

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

AREA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

CONCEPÇÃO DE UM SISTEMA DE CONTROLE DA PRODUÇÃO
PARA A MANUFATURA CELULAR

FLAVIO CÉSAR FARIA FERNANDES

Orientador: DR. J.V. MOCCELLIN



DEDALUS - Acervo - EESC



31100017859

Tese apresentada à área de
Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da
Escola de Engenharia de São Carlos-USP,
como parte dos requisitos para a obtenção
do Título de Doutor em Engenharia.

SÃO CARLOS
* 1991 *

SÃO CARLOS, ABRIL/1989

Noite e Dia

A Noite vai firme,
na sua certeza
de postergar ao máximo,
o romper de um novo Dia.

A Noite vai firme,
na sua missão
de evidenciar dúvidas,
em horas de insônia.

E as dúvidas eclodem,
tal qual pintos
a romper suas cascas.

Quem sabe ocorra, a um Dia,
evidenciar respostas
em horas de dormência.

FLAVIO CÉSAR F. FERNANDES

Engenheiro Mecânico pela Escola de
Engenharia de São Carlos (EESC-USP), 1977.
Mestre em Engenharia de Produção pela
Escola Politécnica (EP-USP), 1982.

AGRADECEMOS:

* Ao Prof. Dr. João Vitor Moccellin pela orientação, dedicação e estímulo;

* Aos Professores José Roberto Ferro, Dr. Eduardo Vila Gonçalves Filho e Dr. Marcelo Amoroso Lima pelo valiosíssimo apoio na obtenção de grande parte do material bibliográfico utilizado e inexistente nas bibliotecas brasileiras;

* Ao Engenheiro Horaldo Sérgio Tinto, nosso ex-aluno, que nos colocou que em sua experiência profissional sentiu a necessidade de métodos de programação da produção que levassem em conta aspectos financeiros;

* e a todos aqueles que de alguma forma colaboraram para que este trabalho pudesse ser concluído.

AOS QUERIDOS
MARIA CECÍLIA,
GUILHERME, HEITOR,
ANTÔNIO E ODILA.

INDICE

	página
TERMOS INGLESES	ix
SIGLAS	xiii
LISTA DE FIGURAS	xix
LISTA DE TABELAS	xx
RESUMO	xxi
ABSTRACT	xxii
1. INTRODUÇÃO	1
2. VISÃO GERAL SOBRE A FUNÇÃO CONTROLE NOS SISTEMAS DE MANUFATURA INTEGRADOS POR COMPUTADOR	5
2.1 Introdução	5
2.2 Visão Geral sobre o Sistema de Manufatura Integrado por Computador (CIMS)	8
2.3 Controle, a Função Vital para se Obter Integração	16
2.4 Considerações Finais	21
3. A PESQUISA OPERACIONAL E O CONTROLE DOS SISTEMAS DE MANUFATURA INTEGRADOS POR COMPUTADOR	23
3.1 Considerações Iniciais	23
3.2 A PO no Contexto do Controle dos CIMSS	25
3.3 Sistemas de Apoio à Decisão: A Resposta para a Falta de Flexibilidade dos Modelos de Pesquisa Operacional	29
3.4 Revisão Bibliográfica Complementar a Respeito dos SADS	37
4. CONTROLE DA PRODUÇÃO	41
4.1 Conceitos Básicos	41
4.1.1 Classificação dos sistemas de produção	41
4.1.2 Definições de controle da produção	45
4.1.3 Fatores que afetam o fluxo	49
4.1.4 Tempo de preparação	49

4.1.5	O balanceamento do fluxo	52
4.2	Estrutura Decisória do Controle da Produção	54
4.2.1	Programa mestre de produção	55
4.2.2	Emissão de ordens	57
4.2.2.1	Classificação dos sistemas de emissão de ordens	58
4.2.2.2	Sistema PBC	59
4.2.2.3	Sistema de estoque mínimo	62
4.2.3	Programação de operações	66
4.3	Super-Sistemas de Controle da Produção	70
4.3.1	Sistema de controle da produção JIT	70
4.3.1.1	Programa mestre de produção	74
4.3.1.2	Sistema de emissão de ordens	74
4.3.1.2.1	Funcionamento básico	75
4.3.1.2.2	Variantes do Kanban	78
4.3.1.2.3	Avaliação do Kanban	80
4.3.1.3	Programação de operações	81
4.3.2	Sistema de controle da produção MRPII	82
4.3.2.1	Programa mestre de produção	85
4.3.2.2	Sistema de emissão de ordens	87
4.3.2.2.1	Funcionamento básico do sistema MRP	88
4.3.2.2.2	Avaliação do MRP	90
4.3.2.3	Programação de operações	91
4.3.3	Sistema de controle da produção OPT	92
4.3.3.1	Funcionamento básico do OPT	95
4.3.3.2	Avaliação do sistema OPT	98
4.3.4	Alguns comentários sobre combinar super-sistemas	100
5.	MANUFATURA CELULAR	102
5.1	Manufatura Celular e Tecnologia de Grupo	102
5.2	O Conceito de Célula de Manufatura	107
5.3	Formação de Células	110
5.4	O Conceito de Célula Flexível	112
5.5	Taxonomia da Manufatura Celular	113
5.6	Problemas de Implantação	117

6.	CONTROLE DA PRODUÇÃO NA MANUFATURA CELULAR	119
6,1	Introdução	119
6.2	Emissão de Ordens	123
6.3	Carga de Célula	127
6.4	Programação de Operações	132
6.4.1	Trabalhos específicos	133
6.4.1.1	Seqüenciamento em uma máquina	133
6.4.1.2	'Scheduling' na manufatura celular multi-estágios	136
6.4.1.2.1	Minimizar M pela abordagem teórica	136
6.4.1.2.2	Minimizar M pela aborda- gem 'branch-and-bound'	139
6.4.1.2.3	Minimizar M pela abordagem heurística	140
6.4.1.2.4	Outros critérios	141
6.4.2	Minimização do tempo de preparação	142
6.4.3	Trabalhos empregando simulação	147
6.4.4	Programação da produção na manufatura celular repetitiva	150
6.4.5	Programação de operações de FFLs	151
6.4.6	Programação da produção de FMSs	153
6.5	Conclusões	158
7.	CONCEPÇÃO DE UM NOVO SISTEMA PARA CONTROLE DA PRODUÇÃO NA MANUFATURA CELULAR	159
7.1	Introdução	159
7.2	Sistema de Apoio à Decisão para Elaboração do Programa Mestre de Produção	161
7.2.1	Introdução	161
7.2.2	A interface usuário/sistema	166
7.2.3	Base de dados	169
7.2.4	O modelo I	173
7.2.5	O algoritmo H	181
7.3	Sistema de Emissão de Ordens	189
7.4	Sistema de Programação de Operações	194

7.4.1	Introdução	194
7.4.2	PROCEL	199
8.	CONCLUSÕES	212
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	217
	APÊNDICES:	
1.	Minimização do Tempo Total de Preparação pelo Método 'Branch-and-Bound'	235
2.	Minimização do Tempo Total de Preparação pela Programação Dinâmica	237
3.	Cálculo do Limitante Inferior para o Critério Minimizar o Tempo Médio de Permanência, Usado nos Algoritmos A2E1 e A2E2	238
4.	Cálculo do Limitante Inferior para o Critério Minimizar o 'Makespan', Usado nos Algoritmos A2E1 e A2E2	239

TERMOS INGLESES

- 'AUTOMATED-WAREHOUSE'= sistema automatizado de armazenagem de materiais;
- 'BEST-BOUND-FIRST'= estratégia de busca para o método 'branch-and-bound' pela qual o próximo nó a ser ramificado, é o nó ativo que detem o menor limitante inferior;
- 'BLACKSHEEP'= Se alguma operação de uma peça de certa família, tiver que ser realizada fora da célula que processa tal família de peças, então se diz que tal operação é um 'blacksheep';
- 'BRANCH-AND-BOUND'= método de otimização combinatorial, onde a procura da melhor solução é feita usando-se dois procedimentos: (a) ramificação, (b) limitação;
- 'BUFFER'= pulmão. Local onde é armazenada certa quantidade de estoque em processo;
- 'CLUSTER'= noção de grupo ou agrupamento. Organização 'cluster', se refere a um tipo de organização de grupos de pessoas, mesmo fisicamente distantes, que se comunicam e têm suas habilidades complementadas. Análise 'cluster', é um método estatístico ou numérico para agrupar elementos similares;
- 'COMPUTER-AIDED'= auxiliado por computador. O termo se refere a uma série de tecnologias baseadas no uso do computador (CAD, CAM, CAPP, ...);
- 'CONTAINER'= contentor de pequeno porte que via de regra é uma caixa de plástico ou um carrinho;
- 'DISPATCHING'= liberação;
- 'DOWNTIME'= tempo ocioso;
- 'FEEDBACK'= realimentação;
- 'FLOW-LINE'= linha de produção;

- 'FLOW-SHOP'= tipo de instalação ou de padrão de fluxo onde, todas as tarefas executadas têm o mesmo roteiro de fabricação (passam pelas mesmas máquinas e na mesma ordem);
- 'GOZINTO'= método para determinação das necessidades de itens com demanda dependente. Foi criado em 1956 e é baseado na álgebra matricial;
- 'JOB-SHOP'= um tipo de instalação fabril para produção em lotes (intermitente), onde o arranjo físico é do tipo funcional e, na grande maioria das vezes a produção é sob encomenda; pode significar ainda o tipo de padrão de fluxo onde cada peça tem um roteiro de fabricação que pode ou não ser o mesmo de outras peças fabricadas na instalação;
- 'JUST-IN-TIME'= tanto pode significar o sistema de produção JIT, a estratégia de fabricação JIT, o sistema de controle da produção JIT ou a estratégia de controle da produção JIT. Alguns traduzem por "justo-a-tempo";
- 'LATENESS'= é a diferença entre a data de conclusão de qualquer tarefa e a sua data devida. Se houver atraso esse valor é positivo, e se houver adiantamento ele é negativo;
- 'LAY-OUT'= arranjo-físico;
- 'LEADTIME'= tempo decorrido entre o instante em que se formaliza uma solicitação, e o instante em que o que foi solicitado se torna disponível. Assim, temos:
o 'LEADTIME' de SUPRIMENTO (tempo decorrido entre a liberação da ordem de compra para o fornecedor e o instante do recebimento do item),
o 'LEADTIME' de PRODUÇÃO (tempo decorrido entre a liberação da ordem de produção e a conclusão da referida ordem), e
o 'LEADTIME' de DISTRIBUIÇÃO (tempo decorrido entre a liberação da ordem de entrega e a entrega ser efetivada);
- 'LOOP'= alça de comunicação que faz com que a ação seja

- adaptada e repetida até que o padrão estabelecido seja atingido;
- 'MAKESPAN'= tempo necessário para conclusão do conjunto de tarefas a ser realizado, conforme uma dada programação;
- 'MIX'= significa uma dada combinação de diversidade e quantidade de produtos a serem feitos num dado horizonte;
- 'OVERFLOW'= "transbordamento", no texto indica que a peça pode saltar alguma(s) máquina(s) e não ser aí processada;
- 'OVERLAPPING'= sobreposição de operações. Por exemplo, um item A produzido em lote de 50 peças, é processado na máquina M1 e a seguir na M2; se houver 'overlapping' significa que processadas algumas peças em M1, elas já passam para a M2 e começam a ser aí processadas, antes de todo o lote em M1 ter sido completado;
- 'OVERPLANNING'= significa super-estimar (propositalmente), para fins de programação da produção, as necessidades dos clientes;
- 'PALLET'= contentor de grande porte que no geral comporta vários 'containers';
- 'SCHEDULING'= programação da produção em várias máquinas, enquanto que seqüenciamento é a programação em uma única máquina;
- 'SET-UP'= preparação;
- 'SIMULATED ANNEALING'= é uma técnica recente (de 1983) para solução de problemas de otimização combinatorial. Sua idéia básica vem da física do comportamento estocástico (daí a relação com simulação) e o esquentamento ('annealing') de partículas de um sólido;
- 'TIME-PHASED'= numa base de tempo;
- 'TIMING'= determinação ou estabelecimento do instante ou período em que certo evento deverá ocorrer;
- 'TOTAL FLOW TIME (F) '= tempo total de permanência (ou de fluxo). É a soma dos tempos de permanência de todas as

tarefas;

'TRADE-OFF' = toda vez que ocorrer de, para melhorar uma certa variável (por exemplo o custo de faltar estoques), outra (s) terá (ão) seu desempenho piorado (por exemplo o custo de manter estoques), isso configura uma situação onde há um 'trade-off' ("ganha-se de um lado mas perde-se de outro").

