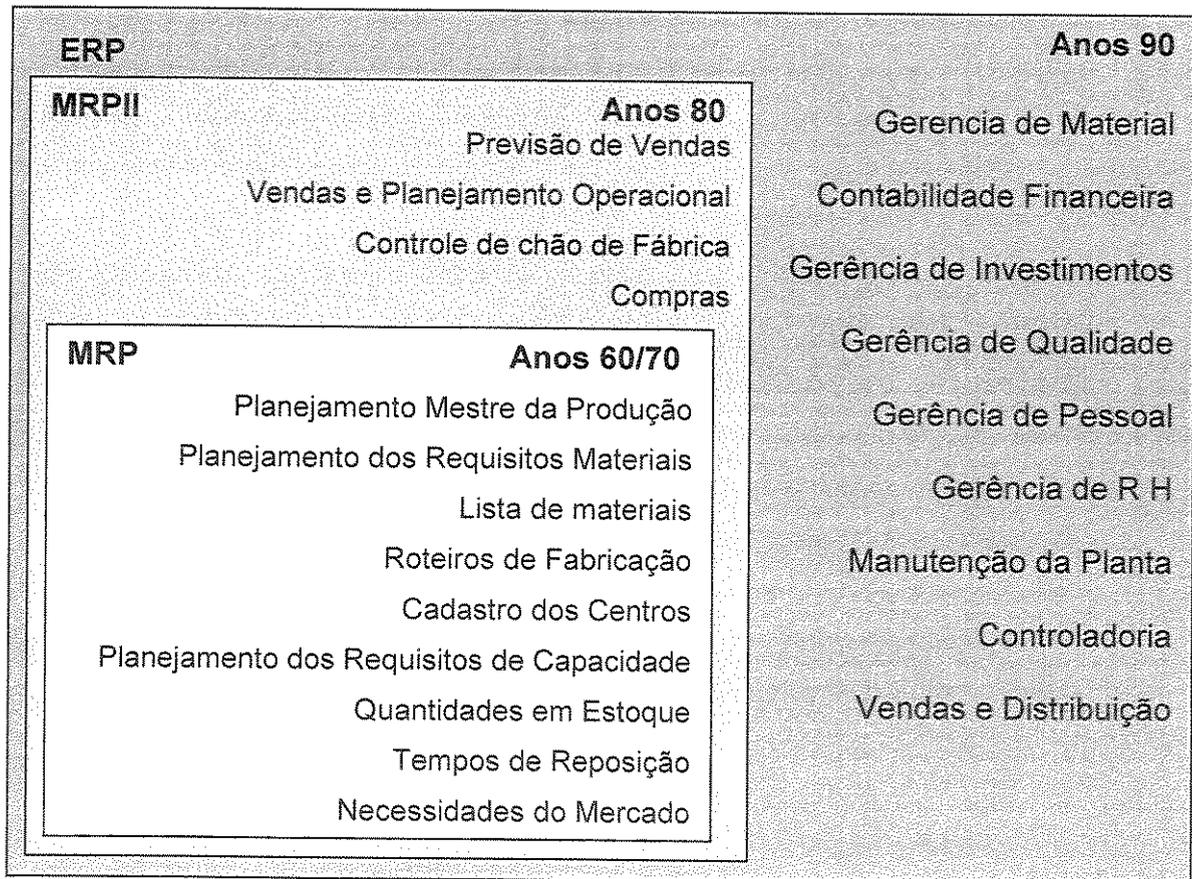


Figura 2.7 - Evolução do Sistema ERP (adaptada de Watson e Schneider, 1999)

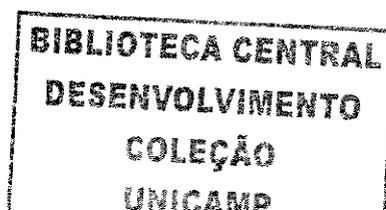
Os ERP's são pacotes comerciais que, por agruparem todas as informações da empresa numa única base de dados, ajudam a eliminar redundâncias e inconsistências (Mendes e Escrivão Filho, 2002). Disponibilizam as informações em tempo real, fazendo com que diversas áreas da empresa sejam constantemente atualizadas, facilitando o gerenciamento do negócio. Além disso padronizam as informações e conceitos, facilitando uma linguagem única dentro da empresa, mesmo quando esta possui unidades geograficamente dispersas. Apresentam maior controle sobre as operações da empresa, quando comparados a sistemas não integrados. Eliminam também as interfaces entre os vários sistemas, melhorando a qualidade da informação. São de porte significativamente maior que de seus antecessores, o MRP e o MRPII.

Alguns dos ERP's existentes atualmente no mercado brasileiro são o MySAP da alemã SAP, o ERP Baan da holandesa Baan, o ERP Oracle da Americana Oracle, o ERP DATASUL da brasileira DATASUL e o LOGIXTM da Brasileira LOGOCENTER.

Quando bem implementado, um sistema ERP pode trazer benefícios significativos para a empresa. Sua implementação tem permitido atividades de reengenharia em muitas corporações, dando a oportunidade para mudar antigos sistemas, processos de trabalho e culturas contra-produtivas. Além disso os rumos do negócio podem ser radicalmente redefinidos.

Como lembram Laurindo e Mesquita (2000), a integração via ERP aparece com a proposta de se evitar os transtornos de uma integração freqüentemente problemática e custosa. Traz a perspectiva de serem resolvidos de uma só vez todos os problemas associados à massa de dados acumulados ao longo do tempo. Com relação à manufatura, permite uma melhor gestão de pedidos e uma possibilidade maior de integração com fornecedores. Outra vantagem embutida é que uma maior integração das diferentes funções do negócio aumentam o desempenho de toda a organização. Além disso, a aquisição destes sistemas traz também a expectativa de que um sistema pronto, ainda que necessite customizações, seja mais barato que um desenvolvido em casa, com o mesmo grau de eficiência e integração.

Mendes e Escrivão Filho (2002), ressaltam que a integração da empresa, facilitada pelo uso do ERP, decorre de fatores como: uso de um único sistema de informação que atenda a todas as suas áreas; armazenamento de todos os dados num banco de dados único e centralizado;



orientação a processos. Pelo fato dos processos implementados no sistema não se restringirem a áreas ou departamentos específicos, quebram barreiras impostas pelas estruturas departamentais.

Laurindo e Mesquita (2000) lembram ainda que para empresas multinacionais, com filiais em diferentes países e para empresas com viés centralizador, as vantagens deste sistema podem ser ainda mais significativas pois, além dos ganhos operacionais existe a perspectiva de ganhos organizacionais, pela homogeneização das práticas operacionais e de formas de gerenciamento.

De acordo com a Watson e Schneider, (1999), várias foram as razões que fizeram com que o mercado comercial dos ERP's crescesse rapidamente nos anos 90. Podem-se destacar, entre outras:

O ambiente cliente/servidor tornou-se uma plataforma popular para muitas organizações, e o ERP é projetado para lidar com esta situação.

Os sistemas são vendidos como soluções estratégicas, e não como softwares computacionais.

Contudo, a implantação de um sistema deste porte deve ser sempre muito bem analisada. É necessário levar em conta que, por mais que permita customizações, a empresa sempre terá que se adequar ao software. Em muitos casos isto pode ser catastrófico, já que a adequação da empresa a parâmetros gerais pode significar a perda de fatores diferenciadores de competitividade.

Laurindo e Mesquita (2000) lembram que é necessário planejar a implantação de um ERP cuidadosamente, envolvendo de forma integrada e concomitante aspectos estratégicos, organizacionais, culturais e técnicos da empresa.

Mudanças radicais devem ser conduzidas com cuidado. As pessoas que trabalham na empresa devem entender as mudanças e serem incentivadas no sentido de apoiá-las, caso contrário qualquer implantação corre o risco de vir a falhar.

Os custos de implantação devem ser também cuidadosamente analisados, já que não se restringem à compra do software. Devem ser considerados ainda custos de consultoria e treinamento, que costumam ser significativamente maiores que o preço do software em si.

Alguns autores como Singh (2004) e Laurindo e Mesquita (2000), apontam a evolução dos ERP's na direção da gestão da Cadeia de Suprimentos e Operação de Comércio Eletrônico. Padilha e Marins (2005) apresentam as cinco principais tendências de mercado para os ERP's :

- Foco nas Empresas de Pequeno e Médio Porte – empresas com faturamento anual na faixa entre US\$10 milhões e US\$300 milhões;
- Incorporação de módulos operacionalizados via Internet;
- Business Intelligence –aplicações, plataformas, ferramentas e tecnologias de apoio ao processo de exploração de dados de negócio e análisw de suas correlações e tendências;
- Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos;
- Gerenciamento das Relações com os Clientes.

2.1.2.4. O APS

Os problemas de dimensionamento e de seqüenciamento de lotes tão comuns na prática industrial, vêm sendo estudados há muitos anos. Em geral apresentam um elevado grau de complexidade, dificultando as tomadas de decisão do planejador, que pode se basear em diversos objetivos. Karimi et al. (2003) lembram que a minimização dos custos de produção e *setup* está diretamente relacionada com as decisões sobre tamanho dos lotes a serem manufaturados. Tomar a decisão correta sobre o tamanho dos lotes afeta diretamente o desempenho do sistema e sua produtividade, variável fundamental para que qualquer empresa continue a competir no mercado. Como ressaltam Zahorik et al. (1984), não é necessário que a estrutura do produto seja muito complexa para que o número de alternativas de soluções seja grande e o problema de encontrar a abordagem de menor custo seja uma tarefa complicada. Na verdade muitos elementos contribuem para esta situação. Os itens passam por vários estágios de produção desde a matéria prima até tornarem-se produtos finais e em cada um dos estágios existem decisões a serem tomadas. Além dos tamanhos de lote, as datas de início e quantidades a serem estocadas, os tempos e custos de *setup*, as rotas alternativas de produção, os recursos gargalo, os *setups* dependentes da seqüência, os custos de estoque e uma infinidade de outras características trazem particularidade a cada situação estudada.

Os APS's, sigla de *Advanced Planning and Scheduling*, são ferramentas de gerenciamento de manufatura e têm como finalidade dar subsídios ao planejador na tarefa de decidir qual a

alternativa a ser seguida dentre as muitas que se apresentam como possíveis. A tecnologia APS abrange desde *Finite Capacity Scheduling* ou FCS até o planejamento e coordenação de Cadeias de Suprimento (VISOPT *Intelligent Solutions*, 2003).

Shobrys (2004a) defende que alguns conceitos incorporados aos APS's são anteriores à existência dos computadores, como por exemplo os Gráficos de Gantt. O uso de modelos matemáticos na resolução de problemas de planejamento data dos anos 40, quando Estados Unidos e União Soviética aplicavam manualmente técnicas de Programação Linear na resolução de problemas de logística, relacionados a esforços de guerra.

Esta tecnologia, quando aplicada à manufatura, a torna apta a responder prontamente às necessidades do cliente. Segundo Gilman (2003), são três as razões para que isso ocorra :

Para se oferecer um compromisso de expedição, é necessário saber quanto da capacidade já está comprometida;

Se ocorre algum problema ou mudança em alguma ordem, é necessário saber como isso afetará os compromissos já existentes com outros clientes e,

O chão de fábrica precisa expedir seus compromissos sem afetar a eficiência.

Os ERP/MRP II tradicionais não foram projetados para atender a estes requisitos, gerando uma lacuna no seu funcionamento, porém como lembra Shobrys (2004b) as duas ferramentas podem ser consideradas complementares.

Um exemplo da inadequação da representação da capacidade disponível nos ERP's é dado por Gilman (2003). Os Centros de Trabalho são cadastrados como tendo uma certa capacidade por um período de tempo, o que leva a distorções. Digamos, por exemplo que um Centro de Trabalho tenha três máquinas, disponíveis 8 horas por dia (totalizando 24h de capacidade) e que chegue um lote de 16 horas. Conclui-se que o lote consumirá 16 das 24 horas disponíveis e que no mesmo dia o lote estará finalizado. Essa conclusão pode ser errada, já que o lote pode demandar *setup* e neste caso provavelmente será interessante executá-lo numa única máquina, o que exigirá 8 horas de trabalho por dois dias. Gilman (2003) conclui dizendo que esta representação simplista da capacidade por Centro de Trabalho pode ser usada no *Rough Cut Capacity Planning*, porém não oferece o nível de detalhe suficiente para produzir um seqüenciamento realista do chão de fábrica.

Clark (2003) ressalta que recentemente muitas das empresas vendedoras de ERP incluíram em seus pacotes ferramentas que usam Pesquisa Operacional afim de melhorar a qualidade do planejamento e seqüenciamento da produção, como por exemplo o *Advanced Production Optimizer*, da SAP. Ainda segundo Clark (2003), algumas companhias se especializaram em prover APS's como a OPL Studio. No entanto, seja num caso ou noutro, cabe ao usuário a formulação de um modelo que reflita os objetivos de planejamento e restrições da organização, tarefa que não pode ser considerada fácil e que, se realizada de forma inadequada, pode resultar em modelos imprecisos ou impossíveis de otimizar. É importante lembrar ainda que mesmo modelos bem formulados podem resultar em problemas tão grandes que inviabilizem a resolução, se não forem utilizadas técnicas heurísticas.

Os sistemas APS consideram os requisitos de material e capacidade da planta, ao gerarem os planos de produção sendo que alguns deles geram um seqüenciamento ótimo que respeita os objetivos da organização (VISOPT, 2003). Para tanto, ponderam restrições e regras do negócio a fim de encontrar a melhor disponibilização para materiais e capacidade da planta. Durante o processo de otimização, o APS escolhe o melhor plano, através de múltiplos passos. O MRP, ao contrário, apresenta um único passo assumindo capacidade da planta infinita, disponibilidade de material, uma única fase de produção e pedidos de compra baseados somente em datas de entrega de pedidos (Bermudez,1998).

2.2. A Teoria das Restrições

A Teoria das Restrições, ou *Theory of Constraints*, foi apresentada por Eliyahu M. Goldratt e Jeff Cox, por meio do livro A META (Goldratt e Cox, 2002). De acordo com Gibson et al. (1995), esta teoria é a essência de uma tecnologia proprietária, denominada *Optimized Production Technology*, ou OPT. Embora o OPT seja um algoritmo computacional proprietário, usado para seqüenciamento finito dos recursos gargalo, os princípios delineados e suposições nos quais se baseia são universalmente válidos e podem ser aplicados em muitos ambientes de manufatura, sem a necessidade da implementação do algoritmo em si.

A filosofia original do OPT consiste de 9 princípios básicos, centrados na existência de um recurso gargalo e suas implicações para o gerenciamento da manufatura e o seqüenciamento da produção.

Os princípios e o sistema de manufatura resultante servem para enfatizar o fato de que deve ser dada prioridade ao planejamento e seqüenciamento do fluxo de trabalho através do recurso gargalo (que passará a ser uma restrição maior nos objetivos da fábrica como um todo) e que portanto deve ser gerenciado com muito mais cuidado que os recursos não gargalo. Os detalhes de como isso é conseguido podem variar de situação para situação, e a operacionalização dos 9 princípios designados por Goldratt, na forma do sistema OPT é somente uma das formas de se alcançar esse objetivo (Gibson et al., 1995).

O principal objetivo de uma empresa de manufatura é fazer dinheiro, tanto no presente quanto no futuro. De acordo com a terminologia desenvolvida por Goldratt e Cox (2002), isto ocorre pelo investimento de dinheiro em inventário (matéria prima), que é convertido em *throughput* (taxa de saída), incorrendo em despesas operacionais, que adicionam valor à matéria prima. Nota-se que a definição de inventário deliberadamente exclui componentes com valor acrescido por ter sido processado, e a taxa de saída está associada somente a bens ventáveis e não bens produzidos. A maximização das medidas de desempenho da linha, o retorno sobre o investimento e o fluxo de caixa podem ser alcançados pela maximização da taxa de saída ao mesmo tempo em que se minimiza o inventário e as despesas operacionais. Assim, todas as atividades da manufatura devem ser direcionadas para estes objetivos.

Os objetivos da manufatura devem ser:

Maximizar a taxa de saída seqüenciando o recurso gargalo de forma a se maximizar sua utilização;

Reduzir inventário, sincronizando a produção nos recursos não-gargalo;

Reduzir as despesas operacionais utilizando o tempo ocioso dos não-gargalo em manutenção preventiva e outros programas de melhoria, ou pela redução da capacidade dos não-gargalo.

Na formulação original do OPT, gargalos e não-gargalos são definidos como:

Gargalo: qualquer recurso cuja capacidade é igual ou menor que a demanda por ele processada;

Não-gargalo: qualquer recurso cuja capacidade é maior que a demanda por ele processada.

Qualquer tempo ocioso ou desperdiçado num gargalo leva a uma irrecuperável perda de taxa de saída. Qualquer ação resultando em tempo produtivo adicional num gargalo, permitirá à planta processar a taxa de saída adicional. Por outro lado, os recursos não-gargalo vão ter sempre excesso de capacidade. O tempo ocioso pode, no entanto, ser usado produtivamente, o que representa um ponto importante para toda a abordagem OPT. Absorvendo mais *setups* (que podem ser acomodados nos tempos ociosos), podem ser produzidos lotes menores nos recursos não-gargalo, o que aumentará a flexibilidade de coordenação destes recursos com as atividades do gargalo, levando a reduções de inventário.

Gargalos atuam como restrições potenciais no desempenho dos sistemas e não necessitam ser máquinas. Podem tomar a forma de trabalho, disponibilidade de material, sistemas de manuseio de materiais, processamento de informação ou ainda políticas de gerenciamento. O objetivo da abordagem OPT é focar nos recursos restrição e gerenciá-los, bem como a suas interações com os outros recursos.

Recurso Restrição é definido como qualquer recurso que, se não for adequadamente seqüenciado e gerenciado pode acarretar que a produção seja diferente da planejada.

Os 9 princípios do OPT, juntamente com uma breve explicação são listados a seguir:

Balancear o fluxo e não a capacidade: De acordo com Corrêa e Gianesi (1994), contrariamente ao que prega a abordagem tradicional, que é balancear a capacidade e estabelecer um fluxo de materiais suave, o OPT defende o balanceamento do fluxo de produção. A ênfase é dada no fluxo dos materiais e não na capacidade dos recursos. Portanto faz-se necessária a identificação dos gargalos, que são os recursos limitantes do fluxo do sistema como um todo.

O nível de utilização de um não-gargalo não é determinado pelo seu próprio potencial, mas por alguma outra restrição do sistema: Gibson et al. (1995) explicam que o recurso não gargalo deve ser utilizado somente na medida em que mantém o gargalo ocupado. A capacidade do gargalo é então a restrição que deve determinar o nível de utilização do não-gargalo.

Utilização e Ativação de recursos não são sinônimos: Gibson et al. (1995) afirmam que um recurso não-gargalo pode ser entendido como ativado quando sua saída é requisitada por um recurso a seguir (por exemplo um gargalo). Existe então uma diferença entre ativação e utilização, quando o recurso está simplesmente produzindo uma saída não importando se esta foi ou não requisitada. Na manufatura tradicional existe uma tendência de se maximizar a utilização

de todos os recursos, já que este procedimento minimiza as unidades de custo que compõem o produto, contudo, se o recurso não for ativado por um estágio posterior do processo, isto acarretará em inventário extra.

Uma hora perdida no gargalo é uma hora perdida no sistema como um todo: desde que o gargalo determina o fluxo total, qualquer perda de tempo no gargalo resultará em perda de tempo para o sistema total. Isto implica em que devem ser feitos todos os esforços para manter o gargalo trabalhando e para evitar quebras ou falta de material. A minimização de *setups* deve também ser buscada (Gibson et al., 1995).

Tempo salvo em recursos não-gargalo não acrescenta nada ao sistema total: desde que o tempo parado de um recurso não-gargalo não seja tão longo que este se torne um gargalo, o não-gargalo deve, por definição, ter um tempo ocioso. Isto significa que os não-gargalos podem ter *setups* mais freqüentes que os gargalos, gerando uma maior flexibilidade nos tamanhos dos lotes e políticas de seqüenciamento (Gibson et al., 1995).

O tamanho dos lotes devem ser variáveis e não fixos: Gibson et al.(1995), ressaltam que no MRP o tamanho dos lotes de uma ordem em particular é assumido como fixo, à medida em que caminha pelos diversos processos. Contudo, se alguns destes processos se realizam em máquinas gargalo e não-gargalo, será importante produzir lotes maiores para o gargalo, a fim de se fazer o máximo uso de sua capacidade produtiva. Recursos não-gargalo podem tolerar lotes menores, já que a perda de tempo produtivo devido a *setups* não será importante. Portanto o tamanho dos lotes deve ser dependente do recurso que os processa. Nos gargalos devem ser usados lotes maiores que são fracionados em lotes menores nos recursos não-gargalo, aumentando a flexibilidade de seqüenciamento.

O lote de transferência não é necessariamente igual ao lote de processamento: Esperar que o processamento de um lote completo seja finalizado antes de transferi-lo para o próximo centro de trabalho pode resultar em *lead times* desnecessariamente longos, particularmente se o lote é grande. Os *lead times* podem ser reduzidos com a transferência de unidades de um processo para o seguinte, assim que são produzidas. O lote de transferência é então o número de unidades transferidas por vez (Gibson et al., 1995).

Os gargalos determinam o fluxo do sistema e definem seus estoques: De acordo com Corrêa e Gianesi (1994), os gargalos determinam o fluxo do sistema porque são limitantes da capacidade global. Além disso são também condicionantes dos estoques, pois estes são dimensionados e

localizados em pontos tais que consigam isolar os gargalos de flutuações estatísticas propagadas por recursos não-gargalo que os alimentam.

O seqüenciamento deve ser determinado depois de se examinar todas as restrições simultaneamente: Gibson et al. (1995), afirmam que na abordagem MRP, os *lead times* planejados e os tamanhos de lote são fixos e então o plano de necessidade de capacidade é calculado e testado para verificar a factibilidade. Se o plano não é factível, o MPS precisa ser mudado ou o processo precisa ser repetido para diferentes *lead times* e/ou tamanhos de lotes. Seria mais adequado considerar os *lead times* e tamanhos de lote como variáveis ao invés de constantes, e considerar todas as restrições simultaneamente, calculando *lead times* e tamanhos de lote que dão um plano factível na primeira execução.

Em resumo, a filosofia da teoria das restrições, e do OPT em particular, baseia-se no princípio de que nos sistemas produtivos existem dois tipos de recursos no que se refere à sua importância para o desempenho do sistema: os gargalos e os não-gargalos. Os gargalos são aqueles que limitam a capacidade do sistema produtivo como um todo e portanto merecem atenção especial. As decisões referentes a todos os outros recursos devem ser submetidas às decisões tomadas em relação aos gargalos (Corrêa e Gianesi, 1994).

2.3. Conclusão do Capítulo 2

Este capítulo apresentou em linhas gerais dois enfoques distintos para o gerenciamento da produção. O primeiro referiu-se aos sistemas ERP, amplamente usados pelas indústrias. O segundo tratou do gerenciamento da produção tendo como foco os gargalos.

Entre as qualidades apresentadas pelos ERP's, destacam-se a geração automática de ordens de compra e venda, liberação de estoque e produção e a organização da empresa numa única base de dados, com a eliminação de redundâncias e inconsistências. Uma deficiência importante destes sistemas é a falta de visibilidade temporal do problema, resultante da consideração de capacidade de produção infinita para os recursos fabris. Nota-se espaço para uma ferramenta que apresente ao planejador uma distribuição de carga compatível com as reais capacidades.

Em geral as empresas processam uma ampla gama de produtos que disputam vários recursos instalados no chão de fábrica. Uma análise detalhada da carga alocada a cada recurso, ao longo de alguns períodos, resultaria numa grande quantidade de dados a ser estudada pelo planejador, o que, em alguns casos, pode tornar-se contraproducente. Uma possibilidade de simplificação para estes casos é a modelagem somente dos recursos considerados gargalo. Como afirmado pela teoria das restrições, estes recursos merecem atenção especial pois são eles que ditam o ritmo de produção nas empresas.

Conclui-se que uma ferramenta que forneça, para o recurso gargalo, uma seqüência de processamento que respeite as capacidades instaladas será de grande auxílio ao planejador. Se esta ferramenta puder se valer dos dados já cadastrados no ERP em uso na empresa, os transtornos usualmente ocasionados pela utilização de novas tecnologias serão minimizados.

Capítulo 3

Modelagem e abordagens de solução para o problema do seqüenciamento de lotes

Existem atualmente muitas ferramentas de auxílio ao planejador na resolução do problema de dimensionamento e seqüenciamento de lotes, sendo que para cada situação real existirá um método mais adequado. Em alguns casos os tempos e custos de *setup* podem ser desprezados, sendo que em outros estes fatores devem ser considerados na modelagem do problema. Existem situações onde os recursos podem ser tratados como tendo capacidade infinita, em outros casos, a grande restrição do problema está num recurso considerado gargalo, implicando portanto numa atenção especial na utilização de sua capacidade. Em muitas situações a seqüência de processamento dos lotes é irrelevante, porém em uma grande gama de processos, esta seqüência é de fundamental importância para a racionalização de tempos e custos de *setup*. Quando os problemas são pequenos pode-se tratá-los de forma exata. No caso de problemas grandes, a abordagem mais adequada parece ser a dos métodos heurísticos, onde busca-se uma solução que seja boa e não necessariamente a ótima. Em casos onde o número de itens a ser seqüenciado é elevado, é comum a abordagem da hierarquização.

A modelagem de problemas onde o tempo de *setup* é relevante, é em geral feita usando-se Programação Linear Inteira (Karimi et al., 2003; Lachtermacher, 2002). Neste tipo de modelagem, para cada variável relativa ao processamento de um item num equipamento, existirá uma outra variável, com valor 0 ou 1, relativa ao *setup* do equipamento para este processamento. Isto implica num aumento considerável do número de variáveis. A Figura 3.1 exemplifica o caso onde um item pode ser processado em duas máquinas distintas. A modelagem deste problema

terá duas variáveis relativas ao processamento (processamento de P1 em M1 e processamento de P1 em M2), duas variáveis relativas ao *setup* dos equipamentos, e quatro soluções possíveis (processamento de P1 em M1, em M2, em M1+M2 e não processamento de P1).

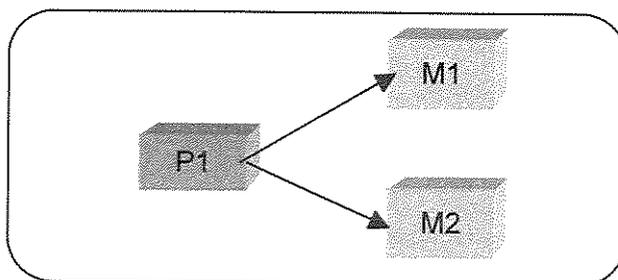


Figura 3.1 - Exemplo de um item com processamento possível em dois equipamentos

Num caso de 2 itens disputando duas máquinas, o número de variáveis relacionadas ao processamento do problema será 4 – mesmo número de variáveis relacionadas ao *setup* dos equipamentos - e o número de soluções possíveis será 2×2^2 .