SIGLAS

- AIDA= 'Analysis of Interconnected Decision Areas'= Análise de áreas de decisão interligadas;
- AIIE= 'American Institute of Industrial Engineers'= Instituto americano de engenheiros de produção;
- AGVs= 'Auto Guided Vehicles'= Carros auto controlados por computador;
- ASME= 'American Society of Mechanical Engineers'= Sociedade americana de engenheiros mecânicos;
- BOM= 'Bill of Materials'= Lista de materiais;
-
- CACE= 'Computer-Aided Cost Estimating'= Estimativa de custos auxiliada por computador;
- CAD= 'Computer-Aided Design'= Projeto auxiliado por computador;
- CAM= 'Computer-Aided Manufacturing'= Manufatura auxiliada por computador;
- CAPP= 'Computer-Aided Process Planning'= Planejamento do processo auxiliado por computador;
- CAQC= 'Computer-Aided Quality Control'= Controle da qualidade auxiliado por computador;
- CIM= 'Computer Integrated Manufacturing'= Manufatura integrada por computador;
- CIMSS= 'Computer Integrated Manufacturing Systems'= Sistemas de Manufatura Integrados por Computador;
- CIPP&C= 'Computer Integrated Production Planning and Control'= Planejamento e controle da produção integrado por computador;
- CIRP= 'Collège International pour L'Étude Scientifique des Techniques de Production Mecanique'= Colégio internacional para o estudo científico das técnicas de produção mecânica;
- CMP= Conjunto Mínimo de Peças;

CNC= 'Computer Numerical Control'= Controle numérico por computador;

COI= 'Creative Output Incorporation'. Empresa americana que comercializa o sistema OPT;

COVERT= 'Cost Over Time Value'= Valor do custo no tempo;

CP= Controle da Produção;

CPC= 'Computer Process Control'= Controle do processo por computador;

CPL= 'Cell Programming Language'= Linguagem de programação de célula;

DNC= 'Direct Numerical Control'= Controle numérico direto;

DS= 'Dynamic Slack'= Folga dinâmica. (Regra de despacho que seleciona como próxima tarefa aquela com o menor valor da diferença entre a data devida e a data atual);

EDD= 'Earliest Due Date'. (Regra em que as tarefas são atendidas segundo a ordem não decrescente de suas datas devidas);

EDPs= 'Electronic Data Processors'= Processadores eletrônicos de dados;

EOQ= 'Economic Order Quantity'= Lote econômico;

FFL= 'Flexible Flow Line'= Linha de produção flexível;

FCFS= 'First Come First Served'= Primeira tarefa que chega é a primeira a ser processada;

FIFO= 'First-In/First-Out'= é a regra que estabelece que o primeiro que chegou na fila é o primeiro a ser atendido e completado;

FMS= 'Flexible Manufacturing System'= Sistema flexível de manufatura;

FO= Função-Objetivo;

FTL= 'Flexible Transfer Line'= Linha de transferência flexível;

GE= 'General Electric'. Uma empresa multinacional;

IA= Inteligência Artificial;

IE= 'Industrial Engineering'= Engenharia de produção;

IIE= 'Institute of Industrial Engineers'= Instituto de engenheiros de produção (EUA);

JIT= 'Just-In-Time';

LAN= 'Local Area Network'= Rede local de interligação;

LB= 'Lower-Bound'= Limitante inferior;

LD= 'Leadtime' de Distribuição;

LP= 'Leadtime' de Produção;

LS= 'Leadtime' de Suprimento;

LPT= 'Longest Processing Time'= é a regra de despacho que estabelece como primeira tarefa a ser executada a que tem o maior tempo de processamento;

LTC= 'Least Total Cost'= Custo Total Mínimo. (É uma técnica de dimensionamento de lotes);

MIP= 'Mixed-Integer Programming'= Programação inteira-mista (modelo de programação linear onde existem variáveis inteiras e variáveis reais);

MIS= 'Management Information System'= Sistema de Informações gerenciais;

MIT= 'Massachusetts Institute of Technology';

MRP= 'Material Requirements Planning'= Planejamento das Necessidades de Materiais'. (É um conhecido sistema informatizado de emissão de ordens);

MRPII= 'Manufacturing Resource Planning'= Planejamento dos recursos de fabricação;

MS= 'Management Science'= é a PO no âmbito do gerenciamento;

MWKR= 'Most Work Remaining'. Regra que estipula como próxima tarefa a ser programada aquela com maior quantidade (em unidades de tempo) de trabalho a ser executado;

NS= Nível de Serviço;

OC= Ordem de Compra;

OF= Ordem de Fabricação;

OM= Ordem de Montagem;

Opt= designa o sistema de emissão de ordens do sistema de controle da produção OPT;

OPT= 'Optimized Production Technology'= Tecnologia da produção otimizada;

OS= Ordem de Serviço. Pode ser uma OC, uma OP ou uma OM:

PBC= 'Period Batch Control'. É o sistema de emissão de ordens do período-padrão;

PCP= Planejamento e Controle da Produção;

PD= Programação Dinâmica. É uma técnica de Pesquisa Operacional que poderia ser chamada de Programação por Estágios;

PE= Planejamento Estratégico;

PERA= 'Production Engineering Research Association'= Associação de Pesquisa em Engenharia de Produção (Grã-Bretanha);

PERT/CPM= 'Program Evaluation and Review Technique/ Critical Path Method';

PFA= 'Production Flow Analysis'= Análise do fluxo de produção;

PMP= Programa Mestre de Produção;

PMS= 'Piece Manufacturing Specifications'= Especificações de

- fabricação de peças;
- PO= Pesquisa Operacional;
- PP= Planejamento da Produção;
- PSP= Posto de Seqüenciamento da Produção;
- QD= Quadro de Decisão;
- RD= Regra de Decisão;
- RP= Regra de Prioridade;
- SADs= Sistemas de Apoio à Decisão ('Decision Support Systems'= DSSs);
- SCP= Sistema de Controle da Produção;
- SE= Sistema Especialista;
- SEOs= Sistemas de Emissão de Ordens;
- SFs= Sistemas de Fabricação;
- SI= Sistema de Informação;
- SIC= 'Statistical Inventory Control'= Controle Estatístico de Estoques;
- SME= 'Society of Manufacturing Engineers'= Sociedade de engenheiros de fabricação (EUA);
- SMED= 'Single Minute Exchange of Die'= Troca de estampo em um minuto. (Sistema idealizado por Shingo na Toyota para reduzir tempos de preparação);
- SP= Sistema de Produção;
- SPT= 'Shortest Processing Time'. Regra que estipula como primeira tarefa a ser processada a de menor tempo de processamento;
- SST= 'Shortest Set-up Time'. Regra que seleciona como prio-

- ritária a tarefa com menor tempo de preparação;
- TG= Tecnologia de Grupo;
- TPM= 'Total Preventive Maintenance'= Manutenção Preventiva Total;
- TSS= 'Travelling Salesman Sequence'. Seleciona a tarefa de acordo com a seqüência dada pela solução do problema do caixeiro viajante;
- UB= 'Upper-Bound'= Limitante superior;
- WLA= 'WorkLoad Aproximation'. Heurística para programação de operações de FFLs.

LISTA DE FIGURAS

N.	TÍTULO	PÁG.
1	O âmbito do CIMS	6
2	Filosofia de fabricação (CIM e convencional)	11
3	Arquitetura de 'hardware' a nível de integração total	12
4	Modelo conceitual de integração de um sistema de manufatura	15
5	Os 17 níveis de mecanização e suas relações com as fontes de energia e de controle	17
6	O clássico esquema do processo de controle	18
7	Configuração geral de um sistema de controle adaptativo	26
8	A sinergia do SAD interativo	31
9	Estrutura do SAD	32
10	Natureza do problema e tipo de sistema de informação	34
11	Tempo de resposta de um sistema de produção	41
12	Fluxo típico na manufatura celular semi-repetitiva	45
13	Interação dos sistemas organizacional, social e técnico	48
14	Estrutura do controle da produção adotada	56
15	Programa-padrão	60
16	Curva dente de serra	63
17	Variantes do sistema de estoque mínimo	63
18	Funcionamento do sistema Kanban	77
19	Fluxo do cartão Kanban relativo à peça alavanca ..	79
20	O MRPII	83
21	Procedimentos fundamentais do MRP	89
22	Lote de transferência de entrada e de saída	93
23	Fluxograma de funcionamento do OPT	96
24	Esquema geral de sinergia entre MRPII, JIT e OPT .	100
25	Escolha do sistema de controle da produção	101
26	'Lay-out' funcional e 'lay-out' celular com padrão de fluxo 'flow-shop'	108
27	Gráfico P-Q	109
28	Gráfico de Gantt da solução do problema (2+3+2)/2/	

	produção em grupo/M	139
29	Os níveis de controle da produção	160
30	A estrutura do sistema SADEPMEP	165
31	Menu principal proposto para o diálogo usuário/SADEPMEP	167
32	Os arquivos da base de dados do sistema	170
33	Arquivo MOD de modelos	175
34	Um vetor valor	175
35	PBC Modificado (período de fabricação duplo)	189
36	Posição do processo cuja produção será controlada	190
37	A posição "central" do planejamento e controle da produção (PCP)	193
38	Estratégia de busca adotada no algoritmo A2E1	196
39	Estratégia de busca adotada no algoritmo A2E2	197

LISTA DE TABELAS

N.	TÍTULO	PÁG.
1	Exemplo de arquivo EPRO	171
2	Um arquivo AVPMP	171
3	Um arquivo RAVAC	171
4	Um arquivo AVAC	172
5	Um arquivo DF	174
6	Um arquivo PAP	176

RESUMO

Este trabalho visa integrar todas as atividades de programação da produção, dentro do contexto de um Sistema de Controle da Produção concebido para operar na Manufatura Celular, e em particular na manufatura celular semi-repetitiva.

A estrutura conceitual para se obter a integração repousa numa modificação da estrutura decisória do Controle da Produção proposta por Burbidge, e na recente abordagem dos Sistemas de Apoio à Decisão baseados em modelos, que a nosso ver fornece a flexibilidade requerida no ambiente da Manufatura Integrada, algo que não é possível se obter com apenas a tradicional abordagem da Pesquisa Operacional.

O sistema proposto foi concebido em 3 módulos (nível de produto final, de componentes e de operações), havendo em cada um deles contribuições relevantes para a literatura especializada.

ABSTRACT

This Dissertation intends to integrate all production scheduling activities in the context of a Production Control System designed to operate in a Cellular Manufacture and in particular, in the semi-repetitive cellular manufacture.

The conceptual framework to obtain the activity integration stands on a modification of the Production Control decision structure proposed by Burbidge, and in the recent approach of the model-based Decision Support Systems. Such a framework is able to provide the required flexibility in the Integrated Manufacturing environment, which is not possible to get by only the traditional Operations Research approach.

The proposed Production Control System was designed with three modules, that is final products, components and operations levels. In each one of them, we present relevant contributions to the specialized literature.

CAPITULO I

INTRODUÇÃO

A Manufatura Integrada tem se mostrado como a saída para que um sistema produtivo de bens, possa propiciar níveis convenientes de produtividade e flexibilidade, e um ambiente de trabalho mais motivador e condizente com as capacidades do homem. Já a Manufatura Celular representa um dos passos a serem seguidos para se atingir a Manufatura Integrada. Nesse contexto, o estudo da Manufatura Celular, e em particular do Controle da Produção na Manufatura Celular, se reveste de mais alta importância.

Classificamos a manufatura em lotes em 3 tipos: repetitiva, semi-repetitiva e não-repetitiva. Basicamente, na repetitiva pelo menos 75% dos itens são fabricados em todos os ciclos de produção. Na semi-repetitiva pelo menos 25% se repetem e 25% não se repetem. Na não-repetitiva, é comum que 75% ou mais não se repetem.

Para a manufatura celular repetitiva, existe o sistema japonês de controle da produção 'Just-in-time' que nos parece ideal para esse tipo de produção. No outro extremo, a manufatura não-repetitiva (onde ou se tem o 'job-shop' ou as células são do tipo mini-fábrica, ou seja, acima de 15 ou 20 equipamentos em cada uma), o sistema israelense OPT, se for verdadeiro o que propalam seus criadores, representa atualmente a melhor solução.

O objetivo desta Tese é propor um sistema de controle da produção que seja apropriado para a manufatura celular semi-repetitiva.

Nosso sistema não é tão simples quanto o 'Just-in-time', mas não tão complicado quanto o OPT (talvez a complicação seja fruto dos mistérios e segredos contidos nesse sistema, por questões de sigilo comercial), e acreditamos que possui uma "variedade" cibernética, compatível com a complexidade da situação que ele visa controlar.

Além disso, cremos que a sua implementação computacional, que não é objetivo desta Tese, e a implantação final em fábricas, impliquem em investimentos menores que por exemplo o OPT. Segundo AGGARWAL (1985), instalar MRPII, JIT, OPT ou FMS, requer vários anos de educação como também de treinamento, e milhões de dólares de investimentos.

A ciência da gestão não está consolidada como outras ciências. Os termos são um tanto fluídos e as pessoas têm interpretações distintas dos mesmos. Por exemplo, administração e gerenciamento são sinônimos? Não. Administração está envolvida com a definição de políticas da corporação, com a coordenação entre as funções da empresa (produção, finanças, distribuição, ...), com o controle dos executivos, etc. Já o gerenciamento é responsável pela execução das políticas em cada área específica. Exemplificando, a gerência da produção é responsável, mesmo que delegue responsabilidades, pelo projeto dos sistemas de planejamento e controle, pela organização da área produtiva (estruturando, hierarquizando e obtendo os recursos humanos e materiais necessários para o desempenho das atividades previstas), pelo planejamento, pelo controle e pelo comando da produção.

Apesar de sua longa existência e sua aparente simplicidade na maioria dos tópicos, o Controle da Produção é uma área cujos conceitos não estão bem sedimentados, e uma área ainda rica em oportunidades de pesquisa.

Para comprovar isso, listamos algumas informações:

- (i) os primeiros conceitos e aplicações do controle da produção são devidos ao rei da Babilônia Nabucodonozor por volta de 600 antes de Cristo (GEORGE, 1972);
- (ii) um dos maiores expoentes mundiais na área de controle da produção e em particular no controle da produção na manufatura celular, é sem dúvida o veterano Burbidge, autor de 14 livros e dezenas de artigos na área; no entanto o próprio BURBIDGE (1975; 1983; 1985) faz algumas afirmações que podem confundir o leitor atento: afirma que o PBC foi reinventado com o nome de MRP; diz

em outro artigo que o PBC possui semelhanças com o 'Just-in-time' (JIT e MRP são suficientemente diferentes a ponto de a maioria dos autores dizer que o primeiro segue a abordagem de puxar a produção e o outro a de empurrar a produção); em outro, Burbidge coloca que não gosta do MRP, e em todas essas referências defende categoricamente que o PBC é o melhor sistema, principalmente no ambiente da manufatura celular. Embora todas essas afirmações sejam verdadeiras, pelo menos em algum aspecto, colocadas como foram sem ressalvas, elas são contraditórias;

(iii) o melhor e maior periódico científico da Grã-Bretanha relacionado com a engenharia de produção é o 'International Journal of Production Research', o qual em 1989 publicou 136 artigos dos quais 36% atinentes ao controle da produção.

Assim sendo, no tratamento dessa área estimulante e importante (dado o seu impacto sobre a produtividade e lucratividade das empresas de manufatura), procuraremos definir os termos de uma forma precisa, tentando evitar o que ocorre na literatura relacionada com o gerenciamento: só para citar um exemplo, Tecnologia de Grupo aparece definida como princípio, conceito, filosofia, técnica, sistema Além disso, os termos em inglês acabaram por se consagrar de tal forma que toda tentativa de tradução acaba mais confundindo que esclarecendo; por exemplo, o termo 'leadtime' é traduzido na maioria das vezes (ZACCARELLI, 1987; BURBIDGE, 1983) por tempo de espera, o que não representa exatamente o significado do termo. No texto deixaremos tais termos em inglês entre apóstrofes, e os colocamos no início do trabalho, fornecendo seu significado e/ou uma tradução que consideramos razoável. Outra questão são as siglas inglesas, por exemplo MRP ('Material Requirements Planning') de emprego tão generalizado que não faz sentido empregar em seu lugar PNM (Planejamento das Necessidades de Materiais). Manteremos as siglas em inglês, salvo nos casos em que a sigla em português já esteja


bastante arraigada, por exemplo PO (Pesquisa Operacional). Antecedendo este capítulo, fazemos uma listagem de todas as siglas e seu significado por extenso.

Esta Tese compreende 8 capítulos. No capítulo I apresentamos as Considerações Iniciais. No capítulo II, fornecemos uma visão geral da função controle no ambiente CIM (Manufatura Integrada por Computador), fornecendo um pano de fundo para o trabalho a ser desenvolvido. No capítulo III, discutimos o papel da Pesquisa Operacional (PO) no controle dos Sistemas de Manufatura Integrados por Computador (CIMSS); defendemos a tese de que os Sistemas de Apoio à Decisão (SADs) são uma resposta para a falta de flexibilidade dos modelos de PO, e fazemos uma revisão bibliográfica a respeito dos SADs. No capítulo IV dissertamos a respeito da mais importante atividade de controle gerencial nos Sistemas de Manufatura, o Controle da Produção. No capítulo V elucidamos os conceitos relativos à Manufatura Celular. No capítulo VI, fazemos uma revisão dos trabalhos relacionados com a problemática do Controle da Produção na Manufatura Celular. No capítulo VII, apresentamos nossa proposta de um Sistema para Controle da Produção na Manufatura Celular. No capítulo VIII, explicitamos resumidamente as principais contribuições e conclusões do trabalho.

CAPÍTULO II

VISÃO GERAL SOBRE A FUNÇÃO DE
CONTROLE NOS SISTEMAS INTEGRADOS DE MANUFATURA

2.1 INTRODUÇÃO



Com o desenvolvimento da tecnologia de informação, o computador tem se tornado um elemento catalizador da integração das funções desempenhadas no sistema fabril: integração do projeto do produto com o planejamento do processo, este com o gerenciamento da produção, este com a fabricação etc., e como agentes dessa catalização aparecem os Sistemas de Informação (SI), que são subsistemas do Sistema de Controle. (Há os que colocam a seguinte relação, Sistema de Controle = SI + processo decisório).

Isso pode ser constatado na literatura recente. Por exemplo em HITOMI (1979), se incorpora a Tecnologia de Fabricação com a Tecnologia de Gerenciamento. Hitomi entende que a tecnologia de fabricação trata do fluxo de materiais, incluindo-se aí a transformação dos materiais, enquanto que a tecnologia de gerenciamento lida principalmente com o fluxo de informações de forma a gerenciar efetivamente o fluxo de materiais através do planejamento e controle. Os capítulos do livro de Hitomi se sucedem em ordem compatível com as etapas naturais do desenvolvimento dos Sistemas de Fabricação (SFs). Tem-se os princípios dos SFs e o processo. O gerenciamento da produção e a otimização das atividades de gerenciamento. A automação com as tecnologias do tipo 'computer-aided' e o Sistema de Informação (SI) que é um requisito para a obtenção de um SF integrado (sem SI não há controle, sem controle não há integração).

Como no ambiente integrado todos os aspectos devem ser levados em conta, o volume de dados é alto e deve ser alta a qualidade da transformação desses dados em informa-

ções úteis. Portanto, o computador é uma ferramenta essencial e o Sistema de Informação o agente do processo de integração.

Isso está ocorrendo nos Sistemas de Manufatura Integrados por Computador (CIMs), os sistemas de manufatura desenvolvidos sob a filosofia de fabricação CIM ('Computer Integrated Manufacturing' = Manufatura Integrada por Computador).

A faixa de aplicação do CIMS é intermediária, aproximadamente de médio volume e de média variedade (veja figura 1).

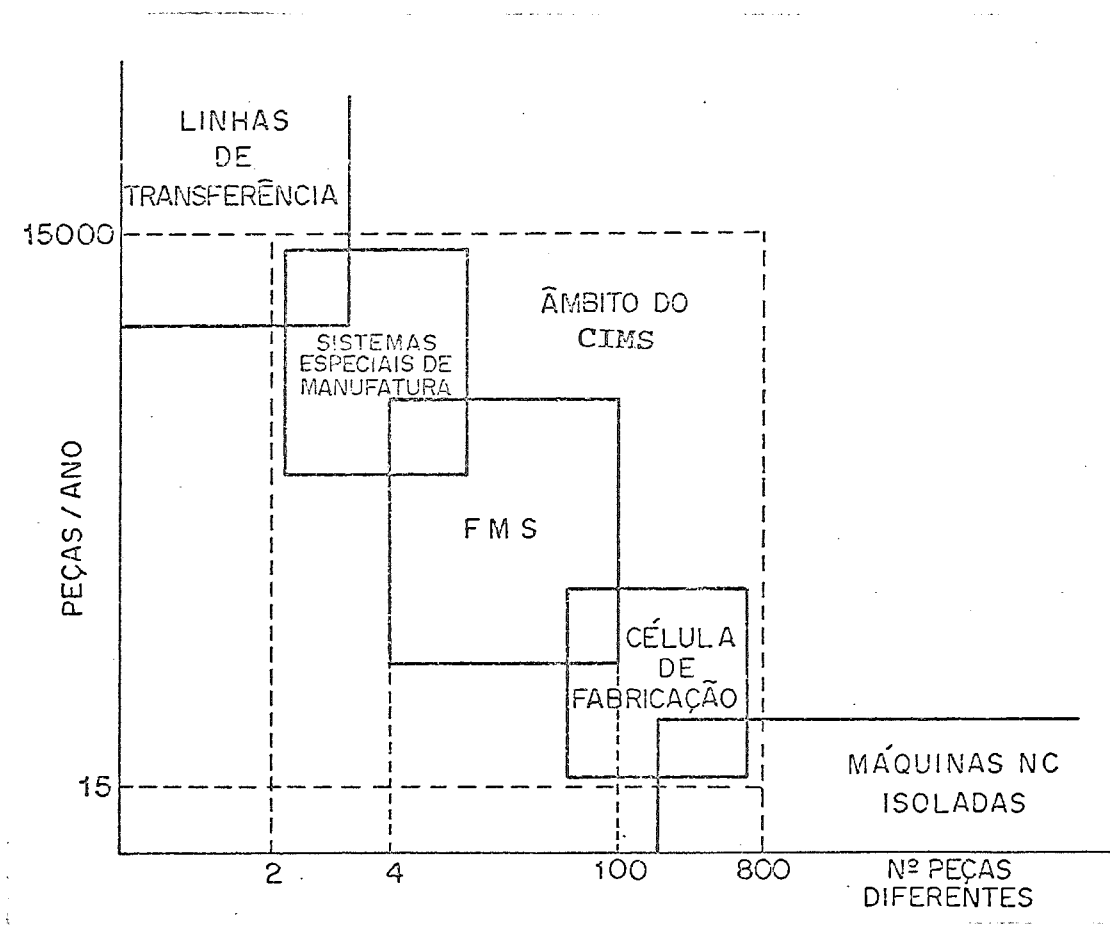


FIGURA 1: O ÂMBITO DO CIMS
ADAPTADO DE GROOVER (1980)

Segundo MERCHANT (1971), sistemas computadorizados para a completa automação e otimização da fabricação de peças estariam totalmente desenvolvidos entre 1980 e 1985. Embora tal previsão não se concretizou totalmente, não há dúvida de que os esforços e desenvolvimentos apontam nessa direção.

Os FMSs (Sistemas Flexíveis de Manufatura) no geral estão presentes nos CIMs (Sistemas Integrados de Manufatura por Computador). Para FERDOWS & LINDBERG (1987), mais que um investimento em tecnologia, a implantação de FMSs revela uma maneira mais profícua de pensar e gerenciar a manufatura, colocando a manufatura num papel estratégico dentro da empresa. Não tem sentido, ou seja não deve haver implantação de FMSs num ambiente em que a filosofia CIM (Manufatura Integrada por Computador) de fabricação não tenha sido adotada. Pela pesquisa que fizeram, FERDOWS & LINDBERG (1987) concluíram: "aqueles que estão enfatizando FMS também estão dando ênfase a muitas outras idéias avançadas no gerenciamento da produção".

É notório que no fundo os FMSs são células de manufatura providas com alto grau de automação flexível. Assim como, a manufatura celular não é factível sem o emprego da estratégia de fabricação Tecnologia de Grupo (TG), a TG é um alicerce para a implantação de um ambiente CIM. (Capítulo V).

Nos CIMs, quanto mais a caríssima tecnologia da automação estiver presente, para se obter resultados compensadores, mais há necessidade de se obter integração entre os cinco componentes do sistema, a saber: 'hardware', 'software', gerenciamento da base de dados, tecnologia da comunicação e recursos humanos. Para SINGHAL et alii (1987), atualmente é virtualmente impossível projetar e instalar um sistema desses onde cada um dos cinco subsistemas possa completamente explorar os outros quatro. Isso naturalmente configura um campo motivador de pesquisas.

2.2 VISÃO GERAL SOBRE O SISTEMA DE MANUFATURA INTEGRADO POR COMPUTADOR (CIMS)

Sistema de Manufatura Integrado por Computador (CIMS), é a fábrica do futuro, e por sinal um futuro que já está se tornando presente nos países mais desenvolvidos. É a fábrica onde graças à automação flexível, com poucas pessoas se consegue um alto volume de produção pela fabricação de média variedade de produtos feitos em quantidades moderadas.

CIMS, teve como causa de seu aparecimento, mudanças no mercado produtor (aumento da competição, introdução de novas tecnologias), no mercado consumidor (procura de produtos diversificados, diferenciados e renovados num curto intervalo de tempo) e na sociedade em geral (insatisfação com o trabalho nas fábricas, maior interesse por empregos no setor de serviços etc.). Como catalizador de seu desenvolvimento tem-se inovações tecnológicas (tecnologias do tipo 'computer-aided', redes locais de interligação (LAN), etc.) e inovações metodológicas. Assim sendo podemos definir o CIM como a filosofia de fabricação baseada no enfoque sistêmico e na existência da tecnologia de informação.

Como tecnologia do tipo 'computer-aided' compreende-se, entre outras:

CAD ('computer-aided design') que pode ser definido como "o uso dos sistemas computacionais para auxiliar na criação, modificação, análise ou otimização de um projeto" (GROOVER & ZIMMERS, 1984);

CAM ('computer-aided manufacturing') que pode ser definido como "o uso dos sistemas computacionais para planejar, gerenciar e controlar as operações de uma instalação de manufatura através de interface direta ou indireta do computador com os recursos produtivos da instalação" (GROOVER & ZIMMERS, 1984);

DNC ('direct numeric control') que envolve o uso de um computador de certo porte para controlar um certo número de máquinas NC ('numerical control') separadas;

CNC ('computer numerical control') onde um computador é usado para controlar uma máquina ferramenta;

CAPP ('computer-aided process planning') é o planejamento do processo auxiliado por computador;

CPC ('computer process control') é o controle do processo por computador;

CACE ('computer-aided cost estimating') cujo significado é estimativa de custos auxiliada por computador;

CIPP&C ('computer integrated production planning and control') cuja "pretensão é ser um sistema único responsável pela execução de todas as funções no domínio do controle da produção" (DAS & SARIN, submetido em 1990);

Armazenagem automatizada ('automated warehouse');

Movimentação de materiais automatizada, através de AGVs ('auto guided vehicles') que são veículos controlados por computador;

Robôs industriais que são manipuladores reprogramáveis controlados por computador;

CAQC que é o controle de qualidade auxiliado por computador.

A eficácia do emprego dessas tecnologias pode ser aumentada utilizando-se algumas estratégias de fabricação e estratégias de controle da produção, tais como: JIT ('just-in-time'), TG (tecnologia de grupo) e OPT (tecnologia de produção otimizada). Essas estratégias são baseadas em alguns princípios e serão abordadas em capítulos seguintes.

Quanto ao enfoque sistêmico, é a abordagem onde:

	DEIXOU DE SER	PASSOU A SER
* o modo de pensar	Primeiro analítico depois sintético	Primeiro sintético depois analítico
* o centro de atenção	A parte	O todo
* o método de resolver problemas	Dividir em problemas menores, resolver cada um, juntar as soluções	Resolver o problema, decompor a solução.

Essa abordagem estabelece que: o desempenho do todo depende do entrosamento entre as partes, e não apenas do

desempenho de cada uma, ou seja, o melhor funcionamento do todo, não corresponde, via de regra, somente ao melhor funcionamento de cada parte isoladamente.

As principais diferenças da Filosofia de Fabricação Convencional e a Filosofia de Fabricação CIM estão colocadas na figura 2 tendo como fonte BULLINGER et alii (1986).