No caso de N itens disputando M equipamentos, existirão até $M \times N$ variáveis relacionadas aos processamentos e o mesmo número relacionadas aos *setups*, resultando em $2 \times M \times N$ variáveis e $N \times 2^M$ possíveis soluções. Nota-se portanto que o número de variáveis cresce rapidamente com o tamanho do problema, o mesmo ocorrendo com o tempo computacional requerido.

Como ressalta Lachtermacher (2002), cada problema de Programação Linear Inteira tem associado um Problema de Programação Linear Relaxado, que é o problema original sem a consideração das variáveis inteiras. O método de solução destes problemas usa então o PL Relaxado, associado a uma busca exaustiva de soluções, como por exemplo um método *Branch and Bound*. É encontrada a solução ótima, sem levar em consideração as variáveis inteiras. A seguir são pesquisados todos os pontos próximos a essa solução ótima onde a restrição inteira é respeitada. O número de soluções possíveis a serem pesquisadas é de até $N \times 2^M$. No caso de um problema com 100 variáveis de decisão do tipo binária, o que não é considerado um problema grande, existirão até 2^{100} soluções viáveis, ou seja $1,27 \times 10^{30}$ soluções possíveis a serem pesquisadas. A solução de problemas usando modelagem de Programação Linear Inteira torna-se, portanto, inviável quando o número de variáveis cresce.

Quando os tempos de *setup* podem ser desprezados, o sistema produtivo pode ser modelado como um problema de fluxo em rede com restrições adicionais.

Nos casos onde o *setup*, além de relevante, é dependente da seqüência, uma boa opção é a agregação dos itens em famílias.

Nota-se que para cada situação existe uma abordagem que parece ser a mais adequada. Este capítulo procura, portanto, apresentar enfoques diferentes para a solução do problema, analisando a utilização de métodos exatos e de heurísticas aplicadas a problemas reais.

3.1. Abordagens para Otimização

Um caminho para auxiliar a tomada de decisão gerencial de processos de planejamento da manufatura é a utilização dos métodos de otimização. Segundo vários autores, dentre eles Özdamar et al. (1996), Malik (2004), Gilman (2003) e Clark (2003), a maior crítica aos MRP's está na não consideração das capacidades disponíveis, quando da geração dos planos de produção, resultando em diversas simulações de MPS até que se chegue a um plano factível. Como solução para este problema, Özdamar et al. (1996) propõem a integração entre um Sistema Hierárquico de planejamento de Produção e um MRP. Desta forma afirmam que o sistema incorpora o conhecimento do planejador com as potencialidades do MRP, preenchendo a lacuna entre os níveis hierárquicos superior e inferior, no planejamento.

Dentre as possibilidades disponíveis no auxílio à tomada de decisão, um enfoque muito atrativo é a modelagem do sistema produtivo como um problema de fluxo em rede com restrições adicionais (Carvalho et al., 1999). Esta modelagem aproveita as características de fluxo de item da rede de produção, do sistema de manufatura, para realizar a modelagem através de recursos gráficos. O grande apelo deste enfoque é que ele olha pelo o ponto de vista da empresa (retorno esperado), além de procurar resolver o problema com uma visão temporal considerando assim as informações disponíveis para todo o horizonte de planejamento. Este fato permite o trabalho no sentido de gerenciar os gargalos, deslocando a produção no tempo, em alguns casos adiantando e em outros atrasando (mesmo para linhas que processem multi itens). Permite também analisar objetivos conflitantes e incluir demanda probabilística, sob o ponto de vista do negócio,

assegurando o retorno dos investimentos. A seguir são discutidos aspectos de modelagem e da técnica de solução de problemas de manufatura via otimização.

3.1.1. Abordagem para Otimização na Fabricação de Um Item

Seja o problema de planejamento, constituído em uma linha serial multi estágio de um processo discreto de manufatura, como ilustrado na Figura 3.2, composto de três estágios de produção. Cada estágio pode ter associado uma máquina ou um grupo de máquinas que realizam transformações ou transportes com capacidades definidas *a priori*. O objetivo do planejamento é, a partir de metas estabelecidas por um nível hierárquico superior (por exemplo, decisões mensais geradas pelo programa mestre da produção (Fox, 1984), ou por um sistema hierárquico de decisão (Carvalho et al., 1996), desmembrá-las em produções, por exemplo diárias ou semanais, de forma a otimizar os custos, atendendo ao mesmo tempo às restrições de capacidade das máquinas, de armazenagem e de suprimento de matéria-prima.

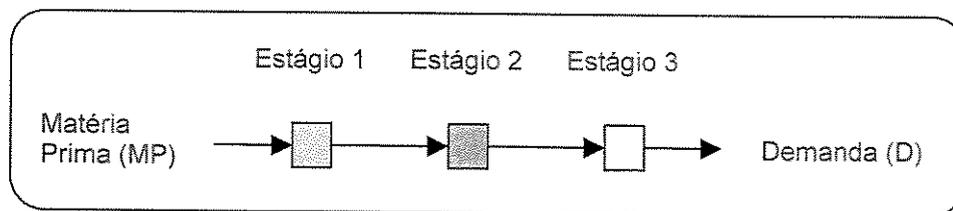


Figura 3.2 - Linha de produção serial (extraída de Carvalho et al. – 1998)

As decisões a serem tomadas para cada período podem envolver: a quantidade produzida, a utilização de matéria prima, o carregamento de cada máquina ou grupo de máquinas, entre outras. A expansão da Figura 3.2 para considerar cinco períodos de planejamento é mostrada na Figura 3.3. Para cada período “t” é explicitada a quantidade de matéria prima injetada (Mpt) e a demanda do item (Dt). Cada estágio de produção tem associado um custo de transporte, processamento ou transformação, que podem ser diferentes para cada período de tempo. Também estão associadas capacidades de produção. Nesta expansão a disponibilidade de cada grupo de máquinas pode ser diferente ao longo do período de planejamento. Assim o grupo de máquinas 1 sofre decréscimo de capacidade nos intervalos de tempo 4 e 5 enquanto o grupo de máquinas 3 recebe uma nova máquina a partir do período 3. Variações semelhantes podem ocorrer com

suprimento de matéria prima e com a demanda. De uma maneira geral, este problema apresenta as seguintes características:

horizonte de planejamento é discretizado em períodos (hora, turno, dia, semana);

cada estágio de produção pode conter um ou mais grupos de máquinas;

são conhecidas as capacidades de produção e de armazenagem de matéria prima para atendimento à demanda, dentro do horizonte de planejamento; e

a capacidade de cada grupo pode ser diferente ao longo do período de planejamento.

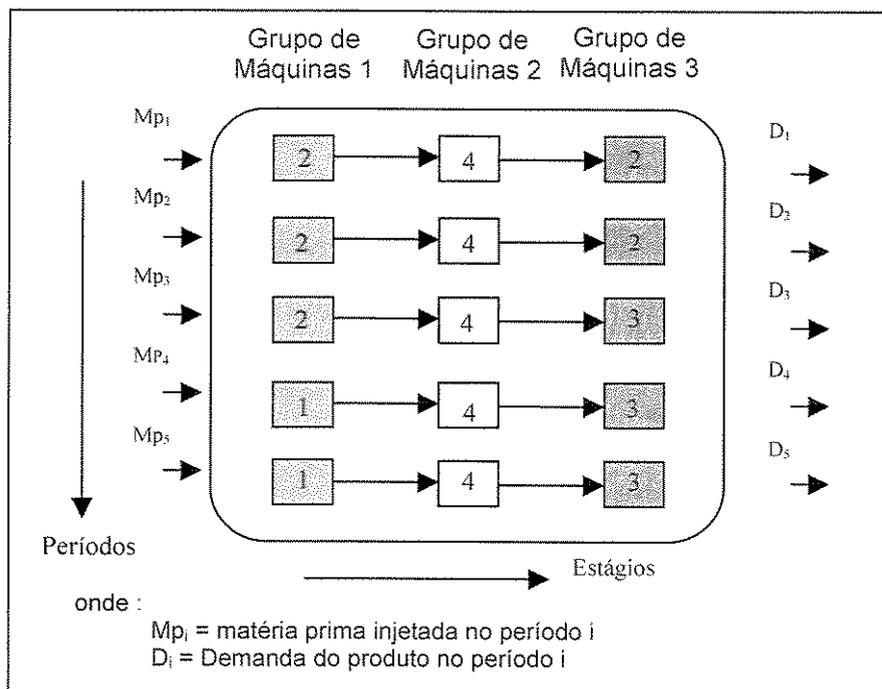


Figura 3.3 - Linha de produção com três estágios e cinco períodos (Carvalho et al. – 1998)

Baseando-se em critérios como custos unitários de matéria prima, de operação, de estocagem e de atrasos na entrega dos itens e no retorno por unidade de demanda atendida, o planejamento deve gerar o seguinte conjunto de decisões:

quanto cada máquina deve produzir e em que período;

quanto armazenar por estágio e em que período;

a escala de utilização de matéria prima por período;

a escala de atendimento à demanda por período;

a quantidade de demanda atendida com atraso; e

o retorno dentro do período de planejamento.

Um caminho para modelar e resolver este tipo de problema, passa pela observação de que a linha de produção, para o sistema ilustrado pela Figura 3.3, pode ser visualizada como um conjunto de partes fluindo através das máquinas e das unidades de armazenamento, sofrendo trabalho (fabricação ou transporte) em cada período de tempo, até se tornar um produto final. Se um item deixa um estágio i , ele pode ir imediatamente ao estágio $i+1$ ou ser armazenado para processamento em períodos subsequentes. Esta decisão passa pelas capacidades e custos de produção e de estocagem. Esta característica sugere a aplicação de técnicas de grafos para modelagem do problema de planejamento da produção onde para cada estágio pode ser escrita a seguinte equação de balanço:

$$x_{i-1,t} + y_{i,t-1} = x_{i,t} + y_{i,t} \quad (1)$$

onde $x_{i,t}$ representa a quantidade processada no estágio i , no tempo t e $y_{i,t}$ representa a quantidade armazenada para posterior processamento no estágio i e tempo t . A representação da linha de montagem serial ilustrada na Figura 3.3, através de uma estrutura de grafo, é apresentada na Figura 3.4.. Nesta rede os nós representam aos pontos de decisão e os arcos os recursos disponíveis.

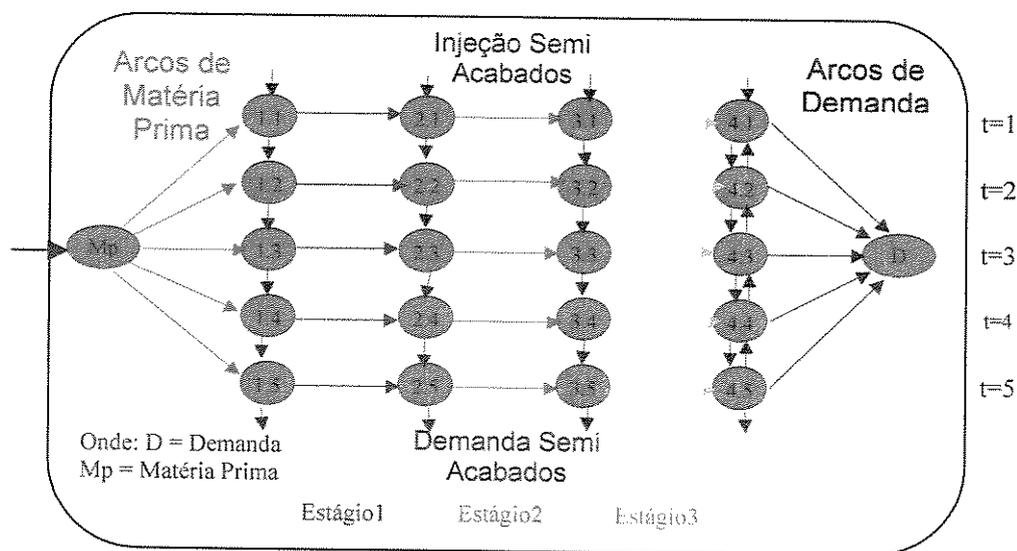


Figura 3.4 - Representação por grafo do sistema produtivo (extraída de Carvalho et al. – 1998)

Os fluxos nos arcos do grafo representam, para cada período de tempo: a quantidade de fornecimento de matéria prima, a quantidade de demanda por item, o nível de produção das máquinas, o nível de armazenagem dos itens entre os períodos t e $t+1$, e o nível de demanda em atraso de itens entre os períodos t e $t-1$ (Carvalho et al., 1999). Por outro lado, os nós (i,j) do grafo representam os pontos de decisão, onde são definidos o quanto produzir no período t e o quanto armazenar para o período $t+1$. Neste modelo o objetivo é a minimização dos custos de produção e atendimento à demanda, que envolvem compra de matéria prima, armazenagem, processamento e penalidade por demanda em atraso).

Este grafo possui uma estrutura muito especial, onde cada nó corresponde a um estágio de produção. Possui pelo menos dois arcos divergentes, um para representar a capacidade de processamento e outro para representar a capacidade de armazenagem do sistema. A exceção ocorre com os nós relativos ao suprimento de matéria prima e de balanço de demanda. De um modo geral, pode-se formular o problema em questão, na forma matricial, como segue:

$$\begin{aligned} & \text{Min } f(x) \\ & \text{s. a } Ax = b \\ & 0 \leq x \leq X \end{aligned}$$

onde $f(\cdot)$ é a função objetivo, A é a matriz de incidência nó-arco para o horizonte de planejamento, x o conjunto de variáveis que representam os fluxos nos arcos do gráfico e b o conjunto de disponibilidades de matérias a serem processadas ou demandas a serem atendidas.

3.1.2. Abordagem para Otimização na Fabricação de Vários Itens

Se itens diferentes forem processados por células inteiramente diferentes basta repetir a equação (1) para cada conjunto item/célula. Mas a característica principal de um sistema de produção está no compartilhamento de recursos com itens diferentes.

Este compartilhamento leva a um menor custo de instalação, a um coeficiente maior de produtividade para as máquinas, e portanto a melhor utilização do sistema produtivo. A equação de balanço para o caso multi item, com árvores idênticas ou não (Carvalho et al., 1999) será:

$$X_{(i-1,k,t)} + Y_{(i,k,t-1)} = X_{(i,k,t)} + Y_{(i,k,t)}$$

onde $x_{(i,k,t)}$ é a produção no estágio i no período t do item k ; $y_{(i,k,t)}$ é a quantidade armazenada no estágio i no período t do item k .

Estes itens podem ter árvores de produto idênticas ou diferentes. Assim sendo, é importante garantir que, dentro do horizonte de planejamento, o processamento de itens diferentes em uma mesma máquina não leve à violação de capacidade de produção deste recurso.

Uma formulação geral para um sistema de decisão com recursos compartilhados é mostrada em (2), a seguir, onde S representa a matriz de restrição de capacidade para múltiplos itens e d a capacidade de produção/armazenagem.

$$\begin{aligned} & \text{Min } f(x) \\ & \text{s.a. } Ax = b \\ & \quad Sx \leq d \\ & \quad u \leq x \leq U \end{aligned} \quad (2)$$

Uma formulação mais detalhada, para um problema com N itens e M estágios de produção, semelhante a muitas outras disponíveis na literatura como Kennington (1980) e Zahorik (1984), é mostrada a seguir.:

Sejam os índices:

i = estágio;

t = período;

k = item;

j = recurso.

As constantes:

c_{iktj} = custo unitário de produção para o item k no estágio i , período t , pelo recurso j ;

h_{ikt} = custo unitário para manutenção do item k em estoque no estágio i , no período t ;

v_{ikt} = custo de ordem em atraso para o item k , no estágio i , no período t ;

r_{kt} = demanda externa para o item k no período t ;

K_{jt} = capacidade máxima de produção para o recurso j no tempo t ;

L_t = capacidade máxima de armazenagem no tempo t ;

P_{iktj} = Capacidade individual de produção para o item k , no estágio i , no período t , pelo recurso j ;

U_{ikt} = Capacidade individual de armazenagem para o item k no estágio i , no período t ;

$D_k = (r_{tk}, \dots, r_{Tk})$ vetor de demandas externas.

E as variáveis:

X_{iktj} = quantidade produzida do item k no estágio i , no tempo t , pelo recurso j ;

Y_{ikt} = quantidade estocada do item k , no estágio i , entre os períodos t e $t+1$;

B_{ikt} = quantidade de atendimento em atraso para o item k , no estágio i entre períodos t e $t+1$.

O problema pode ser expresso como:

$$\text{Min } \sum_i \sum_k \sum_t \sum_j c_{iktj} X_{iktj} + \sum_i \sum_k \sum_t h_{ikt} Y_{ikt} + \sum_i \sum_k \sum_t v_{ikt} B_{ikt}$$

s. a

$$\sum_i \sum_k \sum_t \sum_j X_{iktj} \leq K_{jt}, \quad \text{para todo } i, j, k \text{ e } t$$

$$\sum_i \sum_k \sum_t Y_{ikt} \leq L_t, \quad \text{para todo } i, k \text{ e todo } t = 1, \dots, T-1$$

$$\sum_i \sum_k \sum_t \sum_j X_{iktj} + \sum_i \sum_k \sum_t B_{ikt} + \sum_i \sum_k \sum_t Y_{ikt} = D_{kt}, \quad \text{para todo } i, t, k \text{ e } j$$

$$0 \leq X_{iktj} \leq P_{iktj}$$

$$0 \leq Y_{ikt} \leq U_{ikt}$$

Devido à consideração das restrições de capacidade conjunta para produção e armazenagem, o problema acima perde a estrutura de grafos, resultando num problema mais complexo.

3.1.3. Abordagem para Otimização na Fabricação e Montagem de Um Item

Ambientes de manufatura que envolvem, além das operações de manufatura, também operações de montagem, podem ser modelados como fluxo em redes (Carvalho et al. 1999). A Figura 3.5, baseada em Carvalho et al. (1999) apresenta uma árvore de produto para um item com duas operações de montagem e sete de fabricação.

A figura 3.6 mostra a representação por fluxo em redes do sistema da Figura 3.5, para três períodos de tempo. Nesta representação, as setas pontilhadas verticais indicam armazenagem inter períodos, enquanto que as setas horizontais indicam operações de fabricação ou montagem. Existirão tantos grafos independentes quantas forem as linhas de produção do sistema.

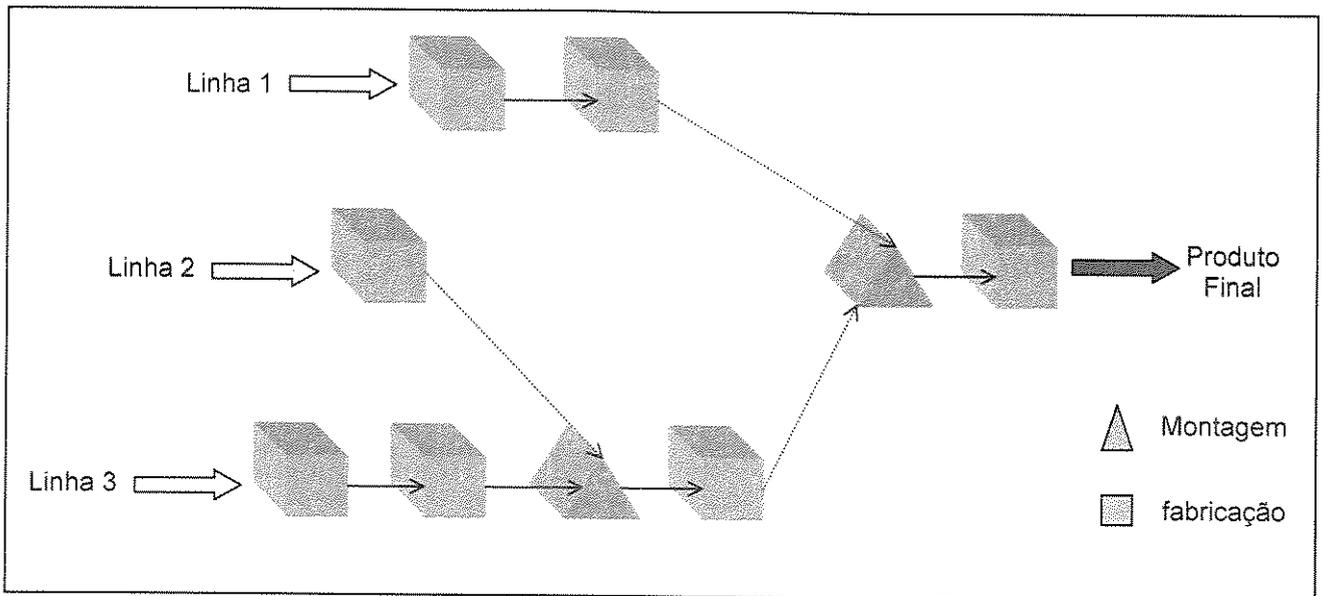


Figura 3.5 – Árvore de Produto para um item com duas operações de montagem e sete de fabricação

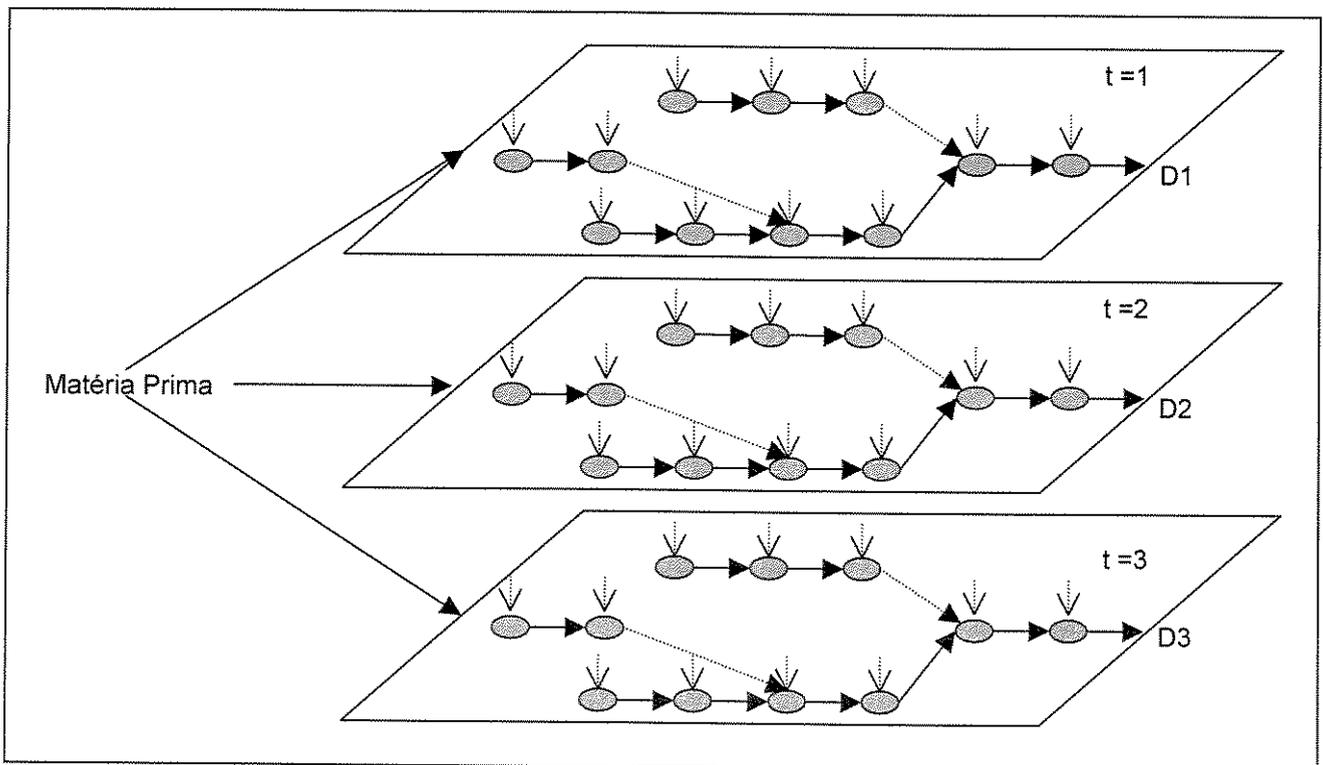


Figura 3.6 – Representação por Fluxo em Redes do sistema da Figura 3.5, para três períodos de tempo

Neste sistema as restrições de montagem são expressas como:

$$X_{p,t} - q_p x_{i,t} = 0$$

Onde q_p é a taxa de montagem da linha p . Esta equação garante a coordenação do fluxo no ponto de montagem i , no tempo t . A Figura 3.7 exemplifica o caso da montagem de rodas num automóvel. Neste exemplo, $q = 1/4$, ou seja, são necessárias quatro rodas para cada automóvel.

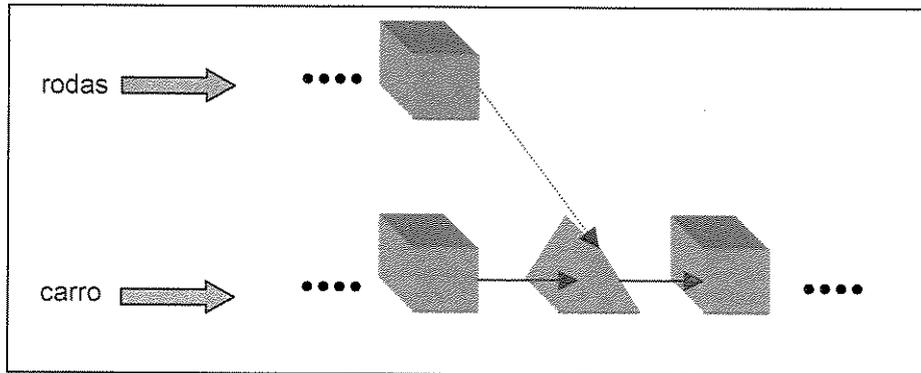


Figura 3.7 - Exemplo de montagem – Quatro rodas para cada carro

De forma geral este problema pode ser expresso como:

$$\begin{aligned} & \text{Min } f(x) \\ & \text{s. a } Ax = b \\ & \quad Qx = 0 \\ & \quad u \leq x \leq U \end{aligned}$$

Onde:

A = matriz bloco diagonal, onde cada bloco A_p com $p = 1, \dots, P$ representa a matriz de incidência da linha p . P é o número de linhas de produção;

Q = matriz diagonal com as taxas de montagem;

u = limitante inferior para as variáveis de produção x ;

U = limitante superior para as variáveis de produção x .

3.1.4. Abordagem para Otimização na Fabricação e Montagem de Vários Itens

A coordenação dos pontos de montagem entre linhas, num sistema onde diferentes produtos disputam recursos de produção e montagem leva à racionalização de estoques e

balanceamento das capacidades produtivas (Carvalho et al., 1999). Em cada um dos pontos de montagem existem três tipos de coordenação:

Temporal – gerencia as atividades sob o ponto de vista do tempo;

Espacial – garante a disponibilidade dos itens nos pontos corretos de montagem, e

De capacidade – garante que a soma dos planos de produção de cada item não exceda a capacidade total de produção dos recursos.