Uma possível arquitetura para um Sistema Integrado de Manufatura por Computador encontra-se na figura 3.

Como se pode ver, o sistema é controlado por uma estrutura hierárquica onde um conjunto de computadores interagem enviando instruções de um nível mais alto (um controle gerencial, como definiremos na próxima seção), até o nível mais baixo (controle físico dos equipamentos) para que as operações sejam realizadas.

A integração necessita de uma estrutura de controle hierarquizada cujos elementos sejam compatíveis e comunicáveis entre si, assim a interligação dos computadores de controle deve ser feita através de redes locais de interligação (LANs) apropriadas.

A nível de chão de fábrica aparecem os FMSs ('Flexible Manufacturing Systems' = Sistemas Flexíveis de Manufatura), que são subsistemas vitais dos CIMs típicos. Um FMS consiste de um conjunto de máquinas ferramentas, equipamentos de movimentação de materiais e "facilidades" para a armazenagem em processo os quais estão sob o controle de um sistema de computador (BUZACOTT & SHANTHIKUMAR, 1980). Foram introduzidos por volta de 1970, exigem alto investimento e trazem um aumento substancial da produtividade na fabricação em pequenos e médios lotes (GROOVER & ZIMMERS, 1984).

Os fatores que contribuem para a flexibilidade das células de manufatura, e principalmente dos FMSs são:

- (i) tempos de preparação muito reduzidos, com o que se torna viável fabricar em pequenos lotes,
- (ii) versatilidade dos centros de usinagem em realizar uma variedade de operações em uma peça,
- (iii) possibilidade de mudar o roteiro de fabricação para

FILOSOFIA DE MANUFATURA	
CONVENCIONAL	CIM
DIVISÃO DO TRABALHO	
* Maior possível, o que acarreta: - trabalho simples com a menor categoria de salário possível, - baixo envolvimento do trabalhador, - muitos pontos de interfaceamento.	* Menor possível, o que acarreta: - trabalho qualificado com pessoal o mais qualificado possível, - alto envolvimento do trabalhador, - poucos pontos de interfaceamento.
EXECUÇÃO DO TRABALHO	
* Em lotes. * Uma operação após a outra. * Abordagem "empurrar" a produção/orientada para a utilização.	* De acordo com a demanda. * Sobreposição de operações. * Abordagem "puxar" a produção/orientada para processo.
TEMPO REQUERIDO PARA EXECUÇÃO	
* Mínimo por operação. * Máxima produção por minuto	* Mínimo por ordem. * Máxima utilização por período.
FLUXO DE MATERIAL E INFORMAÇÃO	
* Considera de forma isolada	* Integra.

FIGURA 2: FILOSOFIA DE FABRICAÇÃO (CIM E CONVENCIONAL)
 Fonte: BULLINGER et alii (1986).

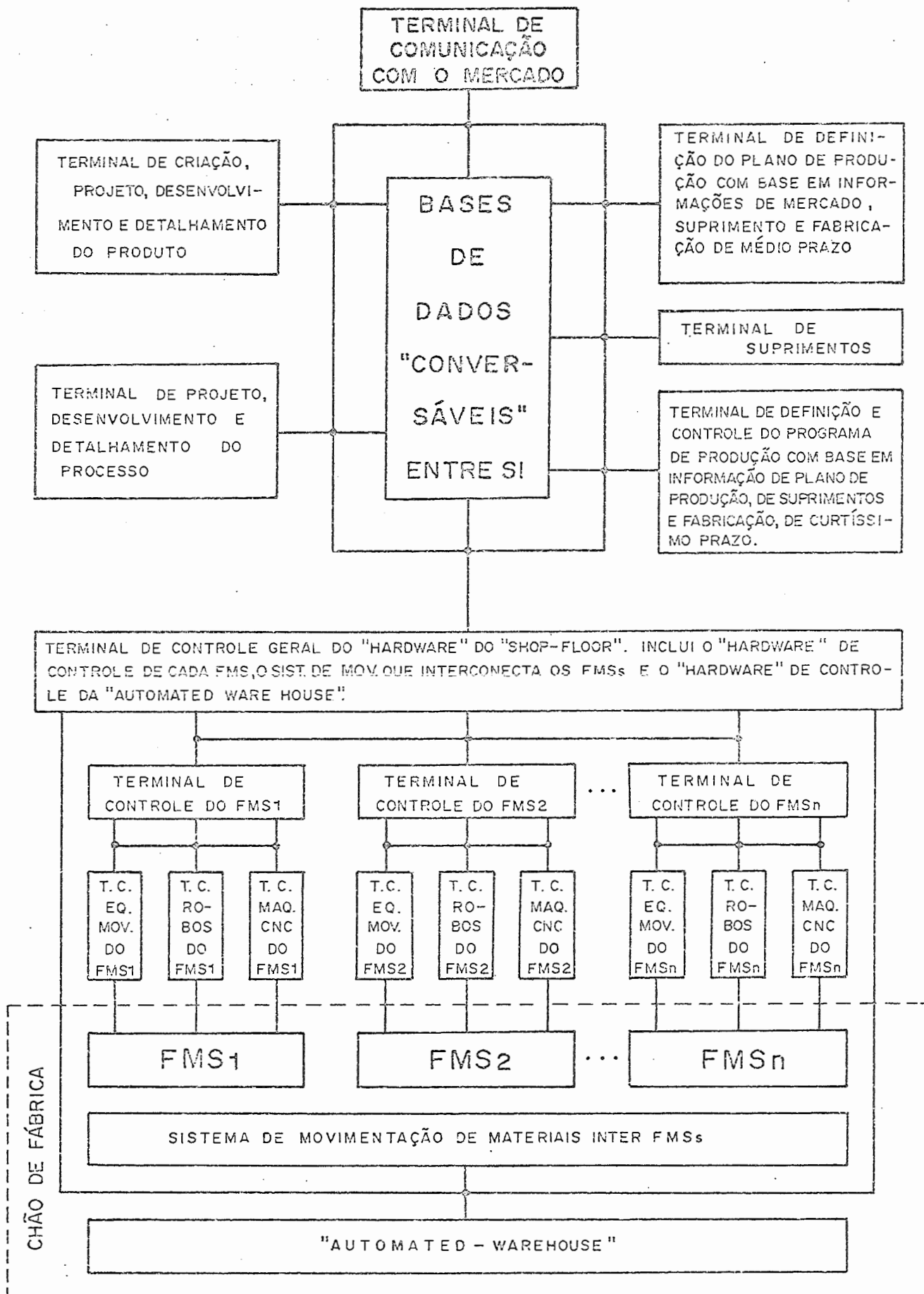


FIGURA 3. ARQUITETURA DE 'HARDWARE' A NÍVEL DE INTEGRAÇÃO TOTAL (—+— NÓ DE REDE LOCAL DE INTERLIGAÇÃO; tc = TERMINAL DE CONTROLE)

contornar o problema de máquinas paradas para reparo, (iv) disponibilidade de operações alternativas de forma a balancear a carga das máquinas.

Esse último fator recai num problema de controle da produção. Com as operações alternativas para fins de programação ('scheduling', que como veremos é uma atividade de controle da produção), pode-se aliviar as máquinas gargalos levando a um aumento global da produtividade do FMS (ou da célula de manufatura, na versão menos automatizada do CIMS). RANKY (1983) denomina isso de 'scheduling' dinâmico.

Um bom sistema de controle da produção trará como principais benefícios:

- (i) redução dos estoques de material comprado e de material em processo de modo que se empregue menor capital de giro e não se ultrapasse o espaço disponível para estoques nas estações de trabalho, que por sinal são muito reduzidos nos CIMSS;
- (ii) aumento da taxa de produção devido a vários fatores entre os quais a redução do tempo de preparação ('set-up') e a melhor utilização da mão-de-obra;
- (iii) maior cumprimento dos prazos de entrega, fornecendo assim, trunfos de vendas para a empresa;
- (iv) maior eficiência no processo de montagem uma vez que os itens certos estarão no momento certo no setor de montagem.

Do gerenciamento e em particular do controle, muito depende o sucesso de um CIMS. JAIKUMAR (1986) comparando sistemas avançados de manufatura americanos e japoneses, afirma que o desempenho dos sistemas japoneses era muito melhor. "Com poucas exceções, os FMSs instalados nos EUA mostram uma alarmante falta de flexibilidade. Em muitos casos, eles desempenham pior que a tecnologia convencional que eles substituíram. A tecnologia em si não é culpada; é o gerenciamento que faz a diferença... . As companhias americanas usavam FMSs de forma errada - para alto volume de produção de poucas peças ao invés de grande variedade de peças a baixo custo por unidade" (JAIKUMAR, 1986). E evidencia que Siste-

mas Flexíveis lembram fábricas em miniatura em operação e são os laboratórios naturais para estudar a Manufatura Integrada por Computador (CIM) que está se tornando rapidamente o campo de batalha para obter a supremacia na manufatura a nível mundial.

O sucesso de um CIMS depende em última análise, principalmente da qualificação dos funcionários da engenharia e do gerenciamento da empresa. Numa empresa com funcionários de alto nível, a engenharia cria levando em conta o mercado e o processo, enquanto que a gerência consegue implantar sistemas de controle mais eficientes.

Sobre esse último aspecto, o Japão é um bom exemplo. É um país que consegue implantar com sucesso Sistemas Modernos de gerenciamento, enquanto que na grande maioria dos países a implantação é uma fase difícilíssima. Esse sucesso de implantação, segundo MATSUDA (1988) advém do que ele chama de inteligência organizacional existente nas fábricas japonesas e coloca que isso ainda pode ser mais fortalecido pela integração S³ : síntese (incentiva coisas diferentes ficarem juntas), simbiose (incentiva coisas diferentes viverem juntas para benefício próprio de todas elas) e sinergia (incentiva coisas diferentes ficarem juntas e obter mais que a simples soma das partes).

A seguir, na figura 4, esboçamos um modelo conceitual de integração de um Sistema de Manufatura, no qual a função controle gerencial desempenha um papel preponderante. O controle gerencial capta as necessidades (detonadas a partir do mercado), avalia e coordena as capacidades (da engenharia, do suporte e do chão de fábrica), exerce um controle sobre o controle físico (das operações e da movimentação dos materiais). Exercer controle sobre o controle pode ser chamado de meta-controle.

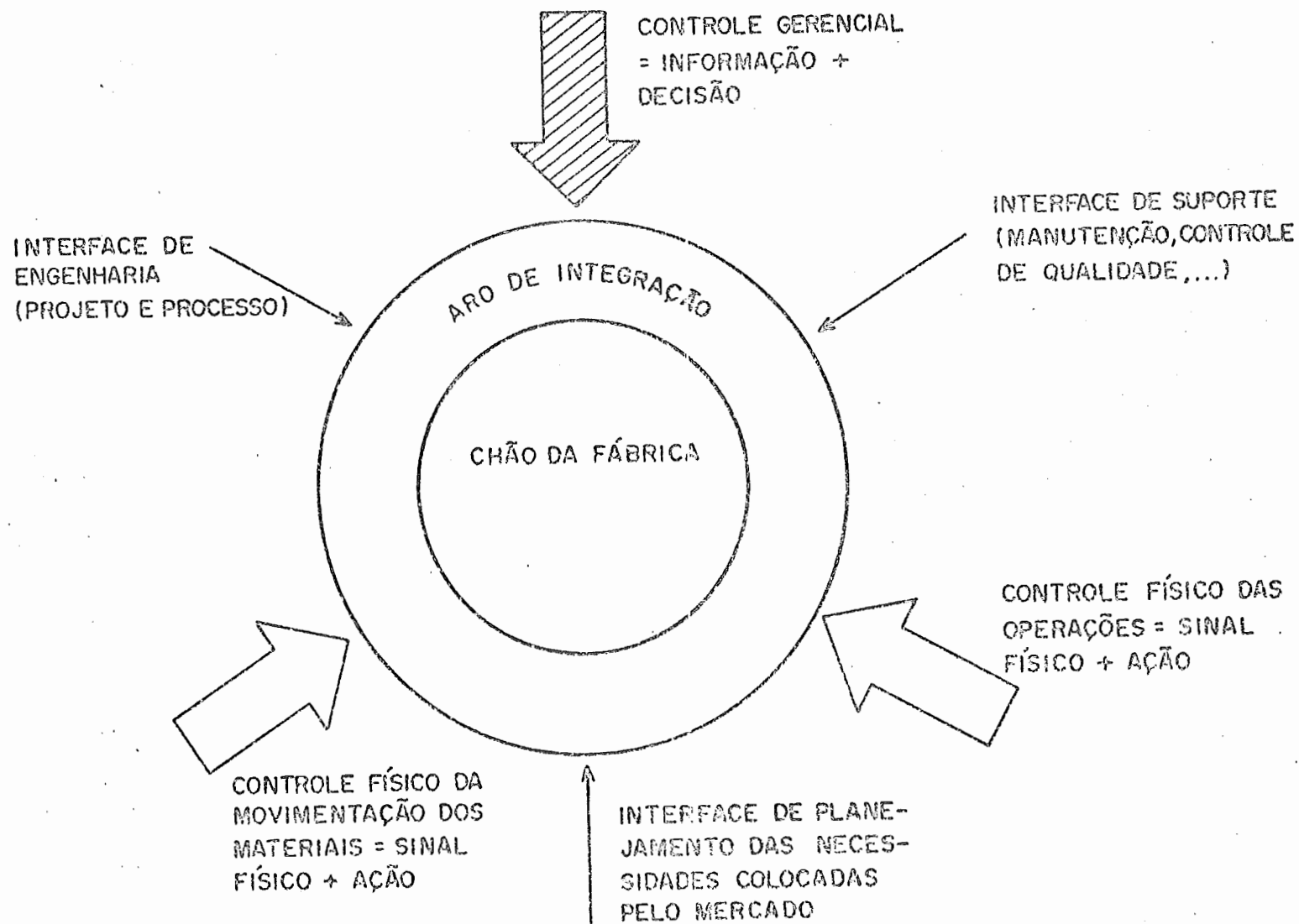


FIGURA 4. MODELO CONCEITUAL DE INTEGRAÇÃO DE UM SISTEMA DE MANUFATURA

2.3 CONTROLE, A FUNÇÃO VITAL PARA SE OBTER INTEGRAÇÃO

É de conhecimento comum que a atividade de controle é fundamental para a execução de qualquer trabalho. Nos CIMSS (Sistemas de Manufatura Integrados por Computador) a automação ocupa uma posição da mais alta importância, e por sua vez o controle num ambiente automatizado tem um papel crítico. Para ficar mais claro tomemos a definição encontrada em GROOVER (1980):

"Automação é a tecnologia relacionada com a aplicação de complexos sistemas mecânicos e eletrônicos baseados no computador para a operação e controle da produção. Essa tecnologia inclui:

- * máquinas ferramentas automáticas para processar peças,
- * sistemas automáticos para movimentação dos materiais,
- * máquinas para montagem automática,
- * processos contínuos,
- * sistemas de controle com realimentação ('feedback'),
- * sistemas de controle do processo por computador,
- * sistemas computadorizados para coleta de dados, planejamento e tomada de decisão para suportar as atividades de manufatura".

Nessa definição, o termo controle aparece explicitamente três vezes e no último parágrafo ele aparece novamente porém de forma implícita.

Há algumas décadas BRIGHT (1958) demonstrou que a natureza do controle tem íntima relação com os níveis de automação. Um resumo dos 17 níveis de mecanização de Bright encontra-se na figura 5.

A visão de controle mais estreita é a que o considera apenas como monitoramento. E talvez a mais abrangente é a de LEEUW (apud BOER & DURING (1987)) que entende que qualquer fenômeno de interesse pode ser modelado como uma configuração de controle, que consiste de um controlador, um sistema controlado e um ambiente. Para ele, controle é qualquer forma de influência dirigida do controlador sobre o sistema controlado. Ainda Leeuw estabelece que um controlador

A PARTIR DO HOMEM		A PARTIR DE UM MECANISMO DE CONTROLE QUE SE ORIENTA POR UM PADRÃO PRÉ-DETERMINADO DE AÇÃO	A PARTIR DE UMA VARIÁVEL NO AMBIENTE		INICIANDO A FONTE DE CONTROLE													
VARIÁVEL	FIXO DENTRO DA MÁQUINA	RESPONDE COM SINAL	RESPONDE COM AÇÃO		TIPO DE RESPOSTA DA MÁQUINA													
			SELECIONA A PARTIR DE UMA GAMA LIMITADA DE POSSÍVEIS AÇÕES PRÉ-FIXADAS	MODIFICA A PRÓPRIA AÇÃO SOBRE UMA FAIXA LARGA DE VARIACÃO														
MANUAL		MECÂNICO (NÃO MANUAL)			FONTE DE ENERGIA													
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	NÚMERO DO NÍVEL	NÍVEL DE MECANIZAÇÃO
Manual	Ferramenta manual	Ferramenta manual provida com energia	Ferramenta provida com energia e com controle manual	Ferramenta provida com energia e com ciclo fixo (função única)	Ferramenta provida com energia e com controle programado (sequência de funções fixas)	Sistema de ferramentas providas com energia e com controle remoto	Sistema atua ao ser introduzida a peça a ser manufaturada	Sistema atua e mede alguma(s) característica(s) do trabalho realizado	Além de medir o sistema compara e pode assim detectar os erros	Registra o desempenho	Altera velocidade, posição, direção de acordo com o sinal de mensuração	Automaticamente aceita ou rejeita o produto de acordo com a medição realizada	Identifica e seleciona conjunto apropriado de ações	Corrige o desempenho após operar	Corrige o desempenho enquanto opera	Antecipa a ação necessária para produzir o desempenho requerido e de acordo com isso se auto-regula		

FIGURA 5: OS 17 NÍVEIS DE MECANIZAÇÃO E SUAS RELAÇÕES COM AS FONTES DE ENERGIA E DE CONTROLE.
 Fonte: BRIGHT (1958)

efetivo deve ter: (a) um objetivo; (b) um modelo do sistema controlado; (c) informação sobre o ambiente e o estado do sistema controlado; (d) ações adequadas de controle e (e) suficiente capacidade de processamento de informação.

De uma maneira geral, todo controle engloba:

- * a definição de um padrão de resposta do sistema que está sendo controlado. Isso implica num processo de tomada de decisão;
- * a monitoração da resposta para efeito de comparação com o padrão selecionado. No monitoramento, dados sobre o processo são transmitidos para o computador;
- * ação para alterar, se for necessário, os estímulos/entradas/padrões de forma a se atingir os resultados desejados (veja figura 6).

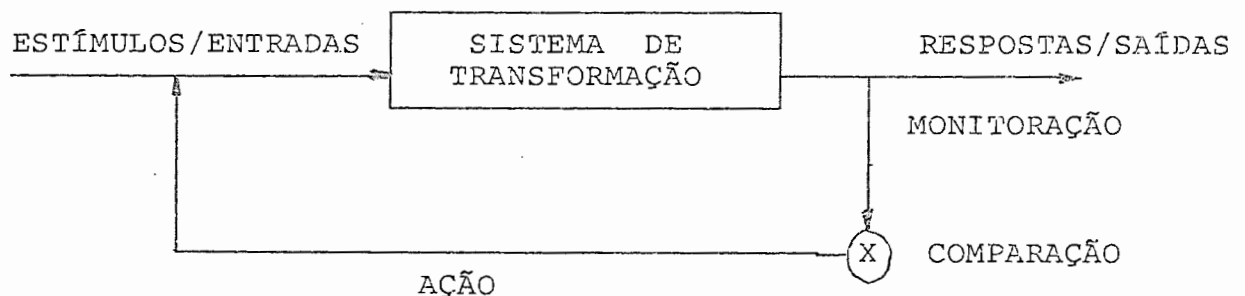


FIGURA 6: O CLÁSSICO ESQUEMA DO PROCESSO DE CONTROLE

Qualquer sistema "é um conjunto de elementos que atuam juntos na execução do objetivo global do todo" (CHURCHMAN, 1972).

Quanto à natureza dos elementos existem os sistemas "físicos" e os sistemas "gerenciais". Nos primeiros os elementos são entidades físicas (por exemplo, um automóvel), enquanto que nos segundos os elementos são procedimentos (por exemplo, o sistema MRP).

Da mesma forma que num automóvel existem subsiste-

mas, por exemplo o sistema de comando de válvulas para controlar a injeção de combustível nos cilindros, num sistema de Manufatura também existem subsistemas, por exemplo o sistema de programação da produção que entre outras coisas norteará o seqüenciamento das operações no chão da fábrica.

Dessa forma podemos depreender dois tipos de controle:

- * controle físico, e
- * controle gerencial.

O controle físico é o controle existente por exemplo, no governador das máquinas a vapor (James Watt, fins do século XVIII), cuja finalidade é manter sob controle o número de rotações por minuto do eixo da máquina. Se a velocidade aumenta, aumenta a força centrífuga sobre duas esferas acopladas ao eixo de saída, com isso elas se afastam do eixo, e quanto maior o afastamento mais se fecham as válvulas que controlam a entrada de vapor nos êmbulos, fazendo então a velocidade diminuir em direção ao padrão.

Já o controle da produção, o qual engloba a programação da produção, é um controle tipicamente gerencial. A informação é o "sangue" que flui tanto se o sistema é manual (via documentos tais como ordens de serviço, etc.) ou se é automatizado (via terminais, LANs, etc.).

Há portanto uma perfeita analogia entre os tipos de sistema e os tipos de controle. A parte visível de qualquer sistema de manufatura são subsistemas físicos cuja operação depende de sistemas de controle físico. Já a integração dos vários subsistemas físicos é feita por sistemas gerenciais que realizam controle do tipo gerencial. Quanto mais integração for requerida, mais apurado deve ser o controle gerencial.

Existem vários tipos de controle gerencial de acordo com o problema abordado: controle da produção; controle da produtividade; controle da qualidade etc.

Um parâmetro que é comum a todos esses controles é o tempo. No controle físico o tempo de desencadeamento de uma ação no 'loop' de realimentação (figura 6) é instantâneo, enquanto que no controle gerencial isso ocorre no geral em

intervalos nítidos de tempo; nesse sentido dizemos que o controle gerencial é geralmente 'off-line' enquanto que o controle físico é sempre 'on-line'.

O controle gerencial da produção é o que mais afeta a integração. Além disso, num CIMS o controle da produção e o da manutenção passam a ter uma importância muito maior do que têm nos sistemas de fabricação convencionais. As razões disso são que num CIMS os equipamentos exigem grandes investimentos e assim devem ser cortados ao máximo os tempos improdutivos evitáveis, quer de preparação através de uma programação da produção eficiente (que deve levar em conta outros fatores, tais como prazos de entrega e inventários em processo), quer de uma programação da manutenção que programe reparos preventivos exatamente quando o equipamento não estiver sendo requisitado pela programação da produção.

O acompanhamento da produção deve ser capaz de coletar os dados certos na hora certa sobre o que está ocorrendo no chão da fábrica de forma que as reprogramações da produção e da manutenção sejam feitas com dados atualizados.

Resumidamente o controle da produção compreende:

- (a) definir (estabelecer padrão) o que deve ser feito, onde e quando (numa base de tempo de curto prazo). Isso corresponde à programação da produção que, como veremos no capítulo IV, pode ser hierarquizada em três níveis de decisão;
- (b) monitorar o que está acontecendo no chão de fábrica;
- (c) comparar o que está acontecendo com o programado e, em casos de desvios, realimentar o processo através de uma reprogramação.

A fase (a) é basicamente um processo de tomada de decisão. É aí que metodologias como PO e mais recentemente Inteligência Artificial (IA), têm importância no controle da produção, principalmente no ambiente CIM. A relevância da PO no controle dos CIMSs, abordaremos no próximo capítulo.

2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os fatores estratégicos para uma empresa de manufatura se manter no mercado são: adaptabilidade (capacidade da engenharia de projeto criar e desenvolver produtos na velocidade que o mercado consumidor demande), flexibilidade (capacidade do processo de fabricação se adaptar a tempo para produzir os novos produtos introduzidos), qualidade e produtividade (GERELLE & STARK, 1988).

Não se pode ter uma dosagem apropriada de adaptabilidade, flexibilidade, produtividade e qualidade sem haver integração. Empresas não integradas tendem a ser fortes em aspectos não tão essenciais e fracas em aspectos cruciais para as suas características de relacionamento com o mercado consumidor. Por exemplo, ser apenas altamente produtiva quando sua situação exige alta adaptabilidade.

Como vimos essa integração depende basicamente dos controles gerenciais.

Uma tendência marcante nos CIMSS que estão sendo desenvolvidos nos países mais adiantados é que está havendo uma centralização do controle, algo que foi previsto há três décadas. LEAVITT & WHISLER (1958) previram que na década de 80, com a combinação da MS ('Management Science', é a PO no âmbito do gerenciamento) e a Tecnologia da Informação, haveria uma descentralização ao nível de tomada de decisões, uma centralização ao nível de controle, uma redução grande do número de gerentes médios e maior controle da alta gerência sobre a empresa.

Essa descentralização ao nível de tomada de decisão deve se tornar maior à medida que os SADs (Sistemas de Apoio à Decisão) vão sendo desenvolvidos e implantados. Além disso os computadores estão assumindo muitas atividades de controle que cabiam aos gerentes médios. Os gerentes de linha que estão ficando bem como a alta gerência, estão passando a ter uma responsabilidade maior.

Ressaltando o impacto sobre o gerenciamento, dos avanços das tecnologias relacionadas com a tecnologia da

informação, APPLGATE et alii (1988) acreditam que o efeito das mesmas será o aparecimento de uma nova forma organizacional, a organização 'cluster' (organização de grupos), onde pessoas mesmo fisicamente distanciadas, trabalham juntas para resolver os problemas da companhia ou para definir um processo. Assim os sistemas de informação e comunicação permitirão às pessoas com habilidades que se complementam, trabalharem juntas.

Para finalizar o capítulo, enfatizando a importância do controle para a empresa industrial, citamos BEER (1966) que mostra a correspondência existente entre o sistema de controle de uma empresa e o sistema nervoso central do corpo humano: "...existem óbvias semelhanças entre os controles usados numa empresa e aqueles usados no corpo humano. Por exemplo, ambos são redundantes e ambos incorporam subsistemas de maior ou menor autonomia".

CAPITULO III

A PESQUISA OPERACIONAL E O CONTROLE DOS
SISTEMAS DE MANUFATURA INTEGRADOS POR COMPUTADOR

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A área do gerenciamento onde mais ocorre a intervenção da Pesquisa Operacional (PO) é o controle. Isso ao que parece, é explicado pelo caráter tático da função controle, e a PO, pelo menos até aqui se mostrou muito mais aplicável às situações táticas que às situações estratégicas.

Para BEER (1966) a finalidade da PO é a "...obtenção de 'insights' sobre as maneiras ótimas de controlar a empresa como um todo, e o estabelecimento de procedimentos formais de tomada de decisão para o controle de suas compras, estoques, produção e políticas de 'marketing'".

Uma ciência irmã da Pesquisa Operacional é a Cibernética, a qual visa a obtenção do controle automático tanto para as atividades gerenciais como físicas na empresa. Cibernética é a ciência do controle através da comunicação não importando se o sistema é animado ou inanimado. A Cibernética estuda o fluxo de informação pelo sistema e o modo como essa informação é usada para controlar o sistema. BEER (1966) delineou um modelo cibernético através do qual a PO é capaz de fornecer ao gerente um esquema integral para o controle das operações sob seu comando. Contudo, embora interessante sob o ponto de vista conceitual, essa teoria nem teve desdobramentos e nem mostrou sua utilidade em situações práticas.