De forma geral, o problema pode ser expresso como:

$$\begin{aligned} & \text{Min } f(x) \\ & \text{s. a } Ax = b \\ & \quad Qx = 0 \\ & \quad Sx \leq d \\ & \quad u \leq x \leq U \end{aligned}$$

onde:

A = matriz bloco diagonal, onde cada bloco A_p com $p = 1, \dots, P$ representa a matriz de incidência da linha p . **P** é o número de linhas de produção. **A** representa a coordenação temporal do problema;

Q = matriz diagonal com as taxas de montagem. **Q** representa a coordenação espacial do problema;

S = restrições adicionais ou capacidades mútuas de produção. **S** representa a coordenação das capacidades disponíveis nos recursos;

b = vetor das demandas;

d = vetor das capacidades mútuas;

u = limitante inferior para as variáveis de produção x ;

U = limitante superior para as variáveis de produção x .

3.2. A Abordagem Heurística

A grande dimensão dos problemas aliada à imprecisão e incerteza dos dados de entrada, tais como as demandas e os tempos de processamento e *setup* que nem sempre são obtidos de forma exata, incentivam o uso de heurísticas como um enfoque auxiliar na solução dos problemas de Programação da Produção reais. Estes métodos, em muitos casos podem ser mais apropriados que os algoritmos de otimização exatos, presumivelmente mais custosos. Além disso, como

lembram Zahorik et al. (1984), a dificuldade na solução de casos gerais sugere que a literatura possa se beneficiar de um catálogo de algoritmos específicos para determinadas situações, já que o problema existe na forma estudada e uma técnica de solução eficiente pode ser usada como subproblema na resolução de problemas mais gerais.

Vários autores desenvolveram heurísticas para o tratamento do problema, dentre os muitos existentes, podemos citar, por exemplo, Hindi (1995 a, b), Mercé e Fontan (2003), Clark e Armentano (1995), Gupta e Magnusson (2005), Hung et al. (2003) e Berretta e Rodrigues (2004).

Hindi (1995a) considera um problema de um único estágio de produção (as demandas dos itens são independentes entre si), multi item, com restrições de capacidade e sem consideração de tempos ou custos de *setup*. Mercé e Fontan (2003) e Clark e Armentano (1995) utilizam Programação Inteira Mista e levam em consideração o tamanho mínimo dos lotes de produção, os tempos e custos de *setup*, múltiplos itens, múltiplos períodos. Em sua modelagem, Mercé e Fontan (2003) também consideram um único estágio de produção, com horizonte de planejamento rolante e dividido em três sessões. Cada sessão possui vários períodos de tempo. São usadas diferentes abordagens para a resolução do problema, dependendo de em qual sessão encontra-se o período de tempo considerado.

Clark e Armentano (1995) não restringem os estágios de produção e consideram *lead times* maiores que zero. Partem de uma solução factível para um problema não capacitado. A heurística é utilizada no caso de haver violação de capacidade, quando esta passa a ser considerada. A produção excedente em cada período é alocada para períodos anteriores, respeitando-se sempre a restrição de existência dos componentes necessários à fabricação. Clark (2003) apresenta ainda uma modelagem com Programação Inteira Mista onde é levada em consideração a seqüência de processamento dos lotes – e portanto dos tempos/custos de *setup*. Compara os resultados entre a abordagem exata –CMRP - e dois métodos heurísticos – CMRP1 e CMRP2. Segundo a conclusão do autor, os testes mostraram que para problemas pequenos a abordagem exata tem resultados superiores aos das heurísticas testadas. Contudo, para problemas de tamanho médio, CMRP1 apresenta resultados melhores, com tempo computacional igual ao da abordagem exata e quando o tamanho dos problemas é grande, CMRP2 produz uma solução num tempo computacional em que CMRP1 ainda nem chegou a uma solução factível.

Gupta e Magnusson (2005), e Hung et al. (2003) consideram simultaneamente tempos e custos de *setup* dependentes da seqüência. Os primeiros desenvolvem um algoritmo de programação inteira mista para uma única máquina que processa múltiplos itens em múltiplos períodos, porém devido à sua natureza combinatorial, o problema torna-se intratável para grandes instâncias. A solução encontrada pelos autores foi a implementação de uma heurística que considera *setups* positivos e fixos. Comparam os resultados com os de soluções exatas e concluem que sua heurística se comporta melhor em situações onde o número de itens é relativamente maior que o número de períodos considerados. Hung et al. (2003), usam *tabu search* para desenvolver a heurística que leva em consideração, além das características acima, também o uso de múltiplos recursos. É assumido que os *setups* não passam de um período para outro e não são consideradas decisões de seqüenciamento dentro dos períodos. Em ambos os casos o problema é modelado como programação inteira mista.

Berretta e Rodrigues (2004), apresentam heurística baseada em algoritmos evolucionários. Consideram um problema com múltiplos períodos, múltiplos itens, múltiplos estágios de produção, custos e tempo de *setup* fixos. Os autores valem-se de uma heurística composta por quatro procedimentos, que são ativados dependendo da factibilidade ou não da solução do procedimento anterior. São usados os algoritmos Wagner Whitin e procedimento *smoothing*.

Para todos os artigos estudados, sempre que os tempos e custos de *setup* são considerados - sejam eles dependentes ou independentes da seqüência - a modelagem do problema é feita usando-se Programação Inteira Mista. Com freqüência são desenvolvidas heurísticas cuja finalidade é tornar os tempos de execução mais aceitáveis.

3.2.1. Modelagem como Grafo de um Problema com Restrições Conjuntas de Produção – Método de Zahorik et al. (1984)

Dentre os métodos estudados, nos interessa particularmente o trabalho de Zahorik et al. (1984). Este método se aplica ao caso particular de problemas que podem ser modelados como mostrado na Formulação Geral (2) e que permite transformar um problema com restrições de capacidade conjunta em um grafo. Os autores, que definem seu trabalho como heurística, apresentam uma “receita” onde, desde que respeitadas algumas condições, é possível transformar

um problema de fluxo em redes com restrições adicionais em um problema de fluxos em redes simples. O trabalho propõe o estudo de um caso especial de seqüenciamento de produção multi estágio e multi item, no qual vários itens seguem a mesma seqüência de produção, com restrições de capacidade de produção e/ou armazenagem em um único estágio.

Assumem:

- Demandas externas determinísticas
- Horizonte finito
- Custos lineares para produção e armazenagem
- Mesma seqüência de operação para todos os itens
- Não são considerados *setups*
- Não são permitidas ordens em atraso

Segundo os autores, problemas com restrições de capacidade, em geral não podem ser modelados como problemas de fluxos em rede. A particularização proposta é a de se considerar:

- um horizonte com apenas três períodos, e restrições de armazenagem em qualquer estágio,
- ou
- um horizonte com apenas três períodos, e restrições de produção e de armazenagem somente no último estágio.

Respeitando-se estas premissas, os autores apresentam uma seqüência de operações básicas nas linhas da matriz de incidência do problema, que resulta numa estrutura de rede. Para casos onde o horizonte a ser analisado é maior que três períodos, é proposto o planejamento por horizonte rolante.

Embora o trabalho considere as situações citadas acima, vamos nos ater somente à segunda delas, por ser a que mais diretamente nos interessa. A formulação matemática proposta para o problema é mostrada a seguir:

Sejam os índices:

$i = 1, \dots, N$ os índices para os estágios de produção;

$t = 1, \dots, T$ os índices para os períodos;

$k = 1, \dots, K$ os índices para os itens.

As constantes:

c_{ikt} = custo unitário de produção para o item k no estágio i , período t ;

h_{ikt} = custo unitário de manutenção do item em estoque;

r_{kt} = demanda externa;

K_t = capacidade máxima de produção do recurso no tempo t ;

L_t = capacidade máxima de armazenagem do estoque no tempo t ;

P_{ikt} = Capacidade individual de produção do item;

U_{ikt} = Capacidade individual de armazenagem do item;

A = matriz de conservação de fluxo;

$D_k = (r_{kt}, \dots, r_{kT})$ vetor de demandas externas.

E as variáveis de decisão:

X_{ikt} = quantidade produzida;

Y_{ikt} = quantidade estocada entre períodos;

$E_k = [X_{1k1}, \dots, X_{MkT}, Y_{1k1}, \dots, Y_{MkT-1}]$ vetor de variáveis de decisão para o item k .

O problema pode ser expresso como:

$$\text{Min } \sum_i \sum_k \sum_t c_{ikt} X_{ikt} + \sum_i \sum_k \sum_t h_{ikt} Y_{ikt} \quad (3)$$

s. a

$$A E_k = D_k \quad (4)$$

$$\sum_k \sum_t X_{Nkt} \leq K_t, \quad \text{para todo } k \text{ e } t \quad (5)$$

$$\sum_k \sum_t Y_{Nkt} \leq L_t, \quad \text{para todo } k \text{ e todo } t = 1, \dots, T-1 \quad (6)$$

$$x \leq X_{ikt} \leq P_{ikt} \quad \text{para todo } i, \text{ todo } t \text{ e todo } k \quad (7)$$

$$u \leq Y_{ikt} \leq U_{ikt} \quad \text{para todo } i, \text{ todo } t \text{ e todo } k \quad (8)$$

A equação (3) considera a minimização dos custos de produção e armazenagem. A equação (4) considera as demandas por período. A equação (5) garante que a capacidade produtiva será respeitada no último estágio de produção (estágio N). Da mesma forma, a equação (6) garante que a capacidade de armazenagem será respeitada no último estágio de produção. As equações (7) e (8) garantem as capacidades máximas de produção e armazenagem para cada item, individualmente.

A Figura 3.8 explicita a situação onde três itens disputam um recurso, em dois períodos. O índice. X_{ikt} representa o item k no estágio i , no período t . Y_{ikt} representa a armazenagem do item k no estágio i , do período t para o período $(t + 1)$.

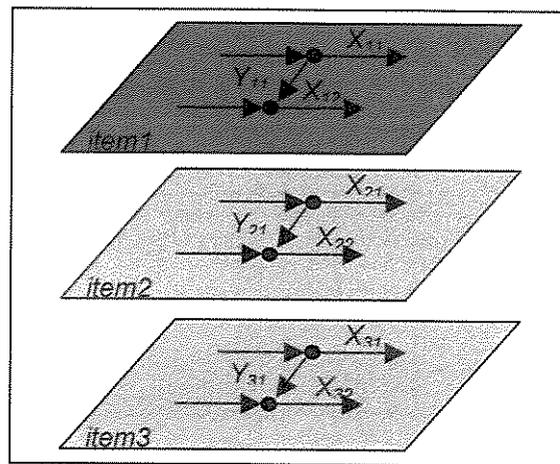


Figura 3.8 - Exemplo com um estágio de produção disputado por três itens, em dois períodos

A Figura 3.9 explicita as restrições de capacidade conjunta de produção para os mesmos três itens. Os itens 1, 2 e 3 deverão compartilhar os recursos de produção nos dois períodos considerados. Desta forma $\sum_i \sum_k \sum_t X_{ikt} \leq K_t$, onde K_t é a capacidade de produção do recurso considerado, no período t .

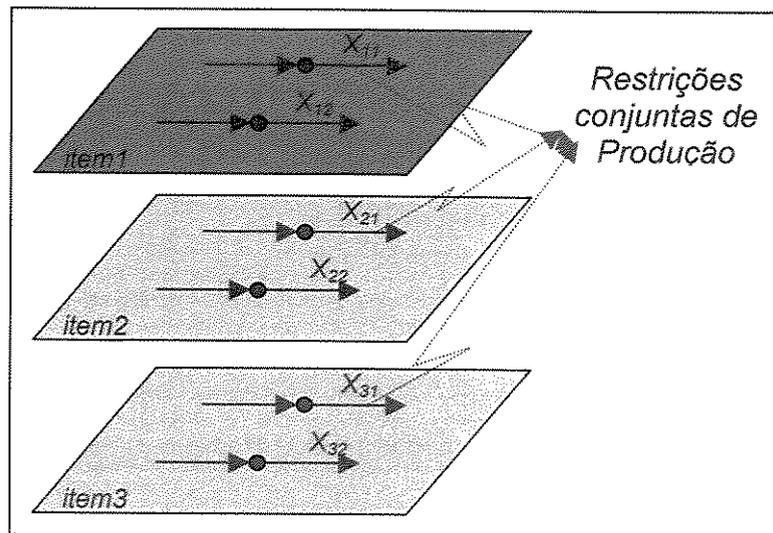


Figura 3.9 - Restrições de capacidade conjunta de produção para três itens em dois períodos

Da mesma forma que na Figura 3.9, a Figura 3.10 explicita as restrições conjuntas de armazenagem. São considerados dois períodos onde os itens 1, 2 e 3 deverão compartilhar os recursos de armazenagem. Desta forma $\sum_i \sum_k \sum_t X_{ikt} \leq L_t$, sendo L_t a capacidade de armazenagem no período t .

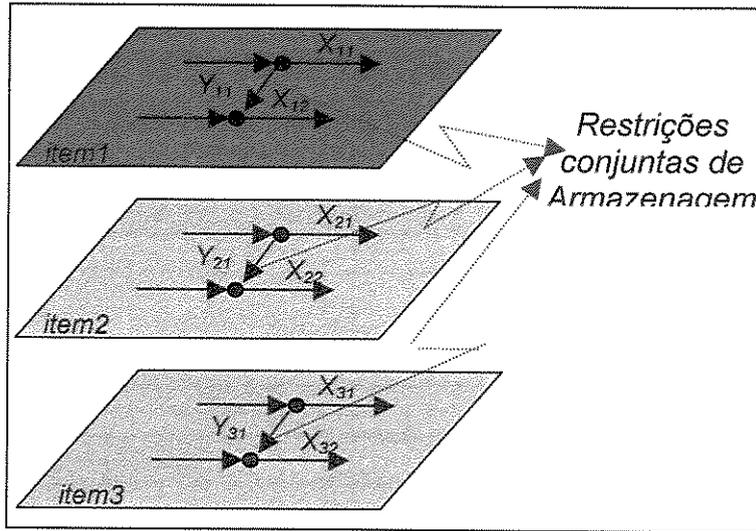


Figura 3.10 - Restrições de capacidade conjunta de armazenagem para 3 itens em 2 períodos

A Figura 3.11, mostra, de forma reduzida, a matriz de incidência para o problema definido nas equações (2) a (7).

$$M = \begin{array}{|c|c|c|c|c|} \hline A_{11} & A_{12} & & & \\ \hline A_{21} & & & & A_{25} \\ \hline & A_{32} & & A_{34} & \\ \hline A_{41} & & A_{43} & & \\ \hline \end{array}$$

Figura 3.11 – Representação reduzida da Matriz de Incidência

Na Figura 3.11, A_{11} , A_{21} e A_{41} referem-se a cada item (k) no período (t). A_{12} e A_{32} referem-se a armazenagem do período (t) para o período ($t+1$), para cada item (k). A_{43} representa as variáveis de folga para as restrições conjuntas de capacidade de produção. A_{34} refere-se às variáveis de folga para as restrições conjuntas de armazenagem. A_{25} contém as variáveis de folga dos itens, por período.

As sub matrizes $(-A_{11})$, A_{21} e A_{25} são matrizes identidade com dimensão $m \times n$, onde m é o número de itens e n o número de períodos considerados. A_{43} é matriz identidade com dimensão n e A_{34} é matriz identidade com dimensão $n-1$.

A_{12} tem a estrutura mostrada na Figura 3.12 e A_{41} e A_{32} têm a estrutura da Figura 3.13. A_{12} , A_{41} e A_{32} têm tantas sub matrizes quantos forem os itens considerados no problema. Para A_{12} e A_{32} o número de colunas em cada sub matriz é o número de períodos menos 1. Para A_{41} o número de colunas em cada sub matriz é o número de períodos. O número de linhas para as sub matrizes de A_{12} e A_{41} é igual ao número de períodos. O número de linhas para cada sub matriz de A_{32} é igual ao número de períodos menos 1.

-1			
1	-1		
	1		
		-1	
		1	-1
			1

Figura 3.12 - Estrutura de A_{12}

1			1	
	1			1
		1		
				1

Figura 3.13 - Estrutura de A_{41} e de A_{32}

O exemplo apresentado considera dois itens e três períodos - lembrando que os autores consideram um número máximo de 3 períodos.

Assumindo estas condições Zahorik et al. (1984) transformam, através de simples operações nas linhas, um problema de fluxo em redes com restrições adicionais em um problema de fluxo em redes simples.

3.2.2. Extensão do Método de Zahorik et al. (1984) considerando ordens em atraso, taxas de produção constantes e mais do que três períodos de planejamento

Aplicando-se uma adaptação das transformações sugeridas por Zahorik et al. (1984) para a situação da Figura 3.11, que leva em conta restrições conjuntas de armazenagem e produção e, além disso, considerando-se taxas de produção iguais para todos os produtos e permitindo-se a ocorrência de ordens em atraso, chega-se ao problema descrito pelas equações (9) a (14) e à matriz apresentada na Figura 3.14 (Haddad e Carvalho, 2005-a).

Sejam os índices:

$i = 1, \dots, N$ os índices para os estágios de produção;

$t = 1, \dots, T$ os índices para os períodos;

$k = 1, \dots, K$ os índices para os itens.

As constantes:

c_{ikt} = custo unitário de produção para o item k no estágio i , período t ;

h_{ikt} = custo unitário de manutenção do item em estoque;

b_{ikt} = custo unitário de entrega do item em atraso;

r_{kt} = demanda externa;

K_t = capacidade máxima de produção do recurso no tempo t ;

L_t = capacidade máxima de armazenagem do estoque no tempo t ;

P_{it} = Capacidade de produção dos itens;

U_{ikt} = Capacidade individual de armazenagem do item;

A = matriz de conservação de fluxo;

$D_k = (r_{kt}, \dots, r_{kT})$ vetor de demandas externas.

E as variáveis de decisão:

X_{ikt} = quantidade produzida;

Y_{ikt} = quantidade estocada entre períodos;

B_{ikt} = quantidade entregue em atraso;

$E_k = [X_{1k1}, \dots, X_{MkT}, Y_{1k1}, \dots, Y_{MkT-1}]$ vetor de variáveis de decisão para o item k .

O problema pode ser expresso como:

$$\text{Min } \sum_i \sum_k \sum_t c_{ikt} X_{ikt} + \sum_i \sum_k \sum_t h_{ikt} Y_{ikt} + \sum_i \sum_k \sum_t b_{ikt} B_{ikt} \quad (9)$$

s. a

$$A E_k = D_k \quad (10)$$

$$\sum_k \sum_t X_{Nkt} \leq K_t, \quad \text{para todo } k \text{ e } t \quad (11)$$

$$\sum_k \sum_t Y_{Nkt} \leq L_t, \quad \text{para todo } k \text{ e todo } t = 1, \dots, T-1 \quad (12)$$

$$x \leq X_{ikt} \leq P_{it} \quad \text{para todo } i, \text{ todo } t \text{ e todo } k \quad (13)$$

$$u \leq Y_{ikt} \leq U_{ikt} \quad \text{para todo } i, \text{ todo } t \text{ e todo } k \quad (14)$$

M=

A ₁₁	A ₁₂				A ₁₆
A ₂₁				A ₂₅	
	A ₃₂		A ₃₄		
A ₄₁		A ₄₃			

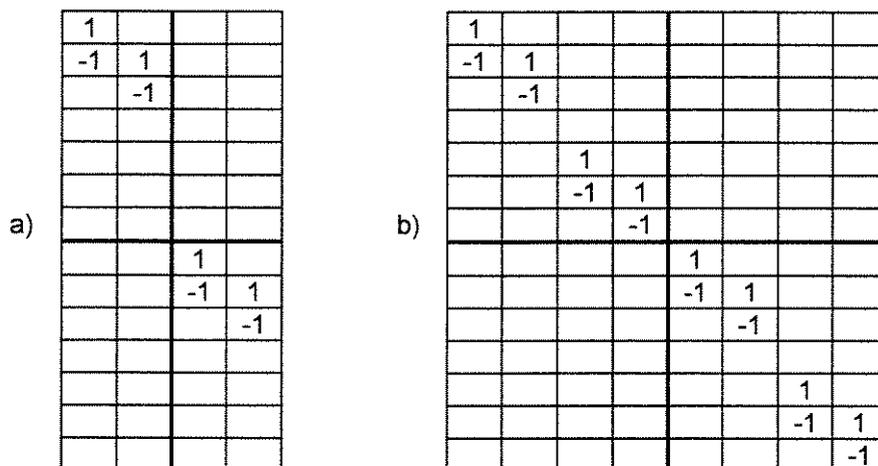
Figura 3.14 – Representação de adaptação da Matriz de sugerida por Zahorik et al. (1984)

Na matriz da Figura 3.14, as colunas 1, 2, 3, 4 e 5 têm o mesmo significado explicado para a Figura 3.1. A coluna 6 refere-se às ordens em atraso. As colunas, 1, 3, 4 e 5 têm a mesma estrutura já explicada. A_{12} pode assumir qualquer das duas estruturas apresentadas na Figura 3.15.

A parte a) da Figura 3.15 refere-se a consideração das restrições de armazenagem somente nos três primeiros períodos de tantos quantos se queira estudar. A parte b) da Figura 3.15 refere-se à consideração das restrições de armazenagem a cada três períodos, deixando-se um intervalo de pelo menos um período sem a consideração deste tipo de restrição.

O exemplo da Figura 3.15 apresenta a matriz de restrições de armazenagem para um problema com sete períodos. Na situação da Figura 3.15 a) as restrições de armazenagem são consideradas somente nos três primeiros períodos. Para os demais não se considera este tipo de restrição. Para a situação apresentada em 3.15 b) as restrições de armazenagem são consideradas a cada três períodos, com um período no intervalo, onde não é considerado este tipo de restrição. Por exemplo, para um problema com sete períodos, no primeiro, segundo e terceiro são consideradas as restrições conjuntas de armazenagem. No quarto período despreza-se esta restrição. No quinto, sexto e sétimo períodos considera-se outra vez as restrições conjuntas, e

assim por diante. A_{16} tem a mesma estrutura que A_{12} , multiplicada por (-1) . Resolvendo-se este problema estendido, mesmo com a restrição de armazenagem relaxada no quarto período, pode-se ter uma visão abrangente do comportamento da produção. Pode-se verificar a necessidade de armazenagem neste período 4, somando-se as armazenagens de cada item no período. Se este recurso de armazenagem estiver sobrecarregado significa que ele é importante na solução do problema. Caso a soma das utilizações seja menor que a capacidade máxima de armazenagem, a solução encontrada é a ótima.



- a) Restrições de armazenagem somente nos três primeiros períodos
- b) Restrições de armazenagem no primeiro, segundo terceiro, quinto sexto e sétimo períodos

Figura 3.15 - Duas possíveis estruturas para ordem em atraso e armazenagem

A Figura 3.16 apresenta a Matriz de Transformação **T**. A Figura 3.17 apresenta a matriz **M** resultante de um problema para dois itens, cinco períodos, restrições conjuntas de armazenagem ordens em atraso consideradas somente nos três primeiros períodos e taxas de produção iguais para todos os itens. A Figura 3.18 apresenta o diagrama de fluxo para a matriz da Figura 3.17. Finalmente, na Figura 3.19 é apresentado o resultado da operação de multiplicação entre **T** e **M** e na Figura 3.20 está a representação por fluxo em redes do problema transformado da Figura 3.18. Por ser o resultado de operações nas linhas da matriz original, esta representação não possui um significado real.

Nas Figuras 3.17 e 3.19, por questão de espaço, não está explicitado o lado direito das equações. No primeiro bloco (primeiras 10 linhas) o lado direito refere-se à demanda de cada item por período. O segundo bloco refere-se à capacidade de produção por item, por período, no

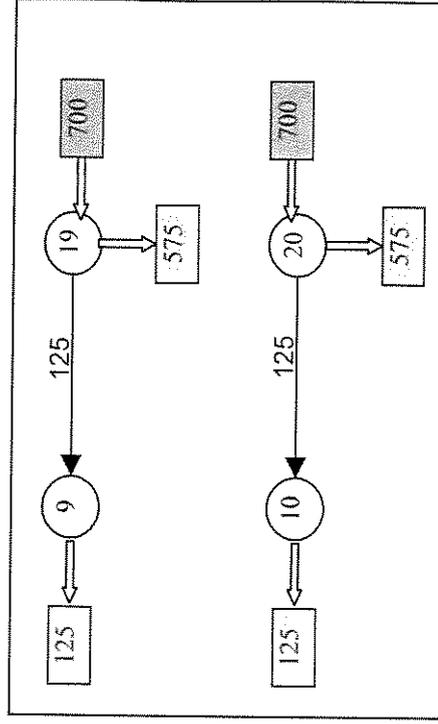
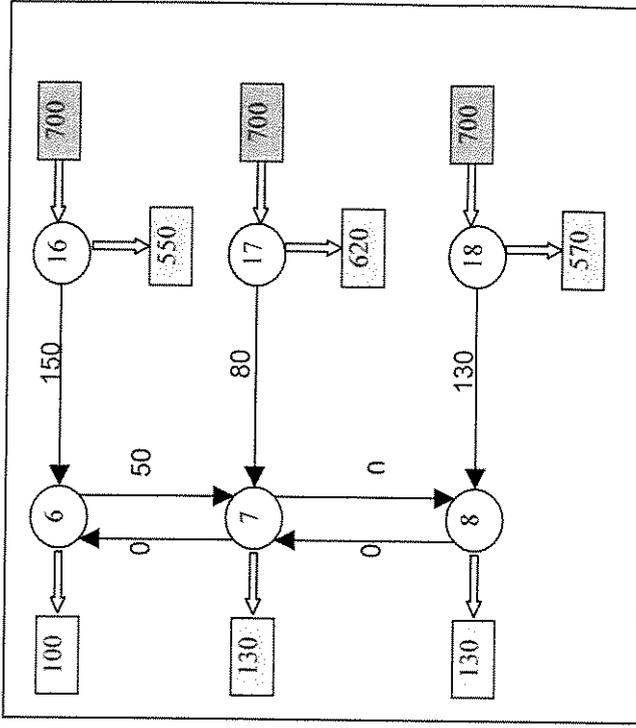
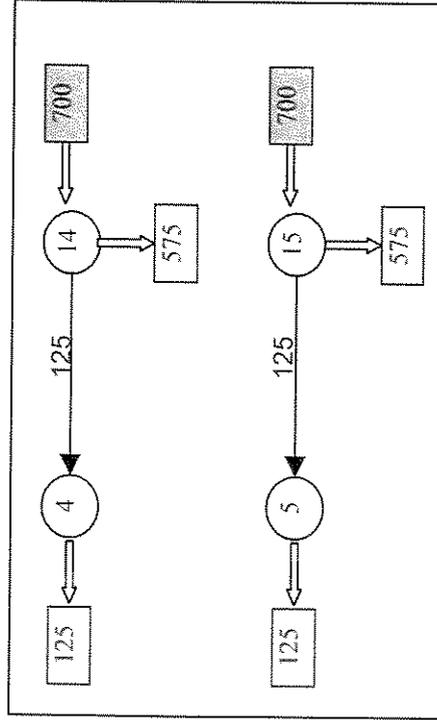
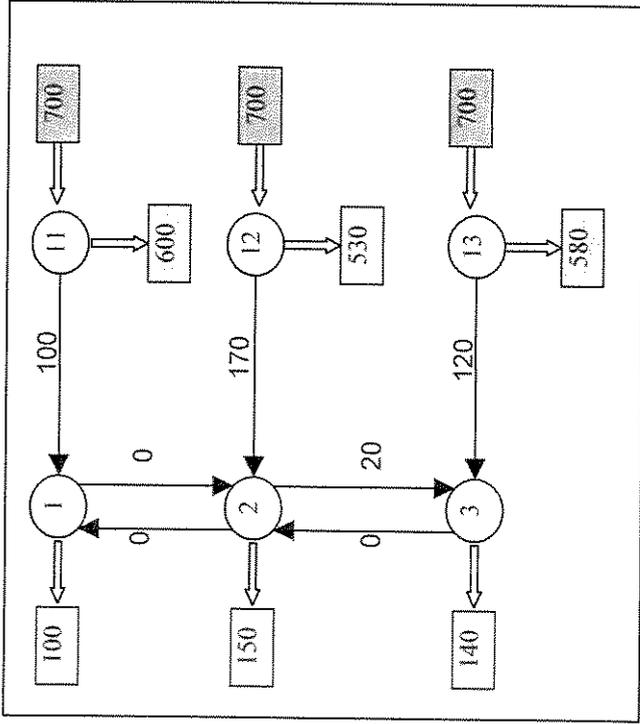


Figura 3.18 - Diagrama de Fluxo para a Matriz da Figura 3.17

3.2.3. Extensão do Método de Zahorik et al. (1984) considerando diferentes taxas de produção e mais do que três períodos de planejamento

Para situações em que os produtos possuem diferentes taxas de produção, não é possível a transformação do problema com restrições adicionais em grafo, se forem consideradas as ordens em atraso. É possível, no entanto, a consideração de mais do que três períodos de planejamento, desde que sejam respeitadas as regras apresentadas na Figura 3.15.