Embora a PO seja, de uma maneira geral, pouco usada na manufatura convencional, ela apresenta um enorme potencial de utilização nos CIMSS. As razões disso são:

- (1) nos sistemas convencionais de manufatura, a falta de dados confiáveis e atualizados provoca uma grande barreira para o uso da PO. Já no CIMS, dada a centralização de informações nas bases de dados, isso é superado;

- (2) num ambiente CIM, a programação da produção dos FMSs ou das células, é mais factível de ser otimizada usando técnicas do que num sistema de manufatura convencional do tipo 'job-shop', onde o porte do problema é maior e o próprio fluxo de materiais é mais caótico;
- (3) no CIMS, a decomposição da carga de trabalho pelos FMSs ou células e a existência de roteiros de fabricação mais curtos, leva a um volume de dados menor que nos sistemas convencionais do tipo 'job-shop'.

3.2 A PO NO CONTEXTO DO CONTROLE DOS CIMSS

Nos CIMSS "atividades rotineiras e funções puramente operacionais desaparecerão com a fabricação por automação flexível; a nova ênfase será nas atividades de planejamento, regulação e verificação. Demandas sensomotoras darão lugar para demandas intelectuais. Nessas atividades o homem será auxiliado mais e mais por sistemas de informação e apoio à decisão modelados através do uso de dados estruturados adaptados para o problema e bases de procedimentos" (BULLINGER et alii, 1986).

Embora nesse contexto outras metodologias, como a Inteligência Artificial, são pertinentes, não há dúvida que a PO tem seu espaço garantido pela própria maior disponibilidade e confiabilidade de dados quantitativos.

Como já vimos, no controle gerencial por computador, este determina os valores dos "padrões" apropriados para cada controle físico existente no CIMS. Para estabelecer esses valores o controle gerencial deve determiná-los de forma a otimizar o Sistema de Manufatura segundo algum(s) objetivo(s) que deva(m) ser atingido(s).

Em qualquer situação de controle podemos identificar os seguintes tipos de variáveis/constantes (ACKOFF & SASIENI, 1979):

- (i) variáveis (ou constantes) que não podem ser controladas, mas que afetam a solução do problema;
- (ii) variáveis de controle. São também chamadas de variáveis de decisão. O decisor possui controle sobre elas;
- (iii) variáveis de resposta. Servem para analisar o desempenho do sistema em função das possíveis alternativas.

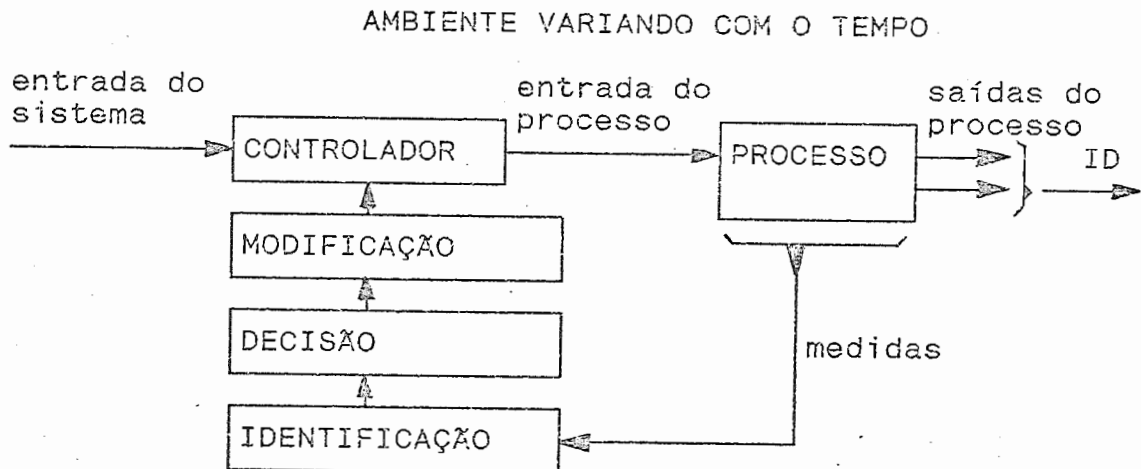
Como ilustração, tomemos determinado problema de controlar a produção numa célula. O número de máquinas CNC de certo tipo, é um dado do problema e portanto uma constante não controlada. Um determinado tempo de preparação, pode ser uma constante ou uma variável não controlada; nesse último caso, é encarado como uma variável aleatória que

deve ter seu comportamento descrito através de um modelo probabilístico. O número de unidades, de certo tipo de peça, que deve ser fabricado num determinado período, é uma variável de decisão. O valor médio de estoque em processo é uma variável de resposta.

Se há uma monitoração da variável de resposta realimentando uma ação direta e imediata sobre as entradas do sistema, temos um controle gerencial adaptativo (configuração geral na figura 7).

No caso de se estudar o estado de equilíbrio do sistema, e o 'feedback' for feito de tempo em tempo, através de reestudos para definir os novos valores das variáveis de controle, esse sistema de controle podemos chamar de sistema de controle revisionado. Se a revisão for feita usando métodos de PO de decisão, podemos chamá-lo de sistema de controle ótimo.

Nas situações estruturadas (objetivos a serem atingidos estão bem definidos) o controle ótimo é bastante apropriado. Nas situações semi-estruturadas ou não-estruturadas temos o controle gerencial de apoio à decisão que é implementado por um SAD (seções 3.3 e 3.4).



ID= Índice de Desempenho

FIGURA 7: CONFIGURAÇÃO GERAL DE UM SISTEMA DE CONTROLE ADAPTATIVO
Fonte: GROOVER (1980)

O controle de 'feedback' (exemplo do governador já citado) é um controle físico. O controle ótimo é um controle gerencial. O controle adaptativo (figura 7) é uma combinação do controle de 'feedback' com o controle ótimo,

Em AMERICAN MACHINIST (1985), é feita uma análise dos aspectos técnicos que influenciam o CIM. São considerados: a comunicação de dados, a validação e consistência de dados, a integração de dados geométricos e textuais, os sistemas especialistas e os modelos do processo. Esse último aspecto é intimamente relacionado com a PO, e esse relatório coloca que "modelos matemáticos mais precisos dos processos de fabricação são necessários. Modelos existentes tendem a refletir o pior caso, não as capacidades reais do sistema ou o desempenho ótimo. Sem modelos atualizados, engenheiros não podem realizar a análise e a otimização matemática de um processo nem esforçar-se na construção de uma síntese do processo a partir dos dados de produção".

Desenvolvimentos da PO, como o seqüenciamento de operações em uma máquina, do qual constam inúmeros trabalhos publicados, e que até agora eram considerados como uma maneira de se criar e provar conceitos que talvez poderiam ser utilizados no problema de 'scheduling' (programação da produção com várias máquinas), nos CIMs começam a ter uma importância prática maior, já que está ocorrendo que "...as operações constantes dos roteiros deverão cada vez mais ser agrupadas em máquinas multioperacionais como os centros de usinagem. O objetivo deverá ser a usinagem completa de uma peça com uma única fixação, os custos das máquinas-ferramentas capazes de operar nessas condições são geralmente altos. Neste caso, os custos de produção, são deslocados do pessoal para as máquinas-ferramentas. Os equipamentos com automação flexível diminuem a influência exercida pelo pessoal diretamente envolvido na produção. Conseqüentemente os resultados de produção obtidos nesses equipamentos são agora dependentes do desempenho do sistema de manufatura e da qualidade da programação" (AGOSTINHO, 1985). Naturalmente o desempenho do sistema de manufatura em muito dependerá do seqüenciamento em um centro de usinagem e/ou do 'scheduling' em vários cen-

tros de usinagem.

Nos sistemas convencionais a maior parte do problema de 'scheduling' é deixada para os encarregados/mestres /supervisores. Agora no ambiente CIM, essa atividade de controle é comandada por um sistema de informação computadorizado, o qual poderá e mesmo deverá ter seu desempenho melhorado com a incorporação de técnicas de PO e/ou IA. O controle da produção deve ser mais preciso, mesmo que á custa de se ter um sistema mais sofisticado, para que não ocorram interrupções indesejáveis e evitáveis da operação dos equipamentos de automação flexível que são caríssimos.

Para terminar essa seção, dando um destaque aos FMSs, os subsistemas de chão de fábrica mais comuns do CIMS, e que no fundo nada mais são que células providas com automação flexível, observamos que:

- (i) eles não são somente um amontoado de máquinas CNC, já que existe o importantíssimo sistema de controle integrado. Ele permite uma drástica redução do tempo total de fabricação e a possibilidade de operar em um turno sem mão-de-obra;
- (ii) essa redução tem impacto direto sobre o tempo improdutivo das peças no chão de fábrica. Na manufatura convencional esse tempo é escandaloso, segundo MERCHANT (apud SÉRIO (1990)) 95% sem considerar os tempos de preparação dos equipamentos e as colocações e retiradas das peças;
- (iii) BUZACOTT & YAO (1986b) alertam que "talvez não foi notado pela comunidade de PO/MS que a implantação dos conceitos de FMS tem o potencial de alterar radicalmente nossa maneira de encarar os problemas na manufatura e criar um número de problemas altamente desafiadores para a PO/MS". Naturalmente, a situação no Brasil da PO nesse contexto é muito mais incipiente.

3.3 SISTEMAS DE APOIO À DECISÃO : A RESPOSTA PARA A FALTA DE FLEXIBILIDADE DOS MODELOS DE PESQUISA OPERACIONAL.

Analisando o por quê dos engenheiros de produção não usarem extensivamente as ferramentas quantitativas computacionais, TURBAN (1983) destaca quatro motivos:

- (i) os engenheiros de produção como a maioria dos profissionais, têm dificuldade em se manter atualizados com a tecnologia computacional a qual se modifica constantemente;
- (ii) tal tecnologia como existente até há pouco tempo, não era abrangente o bastante para servir aos usuários efetivamente. Aplicações computacionais requerem habilidade significativa em programação e análise de sistemas enquanto que a quantidade de pacotes computacionais disponíveis era limitada;
- (iii) muitos problemas de decisão eram altamente complexos para a modelagem IE-MS existente (IE= 'Industrial Engineering'= engenharia de produção);
- (iv) o custo de usar computadores freqüentemente excedia seus benefícios.

Podemos ainda acrescentar o de EDELMAN (1977):

- (v) uma das maiores, senão a maior, limitação de PO/MS é que muitas situações gerenciais requerem uma resposta rápida, e os estudos de PO são muito demorados.

Tanto TURBAN (1983) como EDELMAN (1977) colocam como uma saída para esses empecilhos os desenvolvimentos de Sistemas de Apoio à Decisão (SADs).

Um sexto motivo, que é crucial num ambiente CIM, é a falta de flexibilidade dos modelos.

Flexibilidade tem sido colocada como uma questão central para os CIMs tornarem-se eficientes na produção em pequenos lotes (ADLER, 1988).

O sistema de controle deve ter capacidade de se adaptar às mudanças no ambiente. Um sistema de controle base-

ado somente em técnicas de PO, não tem a flexibilidade desejada. Um SAD por sua vez, traz a flexibilidade do gerente nas situações dinâmicas, ao grande poder analítico dos modelos em situações estáticas.

Outro motivo para defendermos a aplicação da PO na forma de um SAD, é que as barreiras de implantação, devido ao não entendimento das técnicas de PO pelo gerente, ficam totalmente derrubadas, já que o gerente terá controle sobre o que fará a "caixa-preta" e ele poderá discordar das soluções que ela apresentar e fazê-la trabalhar numa direção que ele contemple como sendo promissora.

Um exemplo disso são as máquinas atuais de jogar xadrez. São implementadas com algoritmos de PO e IA, e são melhores que um Grande Mestre em posições táticas, mas em posições estratégicas, são fracas e perdem seu tempo em volumosos cálculos e análises de variantes em direções, na maioria das vezes, irrelevantes. Um bom jogador que possua sólidos conhecimentos estratégicos, em combinação com uma máquina dessas e direcionando-a para onde ele julga promissor, obtém um jogo fortíssimo. A analogia que queremos estabelecer, pode ser fundamentada na afirmação de CHADWICK (1978) de que o problema de programação da produção é similar ao jogo de xadrez.

Isso é compatível com o fato de que a aplicação de PO no geral recai nos problemas táticos estruturados, que via de regra são problemas que possuem um objetivo definido de forma precisa. Já na aplicação da PO a problemas táticos semi-estruturados (muitos objetivos dos quais vários conflitantes) e a problemas estratégicos, há necessidade de incorporá-la num SAD. Um exemplo está em SIMMONS & POULOS (1988) que incorporam um modelo de programação linear num SAD, o qual foi implantado com sucesso e utilizado pela alta gerência no planejamento estratégico. O problema era semi-estruturado e avaliava por exemplo a viabilidade de instalar uma nova fábrica.

Um objetivo do desenvolvimento do SAD é a translação de modelos analíticos complexos em ferramentas fáceis de utilizar. Tem-se os SADs interativos e os inteligentes, de-

pendendo de terem sido ou não incorporadas técnicas de IA (figura 8).

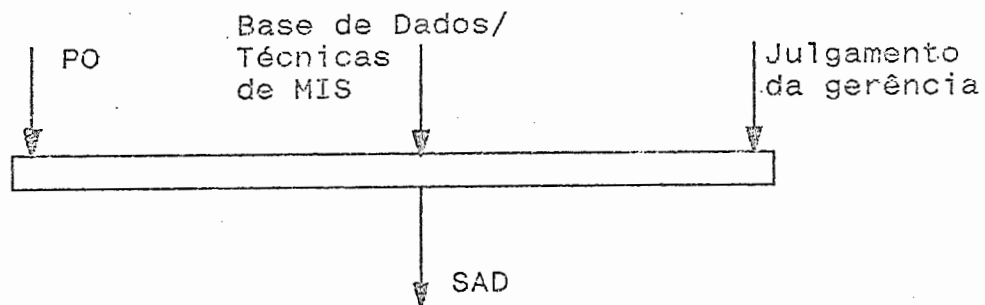


FIGURA 8: A SINERGIA DO SAD INTERATIVO

ANTHONISSE et alii (1988) observam que Sistemas Interativos de Planejamento são um fenômeno relativamente novo na PO e que, a matemática da PO é uma ocupação normativa, enquanto que a prática da PO é uma atividade empírica em que, ferramentas formais são aplicadas às situações reais de uma forma heurística, e que isso é particularmente verdadeiro para os SADs.