As Figuras 3.21 a 3.24 apresentam um exemplo de aplicação da extensão do método proposto por Zahorik et al.(1984) quando são considerados mais do que três períodos de planejamento. Seja, portanto, o problema descrito nas equações (2) a (7), para um horizonte de planejamento de mais do que três períodos.

As Figuras 3.21 e 3.22 apresentam as Matrizes de Transformação **T1** e **T2** para um exemplo onde as taxas de produção são diferentes para os diferentes itens. A Figura 3.23 apresenta a matriz **M1** resultante de um problema para dois itens, cinco períodos e restrições conjuntas de armazenagem consideradas somente nos três primeiros períodos. Ordens em atraso não são consideradas. A Figura 3.24 apresenta o resultado da operação de multiplicação em dois passos das matrizes **T1** e **T2** por **M1**.

Na Figura 3.23, por questão de espaço, não está explicitado o lado direito das equações. No primeiro bloco (primeiras 10 linhas) o lado direito refere-se à demanda de cada item por período. O segundo bloco refere-se à capacidade de produção por item, por período, no terceiro bloco tem-se a capacidade total de armazenagem e no quarto a capacidade total de produção. A Figura 3.24 apresenta uma representação por fluxo em redes simples.

3.3. Definição da Modelagem Respeitando as Características de cada Problema

Em geral os problemas de seqüenciamento de lotes podem ser resolvidos com Programação Linear. Quando tempos e custos de *setup* não são importantes, ou podem ser incorporados nos tempos e custos de produção, é possível a modelagem por Fluxos em Redes com Restrições Adicionais, ou por Pontos Interiores.

Existem, no entanto, algumas particularidades que permitem o uso de métodos mais eficientes, como a modelagem por Grafos. Zahorik et al. (1984) apresentam um método para transformar uma modelagem de Fluxo em Redes com Restrições Adicionais em Grafos, desde que o número de períodos considerado seja menor ou igual a três, que ordens em atraso não sejam consideradas e que as restrições conjuntas de produção e armazenagem sejam consideradas somente no último estágio de produção.

O presente trabalho apresenta uma extensão da proposta de Zahorik et al.(1984). É possível transformar um problema de Fluxo em Redes com restrições adicionais em um Grafo, mesmo com a consideração de mais do que três períodos de planejamento, se as restrições de armazenagem forem consideradas somente nos três primeiros períodos, ou se estas restrições forem consideradas a cada três períodos, deixando-se pelo menos um período sem a consideração deste tipo de restrição.

Outra possível extensão para o trabalho de Zahorik et al.(1984), quando as taxas de produção são iguais para os diferentes produtos que disputam um mesmo recurso, é a consideração de ordens em atraso. Como no caso anterior, restrições conjuntas de produção e armazenagem devem ser consideradas somente no último estágio e as restrições de armazenagem devem seguir as mesmas regras já descritas.

3.4. Conclusão do Capítulo 3

Este capítulo apresentou dois possíveis caminhos para a resolução de problemas de seqüenciamento da produção: os métodos exatos e os métodos heurísticos.

Na resolução exata, o problema pode ser modelado como programação linear ou como programação inteira, dependendo da importância dos tempos de *setup*. Tanto num caso como no outro, a literatura apresenta várias possibilidades de algoritmos que se valem de diferentes métodos para chegar à melhor solução.

Em geral, nos casos onde os *setups* têm tempos relevantes comparativamente aos tempos de processamento, a modelagem do problema considera estas variáveis como variáveis binárias. Uma variável binária assume valor um se for ativada ou zero caso contrário. A resolução de problemas com este tipo de variáveis implica no uso de algoritmos de programação inteira, que costumam ser mais custosos em termos de tempo computacional, que os de programação linear não inteira, devido à explosão tanto do número de variáveis, quanto do número de restrições.

Uma das possibilidades para a resolução de problemas não inteiros é o uso de grafos. Nesta abordagem a linha de produção é vista como um conjunto de partes fluindo através das máquinas e das unidades de armazenamento, sofrendo algum tipo de trabalho em cada período de tempo, até tornarem-se produtos finais. Nos casos onde os recursos instalados são disputados por mais de um item, o problema pode ser modelado como fluxo em redes com restrições adicionais. Tanto para o caso de fluxo em redes simples, como para o de fluxo em redes com restrições adicionais, existem algoritmos que resolvem eficientemente o problema, porém no segundo caso a convergência é mais custosa devido ao maior número de pivoteamentos na matriz de incidência.

A literatura apresenta também muitas heurísticas para a resolução de problemas lineares sejam eles inteiros ou não. Um trabalho que mereceu atenção especial foi o desenvolvido por Zahorik et al. (1984). Nesta abordagem, respeitando-se algumas restrições é possível transformar um problema de fluxo em redes com restrições adicionais em um problema de fluxo em redes simples. Esta transformação é efetuada através de simples operações nas linhas da matriz de incidência e garante a resolução do problema com o uso de algoritmos mais eficientes. Esta abordagem é adequada para problemas reais, dado que nestes problemas os horizontes de tempo em geral são curtos, devido às incertezas das demandas e ao número de parâmetros a ser considerado ser elevado, por causa da grande quantidade de itens em produção no chão da fábrica.

Com base no trabalho de Zahorik et al. (1984), este capítulo buscou ampliar as possibilidades de aplicação desta abordagem. As restrições conjuntas de armazenagem podem ser consideradas em mais do que três períodos se for deixado um intervalo de pelo menos um período sem a consideração deste tipo de restrição. As restrições conjuntas de produção podem ser consideradas sem problemas em todos os períodos. Nos casos onde as taxas de produção são iguais, ordens em atraso podem também ser consideradas na modelagem.

Capítulo 4

Integração: Práticas Industriais e Otimização

Embora os ERP's sejam as práticas industriais mais utilizadas para o planejamento da produção dos sistemas de manufatura, eles são insuficientes para resolver o problema completo da programação da produção. Para complementá-los são desenvolvidos mecanismos que considerem a questão da capacidade com uma visão temporal do problema para a definição das necessidades de armazenagem interestágios. Ou seja, mecanismos que procurem fazer uma alocação em um sistema capacitado, e que atuem quando necessário, antecipando ou retardando no tempo o atendimento a uma demanda preestabelecida, baseando-se para tanto em fatores de capacidade e econômicos.

Uma consequência da suposição de capacidade infinita de produção para os recursos produtivos, é uma maior oscilação no fluxo da produção. Consideremos, por exemplo, o caso em que numa determinada semana exista ociosidade no chão de fábrica, e na semana seguinte a situação seja de sobrecarga, como mostra a Figura 4.1. Se o sistema não considera os limites de capacidade de cada recurso, é óbvio que aloca para a data mais tarde possível toda a produção, ou seja, planejará as datas de início das ordens de serviço levando em conta somente os *lead times* dos componentes e desconsiderando a capacidade de produção dos recursos fabris. Porém, nesta situação, a melhor política talvez fosse adiantar parte da produção para a semana ociosa, para evitar o pagamento de horas extras, terceirizações, multas por atraso na entrega ou ainda um eventual não atendimento à demanda.

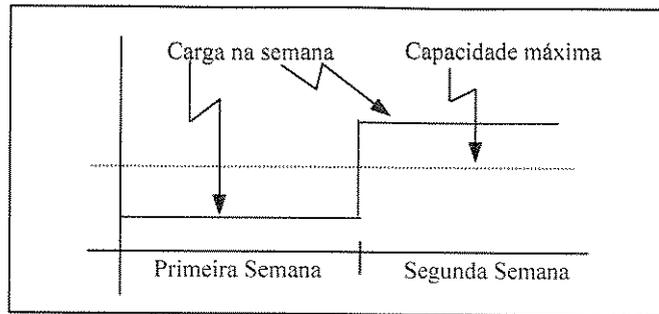


Figura 4.1 - Exemplo de carga de trabalho em duas semanas

Normalmente, numa empresa com produção seriada, existem vários recursos similares, que podem executar uma mesma operação de fabricação em um componente, com diferentes taxas de processamento. Consideremos, por exemplo o caso do componente COMP, que passa, em seu processo de fabricação, por uma serra na operação 1, por um torno na operação 2 e finalmente por uma fresadeira, na operação 3. Consideremos ainda um chão de fábrica com 3 serras, 3 tornos, e 2 fresadeiras, com diferentes capacidades de produção. A Tabela 4.1 mostra as possíveis alocações dos recursos disponíveis para a fabricação de COMP. As capacidades de produção de cada um dos recursos são também explicitadas.

Tabela 4.1-Possíveis alocações de recursos nas diversas operações de COMP

	Recurso (capacidade de produção)		
Operação 1	S1 (20peças/h)	S2 (15peças/h)	S3 (5peças/h)
Operação 2	T1 (15peças/h)	T2 (10peças/h)	T3 (10peças/h)
Operação 3	F1 (30peças/h)	F2 (20peças/h)	

De acordo com a Tabela 4.1, a operação de serrar do componente COMP, pode ser realizada em S1, S2 ou S3, com taxas de produção de 20, 15 e 5 peças por hora, respectivamente. A operação de torneamento pode ser realizada em T1, a uma taxa de 15 peças por hora, ou em T2 ou T3, a uma taxa de 10 peças por hora. Assim também a operação de fresar pode acontecer em F1 ou F2, com taxas de processamento de 30 e 20 peças por hora respectivamente. Desta forma, para este exemplo, existem vários possíveis roteiros alternativos de fabricação para COMP: (S1, T1, F1), (S1, T1, F2), (S1, T2, F1), etc.. Dependendo da demanda e do tempo disponível para execução, existe ainda a possibilidade de que uma operação seja realizada em duas ou três máquina paralelas, aumentando em muito o número de escolhas do roteiro a ser seguido. Alguns exemplos de roteiros de produção usando máquinas paralelas são os seguintes: (S1//S2, T1//T2, F1), (S1//S2, T1, F1), (S1//S2, T1//T2, F1//F2), (S1//S2//S3, T1//T2//T3, F1//F2), etc..

Vamos supor que a fábrica deste exemplo use um sistema de gerenciamento que considere capacidade infinita de produção para os recursos fabris. Neste caso, o conceito de roteiro alternativo perderia o sentido. Em muitos sistemas os roteiros alternativos de produção podem até ser cadastrados para os diferentes itens, porém esta informação não é usada para a distribuição de tarefas aos vários possíveis recursos no chão de fábrica. Será sempre assumido que, para cada operação, toda a produção será realizada em apenas um dos recursos produtivos.

Para os sistemas de MRP com capacidade infinita, a alocação das tarefas para a produção de COMP, independentemente da quantidade a ser produzida, será:

primeira operação em S1

segunda operação em T1

terceira operação em F1

Não são atribuídas tarefas aos recursos S2, S3, T2, T3 e F2, independentemente da quantidade a ser produzida já que o MRP assume os recursos S1, T1 e F1 com capacidades infinitas.

Em sistemas reais, com frequência ocorrerão sobrecargas nos equipamentos destinados às operações. Nestas situações cabe ao planejador decidir para cada recurso, quais os itens, e em que quantidades, devem ser executados. Sem dúvida esta não é uma tarefa fácil e sua execução depende de conhecimentos empíricos do chão de fábrica. Cabe lembrar que as tomadas de decisão nestes casos são geralmente freqüentes e em grande quantidade.

Uma possível abordagem para o problema do paralelismo de máquinas está na criação de uma máquina-equivalente que tenha como capacidade produtiva a soma das capacidades individuais das máquinas que trabalham em paralelo numa operação. A Figura 4.2 ilustra esta situação para, por exemplo, o conjunto de serras S1, S2 e S3 considerados no problema.

Na Figura 4.2, o processamento de 30 peças do componente COMP, corresponde a 1,5 horas de trabalho na máquina S1. No caso da execução se dar na máquina S2 o tempo será de 2 horas e na máquina S3 o tempo será de 6 horas. Existe ainda a possibilidade de se usar mais do que uma máquina para a execução do lote, sendo que, dependendo das máquinas escolhidas, teremos diferentes tempos de processamento para o lote total.

Por exemplo, o planejador pode decidir usar as máquinas S1 e S2, atribuindo 20 peças à Máquina S1 e 10 peças à Máquina S2. Neste caso, em 1 hora o lote estará concluído. A decisão pode ser ainda de se processar 20 peças na Máquina S1 e 10 na S3. Neste caso o tempo total de fabricação do lote será de 2 horas, já que a Máquina S1 estará liberada em 1 hora, mas a Máquina S3 necessitará de 2 horas para executar suas 10 peças.

Outra possível escolha é a das máquinas S2 e S3, com inúmeras possibilidades de alocação de quantidade de peças, sendo que cada uma das alocações de peças às máquinas resultará em diferentes tempos de processamento para o lote total.

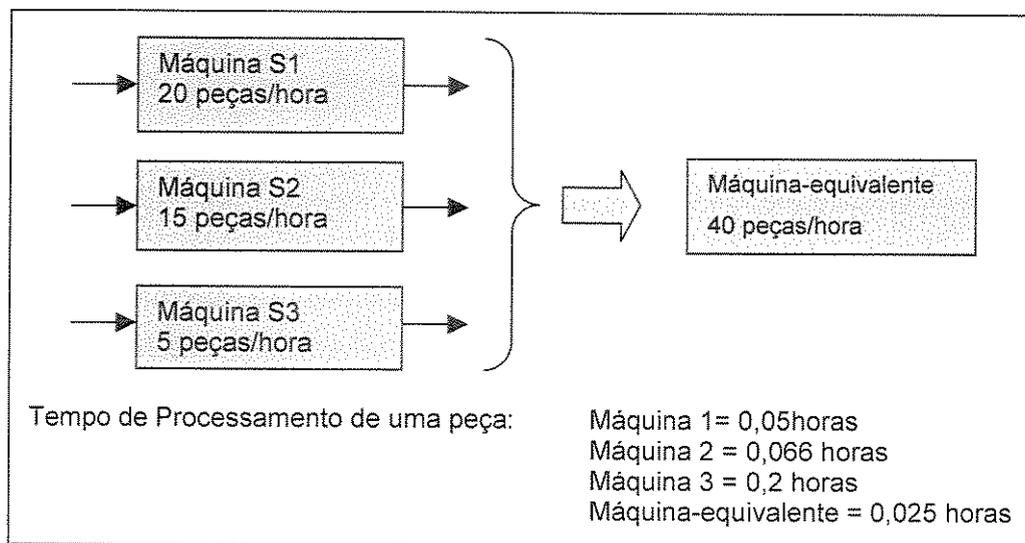


Figura 4.2 - Paralelismo tratado como máquina-equivalente

Podemos considerar ainda que este mesmo lote de 30 peças de COMP seja executado na máquina-equivalente, sendo neste caso necessário apenas 0,75 horas de processamento. Esta abordagem, porém, só é eficiente quando a máquina-equivalente está com carga plena. Nas situações onde pelo menos uma das máquinas que a compõe esteja ociosa, a capacidade da máquina-equivalente estará superestimada, já que, por definição, esta equivale às três máquinas trabalhando em paralelo no mesmo lote de fabricação.

Contudo, na prática, o uso em paralelo de todos os recursos equivalentes para a execução de uma única tarefa pode não ser economicamente atraente, por causa da necessidade de realização de *setups* em várias máquinas para execução de um mesmo lote, principalmente se este for relativamente pequeno.

Como ressaltam Haddad e Carvalho (2002), além do aspecto econômico que pode inviabilizar, ou tornar pouco atraente o uso da máquina-equivalente, existe ainda outro ponto a ser considerado. Em geral os recursos fabris não são dedicados, ou seja, um mesmo recurso é usado no processamento de diferentes componentes. Considerando-se que num chão de fábrica podem circular dezenas, ou mesmo centenas de diferentes ordens de serviço, disputando alguns recursos comuns, com frequência a melhor política será alocar, tanto quanto possível, a cada recurso uma ordem de serviço diferente, possibilitando que várias tarefas tenham andamento em paralelo no chão de fábrica.

Conclui-se, portanto, que o artifício da máquina-equivalente nem sempre é viável, tanto do ponto de vista econômico, devido ao custo dos *setups*, quanto do ponto de vista estratégico, já que a alocação de todos os equipamentos disponíveis para a execução de uma única ordem de serviço pode congestionar o chão de fábrica e atrasar a execução das demais ordens.

Considerando as conseqüências da suposição de capacidade infinita de produção para os recursos no chão de fábrica, chega-se à conclusão que uma ferramenta que leve em conta tanto o paralelismo de máquina, quanto os limites de capacidade produtiva por período, será de ajuda fundamental no gerenciamento do chão de fábrica.

Para suprir esta lacuna na sua funcionalidade, pensou-se na adição de um módulo de programação matemática a um sistema de MRP existente no mercado, no caso o LOGIXTM. Este módulo é capaz de distribuir a produção pelos diversos recursos paralelos, considerando os limites de capacidade de cada um. Além disso, ele enxerga a demanda nos próximos períodos, possibilitando adiantamentos ou atrasos de produção quando se façam necessários, e sempre de forma otimizada.

4.1. Adição do Módulo de Capacitação ao MRP

Os sistemas de MRP possuem dois módulos destinados a analisar a capacidade necessária para que seja cumprido o plano de produção sugerido. Um dos módulos é o *Rough Cut Capacity Planning* – RCCP. Sua finalidade é analisar a disponibilidade de capacidade a partir dos dados do MPS. O outro módulo é o CRP – *Capacity Requirement Planning*, que analisa a carga em cada

um dos centros de trabalho após a explosão dos dados realizada pelo módulo de MRP. O problema com o CRP está no fato que a análise de capacidade é realizada de forma posterior a alocação das tarefas. Primeiro o MRP é executado, para gerar o plano de produção. Depois o CRP é executado, para verificar se o plano é factível. Se não for factível, os requisitos são ajustados pelo planejador e o MRP é executado novamente. Este processo é repetido sucessivamente, até que o planejador consiga ajustar o plano de produção à capacidade disponível (Malik, 2004). Este procedimento torna o processo ineficiente e de difícil solução para sistemas multiitens, que têm que trabalhar com um volume grande de informações.

Uma solução para este problema pode ser a integração de um módulo de capacitação com o MRP. Este módulo tem por finalidade gerar para o chão de fábrica uma seqüência de tarefas compatíveis com as capacidades disponíveis. Isto é feito com o auxílio de um software de Programação Matemática (Carvalho et al., 1999), que analisa as metas mensais estabelecidas por um nível hierárquico superior ao do módulo de MRP, por exemplo o Plano Mestre de Produção, e as decompõe em produções diárias.

A Programação Matemática minimiza os custos de produção e as penalidades por não atendimento à demanda, considerando a capacidade do sistema de produção. As principais decisões envolvem: necessidade de matéria prima, carga de máquina e nível de atendimento à demanda.

O modelo matemático, representado por um problema de Programação Linear é descrito por:

$$\begin{aligned} \text{Min } Z &= c^t x \\ \text{s. a. } Ax &= b \\ 0 &\leq x \leq u \end{aligned}$$

onde: x é o vetor de carga nas máquinas, c^t é o vetor de custos por unidade produzida em cada máquina, A é a matriz de restrições de capacidade, b é o vetor das demandas do sistema e u o vetor das capacidades máximas das máquinas.

A integração entre o software de Programação Matemática e o LOGIXTM possibilita a exploração de características complementares dos dois *softwares*. Por ser um sistema de ERP tradicional, o LOGIXTM apresenta soluções de seqüenciamento que não levam em consideração

os limites de capacidade do chão de fábrica em cada período. O software de programação Matemática, além de considerar os limites de capacidade, faz a coordenação temporal da produção. Por outro lado, tem dificuldade natural na consideração do *setup* e não gerencia estoques de matéria prima e produtos acabados e ordens de compra de material e produção.

Nota-se que a integração dos dois sistemas pode apresentar grande vantagem ao usuário, já que as deficiências de um software são compensadas pelas qualidades do outro, resultando numa abordagem mais completa para o planejador.

4.2. Modelagem do Problema

Os dados presentes na base de dados do ERP e considerados na modelagem do problema são:

tempos de processamento de cada item, por recurso;
roteiro de fabricação;
estrutura do produto;
demandas;
capacidade máxima dos recursos de produção;
capacidade máxima dos recursos de armazenagem.

Com base nestas informações é possível modelar a produção de cada item como fluxo em redes. Prioridades e custos são também considerados na modelagem, que dará como resultado a alocação ótima dos recursos para as demandas em questão.

As capacidades dos recursos compartilhados são consideradas na modelagem de todos os itens, garantindo que as capacidades máximas serão respeitadas.

Como a modelagem considera as estruturas dos produtos e os tempos de processamento em cada etapa da produção, o módulo consegue reconhecer a ocorrência de sobrecarga nos equipamentos, mesmo antes da execução do módulo de MRP.

Com a finalidade de auxiliar a compreensão de como é feita a modelagem do problema, é apresentado a seguir um pequeno exemplo fictício.

Considere a tabela 4.2, que apresenta 2 itens com demanda em dois períodos.

Tabela 4.2 :Exemplo de demanda para dois itens em dois períodos

item	Demandas	
	Período 1	Período 2
F1	200	300
F2	200	500

Suponhamos que F1 e F2 sofram uma única operação em seu processo de fabricação. Suponhamos ainda que estes dois itens disputem dois possíveis recursos. Estes recursos têm disponibilidade de 35 horas nos 2 períodos considerados e as taxas de processamento para os dois itens em questão são mostradas na tabela 4.3.

Tabela 4.3 :Taxas de processamento das máquinas 1 e 2 para os itens F1 e F2

item	Taxa de Processamento peça/hora	
	Máquina 1	Máquina 2
F1	10	11
F2	9	10

Suponhamos ainda que os custos de produção de F1 e F2 sejam 1, que os custos de armazenagem sejam 2. Com base nos dados apresentados, o objetivo deste problema é a minimização dos custos de produção e armazenagem.

Sejam as variáveis:

X_{ijt} = quantidade produzida do produto i na máquina j no período t ;

C_{ijt} = custo de produzir o produto i na máquina j no período t ;

Y_{it} = quantidade do produto i armazenada do período t para o período $t+1$;

D_{it} = custo de armazenar o produto i do período t para o período $t+1$;

S_{ijt} = variáveis de folga para X_{ijt} ;

W_{it} = variáveis de folga para Y_{it} .

O problema pode ser expresso como:

$$\text{Min: } C_{111}X_{111} + C_{121}X_{121} + C_{112}X_{112} + C_{122}X_{122} + C_{211}X_{211} + C_{221}X_{221} + C_{212}X_{212} + C_{222}X_{222} + D_{11}Y_{11} + D_{21}Y_{21}$$

Obedecendo às restrições apresentadas na matriz da figura 4.3

X ₁₁₁	X ₁₂₁	X ₁₁₂	X ₁₂₂	X ₂₁₁	X ₂₂₁	X ₂₁₂	X ₂₂₂	Y ₁₁	Y ₂₁	S ₁₁₁	S ₁₂₁	S ₁₁₂	S ₁₂₂	S ₂₁₁	S ₂₂₁	S ₂₁₂	S ₂₂₂	W ₁₁	W ₁₂	W ₂₁	W ₂₂
1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-1	-1							1													
		-1	-1					-1													-200
				-1	-1				1												-300
						-1	-1		-1												-200
																					-500
1										1											350
	1										1										385
		1										1									350
			1										1								385
				1										1							315
					1										1						350
						1										1					315
							1										1				350
0,10				0,11														1			35
	0,09				0,10														1		35
		0,10				0,11														1	35
			0,09				0,10														35

Figura 4.3 – Matriz de Restrições para o exemplo de Modelagem

Na segunda linha da Figura 4.3, é apresentado o custo de cada variável da primeira linha. Assim, o custo de processamento de qualquer dos dois produtos, em qualquer das duas máquinas, nos dois períodos é 1. O custo de armazenagem para os dois produtos é 2. Os valores apresentados nas quatro últimas linhas da matriz estão em acordo com a Tabela 4.3, ou seja, o tempo necessário à produção de uma peça do produto F1 na máquina 1 é 0,10 horas.

As quatro primeiras linhas do lado direito da figura têm os valores de demanda da Tabela 4.2 e as quatro últimas linhas têm a capacidade máxima, em horas, para as duas máquinas, ou seja, 35 horas por período.

A resolução do problema é apresentada na figura 4.4. A terceira linha mostra as quantidades de cada item a serem produzidas, por período e por máquina. Desta forma, para o produto 1, serão produzidas na máquina 1, no primeiro período as 200 unidades requeridas para o período 1. Para este produto, no segundo período serão produzidas 3 unidades na máquina 1 e 297 unidades na máquina 2, totalizando as 300 unidades necessárias.

O produto 2 deverá ter parte de sua produção adiantada para atender a demanda dos 2 períodos. Das 500 unidades requeridas para o segundo período, 102 serão produzidas no primeiro período, totalizando 302 unidades. A máquina 1 será responsável pela produção de 136 unidades, enquanto que à máquina 2 caberão 166 unidades. No segundo período, a máquina 1 será

responsável pela produção de 315 unidades e a máquina 2 pela produção de 83 unidades do produto 2.

As quatro últimas linhas do lado direita dão a totalização de horas gastas por máquina. A máquina 1 tem alocação de carga total nos dois períodos. A máquina 2, tem alocação de 17 horas no primeiro período e total no segundo. Ou seja, o sistema conta com uma ociosidade de 18 horas no período 1.

X ₁₁₁	X ₁₂₁	X ₁₁₂	X ₁₂₂	X ₂₁₁	X ₂₂₁	X ₂₁₂	X ₂₂₂	Y ₁₁	Y ₂₁	S ₁₁₁	S ₁₂₁	S ₁₁₂	S ₁₂₂	S ₂₁₁	S ₂₂₁	S ₂₁₂	S ₂₂₂	W ₁₁	W ₁₂	W ₂₁	W ₂₂
1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
200	0	3	297	136	166	315	83	0	102	0	0	0	0	0	0	0	0	267	0	0	0
-1	-1							1													-200
		-1	-1					-1													-300
				-1	-1				1												-200
						-1	-1		-1												-500
1										1											200
	1										1										0
		1										1									3
			1										1								297
				1										1							136
					1										1						165
						1										1					315
							1										1				350
0,10				0,11														1			35
	0,09				0,10														1		17
		0,10				0,11														1	35
			0,09				0,10														35

Figura 4.4 – Resolução do Problema

A Tabela 4.4 apresenta uma comparação entre as demandas dos itens e as quantidades a serem produzidas, por período, levando-se em conta os limites de capacidade dos recursos.

Tabela 4.4 : Comparação entre Demandas e Quantidades produzidas

	Período 1			Período 2		
	Demanda	Produção		Demanda	Produção	
		Máquina 1	Máquina 2		Máquina 1	Máquina 2
F1	200	200	0	300	3	297
F2	200	136	166	500	315	83

O valor ótimo da função objetivo é 1403 e será necessária a produção adiantada de 102 peças de F2.

4.3. Estrutura para Integração

Uma possível abordagem para a integração entre os dois sistemas é a adição do módulo de capacitação ao módulo de MRP do LOGIX™. Este módulo, que chamaremos de MRP Capacitado, é executado após o MPS – Programa Mestre de Produção – e fornece como dado de entrada ao MRP uma seqüência factível de tarefas.

A integração pode ocorrer nas formas mostradas na Figura 4.5. Na estrutura da esquerda, o módulo de Capacitação é executado antes do módulo de MRP. Na estrutura da direita este módulo será executado somente quando existir violação de capacidade. Em ambas as estruturas de integração, o objetivo é coordenar a produção no tempo, considerando as restrições de capacidade, estoque interperíodo e disponibilidade de matéria-prima.

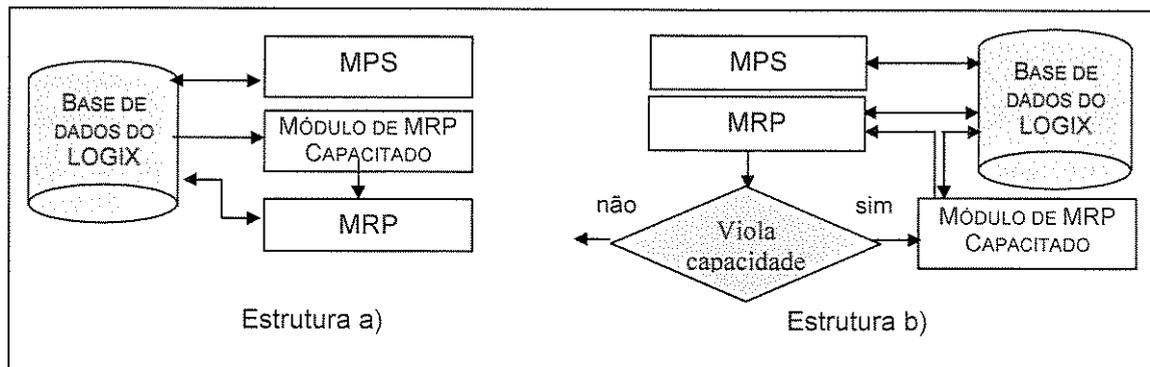


Figura 4.5 - Duas Formas de Estrutura para Capacitação do MRP

Considerando-se que o Módulo de Capacitação tem tempo de execução extremamente rápido, enquanto que o tempo de execução do módulo de MRP é em geral lento e que portanto a execução do módulo de capacitação não será um transtorno, mesmo quando não houver violações de capacidade, decidiu-se pela estrutura da esquerda como forma de integração.

No MRP Capacitado, os itens que dividem o mesmo tempo de preparação de máquinas são agrupados em famílias e somente pontos importantes de produção e montagens de cada linha são representados. Esta agregação evita o processamento maciço de dados e as complexidades computacionais resultantes e tem como objetivo identificar os *trade-offs* e restrições do problema.

A partir dos dados do MRP Capacitado, o MRP recebe as metas estabelecidas pelo módulo de capacitação e as detalha considerando *setup*, desagregando as famílias e os processos e gerando as ordens de produção e de compra, empenhando itens em estoque e cuidando do acompanhamento das tarefas do chão de fábrica. A grande vantagem desta integração é que a solução fornecida pela Programação Matemática é factível ou está muito perto de uma solução factível para o MRP. Assim o plano a ser avaliado pelo MRP estará muito próximo da solução ótima do sistema. A Figura 4.6 mostra a configuração proposta para integração do módulo de capacitação numa estrutura de MRPII.

A Figura 4.7 esquematiza, de forma mais detalhada, a integração proposta na Figura 4.3(a). A Etapa Monta Famílias é um algoritmo desenvolvido com a finalidade de separar em famílias os itens com demanda prevista para o horizonte em estudo. Esta rotina deve ser específica para cada aplicação e voltará a ser tema de estudo na próxima seção. A Etapa Gera Grafos de Entrada tem por objetivo gerar, com base nas famílias estabelecidas pela Etapa Monta Famílias, os parâmetros de entrada para a Etapa de Capacitação.

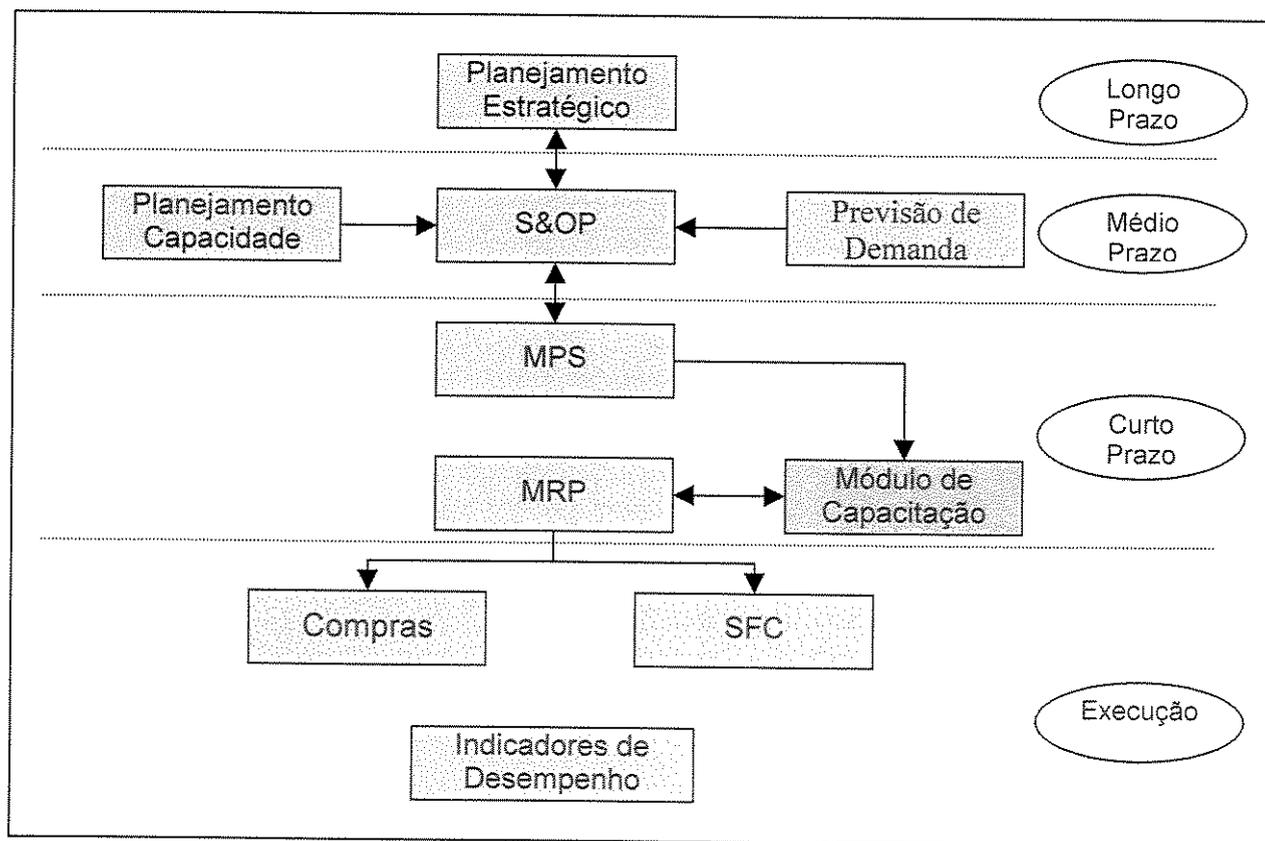


Figura 4.6 - Configuração de um MRPII integrado a um Módulo de Capacitação

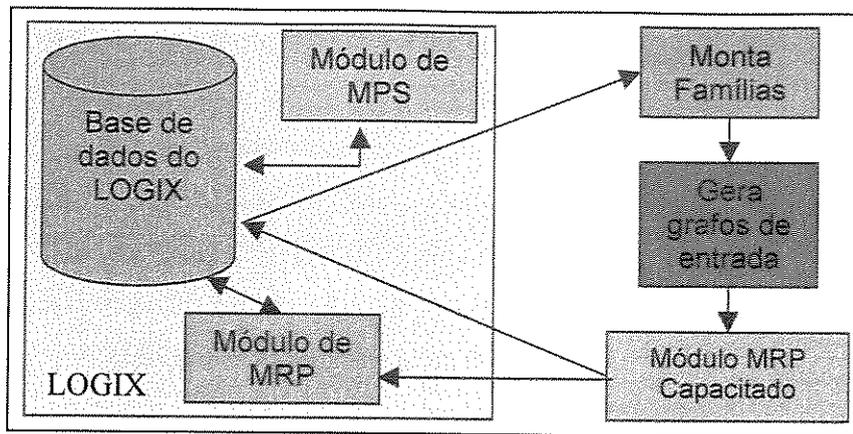


Figura 4.7 - Esquema de integração entre os softwares

4.4. Conclusão do Capítulo 4

Este capítulo mostrou a abordagem adotada pelos pacotes de ERP na consideração da capacidade disponível dos recursos fabris. Propôs a adição de um módulo de otimização a um ERP comercial, a fim de considerar adequadamente as capacidades disponíveis. Foi apresentado um pequeno exemplo com a finalidade de ilustrar como é feita a modelagem do problema.

Foram sugeridas duas configurações para a integração proposta. Na primeira, o módulo de capacitação é sempre executado antes do módulo de MRP. Na segunda, este módulo é solicitado somente quando o módulo de MRP apresenta sobrecarga de algum equipamento. A configuração considerada mais adequada para o estudo de caso realizado foi a primeira, porque o módulo de capacitação tem tempo de execução rápida quando comparado ao módulo de MRP. Na segunda configuração, sempre que houver sobrecarga, o módulo de MRP deve ser executado duas vezes – a primeira quando a sobrecarga é detectada e a segunda, depois do módulo de otimização.

A estratégia adotada foi a de agrupar os diversos itens em famílias, de forma a diminuir a quantidade de dados a ser analisada pelo planejador. Uma vez obtido o seqüenciamento, os itens podem ser desagrupados e o MRP executado como normalmente ocorre, respeitando, porém, as novas datas de processamento e possivelmente compra de matéria-prima.

Este procedimento permite aproveitar as características complementares dos dois enfoques.

Capítulo 5

Estudo de Caso

A integração do Módulo de Capacidade ao ERP envolve três instituições: o CenPRA – Centro de Pesquisas Renato Archer, a LOGOCENTER e uma Empresa usuária do LOGIX™. O CenPRA é um órgão de pesquisa do governo federal sendo a Divisão de Gestão Empresarial voltada para o estudo e solução de problemas relativos à Gestão de Empresas. A LOGOCENTER está entre as quatro maiores *software houses* brasileiras, possui 8 filiais no país, 300 funcionários e mais de 400 clientes. Atua no mercado brasileiro desde 1988 com o LOGIX™, um software de ERP modular e integrado que cobre as áreas industrial, comercial, financeira, de controle, suprimentos, exportação e importação. Uma versão deste pacote foi instalada no CenPRA como parte de uma cooperação entre as duas instituições. A terceira instituição é uma das maiores empresas no setor de autopeças no país. Sendo usuária do LOGIX™, cedeu sua base de dados ao CenPRA para que fosse tomada como plataforma de testes. Esta empresa será nomeada aqui Empresa Piloto

O LOGIX™, assim como qualquer software de ERP, apresenta deficiências e deixa ao planejador a difícil tarefa de, no caso de sobrecarga, decidir quais ordens serão priorizadas, quais serão atrasadas, terceirizadas ou simplesmente não realizadas.

Diferentemente do MRP, que tem como premissa programar ordens de produção para cada item para a data o mais tarde possível, o módulo de MRP Capacitado tem uma visão temporal e espacial do problema, ou seja, ele enxerga a necessidade de produção dentro de um horizonte de planejamento para todos os itens e, havendo sobrecarga num período e ociosidade

em outro, procura adiantar ou atrasar ordens de forma otimizada, tendo como objetivo primeiro garantir o retorno esperado.

A empresa que serviu como modelo para este estudo produz aros, rodas, longarinas, chassis e estampados para a indústria automobilística brasileira, e para exportação. Somente no setor de longarinas, circulam em média 400 itens que passam por diversas etapas em seu processo de fabricação. Pelo fato deste sistema produtivo ser complexo e envolver várias operações em muitos componentes, foi feita a opção de se focalizar o estudo em algum ponto considerado problema no sistema produtivo. Portanto, este estudo de caso extrai parte dos dados fornecidos pela Empresa Piloto para discutir a importância da inclusão de um módulo de capacitação. Foram escolhidos para estudo uma prensa de 5000 toneladas e duas de 3000 toneladas, que trabalham em paralelo e se constituem no gargalo da produção no setor das longarinas. Cada item possui um roteiro de fabricação contendo especificação da prensa onde poderá ser processado. A Figura 5.1 exemplifica o processamento de seis itens nas três prensas. Nota-se que os itens P1, P3 e P4 devem ser processados somente na prensa de 5000 toneladas, enquanto que P2, P5 e P6 podem ser processados em qualquer umas das três prensas.

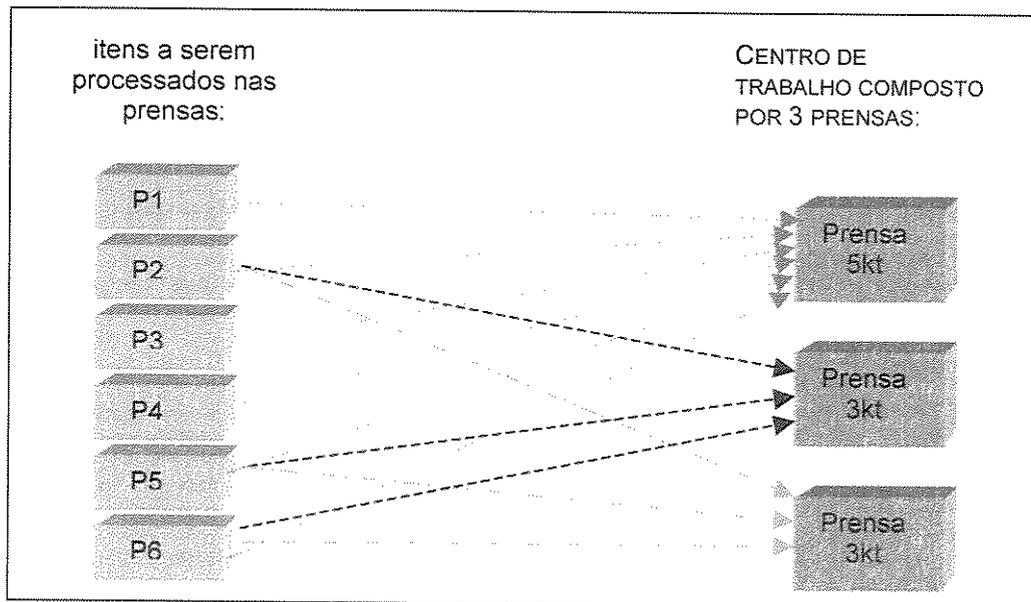


Figura 5.1 - Exemplo processamento de 6 itens nas 3 prensas do centro de trabalho gargalo

Os itens que passam por estas prensas podem sofrer até duas operações, denominadas RF e EF, nos equipamentos. Enquanto o tempo médio de processamento por item para qualquer uma das duas operações é da ordem de 1 minuto, o tempo de *setup* padrão é de 2 horas. Contudo, o tempo de *setup* pode ser grandemente reduzido para determinadas seqüências de processamento. Com a finalidade de explorar esta característica e diminuir assim os elevados tempos de preparação, a Empresa Piloto agrupou os itens em famílias e encontrou empiricamente uma boa seqüência de processamento para itens pertencentes a uma mesma família. Esta agregação evita também o processamento maciço de dados e as conseqüentes complexidades computacionais.

A determinação das famílias de produtos foi norteada pelo ferramental necessário ao processamento nas prensas. Considera-se como itens de uma mesma família aqueles que necessitem de um mesmo subconjunto de blocos na montagem deste ferramental, como exemplifica a Figura 5.2

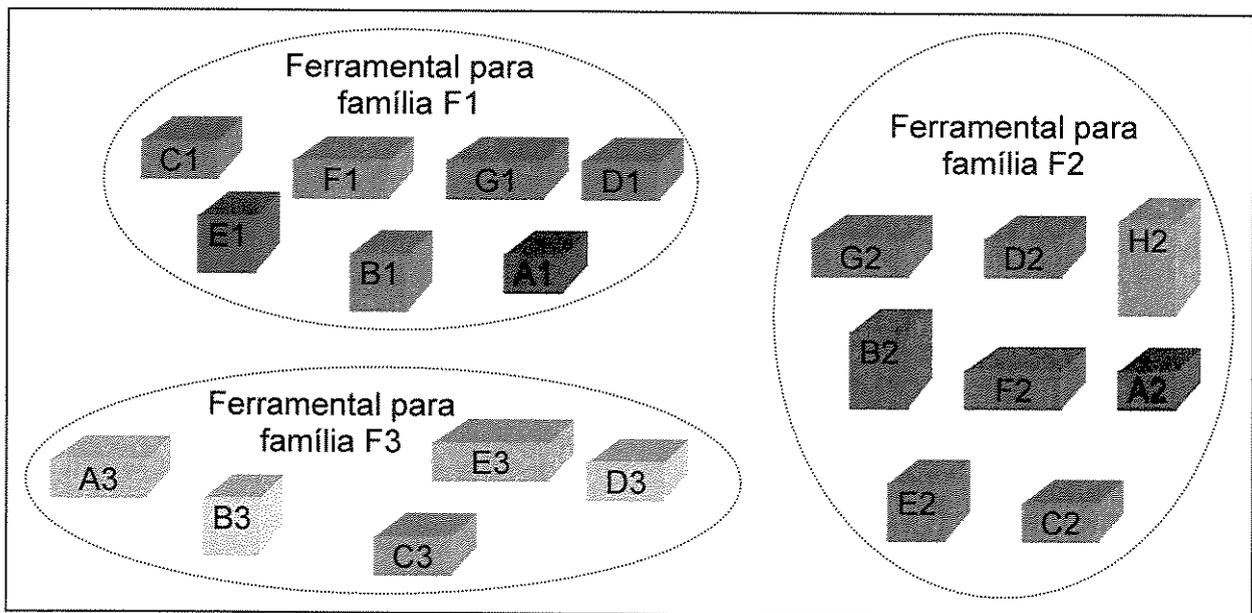


Figura 5.2 – Determinação das Famílias de Produtos, pelo uso do ferramental

Na montagem do ferramental os blocos relativos à família são colocados lado a lado. A quantidade de blocos necessária ao processamento de cada item determina a seqüência de processamento dentro da família, como mostra a Figura 5.3

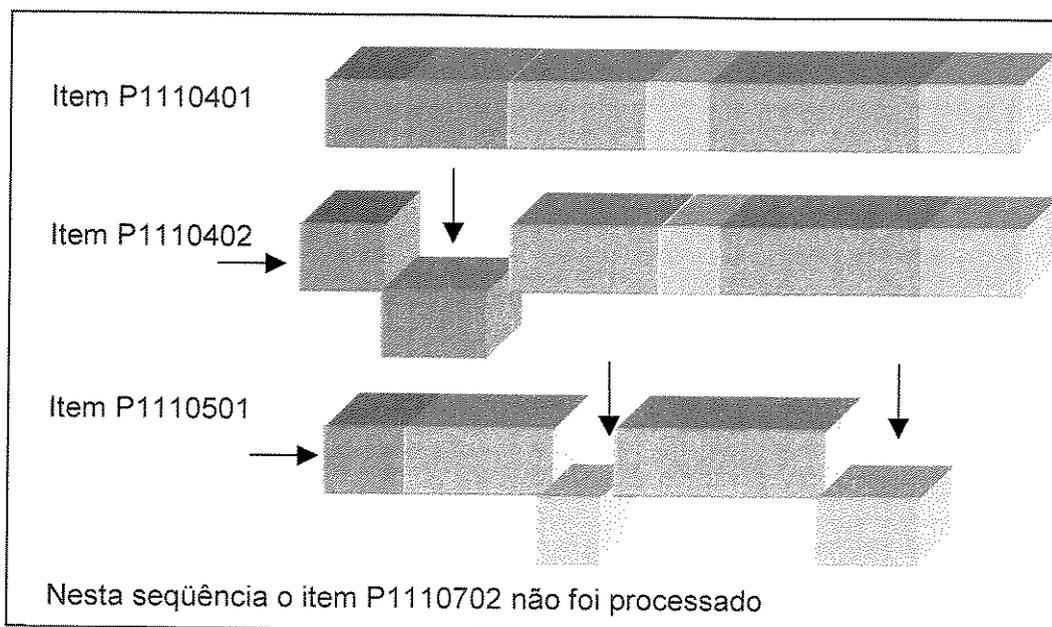


Figura 5.3 - Arranjo da Ferramenta para processamento da família F1

Prepara-se a ferramenta para o item que necessite do maior número de blocos. Quando o processamento deste item é finalizado, retiram-se ou substituem-se alguns dos blocos. Os blocos restantes são empurrados uns de encontro aos outros e o próximo item na seqüência é processado. Ao final de cada operação novas retiradas ou substituições são realizadas. E assim sucessivamente, até que toda a família tenha sido processada. Ou seja, o primeiro item a ser processado, na família, é aquele que necessita do maior número de blocos na montagem do ferramental. O último item da família a ser processado é aquele que necessita do menor número destes blocos na montagem do ferramental. Uma vez que o equipamento é preparado para uma operação, é processado o maior número possível de itens, aproveitando o *setup* realizado.

O gráfico da Figura 5.4 apresenta uma comparação entre tempos de processamento e *setup* para itens que foram seqüenciados de forma aleatória. Nesta situação, enquanto a soma dos tempos de *setup* foi de 52 horas, a soma dos tempos de processamento não atingiu 35 horas.

O gráfico da Figura 5.5 apresenta a comparação entre os tempos de processamento e *setup* para os mesmos itens, no mesmo período da situação anterior, respeitando-se, porém, a seqüência sugerida.

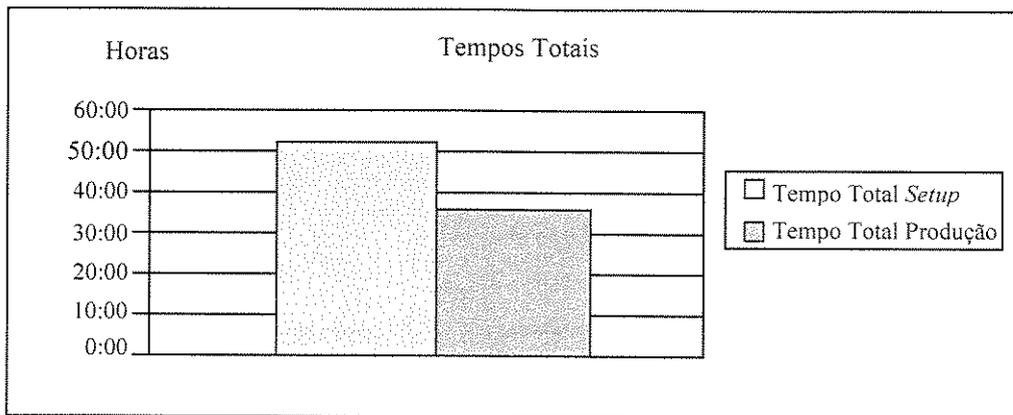


Figura 5.4 -Tempos de produção (34h e 40min) e setup (52 h) numa determinada semana

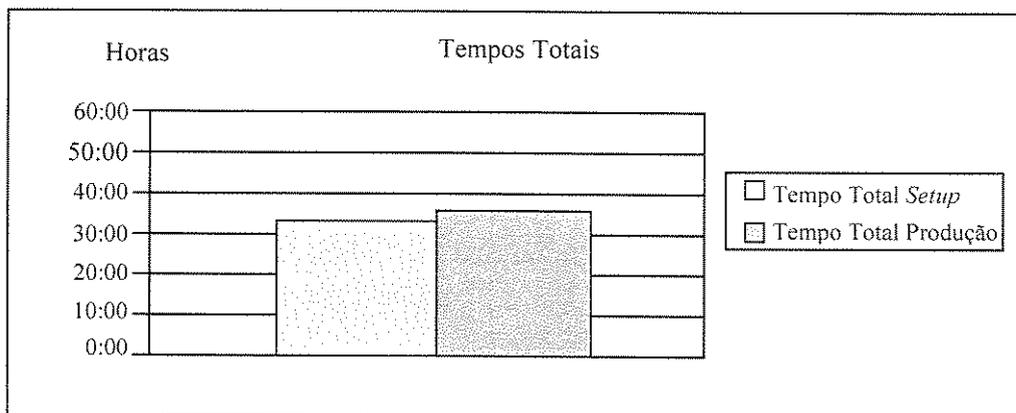


Figura 5.5 -Tempos de produção e setup respeitando-se a seqüência de processamento sugerida

Comparando-se os dois gráficos (Figuras 5.4 e 5.5) fica claro o quanto o tempo de *setup* influencia o tempo total disponível e como este tempo pode ser melhorado. Respeitando-se a seqüência sugerida, a soma dos *setups* é de 33 horas e 50 minutos, ou seja há uma redução de aproximadamente 35% em relação ao tempo de *setup* demandado originalmente

A Figura 5.6 apresenta, para cada item, os tempos de *setup* e processamento, quando a seqüência sugerida para produção é respeitada. Nela identificam-se as famílias de itens pelo tempo de *setup* de alguns elementos. Sabendo-se que o *setup* da família é de 2 h e que os *setups* dentro da família são menores, pede-se determinar o primeiro elemento de cada família. Na

figura, a primeira barra refere-se ao processamento de item com *setup* de família, as três seguintes ao processamento de itens com *setups* menores. Desta forma a primeira família processada é representada pelas quatro primeiras barras. A quinta barra representa o início de uma nova família composta por quatro itens. Ou seja, a segunda família é representada pela quinta, sexta, sétima e oitava barras. Os itens 15, 16, 17 e 18 representam processamento de famílias com itens únicos.