O SAD surgiu ao final da década de 60 e foi possível com o desenvolvimento dos terminais descentralizados que permitem diálogo entre sistema e usuário. MORTON (1971) como pioneiro, escreveu o primeiro livro sobre o assunto; KEEN & MORTON (1978) escreveram o primeiro livro considerado importante na área enquanto que SPRAGUE & CARLSON (1982) são bastante citados por, entre outras coisas, terem concebido a distinção entre: Gerador de SADs (um "pacote" de 'hardware' e 'software' relacionados que fornecem os meios para se construir SADs Específicos de uma forma mais fácil e rápida); SADs Específicos e Ferramentas de SADs (são elementos de 'hardware' e 'software' que facilitam o desenvolvimento de Geradores de SADs e SADs Específicos; por exemplo, APL, PASCAL, LINDO, LOTUS 1-2-3, ...).

Num trabalho paralelo ao de MORTON (1971) e também pioneiro, LITTLE (1970) lança as raízes de algo que na década de 80, principalmente na segunda metade, se consubstanciou em uma das quatro escolas dos SADs: a escola Cálculo de Decisão com forte influência da PO. Segundo STABELL (1987) as outras três escolas (ou abordagens) são: Análise de Decisões, Pesquisa da Decisão e Processo de Implementação.

Não é fácil desenvolver um SAD, já que como principal requisito "... deve-se entender o processo decisório do gerente" (KEEN, 1980). Uma característica importante do SAD é que a definição dos comandos chaves que regularão o diálogo do gerente com o sistema, deve caber mais ao gerente que ao analista de Pesquisa Operacional. Na figura 9 tem-se

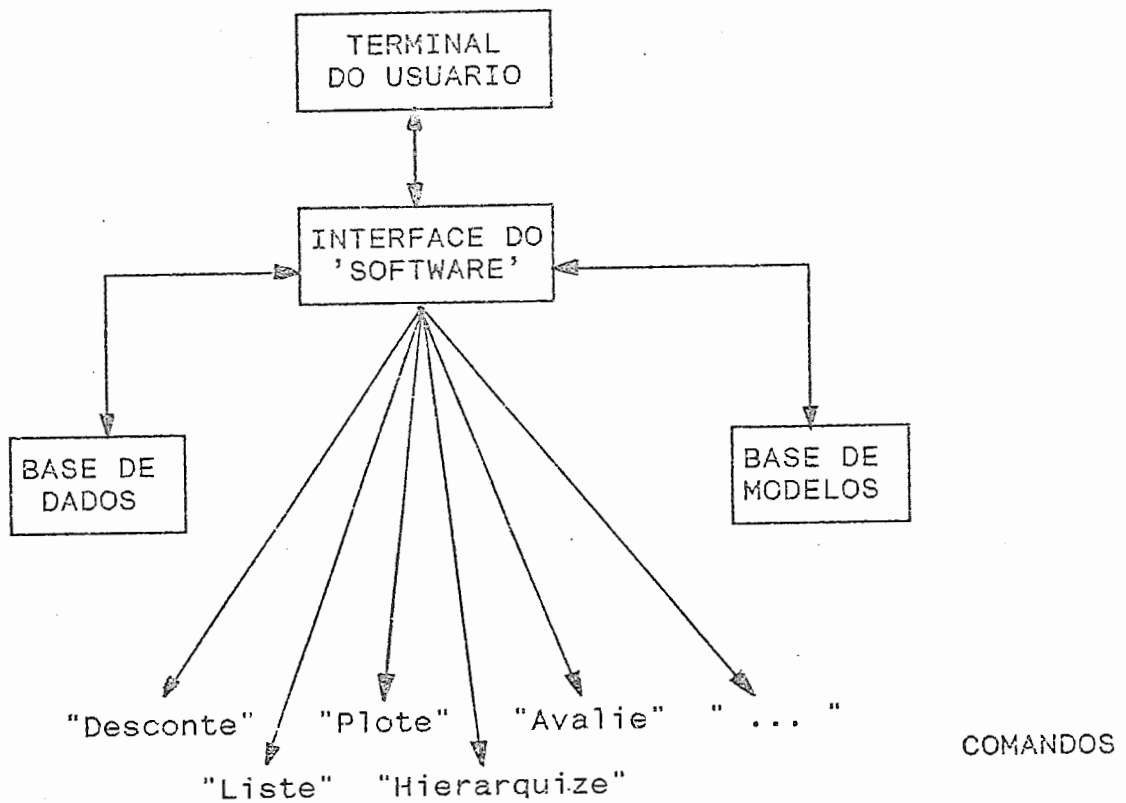


FIGURA 9: ESTRUTURA DO SAD

Fonte: KEEN (1980) em combinação com
SPRAGUE & CARLSON (1982)

a estrutura do SAD. A interface gerencia o diálogo usuário/SAD. Na lista de comandos da interface, o pontilhado significa que, no processo de evolução do sistema, que é inerente aos SADs, novos comandos provavelmente serão adicionados, e outros modificados ou eliminados. Atualmente, é usual esses comandos serem colocados na forma de opções de um menu. SANTOS & HOLSAPPLE (1989) discorrem sobre as vantagens de se ter uma interface usuário/sistema adaptativa; isto é, que possua características que mudam à medida que o usuário ganha experiência com o sistema.

Na figura 10 colocamos a relação entre o tipo de Sistema de Informação (SI) e a natureza do problema. Essa figura não está propriamente de acordo com a literatura. Há muitos pesquisadores que vêem o MIS como apropriado para as situações estruturadas (p. ex., GORRY & MORTON (1971) e OZDEMIREL & SATIR (1987)). RATHWELL & BURNS (1985) entendem que um DDM ('Distributed Decision Making' = Tomada de Decisão Distribuída) pode envolver vários SADs, e como SPRAGUE & CARLSON (1982): um SAD pode envolver vários MISs, e um MIS pode envolver vários EDPs ('Electronic Data Processors' = Processadores Eletrônicos de Dados). ALTER (1977) considera o termo MIS como totalmente dispensável, e prefere em seu lugar Sistemas Baseados no Computador, os quais compreendem: os EDPs (cuja finalidade é facilitar ou automatizar as atividades de manipulação de dados) e os SADs (cuja finalidade é dar apoio à tomada de decisão gerencial). FINLAY & MARTIN (1989) vêem o MIS como um tipo de SAD. Já VAZSONYI (1982) vê o SAD como um tipo de MIS.

Problema de controle da produção, o qual engloba a programação da produção, é um problema estruturado? Depende da empresa. Se as condições são estáveis e os objetivos bem definidos (algo bem mais frequente nos sistemas 'flow-shop') então é um problema estruturado. Nos 'job-shops', é na maioria das vezes não estruturado. Nos CIMs é bem possível que na maioria dos casos seja semi-estruturado. A prioridade dos objetivos se altera dinamicamente, levando no geral a decisões não rotineiras e não repetitivas.

PROBLEMA	TIPO DE SIST. DE INFORMAÇÃO APROPRIADO	CARACTERÍSTICA
Estrutu- rado	Sistemas de PO	Processo decisório é feito totalmente pelo computador que fornece uma escolha única, avaliada como a melhor segundo um objetivo estabelecido e levando em conta as restrições colocadas.
Semi-es- trutu- rado	SAD	Parte do processo decisório é delegada para o computador e parte requer o julgamento do gerente para levar em conta aspectos subjetivos, 'trade-offs' qualitativos e estabelecimento de objetivos.
Não es- trutu- rado	MIS	O processo decisório é realizado pelo gerente. O sistema de informações apenas coloca informações disponíveis para o gerente decidir.

FIGURA 10: NATUREZA DO PROBLEMA E TIPO DE SISTEMA DE INFORMAÇÃO.

Segundo McKAY et alii (1988) na manufatura convencional aplicações bem sucedidas dos desenvolvimentos de PO e IA no 'scheduling', podem já ter acontecido mas são raras, uma vez que para isso a empresa deve apresentar as seguintes características:

- * um processo de fabricação estável, simples e bem entendido;
- * objetivos de manufatura simples que não sejam afetados por agendas secretas;
- * tempos de ciclos curtos de forma que o trabalho possa co-

- meçar e finalizar sem interrupção;
- * tempos de processamento e preparação previsíveis e confiáveis;
 - * prazo, quantidade e qualidade de entrega conhecidos;
 - * grandes intervalos de tempo entre falhas com relação ao intervalo do ciclo de fabricação, e tempos de reparo curtos;
 - * e informação completa e precisa sobre as necessidades de processamento e o 'status' das tarefas colocado no computador.

VOLLMANN et alii (1984) também fazem uma análise do pouco uso que tem sido feito das técnicas quantitativas de gerenciamento. Embora suas conclusões se refiram basicamente aos modelos de planejamento agregado, ao nosso ver elas são válidas de uma maneira geral aos problemas de planejamento e de controle. "A aplicação de modelos quantitativos tem sido na melhor das hipóteses desapontadora Modelos de programação linear têm sido usados extensivamente, mas apenas nas firmas que têm medidas de saídas ('outputs') relativamente homogêneas e estruturas de produto simples, tais como refinarias de petróleo e instalações cujos produtos são misturas de componentes A maior parte do interesse em técnicas de modelagem tem sido acadêmico. Mantemos um certo otimismo de que a teoria e a prática estejam convergindo. No geral existem três razões da falta de aplicações confirmadas da teoria...". A primeira razão apontada é que é comum as empresas não encararem um dado problema da forma como os modelos o concebem. A segunda razão, é a falta de entendimento das técnicas por parte dos gerentes. "...a lógica deve ser transparente para se adquirir aceitação" (VOLLMANN et alii, 1984). E finalmente, as exigências de dados: muitas vezes os dados disponíveis não correspondem às considerações assumidas no modelo, em outros casos os dados simplesmente não existem.

A questão básica para se avaliar se vale a pena empregar a PO no controle gerencial do CIMS, é o

investimento em 'hardware' e 'software' ser menor que os benefícios (redução de custos, aumento de receitas) obtidos num horizonte de médio prazo. Nos sistemas de manufatura convencionais, esse investimento é alto e nem sempre é compensado, contudo nos CIMs, o investimento adicional é bastante menor, já que nesse ambiente o 'hardware' computacional já existe, como também quase todo pessoal necessário para o desenvolvimento do 'software' requerido para a implantação da metodologia da PO nesse contexto.

Acreditamos que pela própria natureza da implantação da filosofia CIM (necessidade de pessoal mais qualificado, implantação de base de dados atualizados e confiáveis para fins de controle) bem como o desenvolvimento de modelos adaptados a essa nova realidade, todas essas três razões serão superadas e a importância da PO no setor industrial aumentará.

Uma possível evidência desse fato é a afirmação de MATSUDA (1988) de que a PO no Japão é muito aplicada, e lá é onde a filosofia CIM tem mais se arraigado. O Japão não se destaca mundialmente quanto aos desenvolvimentos originais de PO, no entanto os japoneses a partir de adaptações à sua realidade de desenvolvimentos do Ocidente, conseguem algo que para nós é difícil: implantar com êxito.

Tudo isso evidencia que a implantação de SADs, baseados nos modelos de PO, fatalmente levam a mudanças organizacionais.

Para tanto há necessidade de se conseguir que as pessoas aceitem essas mudanças. No Brasil é comum pessoas ficarem contra por acharem que os modelos implantados lhe tirarão o emprego. No Japão isso não existe pela maior estabilidade que gozam os funcionários.

De todo modo é bom notar que "a gerência deve estar certa de que sua organização está preparada para levar adiante sistemas avançados antes de tentar implantá-los" (VOLLMANN et alii, 1984). No geral, os sistemas avançados se referem aos sistemas baseados em modelos de PO e/ou técnicas de Inteligência Artificial.

3.4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA COMPLEMENTAR A RESPEITO DOS SADS.

Embora não exista definição universalmente aceita de SADS, para os nossos propósitos a definição de BRENNAN & ELAM (1986) é bastante pertinente: "SADS são sistemas baseados no computador cujo objetivo é permitir ao decisor divisar soluções de alta qualidade para problemas que freqüentemente são formulados apenas parcialmente".

SPRAGUE (1987) delinea o contexto geral da área, e enfatiza o caráter de polo convergente das áreas de Processamento de Dados e de Pesquisa Operacional.

Isso é compatível com a taxonomia de ALTER (1977) que classifica os SADS em 7 categorias, a saber:

- (I) Sistemas Baseados em Dados:
 - (i) Sistemas de Recuperação de Dados:
 - (1) Sistemas de Arquivo de Gavetas
 - (2) Sistemas de Análise de Dados
 - (ii) Sistemas de Análise de Dados:
 - (2) Sistemas de Análise de Dados
 - (3) Sistema de Análise de Informações
- (II) Sistemas Baseados em Modelos:
 - (i) de Simulação:
 - (4) Modelos que calculam as conseqüências de ações planejadas
 - (5) Modelos que estimam as conseqüências de ações baseadas em modelos
 - (ii) de Sugestão:
 - (6) Modelos de Otimização
 - (7) Modelos de Sugestão.

O advento dos SADS baseados em modelos, representa para a PO um novo alento. Para SINGH & SADAGOPAN (1987), de uma forma geral se sente que, em breve, gerentes familiarizar-se-ão com modelos mais sofisticados incluindo aí os de PO, e os futuros SADS terão que levar isso em conta. Eles apontam como indicações disso, o fato dos gerentes terem começado primeiro a utilizar planilhas eletrônicas do tipo VISICALC, e posteriormente passaram para planilhas que permi-

tem uma modelagem um tanto mais elaborada (LOTUS 1-2-3,...).