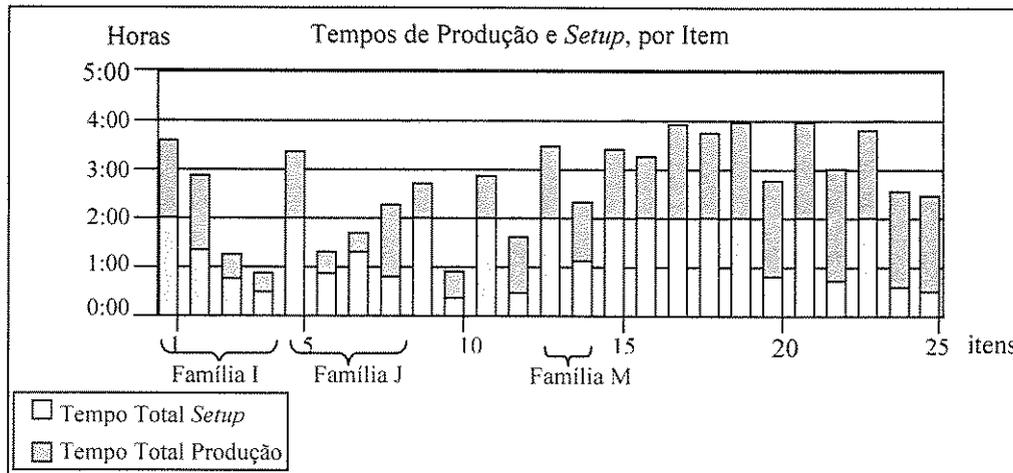


Figura 5.6 - Comparação entre tempos de processamento e setup, por item.

As informações referentes às famílias de produtos e às seqüências sugeridas para processamento dos itens de cada família foram armazenadas em três tabelas (Tabela 5.1, 5.2 e 5.3) pela Empresa Piloto. Estas tabelas, como já foi dito, foram obtidas empiricamente e são de uso corrente na Empresa. Seu conteúdo é explicado a seguir.

A Tabela 5.1 mostra um exemplo de sugestão de seqüência de processamento de itens para duas famílias em cada uma das operações na prensa, assim como os possíveis equipamentos onde estas operações podem ser realizadas. A seqüência de processamento deve ser respeitada, mesmo que nem todos os itens estejam programados para produção. Se por exemplo o item P1110401 da Família F1 estiver programado para produção, deverá ser processado antes de todos os demais da mesma família, tanto na operação RF, quanto na operação EF. Já o item P1110501 ocupa a sexta posição na seqüência de processamento da operação RF e a terceira posição na operação EF.

Tabela 5.1-Sequência sugerida para processamento da família

Item	Família	Seq. na Família	Op.	Padrão (peças/h)	Prensa
P1110401	F1	1	RF	100	PR00/PR20
P1110402	F1	4	RF	100	PR00/PR20
P1110702	F1	5	RF	100	PR00/PR20
P1110501	F1	6	RF	100	PR00/PR20
P1110401	F1	1	EF	150	PR00/PR20
P1110501	F1	3	EF	150	PR00/PR20
P1110702	F1	4	EF	150	PR00/PR20
P1110402	F1	5	EF	150	PR00/PR20
P2117001	F2	1	RF	90	PR00/PR20
P2117002	F2	2	RF	90	PR00/PR20
P2117001	F2	1	EF	90	PR00/PR20
P2117002	F2	18	EF	90	PR00/PR20

A Tabela 5.2 estabelece os tempos de *setup* entre itens, dentro de uma mesma operação. Somente estão cadastrados itens da mesma família. Quando existe a mudança de família ou operação o tempo de *setup* considerado é de duas horas.

Tabela 5.2-Tempos de troca entre itens.

	Família	Op.	Item atual	Próximo item	Tempo troca (h:min)
1	F1	RF	P1110401	P1110501	00:10
2	F1	RF	P1110401	P1110702	01:30
3	F1	RF	P1110401	P1110402	01:30
4	F1	RF	P1110402	P1110401	01:30
5	F1	RF	P1110402	P1110702	00:40
6	F1	RF	P1110402	P1110501	01:00
7	F1	RF	P1110501	P1110401	00:40
:	:	:	:	:	:
23	F1	EF	P1110401	P1110501	00:40
24	F1	EF	P1110402	P1110401	00:20
1	F2	RF	P2117001	P2117002	00:01
2	F2	EF	P2117001	P2117002	01:00

Onde: Item atual - Item cuja configuração está na prensa.

Próximo item - Próxima configuração da prensa.

Tempo troca - Tempo gasto para trocar a configuração do item atual para o próximo item

Nas tabelas apresentadas neste trabalho, os tempos de *setup* e processamento têm a seguinte representação: (h:min), onde h refere-se à quantidade de horas e min à quantidade de minutos necessários à operação.

A Tabela 5.3 contém um exemplo de demanda dos itens a serem produzidos em quatro períodos de uma semana com as respectivas quantidades.

Tabela 5.3-Demanda de itens por período.

Item	02 a 06/09 (peças)	09 a 13/09 (peças)	16 a 20/09 (peças)	23 a 30/09 (peças)
P2117902			139	
P2118001			139	
P1110301		304		
P1110302		322		
P1110401	120			
P1110402	120			
P1110501	26			
P1110702	26			
P2117001				83
P2117002				83

Como no presente caso o tempo de *setup* deve ser levado em consideração, por ser bastante relevante em relação aos tempos de processamento e como a Programação Linear Inteira mostra-se inviável devido ao elevado número de variáveis presentes na modelagem do problema, foi adotada a abordagem sugerida por Haddad e Carvalho (2005-b) de considerar os tempos de *setup* incluídos nos tempos de processamento das famílias. Para tanto, foi desenvolvido para a Empresa em questão, a Etapa Monta Famílias (Figura 4.5), tomando como base as três tabelas fornecidas pela empresa (Tabelas 5.1, 5.2 e 5.3). Esta Etapa calcula os tempos de produção e *setup* para cada família com demanda no período e cria novas famílias com demanda unitária. Estas novas famílias são portanto subconjuntos das famílias originais. O tempo de processamento da família resultante é a soma dos tempos de processamento de cada item com demanda em cada uma das duas operações que acontecem na prensa (RF e EF) acrescidos dos tempos de *setup*. A família é então tratada pelo MRP Capacitado como um único item. Isto garante que todos os itens da família sejam processados juntos e que a seqüência sugerida para processamento dentro de uma família seja respeitada.

Exemplificando:

Sejam $T1(i)$ e $S1(i)$ respectivamente os tempos de processamento e *setup* de um item i na operação RF da prensa. Sejam $T2(i)$ e $S2(i)$ respectivamente os tempos de processamento e *setup* para a operação EF. Então, o tempo consumido na prensa para a fabricação de M itens de i será:

$$T(i) = S1(i) + S2(i) + M*(T1(i) + T2(i)),$$

Logo, o tempo de processamento da família será:

$$\Sigma T(i),$$

para i igual a itens da família com demanda no período.

A Tabela 5.4 mostra este procedimento para duas famílias sendo que a primeira – F1- tem três itens com demanda num determinado período (P1110401, P1110402, P1110702). A segunda família – F2 - tem, para este período, dois itens com demanda (P2117001, P2117002). Os itens de F1 necessitam de processamento nas duas operações (RF e EF). Os itens de F2 necessitam de processamento só na operação RF.

A primeira coluna da tabela é destinada às famílias cadastradas na Empresa. A segunda coluna refere-se aos itens da família que têm demanda no período em questão. A terceira coluna explicita os tempos de *setup*. O tempo de *setup* entre as duas operações ou entre famílias é de 2 horas. O tempo de *setup* do primeiro para o segundo item da família F1 é de 1 hora e 30 minutos e do segundo para o terceiro item é de 40 minutos. Quando passamos para a operação EF na família F1, o *setup* é outra vez de 2 horas. Da mesma forma o tempo de *setup* do primeiro para o segundo item da família F2 é de 1 minuto. Na quarta coluna estão as demandas de cada item. A quinta coluna apresenta a totalização do tempo necessário ao processamento da demanda no período – são necessários 30 minutos para o processamento na operação RF de 50 itens P1110401. O processamento dos mesmos 50 itens na operação EF requer 25 minutos. A sexta coluna tem as novas famílias criadas pela Etapa Monta Famílias. A sétima coluna apresenta a demanda destas novas famílias – sempre unitária – e a oitava coluna mostra o tempo de processamento desta nova família como a soma dos tempos de *setup* e processamento de cada um dos itens nas duas operações de prensa. Para F1A o tempo de processamento será: 2h + 1h30 + 40 min + 2h + 1h10 + 15 min + 30 min + 40 min + 45 min + 25 min + 40 min + 40 min = 11h15.

Tabela 5.4-Exemplo do procedimento de criação de famílias na Etapa Monta Famílias

Família	Item	Setup (h:min)	Demanda (peças)	T.proc (h:min)	Nova Família	Nova Dem (peça)	T.proc+Setup (h:min)
F1 (RF)	P1110401	2:00	50	0:30	F1A	1	11:15
	P1110402	1:30	80	0:40			
	P1110702	0:40	80	0:45			
F1 (EF)	P1110401	2:00	50	0:25	F1A	1	11:15
	P1110702	1:10	80	0:40			
	P1110402	0:15	80	0:40			
F2 (RF)	P2117001	2:00	70	0:50	F2A	1	3:51
	P2117002	0:01	85	1:00			

A abordagem sugerida acima permite que os elevados tempos de *setup* sejam considerados por um modelo de Programação Linear, evitando o uso de Programação Linear Inteira, inviável devido às restrições com relação ao tempo de processamento e número de variáveis a ser considerado.

5.1. Aplicação do Módulo de Capacitação

Para a realização dos testes de integração foi utilizada uma Base de Dados fornecida pela Empresa Piloto. Esta Base de dados é composta por aproximadamente 400 itens, subdivididos em 40 famílias. Como os dados da Empresa constituíam-se em produções passadas e portanto factíveis, as demandas foram aumentadas, a fim de se criar a necessidade de coordenação temporal da produção, quando analisadas pelo software de Programação Matemática. A execução do MRP LOGIXTM com as demandas aumentadas mostrou a necessidade de mais que 100% de utilização do recurso gargalo em alguns períodos, para que o programa de produção fosse cumprido. Uma simulação para três períodos é mostrada nos gráficos da Figura 5.7.

A Figura 5.7, dividida em três partes, considera a alocação de carga nas três prensas, em três períodos consecutivos. A carga máxima de cada equipamento é de 115 horas por período. O gráfico da parte a) mostra a situação de carga da prensa PR00. No gráfico da parte b) está representada a situação da prensa PR10 e, finalmente o gráfico da parte c) refere-se à carga da prensa PR20. Como pode ser observado, a prensa PR00 apresenta 102,317 horas de sobrecarga no período 2 e ociosidade nos períodos 1 e 3. As outras duas prensas apresentam ociosidade nos três períodos, sendo que PR20 não tem trabalho alocado para o primeiro período.

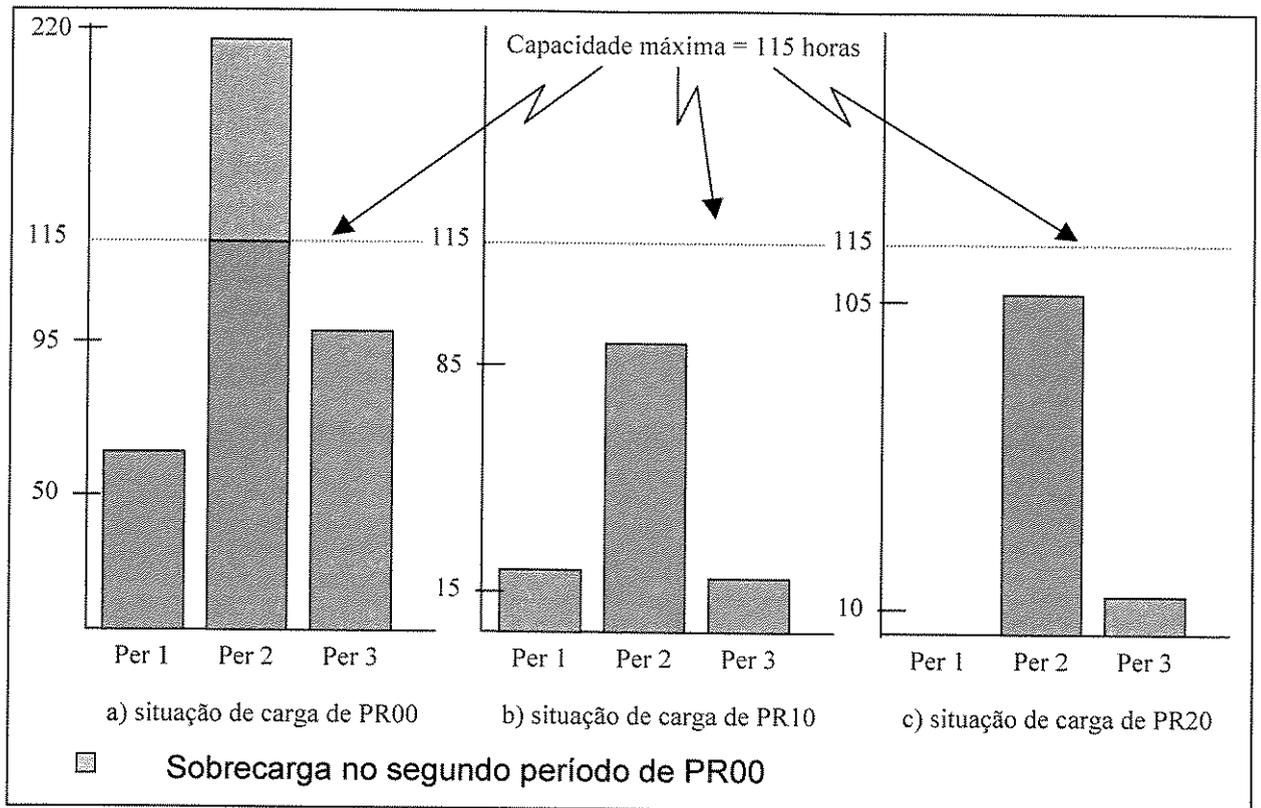


Figura 5.7 – Simulação de carga nas prensas, para três períodos

Com a finalidade de demonstrar a viabilidade da integração entre os dois sistemas, a abordagem adotada durante a fase de testes, foi a da execução de cada um dos *softwares* independentemente do outro. Para tanto foi necessária a extração dos dados relevantes da base de dados do LOGIXTM. Estes dados, juntamente com aqueles das tabelas EXCELTM fornecidas pela Empresa dão subsídios para que o MRP Capacitado gere uma seqüência de processamento ótima.

Os primeiros testes de seqüenciamento ótimo foram feitos em planilha EXCELTM com auxílio da ferramenta solver. Estas ferramentas são encontradas em empresas de diversos tamanhos e são suficientes na resolução de problemas bem pequenos (até 250 variáveis).

Para problemas maiores, pode-se usar a ferramenta Solver, desenvolvida pela Frontline Systems Inc, que pode ser adquirida por aproximadamente US\$1500,00.

Pelo fato do problema estudado ser de porte maior que o suportado pelo EXCELTM, e devido ao fato de existir disponível no CenPRA um software de programação linear para

problemas com restrições adicionais e outro para a resolução de grafos, decidiu-se pela utilização dos mesmos e pelo desenvolvimento de uma interface denominada TRADUZ. Esta interface considera especificamente as características da Empresa Piloto e sua funcionalidade é mostrada na Figura 5.8.

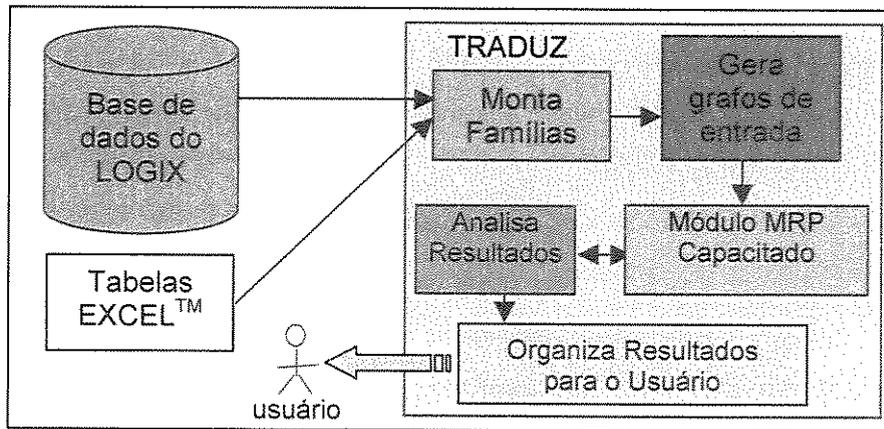


Figura 5.8 – Funcionalidade do Programa TRADUZ

O Programa TRADUZ foi desenvolvido em duas versões. Em cada uma das versões o programa possui sete etapas, sendo que a funcionalidade de cinco delas é idêntica. A diferença aparece nas Etapas Gera Grafos de Entrada e MRP Capacitado.

As sete Etapas são descritos a seguir, nas duas versões desenvolvidas. Dados técnicos relativos a cada uma delas estão detalhados no Apêndice A.

5.1.1 Recupera dados das Tabelas EXCEL™

A primeira etapa tem a função de buscar informações das famílias de produtos nas tabelas EXCEL™ desenvolvidas pela Empresa Piloto. Estas informações referem-se a seqüências de processamento dos itens de cada família e tempos de *setup* para família, operação e itens e encontram-se armazenadas à parte porque o LOGIX™, como em geral todos os ERP's, não comporta informações personalizadas das empresas.

5.1.2 Recupera dados da Base de dados do LOGIX™

A segunda função desta interface é buscar na base de dados do ERP as informações referentes a tempos de processamento em cada uma das duas possíveis operações nas prensas, bem como as informações sobre as prensas, em ordem de prioridade para processamento dos itens. É gerada uma tabela chamada DEMANDA.TXT com o nome do item, a quantidade e o período de produção. Este arquivo contém também o número de períodos a ser considerado na otimização.

5.1.3 Monta as famílias de Produtos

A terceira função do TRADUZ é executar o procedimento Monta Famílias mostrado na Figura 5.8. Com base nas informações obtidas a partir da Base de Dados e das Tabelas EXCEL™ fornecidas pela Empresa Piloto, é criada uma nova tabela, chamada LOGIXDAT, onde estão contidas as novas famílias de produtos, montadas a partir do procedimento descrito na Tabela 5.4. Esta tabela LOGIXDAT é o resultado do procedimento Monta Famílias e deve ser gerada a cada nova execução do sistema. Isto ocorre porque as chamadas novas famílias são válidas somente para o período estudado, já que consideram somente itens com demanda nesse período, em quantidades específicas e com tempos de *setup* dependentes da seqüência dos itens processados. Os dados contidos na Tabela LOGIXDAT são: nova família, com demanda igual a 1, a somatória dos tempos de *setup*, a somatória dos tempos de processamento e a prensa onde prioritariamente deve ocorrer o processamento. A Tabela LOGIXDAT contém, desta forma, as informações necessárias à otimização. Cada item a ser considerado no MRP Capacitado é na verdade uma família de produtos, cujo tempo de processamento é o resultado da soma dos tempos de *setup* e processamento de todos os itens da família, com demanda no período considerado.

5.1.4 Gera Grafos de Entrada

A função Gera Grafos de Entrada tem como finalidade tratar os dados para que possam ser entendidos pelo software de otimização. Esta função foi desenvolvida em duas versões.

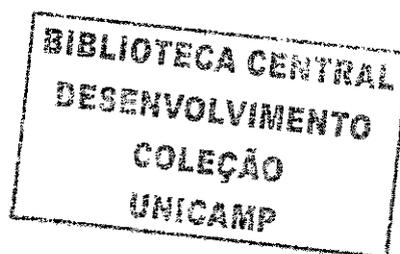
5.1.4.1 Gera Grafos de Entrada – Problema modelado com Restrições adicionais

Na primeira versão desta etapa, o problema é tratado considerando-se as restrições adicionais de produção. Restrições de armazenagem não são importantes no problema estudado, mas poderiam ser consideradas, sem prejuízo da modelagem. Não existe limitação no número de períodos de planejamento analisado. A Etapa Gera Grafos de Entrada prepara os dados para a Etapa de programação linear, que resolverá o problema de fluxo em redes com restrições conjuntas de produção.

5.1.4.2 Gera Grafos de Entrada – Problema modelado como Grafo

É sabido de longa data que o tempo de resolução de um problema com restrições adicionais é da ordem de 150 a 200 vezes superior ao tempo necessário para a resolução de um problema equivalente de grafo (Glover e Klingman, 1981 apud Glover e Klingman). Considerando-se este fato, foi desenvolvida a segunda versão do TRADUZ. Esta versão foi inspirada na abordagem de Zahorik et al. (1984) e teve como finalidade a melhoria de eficiência nos tempos computacionais para problemas com maior porte.

Uma extensão do trabalho de Zahorik et al. (1984), é apresentada no Capítulo 3. Nesta abordagem problemas com restrições adicionais são transformados em problemas de fluxos em redes simples, desde que sejam respeitadas algumas condições. Como no caso estudado as restrições conjuntas de armazenagem não são importantes, optou-se pela modelagem do problema sem a consideração deste tipo de restrição e sem a consideração de ordens em atraso. As restrições conjuntas de produção são consideradas em todos os períodos. Respeitando-se estas premissas é possível, através de operações básicas na matriz de incidência nó-arco, chegar-se a uma estrutura de grafos. Portanto, nesta segunda versão, a Etapa Gera Grafos de Entrada, transforma a matriz original do problema num grafo e a seguir prepara os dados para a execução da quinta Etapa, que é um software de otimização.



5.1.5 Otimização

A quinta Etapa do TRADUZ é a execução do MRP Capacitado. Baseando-se em procedimentos matemáticos esta etapa fornece como resultado o seqüenciamento ótimo das famílias de itens, respeitando prioridades e limites de capacidade dos recursos e datas de entrega dos pedidos. Existem duas possibilidades para o software a ser executado nesta etapa.

5.1.5.1 Programação Linear com Restrições Adicionais

O software de otimização que considera a existência de restrições adicionais utilizado na interface TRADUZ foi desenvolvido no CenPRA. Outros *softwares* poderiam ser usados. A escolha deste deve-se a questões de ordem prática e econômica.

5.1.5.2 Grafos

Na segunda versão o software utilizado também está disponível no CenPRA e resolve problemas de Grafos. Assim como na primeira versão, outros *softwares* poderiam ser usados.

5.1.6 Analisa Resultados

Na sexta Etapa é analisada a necessidade de ser executada novamente a Etapa de otimização. Quando uma prensa prioritária não tem capacidade suficiente para o processamento de toda a família, o lote pode ser alocado para produção em mais do que um equipamento. Esta é uma situação que deve ser evitada, já que existe apenas um ferramental, que portanto não pode ser montado em duas prensas simultaneamente. Quando esta situação ocorre, a prioridade das prensas no processamento da família é invertida e a etapa de otimização é executado novamente.

5.1.7 Apresenta Resultados

A seguir é executada a sétima Etapa do TRADUZ. Os dados fornecidos pelo software de otimização são interpretados e colocados de forma amigável para o usuário. O resultado de todo o processo é fornecido na forma de tabelas. Um exemplo deste resultado está nas Tabelas 5.5, 5.6 e 5.7. Os três resultados são, na verdade, apresentados numa única tabela EXCELTM.

Obedecendo a abordagem adotada na fase de testes, que prevê execução em separado dos dois *softwares*, os resultados obtidos pela Etapa de otimização foram levados novamente ao LOGIXTM. O ERP especificou então novas datas para as ordens de serviço. Nesta nova situação as restrições de capacidade das prensas foram respeitadas, como mostram os gráficos da Figura 5.9, que considera a mesma situação de demanda apresentada nos gráficos da Figura 5.7 depois de ter sido executado a Etapa de otimização. Nota-se que para respeitar as capacidades máximas dos recursos algumas demandas foram antecipadas – PR00 teve parte de sua produção adiantada para o primeiro período e parte realocada para PR20 e a prensa PR20 teve parte da produção do segundo período adiantada para o primeiro.

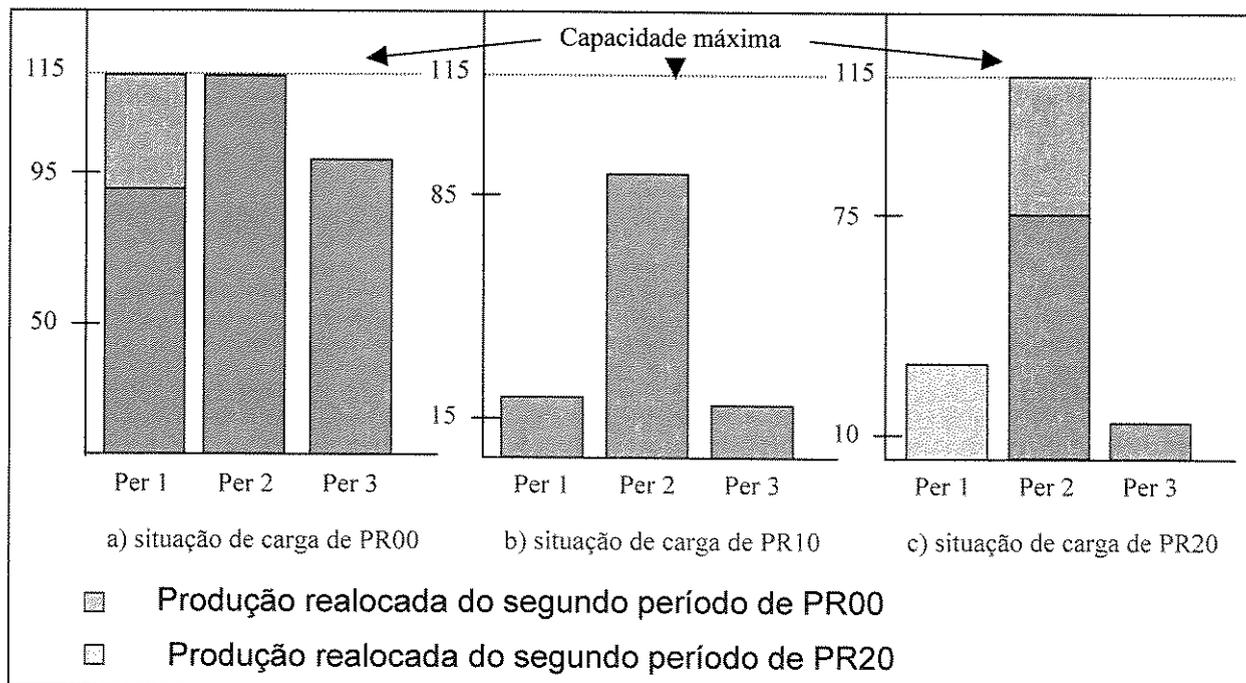


Figura 5.9 – Situação da Figura 5.7 depois da otimização

É importante observar que mesmo com as demandas aumentadas em 50%, o sistema teve condições de acomodar a produção dos itens nos recursos gargalo. Nota-se que é possível aumentar em muito a capacidade produtiva deste sistema, através de um gerenciamento adequado das capacidades já implantadas no chão de fábrica.

Um extrato dos resultados obtidos numa simulação é apresentado nas Tabelas 5.5, 5.6 e 5.7. O extrato considera somente 27 famílias, com produção prevista para três períodos. Cada família apresentada nestas tabelas tem demanda igual a 1 e tempo de processamento como exemplificado na Tabela 5.4. A operação gargalo analisada é a da prensa, onde existem 3 equipamentos (PR00, PR10 e PR20), sendo que cada um dos três equipamentos tem capacidade de 115h semanais. Cada família possui especificação de quais equipamentos podem ser usados para processamento.

Detalhes técnicos para execução do módulo TRADUZ estão apresentados no Apêndice.

A coluna 2 da Tabela 5.5 apresenta a alocação sugerida pelo MPS para a produção de três períodos distintos. As seis primeiras linhas referem-se às famílias programadas para produção no primeiro período. As onze seguintes às famílias programadas para produção no segundo período. As dez últimas às famílias com programação para o terceiro período. As colunas **Prensa** apresentam a alocação das famílias às prensas. Assim a família F3A deve ser processada na Prensa PR00 tanto no período 1 quanto no período 3. Esta escolha segue padrão de prioridade indicado pelo planejador. As colunas 3, 5 e 7 indicam a porcentagem de demanda de cada família a ser processada nos períodos. Assim a demanda da família F6A, previamente alocada pelo MPS para processamento no segundo período, terá 32% da produção adiantada para o primeiro período. A coluna 9 é reservada para não atendimento à demanda nos períodos considerados. As famílias F20A e F12A também tiveram uma antecipação de parte da produção para o primeiro período.

Tabela 5.5-Cenário estudado – porcentagens das famílias processadas em cada período

Família	Período Pro.	Período 1	Prensa	Período 2	Prensa	Período 3	Prensa	Não At.
F1A	1	1	PR00					
F3A	1	1	PR00					
F5A	1	1	PR00					
F4A	1	1	PR00					
F9A	1	1	PR10					
F10A	1	1	PR00					
F7A	2			1	PR00			
F6A	2	0,32	PR00	0,68	PR20			
F13A	2			1	PR10			
F15A	2			1	PR00			
F2A	2			1	PR00			
F8A	2			1	PR00			
F20A	2	0,52	PR20	0,48	PR20			
F25A	2			1	PR10			
F11A	2			1	PR00			
F12A	2	0,78	PR00	0,22	PR00			
F28A	2			1	PR20			
F19A	3					1	PR00	
F14A	3					1	PR00	
F3A	3					1	PR00	
F18A	3					1	PR10	
F17A	3					1	PR20	
F26A	3					1	PR00	
F16A	3					1	PR00	
F30A	3					1	PR00	
F27A	3					1	PR10	
F29A	3					1	PR00	

A Tabela 5.6 apresenta os mesmos resultados da Tabela 5.5, explicitando porém nas colunas 3, 5 e 7 os tempos necessários ao processamento de cada família, por período, em cada uma das possíveis prensas. No caso da família F6A, os 32% da produção adiantada para o primeiro período, equivalem a 18,55 horas de processamento na prensa PR00. Para as famílias F20A e F12A, os adiantamentos equivalem a 30,55 horas na prensa PR20 e 44,217 horas na prensa PR00, respectivamente.

No caso de não haver capacidade suficiente para o processamento de uma família num único equipamento, são usadas regras heurísticas que invertem a prioridade de processamento nas prensas. Podem ocorrer casos onde não exista capacidade suficiente para a produção de uma família em nenhum dos equipamentos. No caso do item F6A, programado para o segundo

período, o equipamento prioritário é a prensa PR00. No entanto neste período esta prensa não tem capacidade para produzir todo o lote. A segunda prensa prioritária é a PR20, que no segundo período tem disponível capacidade para somente 68% do lote. O software sugere então a antecipação da produção dos 32% restantes do lote para o primeiro período, utilizando-se a prensa prioritária PR00.

Tabela 5.6-Cenário estudado – tempo de processamento para cada família, por período

Família	Período Pro.	Período 1	Prensa	Período 2	Prensa	Período 3	Prensa	Não At.
F1A	1	14,633	PR00					
F3A	1	5,733	PR00					
F5A	1	13,6	PR00					
F4A	1	8,933	PR00					
F9A	1	16,267	PR10					
F10A	1	9,333	PR00					
F7A	2			20,533	PR00			
F6A	2	18,55	PR00	39,55	PR20			
F13A	2			47,4	PR10			
F15A	2			24	PR00			
F2A	2			13,65	PR00			
F8A	2			9,967	PR00			
F20A	2	30,55	PR20	28,25	PR20			
F25A	2			40,7	PR10			
F11A	2			34,5	PR00			
F12A	2	44,217	PR00	12,35	PR00			
F28A	2			47,2	PR20			
F19A	3					18,3	PR00	
F14A	3					12,167	PR00	
F3A	3					8,517	PR00	
F18A	3					6,1	PR10	
F17A	3					11,133	PR20	
F26A	3					21,7	PR00	
F16A	3					5,433	PR00	
F30A	3					10,067	PR00	
F27A	3					10,033	PR10	
F29A	3					17,033	PR00	

A Tabela 5.7 apresenta a totalização de horas usadas em cada uma das prensas nos 3 períodos considerados.

Tabela 5.7-Cenário estudado- Totalização de horas alocadas, por prensa

Prensa	Σ Tempos período 1	Σ Tempos período 2	Σ Tempos período 3
PR00	114,999	115	93,217
PR10	16,267	88,1	16,133
PR20	30,55	115	11,133

Com base nas três tabelas apresentadas como resultado da simulação, o planejador tem subsídios para decidir qual a melhor política para a produção. No caso da família F6A, por exemplo, o sistema sugeriu o adiantamento de parte da produção para o primeiro período e num equipamento diferente daquele sugerido para o segundo período (PR00 no primeiro período e PR20 no segundo período). Como esta abordagem implicará num novo *setup* de família, que é de 2 horas, talvez seja mais interessante a fabricação de todo o lote no primeiro período, na prensa PR20, já que este equipamento está sobrecarregado no segundo período, mas conta com ociosidade no primeiro. Esta é, porém, uma decisão do planejador, já que a produção adiantada de toda a família envolve custos de armazenagem e compra antecipada de material.

5.2. Comparação entre as duas abordagens para as Etapas Gera Grafos de Entrada e MRP Capacitado

O exemplo apresentado foi rodado para 40 famílias, distribuídas ao longo de 4 períodos. O equipamento usado foi um Pentium II com 64 MB RAM em plataforma Microsoft Windows 98.

As duas Etapas de otimização foram codificados em linguagem C.

O tempo de execução da Etapa de otimização para a versão com restrições adicionais, para este exemplo foi 600 ms. O tempo de execução da Etapa de otimização para a versão transformada em grafo foi de 440 ms.

Nos testes realizados, os tempos de execução da modelagem com restrições adicionais mostraram-se sempre maiores que os tempos de execução da modelagem dos problemas transformados em grafo. No caso da resolução com restrições adicionais os tempos variaram entre 600 e 880 ms. Para os mesmos problemas transformados em grafo os tempos variaram entre 410 e 550 ms. Ou seja, a resolução por grafos apresentou uma redução de mais que 30% no tempo de processamento.

Além de apresentar tempos de execução menores, a resolução do problema por grafos requer um menor número de pivoteamentos na matriz, o que leva a menores erros de arredondamento quando comparado a versão com restrições adicionais.

A representação por fluxo em redes para cada item do problema modelado como restrições adicionais é mostrado na Figura 5.10.

A parte a) da figura representa 4 períodos para 2 itens que só podem ser processados numa única máquina. Os itens Prod1 e Prod2 disputam o recurso PR10. Na parte b) está a representação de dois itens que podem ser processados em duas máquinas. Prod3 e Prod4 disputam as prensas PR00 e PR20.

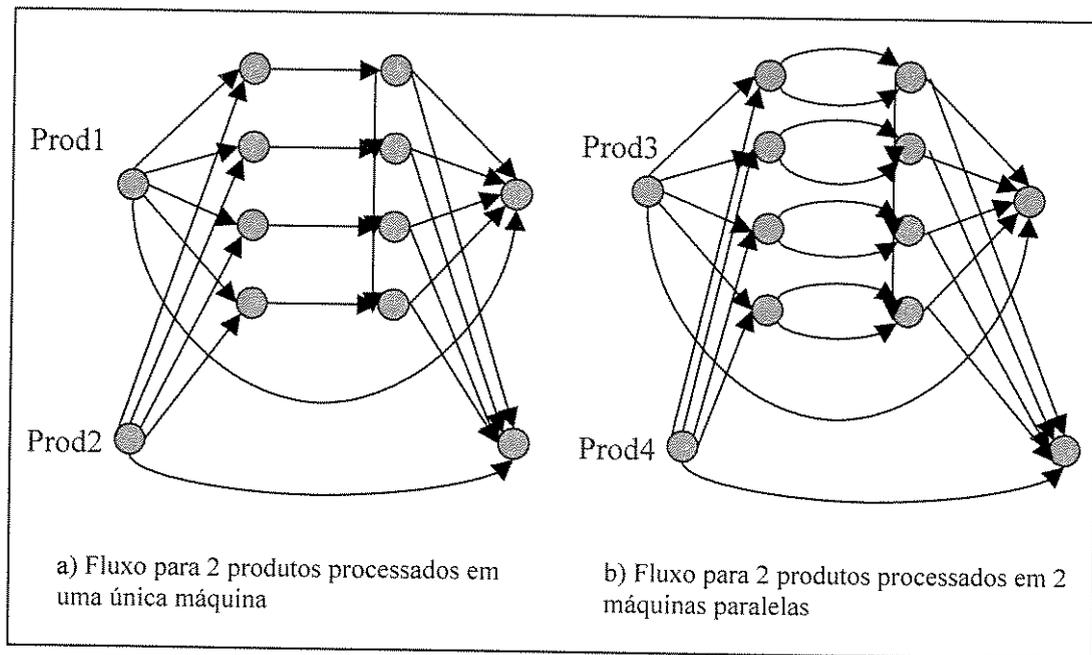


Figura 5.10 – Representação por fluxo em redes para modelagem com restrições adicionais

Para o problema transformado num grafo, a representação por fluxo em redes é como o apresentado na Figura 5.11 A parte a) da figura representa os itens que disputam 2 recursos. Prod1, Prod2 e Prod3 disputam as prensas PR00 e PR20. A parte b) da figura representa a modelagem daqueles itens que disputam um único recurso. Prod4, Prod5 e Prod6 disputam a prensa PR10.

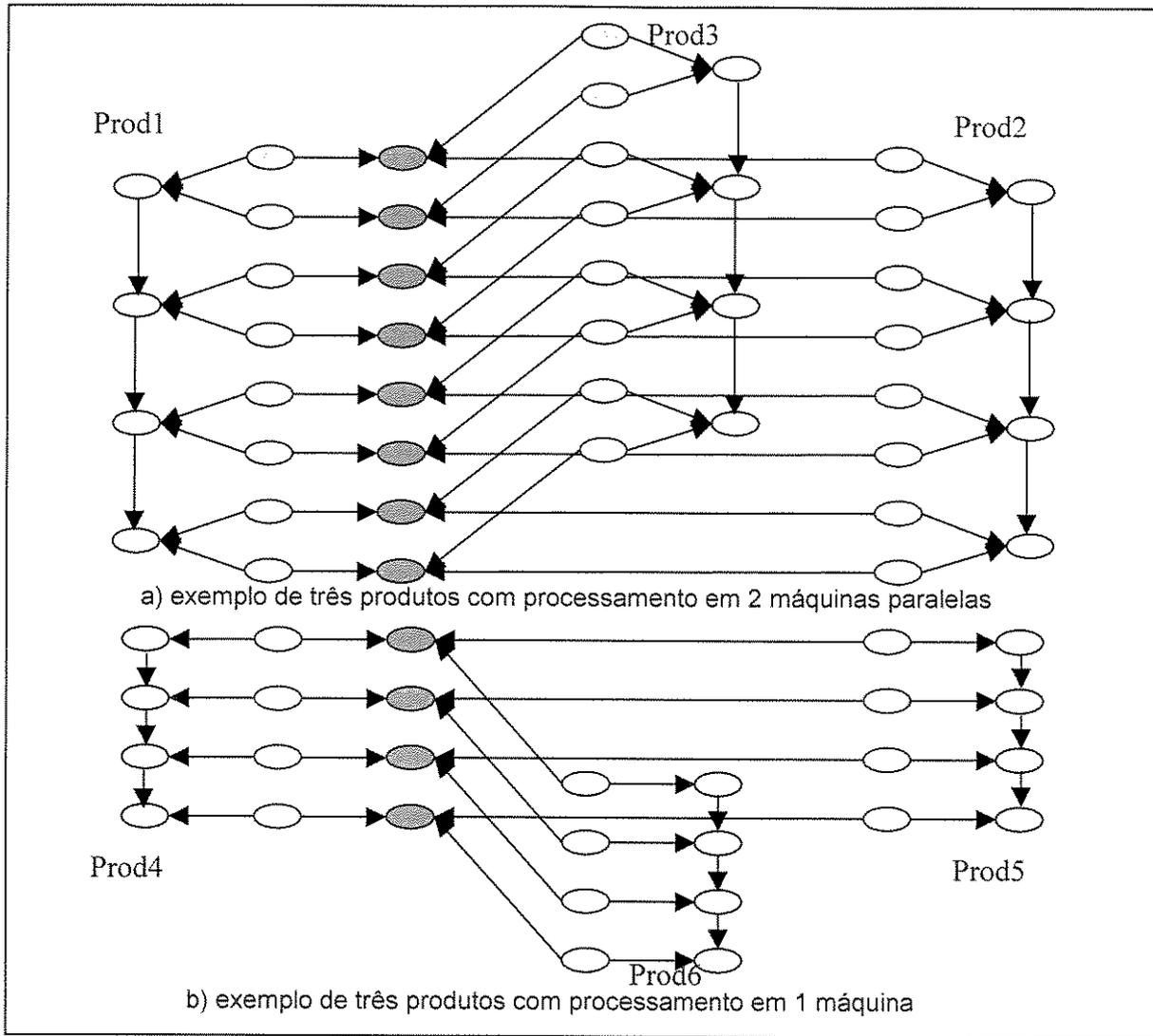


Figura 5.11 – Representação por fluxo em redes para o problema transformado em grafo

5.3. Conclusão do Capítulo 5

Este capítulo apresentou uma aplicação da integração proposta no capítulo 4. Os dados utilizados foram coletados numa empresa do setor de autopeças sendo, portanto, dados reais. Além dos dados coletados no sistema ERP, foram considerados também os dados referentes às heurísticas obtidas empiricamente e em uso na Empresa.

Os dados do ERP utilizados na Etapa de capacitação são os de processo de fabricação – roteiros de fabricação e tempos de *setup* e processamento- e capacidade total de processamento dos recursos, em horas. Os dados empíricos, fornecidos em tabelas EXCELTM, referem-se às famílias de produtos com os respectivos tempos de *setup* e seqüência de processamento. As demandas dos itens por período também foram fornecidas em tabelas EXCELTM.

Optou-se pela modelagem de um recurso considerado gargalo – as prensas. O centro de trabalho conta com três prensas, sendo duas de três mil toneladas e uma de cinco mil toneladas.

Pelo fato dos dados fornecidos para estudo serem produções passadas e portanto factíveis, houve a necessidade de aumentar a demanda de alguns itens, a fim de forçar sobrecarga nos recursos a serem modelados.

O problema de seqüenciamento foi resolvido usando-se duas versões de algoritmo:
algoritmo para resolução de fluxos em rede com restrições adicionais;
algoritmo para resolução de fluxos em rede.

Nos dois casos foi necessário o desenvolvimento de interfaces que tratassem tanto os dados de entrada para o software de otimização quanto os de saída para o planejador. No segundo caso foi necessário também a realização de operações nas linhas da matriz do problema com restrições adicionais de forma a transformá-la num grafo.

Os resultados, com relação à distribuição de fluxo, fornecidos pelos dois algoritmos foram iguais, apresentando sugestões de adiantamentos ou atrasos de ordens nos períodos sobrecarregados.

No que se refere aos tempos de processamento para os testes realizados, a versão da modelagem transformada em grafos mostrou-se sempre vantajosa em relação à modelagem com restrições adicionais.

Quanto à confiabilidade dos valores apresentados na solução, o problema resolvido por grafos pode ser considerado melhor, dado que a resolução do problema requer um menor número de pivotamentos na matriz, implicando em menores erros de arredondamento.

Capítulo 6

Conclusões

Os problemas da produção são complexos, necessitando a utilização de diferentes enfoques para auxiliar o planejador na busca diária de soluções que atendam às disponibilidades de recursos, aos interesses da empresa e às necessidades dos clientes. Este trabalho, reconhecendo a complexidade de um problema real, procurou associar uma prática corrente numa empresa (ERP), com a programação Linear (PL), e experiências do planejador expressas em heurísticas, no sentido da geração de soluções satisfatórias de programação da produção. A grande vantagem desta abordagem está no fato de que auxilia o planejador nas tomadas de decisão sem causar os transtornos que mudanças radicais de procedimentos em geral ocasionam nas empresas.

Através dela acrescenta-se uma funcionalidade à Etapa de Manufatura, aproveitando as vantagens dos sistemas ERP, sem alterar os procedimentos vigentes. As Ordens de Serviço, Pedidos de Compra, Liberações de Estoque assim como todas as rotinas do chão de fábrica continuam a acontecer da forma usual. A base de dados utilizada pela Programação Matemática é a mesma utilizada pelo ERP, impedindo duplicidades e inconsistências. As interfaces do sistema continuam praticamente as mesmas, apenas acrescidas de uma nova função, o que evita os transtornos de uma nova instalação.

O conhecimento obtido empiricamente é aproveitado e passa a ser utilizado pelo sistema, eliminando procedimentos paralelos e officiosos, tão comuns nos chão de fábrica. Desta forma o conhecimento do planejador passa a ser levado em consideração na modelagem do problema.

A consideração de cada família de produtos como um único item permitiu a representação do problema como um modelo de Programação Linear, com resolução em tempo razoável, sem deixar de levar em conta os tempos de *setup*, tão relevantes no caso estudado. Esta abordagem garante ainda o processamento de toda a família em conjunto, coisa que certamente não ocorreria caso cada item fosse considerado separadamente de sua família.

A aplicação deste conjunto de enfoques agregados em um único ambiente, em um sistema real de produção mostrou que esta abordagem pode ajudar no balanceamento da utilização dos recursos ao longo do tempo, deslocando a produção dos períodos sobrecarregados para períodos com disponibilidade de recursos, procurando a otimização da utilização dos recursos de produção e evitando o uso de horas extras e terceirizações de pedidos, sem perder as vantagens que um sistema de ERP pode oferecer. O ambiente permite ainda a geração de diferentes cenários, possibilitando ao planejador um planejamento com relação às manutenções preventivas e aquisição de equipamentos. Prioridades de processamento de lotes podem ser também consideradas.

Embora o resultado oferecido pela Programação Matemática não seja necessariamente o ótimo, já que os cálculos baseiam-se em valores de *setup* estimados, portanto sujeitos a desvios quando implementados, será um valor próximo deste. A modelagem dos recursos críticos fornece ao planejador subsídios para um planejamento factível e visualização da carga de máquina em tantos períodos quantos julgue necessários.

Embora no presente trabalho a integração da programação matemática tenha sido proposta para o ERP LOGIX™ da LOGOCENTER, nada impede que o mesmo procedimento seja executado com qualquer outro ERP existente no mercado. A Etapa de otimização é um software autônomo, que pode ser alimentado por qualquer base de dados, bastando para isso que seja desenvolvida a interface de leitura de dados da nova base.

No caso de modelagem de problemas pequenos – até 250 variáveis, o problema do seqüenciamento ótimo pode ser resolvido através do SOLVER, ferramenta existente nas planilhas EXCEL™, recurso disponível na maioria das empresas, independentemente do porte da mesma.

Outra possibilidade de solução está no uso do SOLVER EXTENDIDO, ferramenta desenvolvida pela Frontline Systems Inc, que pode ser adquirida por aproximadamente US\$1500,00. A vantagem desta abordagem reside no fato da modelagem do problema ser relativamente amigável, já que os dados são inseridos em forma de matriz. É também possível que esta ferramenta seja conhecida pelo usuário, dado que encontra-se disponível para problemas pequenos nas planilhas EXCELTM.

Contudo, quando os problemas a serem resolvidos crescem de dimensão, a visualização dos dados através de matrizes deixa de ser confortável. Nesta situação *softwares* tradicionais para a resolução de problemas de Programação linear parecem ser mais adequados. Torna-se então necessária a utilização de interfaces que gerem automaticamente os dados de entrada para o problema considerado.

Neste trabalho foram testadas duas possibilidades de algoritmo para a resolução de problemas de fluxo em redes. A primeira possibilidade considerou a modelagem do problema com restrições adicionais e utilizou um software desenvolvido no CenPRA.

A segunda possibilidade teve como inspiração e ponto de partida a abordagem sugerida por Zahorik et al. (1984). Segundo esta abordagem, é possível, através de operações nas linhas da matriz, transformar um problema de fluxo em redes com restrições adicionais em um problema de fluxo em redes simples, desde que o horizonte de planejamento seja de, no máximo, três períodos. Os autores assumem ainda a não existência de ordens em atraso.

Na abordagem proposta neste trabalho, o horizonte de planejamento pode ter tantos períodos quanto se queira, desde que seja deixado um intervalo de pelo menos um período a cada três, sem a consideração de restrições conjuntas de armazenagem. As restrições conjuntas de produção podem ser consideradas em todos os períodos, sem prejuízo na transformação da matriz original em um grafo. No caso de taxas de produção constantes, ordens em atraso podem também ser consideradas.

A resolução do problema permite uma visão abrangente do comportamento da produção, mesmo com a restrição conjunta de armazenagem relaxada a cada três períodos. Pode-se verificar a necessidade de armazenagem nos períodos onde estas restrições são relaxadas, somando-se as

armazenagens individuais dos itens. Se o recurso de armazenagem estiver sobrecarregado significa que ele é importante na solução do problema. Caso a soma das utilizações seja menor que a capacidade máxima de armazenagem, a solução encontrada é a ótima.

A vantagem desta abordagem, que trabalha com o problema transformado, em relação a abordagem que resolve diretamente o problema original, está na eficiência da resolução do método, que é, segundo a literatura, mais rápido em 150 a 200 vezes (Glover e Klingman, 1981 apud Glover e Klingman). Embora a diferença entre os tempos de execução dos dois algoritmos seja, no caso estudado, da ordem de milissegundos, pode-se deduzir que para outras situações, a abordagem sugerida por Zahorik et al. (1984) poderá trazer eficiência na resolução do problema.

Outra vantagem da abordagem citada diz respeito aos valores fornecidos na solução, como valor ótimo da Função Objetivo e quantidades a serem executadas nas máquinas, por período. A solução apresentada pelo problema modelado como grafo simples é resultado de um menor número de pivoteamentos na matriz, em relação ao número requerido na resolução do problema com restrições adicionais. Isto implica um menor número de arredondamentos e, portanto uma solução de melhor qualidade.

Os testes para aplicação do modelo foram realizados com as demandas reais aumentadas em 50%. Mesmo nesta situação o sistema conseguiu acomodar a produção dos itens nos recursos gargalo. Fica evidente que um sistema de seqüenciamento de lotes pode aumentar em muito a utilização da capacidade produtiva instalada no chão de fábrica, através do gerenciamento adequado dos recursos, ao longo do tempo.

Este trabalho mostra que a adição do módulo de capacitação a um ERP comercial é viável e atende às necessidades de uma empresa que serviu como base de testes para este estudo.

Propostas de trabalhos futuros

Os testes foram efetuados para um único recurso considerado gargalo. Outras modelagens, mais abrangentes podem ser tentadas, inclusive com a incorporação de possíveis heurísticas praticadas no chão da fábrica, como ocorreu no caso das prensas.

Outros softwares de fluxo em redes podem ser testados.

Propõe-se ainda a utilização de outras abordagens, como as heurísticas para resolução de programação matemática, tão abundantes na literatura.

A integração entre o software de Programação Matemática e o ERP LOGIX™ não foi efetuada. Um trabalho a ser realizado é a inclusão do módulo de otimização no ERP.

Outros ERP's podem ser testados e as interfaces entre estes softwares e os de Programação Matemática podem ser desenvolvidas de forma a apresentar os dados de forma mais amigável.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- APICS American Production and Inventory Control Society Dictionary– Sétima Edição; 1992.
- Benton W. C. e Shin H.; “Manufacturing Planning and Control: The Evolution of MRP and JIT Integration”; *European Journal of Operational Research*; vol 9; n110; pp411-440; 1998.
- Bermudez, J.; “Advanced Planning and Scheduling – Is It as Good as It Sounds?”
(<http://www.eoptimization.com/resources/uploads/APS%20update%201998.pdf>). Acesso em 08/2000.
- Berretta, R; Rodrigues, L. F. “A Memetic Algorithm for a Multistage Capacitated Lot-Sizing Problem”; *International Journal of Production Economics*; n87; pp67-81; 2004. (a) Bitran, G. R.; Haas, E. A.; Hax, A. C.; “Hierarchical Production Planning: A Single Stage System”; *Operations Research* vol. 29; n4; pp717-743; Março 1981.
- b) Bitran, G. R.; Haas, E. A.; Hax, A. C.; “Hierarchical Production Planning: A Two Stage System”; *Operations Research*; vol. 30; n2; pp232-251; Setembro 1981.
- Caravilla, M. A.; Souza, J. P.; “Hierarchical Production Planning in a Make to Order Company: A Case Study”; *European Journal of Operational Research*; n86; pp43-56; 1995.
- Carvalho, M.F.H.; Fernandes, C.A.O; Ferreira, P.A.V; "Multiproduct Multistage Production Scheduling (MMPS) for Manufacturing Systems"; *Production Planning & Control*; vol. 10; n7; pp671-681; 1999.

- Carvalho, M.F.; O.S. Silva Filho e C. A. O. Fernandes; “O Planejamento da manufatura – Práticas Industriais e Métodos de Otimização” Revista Gestão e Produção; Maio 1998.
- Carvalho, M.F.; O.S. Silva Filho; “Two-Stage Strategic Manufacturing Planning System: a Practical View”; Twelfth Interaction conference on CAD/CAM Robotics and Factories of the Future; pp574 -580; 1996.
- Clark, A., R.; “Optimization Aproximations for Capacity Constrained Material Requirements Planning”; International Journal of Production Economics; n 84; pp115 – 131; 2003.
- Clark, A. R. e Armentano, V. A.; “A Heuristic for a Resource Capacitated Multi-Stage Lot-Sizing Problem with Lead Times”; Operational Resaerch Society; n 46; pp1208-1222; 1995.
- Corrêa, H. L.; e Gianesi, I. G. N.; “Just in Time, MRPII e OPT – Um Enfoque Estratégico”; Editora Atlas; S.P; Segunda Edição; ISBN 85-224-1058-5; 1994.
- Dauzère-Perez, S.; Lasserre, J-B.; “On the Importance of Sequencing Decisions in Production Planning and Scheduling” ; International Transactions in Operational Research; n 9; pp779-793; 2002.
- Fox, K.A.; "MRP-II Providing a Natural Hub for Computer Integrated Manufacturing System" Industrial Engineering; pp44-50; 1984.
- Gibson, P.; G. Greenhalgh G.; Kerr, R.; “Manufacturing Management – Principles and Concepts” Chapman & Hall; ISBN 0-41237370-X; cap. 6; pp149-157; 1995.
- Gilman, A. R.; “Advanced Finite Capacity Planning and Scheduling – Theoretical vs. Practical” (<http://www.waterloo-software.com/compare.html>); Acesso em 02/2003.
- Glover, F. e Klingman, D.; “The Simplex Son Algorithm for LP/Embedded Network Problems” ; Mathematical Programming Study; n15; pp148-176; 1981.
- Goldratt, E.; Cox, J. ;“A Meta – Um Processo de Melhoria Contínua”; Segunda Edição; Editora Nobel; 2002.

- Graves, S. C.; “A Review of Production Scheduling”; Operations Research; vol. 29; n4; pp646-675; 1991.
- Gupta, D.; Magnusson, T.; “The Capacitated Lot-sizing and scheduling problem with sequence dependent setup costs and setup times”; Computers & Operations Research; vol. 32; n4; pp727-747; Abril 2005.
- Haddad, R. B. B.; Carvalho, M. F. H. ; Rocha, R. B.; “Integração entre ERP e Programação Matemática – Um Estudo de Caso na Indústria de Autopeças”; Revista Produção on Line; vol. 4; n1; ISSN 1676-1901; Fevereiro 2004.
- Haddad, R. B. B.; Carvalho, M. F. H. ; “Complementaridade entre Programação Matemática e ERP”; Congresso Brasileiro de Automática; Natal; pp245-250; 2002.
- a)Haddad, R. B. B.; Carvalho, M. F. H.; Bera. H.; ”Shop Floor Capacity Evaluation ”; Artigo a ser apresentado no Congresso CARS & FOF 2005; Polônia; 2005.
- b)Haddad, R. B. B.; Carvalho, M. F. H.; “Capacitating ERP Through Mathematical Programming – A Case Study”; Artigo submetido à revista Intenational Journal of Manufacturing Technology and Management; 2005.
- a)Hindi, K. S.; “Efficient Solution of the Single Item, Capacitated Lot-sizing Problem with start-up and Reservation Costs”; Journal of the Operational Research Society; n46; pp1223-1236; 1995.
- b)Hindi, K. S. ; “Algorithms for Capacitated, Multi-Item Lot-Sizing Without Setups”; Journal of the Operational Research Society; n46; pp465-472; 1995.
- Hung, Y-F; Chen; C-P; Shih; C-C e Hung, M-H; “Using Tabu Search with Ranking Candidate Liste to Solve Production Planning Problems with Setup”; Computers & Industrial Engineers; vol 45; n4; pp615-634; Dezembro 2003.
- Karimi, B.; Fatemi Ghomi, S. M. T.; Wilson, J. M.; “The Capacitated Lot Size Problem: A Review of Models and Algorithms”; OMEGA: The International Journal of Management Science; vol. 31; n5; pp365-378; Outubro 2003.

- Kennington, J.; “Algorithms for Networking Programming”; John Wiley & Sons; pp166- 171; 1980.
- Lachtermacher, G. ;“Pesquisa Operacional na Tomada de Decisões”; Editora Campus; pp253-265; 2002.
- Lasserre, J. B.; Mercé, C.; “Robust Hierarchical Production Planning Under Uncertainty”; Annals of Operations Research; n26; pp73– 87; 1990.
- Laurindo, F. J. B.; Mesquita, M. A. ;“ Material Requirements Planning: 25 Anos de História – Uma Revisão do Passado e Prospecção do Futuro”; Revista Gestão e Produção; vol. 7; n3; pp320 - 337; Dezembro 2000.
- Malik, T.K.: “MRP Based Scheduling vs. Finite Capacity Scheduling”; White Paper: (<http://www.supplychain.com>); Acesso em 07/ 2004
- Mendes, J. V. ; Escrivão Filho, E. ; “Sistemas Integrados de Gestão ERP em Pequenas Empresas: Um confronto entre o Referencial Teórico e a Prática Industrial”; Revista Gestão e Produção; vol. 9; n3; pp277-296; Dezembro 2002.
- Mercé, C.; Fontan, G.; “MIP-Based Heuristics for Capacitated Lot-sizing Problems”; International Journal of Production Economics; n85; pp97-111; 2003
- Monks, J. G.; “A Administração da Produção”; Schaum McGraw-Hill; 1987.
- Özdamar, L.; Bozyel, M. A.; Birbil, S. I.; “A Hierarchical Decision Support System for Production Planning (with case study)”; European Journal of Operational Research; n104; pp403-422; 1996.
- Padilha, T., C., C.; Marins, F., A., S.; ”Sistemas ERP: Características, Custos e Tendências”;vol. 15; n.1; pp102-113; Janeiro - Abril 2005.
- Pine II, J.,B.; “Mass Customization – The New Frontier in Business Competition”; Harvard Business School Press; Boston; Massachus; pp5-6; 1993.

Plossl, G. W. “Orlicky’s Material Requirements Planning”; Segunda Edição; McGraw-Hill Inc; cap. 1; pp5 – 10; 1995.

a)Shobrys, D. E. ; “The Gap between APS and MRP Systems” ; White Paper
(<http://www.supplychain.com>); Acesso 07/2004.

b)Shobrys, D. E. ; “The History of APS”; White paper (<http://www.supplychain.com>); Acesso 07/2004.

Singh, H.; “ERP and Planning Systems – Facts and Fallacies”; White paper
(<http://www.supplychain.com>); Acesso 07/2004.

Sohner,V; Schneeweiss, C.; “Hierarchically Integrated Lot Size Optimization” ; European Journal of Operational Research; n86; pp73-90; 1995.

VISOPT – Intelligent Solutions ; (http://www.visopt.com/Articles/art_aps.html); Acesso em 02/2003.

Watson, E. E.; Schneider, H.; “Using ERP Systems in Education” – Communications of the Association for Information Systems; vol. 1; Artigo 9; Fevereiro 1999 ;
(<http://cais.aisnet.org/articles/1-9/default.asp?View=html&x=75&y=9>); Acesso em 04/2004

Zahorik, A.; Thomas, L. J. ; Trigeiro, W. W. ; “Network Programming Models for Production Scheduling in Multi-Stage, Multi-Item Capacitated Systems”; Management Science; vol. 30; n3; pp308-325; Março 1984.

Apêndice A

Dados Técnicos sobre o Programa TRADUZ

O programa TRADUZ foi desenvolvido especialmente para os testes de integração do ERP LOGIX™ com o software de Capacitação de Chão de Fábrica. Neste sentido, este programa gera tabelas a partir de dados extraídos da Base de Dados do LOGIX™ e das tabelas EXCEL™ fornecidas pela Empresa Piloto.

Na situação ideal, com o software de Otimização integrado ao ERP, os procedimentos do TRADUZ serão executados automaticamente e de forma completamente transparente ao usuário.

A Etapa Monta Famílias, explicitado na Figura 5.8, tem serventia somente para a Empresa Piloto, por ter sido desenvolvido levando em conta situações particulares e específicas da Empresa em questão, ou seja, produção seriada, com *setups* relevantes e dependentes da seqüência. Para montar as famílias, a etapa baseia-se nas tabelas EXCEL™ fornecidas pela Empresa Piloto e geradas a partir de heurísticas obtidas empiricamente no chão de fábrica.

A seguir são explicados dados técnicos relativos aos arquivos de entrada, intermediários e de saída, necessários para, ou gerados na execução desta rotina. Recomenda-se que os arquivos sejam abertos em programa de tabelas (EXCEL™), por exemplo, com o caracter “;” como delimitador.

A.1. Arquivos de Entrada, necessários à execução da rotina TRADUZ

Alguns arquivos devem estar presentes no diretório de trabalho quando a rotina TRADUZ for executada. São eles:

Principa.exe
Cfg.txt
Familia.txt
Troca.txt
Demanda.txt
SC.exe ou GRAFO.exe
Inter.exe
Nreescreve.exe
Limpa.exe

A.1.1 Arquivos PRINCIPA.EXE e CFG.TXT

O primeiro destes arquivos, o PRINCIPA.EXE, é o responsável pela execução de todas as etapas da Rotina TRADUZ. Quando executado, este módulo verifica a existência do arquivo de configuração CFG.TXT. Se o arquivo não existe, é gerado automaticamente com valores padrão. Havendo necessidade estes valores podem ser editados. A seguir o PRINCIPA.EXE deve ser executado novamente. Um exemplo do conteúdo do arquivo CFG.TXT é explicado a seguir:

1 Todas configurações aqui dispostas devem permanecer na mesma linha original. Depois de cada informação pode haver comentário, desde que seja separado por "|".

5 INICIO

demanda.txt|Arquivo de demanda

familia.txt|arquivo de familia

troca.txt|Arquivo de troca

OP1;OP2;OP1+OP2|Operacoes

10

PR00;1;115;1.0

PR10;2;115;1.0

PR20;3;115;1.0

15

As cinco primeiras linhas estão reservadas para comentários, sendo que nas duas primeiras ressalta-se a obrigatoriedade de que as chamadas dos arquivos a seguir (linhas 5 a 10), devem respeitar rigidamente a ordem em que se encontram. Nestas linhas não pode aparecer o caracter “;”. Comentários, podem ainda aparecer juntamente com as chamadas dos arquivos, devem, no entanto, estar separados pelo caracter “|”.

As linhas de 5 a 10 são de chamadas dos arquivos de entrada. Por exemplo, a linha 6 contém a informação “demanda.txt|Arquivo de demanda”. Isto significa que o arquivo de demanda a ser aberto tem o nome “demanda.txt”. Este nome pode ser modificado de acordo com as necessidades de simulação. A frase “|Arquivo de demanda” é o comentário da linha – notar que a frase está separada da chamada do arquivo pelo caracter “|”.

Na linha 9 a informação “OP1;OP2;OP1+OP2|Operacoes” refere-se às operações realizadas nas prensas: OP1, OP2, ou OP1 + OP2. Estas informações são específicas da Empresa estudada. Havendo necessidade pode ser alterada.

As linhas 12, 13 e 14 contêm informações sobre as prensas (PR00, PR10 e PR20). Estas linhas podem estar em qualquer posição no arquivo, porém são as únicas a apresentarem quatro colunas delimitadas pelo caracter “;”. Se, por exemplo, uma das prensas for desativada, a linha correspondente deve ser eliminada. No caso de uma nova aquisição, uma linha com as informações pertinentes deve ser acrescentada. Os números 1, 2 e 3 a seguir são números de referência. A informação “115” refere-se à capacidade, em horas, para cada máquina, para os períodos analisados. Este número pode ser editado de acordo com a conveniência. Finalmente, a última informação “1.0” indica que as prensas possuem 100% de disponibilidade de processamento neste período. Este campo pode assumir qualquer valor entre Zero e Um. Estas linhas devem necessariamente apresentar 4 colunas separadas pelo caracter “;”.

A.1.2 Arquivo FAMILIA.TXT

Neste arquivo encontram-se as informações sobre as famílias de produto. O arquivo foi obtido a partir de planilha EXCEL™ fornecida pela Empresa Piloto.

ITEM	FAMILIA	SEQ.	PROC.	OP.	STANDAR D	PRENSA	B.
P1111111	A1	1		OP1	130	PR20	
P2222222	A1	2		OP1	130	PR20	
P3333333	A1	3		OP1	130	PR20	
P4444444	A1	4		OP1	130	PR20	
T1111111	B1	1		OP1	60	PR20	
T2222222	B1	2		OP1	60	PR20	
T3333333	B1	3		OP1	130	PR20	
T4444444	B1	4		OP1	130	PR20	
T5555555	B1	5		OP1	60	PR00	
T6666666	B1	6		OP1	60	PR00	
S20092	01A	1		OP1	180	PR00/PR20	B.a4094
S20093	01A	2		OP1	180	PR00/PR20	B.a4095
S20094	01A	3		OP1	180	PR00/PR20	B.a4092
S20092	01A	1		OP2	200	PR00/PR20	B.a4094
S20093	01A	2		OP2	200	PR00/PR20	B.a4095
S20094	01A	3		OP2	200	PR00/PR20	B.a4092

A primeira coluna contém a denominação dos itens da Empresa. Na segunda coluna a família a que pertencem. A terceira coluna mostra a seqüência de processamento do item, dentro da família. Este dado foi obtido empiricamente pela empresa. Na quarta coluna é explicitado se este item requer operação “OP1” ou “OP2”. A denominação das operações é interna á Empresa. Os itens S20092, S20093 e S20094 requerem as duas operações como explicitado na tabela. Na coluna “STANDARD” está disponível a quantidade padrão de processamento do item, por hora. A coluna “PRENSA” especifica qual o equipamento a ser usado. Em alguns casos existe mais do que uma possibilidade, como para os itens S20092, S20093 e S20094. Neste caso, devem ser apontadas todas as possibilidades, separadas pelo caracter “|”. A coluna “B.” contém informações internas da Empresa.

A.1.3 Arquivo TROCA.TXT

As informações referentes aos tempos de *setup*, quando ocorre troca de itens dentro de uma mesma família e numa mesma operação são mostradas neste arquivo.

Familia	Operacao	Item Atual	Prox. Item	Tempo Troca (h:min)
AO6	OP1	P1119295	P1119297	00:00
AO6	OP1	P1119295	P1115798	00:00
AO6	OP1	P1119295	P1115799	00:00
AO6	OP1	P1119297	P1115798	00:15
AO6	OP1	P1119297	P1115799	00:15
AO6	OP1	P1115798	P1115799	00:00
AO6	OP2	P1119295	P1119297	01:40
AO6	OP2	P1119295	P1115798	00:30
AO6	OP2	P1119295	P1115799	02:00
AO6	OP2	P1119297	P1115798	02:00
AO6	OP2	P1119297	P1115799	00:30
AO6	OP2	P1115798	P1115799	02:00

Na coluna “Família” encontram-se as famílias de produtos. Em “Operação” é explicitado se a operação é “OP1” ou “OP2”. “Item Atual” refere-se ao item que acabou de ser processado. “Prox. Item” refere-se ao item que será processado. Em “Tempo Troca” estão os tempos de *setup* necessários entre um item e outro. É assumido um tempo padrão de 2 h quando não há algum *setup* registrado. Esse mesmo tempo é assumido também para *setup* de família ou de operação.

A.1.4 Arquivo DEMANDA.TXT

Neste arquivo encontram-se os valores de demanda para cada período. Seu conteúdo é explicado a seguir.

A primeira coluna refere-se à denominação do item, utilizada pelo sistema. A segunda coluna contém denominações internas da Empresa Piloto. As quatro colunas a seguir apresentam as demandas de cada item, por período. Neste caso estão sendo considerados quatro períodos para simulação. No caso de um item não possuir demanda em nenhum dos períodos estudados, deverá

ter estes campos preenchidos com o valor zero. Deverão existir tantas colunas de demanda quantos forem o períodos a serem simulados.

ITEM	DEN. INTERNA	06/set	9a13/09	16a20/09	23a30/09
P1111111	ITEM 1	0	0	0	0
P2222222	ITEM NOVO	549	0	0	0
P3333333	ITEM AZUL	181	0	0	0
P4444444	ITEM VELHO	408	0	0	0
T1111111	ITEM PEQ.	0	1590	0	0
T2222222	ITEM FRACO	0	1590	0	0
T3333333	ITEM GDE	0	0	0	240
T4444444	ITEM FORTE	0	0	0	240
T5555555	ITEM ALTO	0	1468	0	0
T6666666	ITEM BAIXO	0	1468	0	0

A.1.5 Arquivo SC.EXE ou GRAFO.exe

Esta é a Etapa de Programação Linear, responsável pela otimização dos dados. Na versão 1 o software SC.exe é um algoritmo de “Pontos Interiores” para resolução de problemas de Programação Linear com Restrições adicionais.

A versão 2 desta Etapa utiliza o software GRAFO.exe, que resolve problemas de grafos.

A saída de qualquer dos dois *softwares* será o seqüenciamento otimizado da produção para os recursos modelados como críticos, nos períodos selecionados, para as demandas existentes de itens.

A.1.6 Arquivo INTER.EXE e NREESCRE.EXE

Estes arquivos analisam a necessidade de executar novamente a Etapa de otimização. Isto pode ocorrer quando uma mesma família é alocada para produção em mais do que uma prensa. Esta situação deve ser evitada, já que o ferramental para processamento da família é único. Mesmo a alocação de mais de uma prensa para uma mesma família em períodos subseqüentes não é ideal, já que demandará mais que um *setup* num curto espaço de tempo. Nestas situações os

módulos Inter e Nreescreve trocam as prioridades das prensas no processamento das famílias, numa tentativa de produzir todo o lote num único equipamento.

A.1.7 Arquivo LIMPA.EXE

A função deste arquivo é apagar os chamados “arquivos intermediários”, gerados durante a execução da Etapa de otimização. No caso de haver necessidade de análise dos resultados destes arquivos, basta tirar o “limpa.exe” do diretório de trabalho, e os mesmos não serão apagados.

A.2. Arquivos Intermediários gerados durante a execução da Rotina TRADUZ

Os arquivos intermediários são gerados durante a execução da Etapa de otimização da rotina TRADUZ. Em geral estes arquivos são apagados pelo módulo limpa.exe, já que seu conteúdo é técnico e de difícil compreensão para o usuário em geral. São eles:

TEMP001.TXT

LOGIXDAz.TXT

TEMP123.TXT

RESULTz.CSV

FALTAN.TXT

A.2.1 Arquivo TEMP001.TXT

Arquivo que guarda a modelagem do sistema. Contém os nós e arcos dos grafos a serem otimizados pela Etapa de otimização

A.2.2 Arquivo LOGIXDAz.TXT

Este arquivo apresenta o resultado dos tempos de processamento das famílias, discriminados entre processamento e *setup*. Sua configuração é a seguinte:

FAMÍLIA	T.PRO.	T. <i>SETUP</i>	PRENSA
17A	500.000	2.240.000	PR10

Na primeira coluna encontram-se as famílias de produtos. A segunda coluna contém a totalização dos tempos de processamento desta família, na prensa. A terceira coluna apresenta a totalização dos tempos de *setup* desta família, na prensa e, finalmente, na quarta coluna estão as possíveis prensas para processamento. Caso exista possibilidade de processamento em mais do que uma prensa, a linha será duplicada.

Existirão tantos arquivos deste tipo quantos forem os períodos considerados na simulação. Assim, o arquivo LOGIXDA1.TXT refere-se ao período 1, LOGIXDA2.TXT refere-se ao período 2 e assim por diante.

A.2.3 Arquivo TEMP123.TXT

Este arquivo guarda os itens que, após análise dos resultados pelos módulos Inter.exe e Nreescreve.exe, tiveram as prioridades de prensa alteradas. Ou seja, são os itens que inicialmente necessitariam de mais que uma prensa para seu processamento e que após inversão de prioridade nos equipamentos, possivelmente possam ser processados numa única prensa.

A.2.4 Arquivo RESULTz.CSV

Este arquivo apresenta o resultado da simulação por período.

ITEM	FAMILIA	OP.	PRENSA	DEMANDA (peças)	SETUP (h:min)	T. PRO (h:min)	T. TOT (h:min)	T. ACU. FAM (h:min)	T. ACU OP. FAM (h:min)
S2037	17A	OP1	PR10	555	02:00	06:45	08:45	08:45	08:45
S2137	17A	OP1	PR10	456	00:30	05:33	06:03	14:48	14:48
S2037	17A	OP2	PR10	555	02:00	05:33	07:33	22:21	07:33
S2137	17A	OP2	PR10	456	00:30	04:33	05:03	27:24:00	12:36

A primeira coluna especifica o item. Na segunda coluna está a família a que este item pertence. A terceira coluna mostra as duas possíveis operações de prensa (OP1 e OP2). A quarta coluna especifica as prensas. Na quinta coluna são apresentadas as demandas de cada item. Na sexta estão os tempos de *setup*. Na sétima os tempos de processamento de todo o lote. A oitava coluna mostra a soma da sexta e sétima colunas. A nona coluna apresenta a totalização do tempo acumulado na família e, finalmente a décima coluna apresenta esta totalização por operação na família.

Existirão tantos arquivos deste tipo quantos forem os períodos considerados na simulação. Assim, o arquivo RESULT1.CSV refere-se ao período 1, RESULT2.CSV refere-se ao período 2 e assim por diante.

A.2.5 Arquivo FALTAN.TXT

Este arquivo apresenta uma lista de itens com demanda para os períodos estudados, mas que não aparecem no arquivo FAMILIA.TXT. Estes itens não são, desta forma, considerados na simulação. Para que passem a ser vistos pelo Programa de Otimização é necessário que sejam cadastrados no arquivo de Famílias, mesmo que seja uma família com um único item.

A não geração deste arquivo indica a inexistência deste tipo de problema.

A.3. Arquivos de Saída da Rotina TRADUZ

Os arquivos de saída da rotina TRADUZ são os seguintes:

DEMPxyz.OUT

TRAPxyz.DAT

TRAPxyz.OUT

RESPxyz.OUT

A.3.1 Arquivo DEMPxyz.OUT

Este arquivo apresenta as mesmas informações que os arquivos intermediários RESULTz.CSV, já apresentados. Sua forma de apresentação, porém, é diferente, pois agrupa num mesmo arquivo todas as informações de todos os períodos.

O exemplo a seguir ilustra um extrato de resultado onde estão considerados apenas alguns itens de quatro famílias em dois períodos. A explicação do conteúdo de cada uma das colunas é a mesma apresentada no item A.2.4.

PER 1										
ITEM	FAMILIA	OP.	LOCAL	DEM (pç)	SETUP (h:min)	T. PRO (h:min)	T. TOT (h:min)	T. ACU. FAM (h:min)	T. ACU OP. FAM (h:min)	
M702	05A	OP1	PR00/PR20	148	02:00	01:28	03:28	03:28	03:28	
M702	05A	OP2	PR00/PR20	148	02:00	01:28	03:28	06:56	03:28	
PER 2										
ITEM	FAMILIA	OP.	LOCAL	DEM (pç)	SETUP (h:min)	T. PRO (h:min)	T. TOT (h:min)	T. ACU. FAM (h:min)	T. ACU OP. FAM (h:min)	
A4083	00A	OP1	PR00/PR20	258	02:00	01:46	03:46	03:46	03:46	
A4085	00A	OP1	PR00/PR20	158	02:00	01:34	03:34	07:20	07:20	
T402	37A	OP1	PR10	452	02:00	05:31	07:31	07:31	07:31	
T551	37A	OP1	PR10	321	01:00	04:00	05:00	12:31	12:31	
T651	37A	OP1	PR10	235	00:01	02:45	02:46	15:17	15:17	
T402	37A	OP2	PR10	452	02:00	04:31	06:31	21:48	06:31	
T651	37A	OP2	PR10	235	02:00	02:21	04:21	26:09:00	10:52	
T551	37A	OP2	PR10	321	01:30	03:12	04:42	30:51:00	15:34	
2080	71A	OP2	PR00/PR20	258	02:00	02:10	04:10	04:10	04:10	
2081	71A	OP2	PR00/PR20	58	00:01	00:34	00:35	04:45	04:45	
2080	71A	OP2	PR00/PR20	258	02:00	02:10	04:10	08:55	04:10	
2081	71A	OP2	PR00/PR20	58	00:30	00:34	01:04	09:59	05:14	

A.3.2 Arquivo TRAPxyz.DAT

É o arquivo de entrada de dados para a Etapa de otimização. Neste arquivo o x refere-se à quantidade de períodos analisados na simulação e o “yz” é um número sequencial, usado para evitar que a simulação atual se sobreponha à anterior.

A.3.3 Arquivo TRAPxyz.OUT

Arquivo de saída de dados da Etapa de otimização. Neste arquivo o “x” refere-se à quantidade de períodos analisados na simulação e o “yz” é um número seqüencial, usado para evitar que a simulação atual se sobreponha à anterior.

A.3.4 Arquivo RESPxyz.OUT

Apresenta uma interpretação mais amigável do resultado fornecido pela Etapa de otimização. Neste arquivo o “x” refere-se à quantidade de períodos analisados na simulação e o “yz” é um número seqüencial, usado para evitar que a simulação atual se sobreponha à anterior.

O arquivo RESPxyz.OUT pode ser dividido em três partes. Na primeira são apresentados os resultados da simulação de forma percentual. Na segunda os mesmos resultados são mostrados em termos de horas necessárias ao processamento. Finalmente, na terceira parte os totais de horas de processamento são apresentados por prensa. A seguir são explicadas as colunas das tabelas apresentadas no arquivo.

ITEM	PER.	PER 1	PRENSA	PER 2	PRENSA	PER 3	PRENSA	PER 4	PRENSA	NAO ATENDIDO
05A	1	1.00	PR00							
00A	2			1.00	PR00					
37A	2	0.90	PR10	0.10	PR10					
01A	3					1.00	PR00			
17A	4					0.95	PR10	0.05	PR10	
71A	4							1.00	PR20	

RESULTADO ANALIZADO POR TEMPO										
ITEM	PER.	PER 1	PRENSA	PER 2	PRENSA	PER 3	PRENSA	PER 4	PRENSA	NAO ATENDIDO
05A	1	6.933	PR00							
00A	2			7.333	PR00					
37A	2	27.817	PR10	3.033	PR10					
01A	3					7.333	PR00			
17A	4					28.600	PR10	1.633	PR10	
71A	4							20.200	PR20	

RESULTADO POR PRENSA										
PR00	1	51.383	2	92.250	3	64.849	4	97.799		
PR10	1	66.151	2	115.000	3	28.600	4	115.000		
PR20	1	4.267	2	99.267	3	53.983	4	77.766		

É apresentado um extrato de resultado para uma situação de simulação de quatro períodos. Na coluna um da primeira e segunda partes da tabela, estão as famílias com processamento nos períodos estudados. Na segunda coluna, tanto da primeira quanto da segunda parte, estão os períodos projetados para processamento pelo ERP. Estes períodos são baseados exclusivamente em *lead times* e datas de entrega. A terceira, quinta, sétima e nona colunas, da primeira e segunda partes da tabela, apresentam as quantidades de cada família a serem processadas nos períodos um, dois, três e quatro, respectivamente. Na primeira parte estas quantidades são apresentadas em percentuais de produção da família e, na segunda parte, em total de horas necessárias ao processamento das famílias. Desta forma, a família 37A, que originalmente estava projetada para processamento no segundo período, teve 90% de sua produção adiantada para o primeiro período, representando 27,817 horas de produção. As colunas quatro, seis, oito e dez, nas duas partes da tabela, referem-se aos equipamentos selecionados para produção (PR00, PR10, PR20) nos períodos um, dois, três e quatro, respectivamente. A décima primeira coluna é reservada para a possibilidade de não atendimento à demanda.

A terceira parte da tabela mostra a totalização de carga em cada uma das três prensas, para cada um dos quatro períodos considerados. Sabendo-se que a máxima capacidade destes equipamentos é de 115 horas por período, nota-se que a prensa PR10 está com carga máxima no segundo e quarto períodos.