Já no início do desenvolvimento dos SADs, APL foi escolhida como a linguagem de programação mais indicada para tais sistemas (EDP ANALYZER, 1976; KEEN, 1976). Atualmente várias outras linguagens também têm características desejáveis, entre elas PASCAL e C. Há ainda a possibilidade de integrar vários 'softwares' através dos chamados programas de integração de 'softwares', os quais se utilizam das chamadas janelas. Um desses programas é o WINDOWS da Microsoft. Esses programas permitem que o usuário acesse mais de um 'software' numa dada aplicação, sem necessidade de fazer malabarismos por meio do sistema operacional.

ADELMAN (1984) afirma que, embora muitos encarem linguagem de modelagem como sinônimo de SAD, na verdade ela é apenas um tipo de SAD, e corresponde ao Gerador de SADs da classificação de SPRAGUE & CARLSON (1982). Nos últimos anos vários esforços vem sendo feitos no desenvolvimento de tais linguagens, e alguns exemplos são: CML, LPM e GAMS; elas fornecem apoio não só para as fases de solução numérica e análise dos resultados como também na formulação do problema e análise dos dados (SINGH & SADAGOPAN, 1987).

Provavelmente Finanças é a área onde mais têm sido aplicados os SADs, seguida da área de Marketing. Um dos Geradores de SADs mais citados na literatura é o IFPS ('Interactive Financial Planning System' = Sistema Interativo de Planejamento Financeiro), além do que as primeiras aplicações se deram nessa área (GUERRITY, 1971). Uma conhecida aplicação na área de 'Marketing', é a de LITTLE (1975). Já aplicações na área de Produção Industrial são reduzidas e conseguimos identificar as seguintes:

* REMUS & KOTTEMANN (1987) apontam que muitos decisores adotam como paradigma para suas decisões o que pode ser chamado de modelo de rastreamento. Como exemplo citam o problema recorrente de planejamento agregado da produção onde, tendo o nível de estoque corrente e a demanda prevista para alguns períodos, o decisor procura nivelar o volume de produção e de mão-de-obra à demanda, de forma análoga a como o caçador segue com sua arma o rastro de sua presa.

Assim para esse problema eles sugerem a criação de um SAD que auxilie o decisor nessa atividade de rastreamento;

* PENDEGRAFT (1987) usando a planilha eletrônica do LOTUS 1-2-3, aborda o problema de programação de operações de empacotamento em 3 máquinas. O sistema calcula os tempos de conclusão de cada tarefa e os apresenta graficamente, de modo a tornar mais rápido o trabalho do programador;

* FLOYD (1989) concebe uma estratégia de implantação de SADs e a ilustra com uma aplicação ao problema de balanceamento dinâmico (permite rebalanceamentos) de linha de produção;

* BISWAS et alii (1988) desenvolvem um SAD inteligente chamado OASES ('Operations Analysis Expert System' = Sistema Especialista para Análise de Operações), ainda a nível de protótipo, para auxiliar à gerência diagnosticar problemas em processos, operando em estado de equilíbrio, do tipo contínuo puro (p. ex., produção de fibras de vidro) ou produção em massa (p. ex., linhas de montagem de automóveis). Num nível de diagnóstico mais específico é tratado apenas o caso da fabricação de fibras de vidro;

* NOF & GURECKI (1980) propõem uma estrutura para desenvolvimento de SADs para a Manufatura, composta de 3 estágios: pré-projeto, projeto e implementação. Na fase de projeto as principais atividades são: a definição da base de dados, da interface usuário/sistema e dos modelos apropriados. Além disso, eles desenvolvem para uma instalação fabril específica, um SAD baseado num modelo de simulação (que permite ao usuário fazer testes do tipo "o que aconteceria se") para avaliar alternativas frente a imprevistos no chão de fábrica;

* MCGLENNON (1990) discute e defende a conveniência de SADs Inteligentes para o Planejamento da Produção;

* ROY et alii (1982) apresentam as características de um SAD baseado num modelo de programação linear para a determinação do 'mix' de produtos para uma fábrica de compensados de madeira. O SAD Específico foi desenvolvido a partir do Gerador de SADs IFPOS comercialmente disponível. O uso do sistema resultou num aumento de 20% no lucro da empresa;

* KIRAN & LOEWENTHAL (1985) e LEFRANÇOIS & CHERKEZ (1987)

abordam problemas de controle de estoques;

* BÜHNER & KLEINSCHMIDT (1988) apresentam a arquitetura de um SAD para atribuição de trabalhadores a um conjunto de células de manufatura;

* OZDEMIREL & SATIR (1987) apresentam as características de um SAD baseado num modelo de simulação, para a programação de operações no setor de usinagem de uma fábrica de tratores. Afora uma extensa tabela sobre os relatórios gerados pelo sistema e, uma tabela sobre deficiências que podem ocorrer devido a erros de previsão do modelo de simulação, nenhum detalhe do Sistema é descrito.

Para terminar esta revisão, enumeramos alguns artigos recentes que podem ser de interesse:

* SISKOS & DESPOTIS (1989) propõem um SAD interativo baseado em modelo para tratar do Problema de Programação Linear com Múltiplos Objetivos. O SAD é criado a partir dos paradigmas: (i) o decisor estabelece interativamente a sua função utilidade usando um modelo de regressão; (ii) o decisor modifica interativamente os níveis de satisfação;

* RICHTER (1988) e TURBAN & WATKINS (1986) analisam as possíveis diferenças e conexões entre os Sistemas Especialistas e os Sistemas de Apoio à Decisão;

* MONEY et alii (1988) tentam delinear uma metodologia para quantificar os benefícios intangíveis dos SADs;

* KYDD (1989) sugere algumas maneiras de prevenir /eliminar/ reduzir vários vícios cognitivos que o decisor pode adquirir com o uso de SADs, o que pode influir na qualidade das decisões;

* SUH & HINOMOTO (1989) advogam que, já que se tem a base de dados e a base de modelos, dever-se-ia ter também a base de diálogos e assim as 3 poderiam ser integradas numa única base relacional;

* ER (1988) faz um breve retrospecto e traça um possível quadro das tendências futuras da área.

Embora grande número de trabalhos relativos aos Sistemas de Apoio à Decisão sejam insossos e enfadonhos, e um número significativo de trabalhos sejam repetitivos, a nosso ver, isso em nada diminui a importância da área.

CAPITULO IV

CONTROLE DA PRODUÇÃO

4.1 CONCEITOS BÁSICOS

4.1.1 Classificação dos Sistemas de Produção

⇒ Um Sistema de Produção Industrial, é um conjunto de elementos inter-relacionados que atuam para se obter produtos finais, cujo valor comercial supere o total dos custos incorridos para obtê-los.

Alguns parâmetros importantes num sistema de produção industrial são: o 'leadtime' de suprimento (LS), o 'leadtime' de produção (LP) e o 'leadtime' de distribuição (LD); veja figura 11 e explicações na página X.

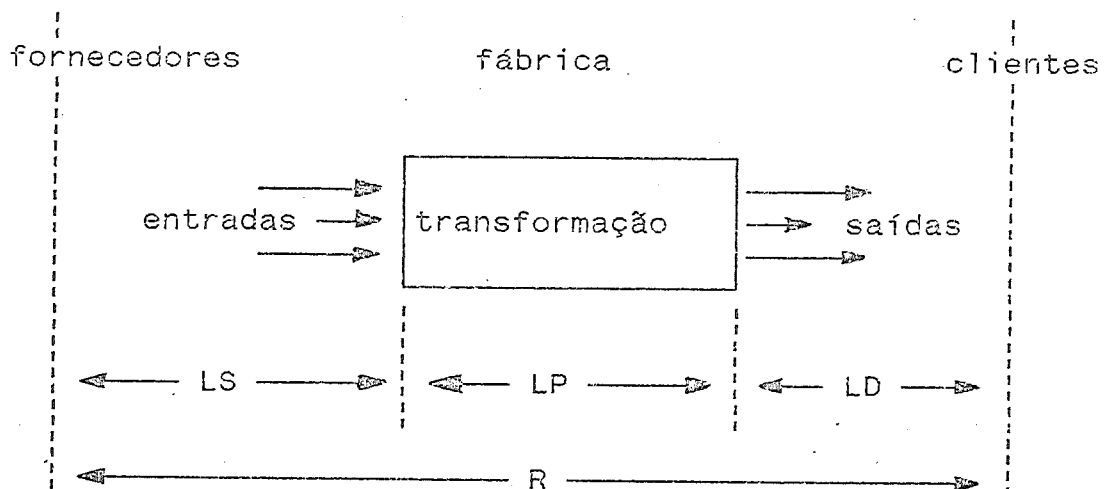


FIGURA 11: TEMPO DE RESPOSTA DE UM SISTEMA DE PRODUÇÃO

⇒ Com base no tipo de produto e no tipo de processo, JOHNSON & MONTGOMERY (1974) classificam os sistemas de produção em:

- (i) sistema contínuo. Poucas famílias de produtos similares feitos em grande volume;
- (ii) sistema intermitente. Nos estágios produtivos ocorrem freqüentes mudanças de um produto para outro, como consequência de uma grande variedade de produtos fabricados. Distinguem-se nessa categoria o:
 - (a) sistema intermitente 'flow-shop', onde todos os itens feitos numa linha ou célula têm a mesma seqüência de operações nas diversas máquinas;
 - (b) sistema intermitente 'job-shop', os itens fabricados num setor produtivo não têm o mesmo roteiro de fabricação;
- (iii) sistema grande projeto. Nesse sistema são feitos produtos complexos e especiais, muitas vezes únicos.

JOHNSON & MONTGOMERY (1974) consideram ainda um quarto tipo de sistema de fluxo de materiais, o sistema puro de estoques, onde itens são comprados, estocados, (distribuídos) e revendidos, e portanto não há a fase de processamento.

CONSTABLE & NEW (1976) consideram três características básicas: a estrutura do produto, a estrutura da organização da fábrica (linha, funcional ou 'layout' em grupo), e a natureza das ordens dos clientes (para estoque ou por encomenda).

BUFFA & MILLER (1979) adotam uma classificação com quatro tipos de sistemas de produção-estoques: (i) sistema contínuo para estoque, (ii) sistema contínuo por encomenda, (iii) sistema intermitente para estoque, e (iv) sistema intermitente por encomenda. Sistema intermitente indica produção em lotes. No caso, o sistema Grandes Projetos está incluído na categoria (iv). Alguns exemplos de cada categoria são: sistemas contínuos para estoque (cimento, televisores, fertilizantes,...); sistemas contínuos por encomenda (componentes eletrônicos, produtos têxteis por exemplo meias); sistemas intermitentes para estoque (instru-

mentos odontológicos, peças de reposição) e sistema intermitente por encomenda (máquinas-ferramentas, usinas nucleares).

Segundo BUFFA & MILLER (1979) no sistema contínuo uma variação na taxa de demanda (por exemplo de 1000 unidades por semana para 2000 unidades por semana) leva a uma mudança na taxa de produção de mesmo valor. Na produção intermitente, uma mudança na demanda pode ser alcançada com mudança no tamanho do lote e/ou na frequência dos lotes. A segunda dimensão da classificação (para estoque ou por encomenda) é em muito, função das políticas de 'marketing' que dizem respeito à forma de atendimento dos clientes e do tempo de resposta para o atendimento se efetivar (BUFFA & MILLER, 1979).

Naturalmente essas quatro categorias não preenchem todas as possibilidades já que muitos sistemas são combinações dos tipos puros, por exemplo fabricar máquinas por encomenda e manter estoques de peças de reposição.

Um termo que tem estado em moda ultimamente é repetibilidade. RIBEIRO (1984) usa o seguinte índice para medir repetibilidade: (\bar{X}/Q) , onde \bar{X} é o valor médio do consumo das peças em 10 dias, e Q o valor do lote econômico de produção (que deve ser pequeno usando-se técnicas de troca rápida de ferramentas).

Desse índice fica claro que alta repetibilidade significa que é muito pequeno o tempo médio entre lotes consecutivos de um mesmo item. Assim podemos definir manufatura repetitiva como sendo aquela onde ocorre alta repetibilidade dos itens produzidos.

De uma maneira geral, os conceitos de sistemas 'job-shop' e 'flow-shop' de forma implícita ou explícita, entram nas classificações da maioria dos autores. Para GRÜNWARD et alii (1989) uma caracterização mais precisa dos sistemas de manufatura intermediários entre o 'job-shop' e o 'flow-shop' é necessária.

→ Com base nesses estudos anteriores, vamos adotar a seguinte taxonomia para os sistemas de produção, que vai do de "repetibilidade infinita" (contínuo puro) até o de menor

repetibilidade (grande projeto):

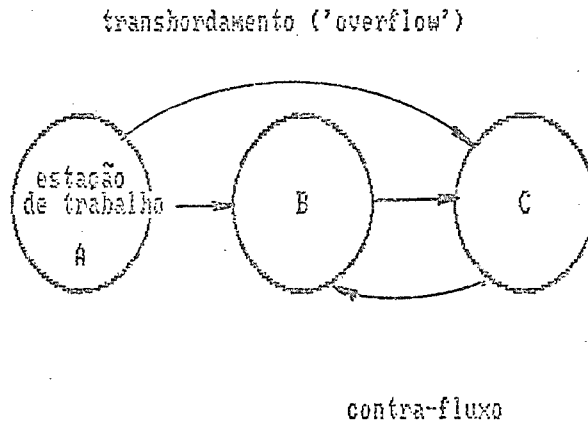
- (i) sistema contínuo puro. Por exemplo, refinarias de petróleo;
- (ii) sistema de produção em massa. Pelo menos 90% dos itens têm alta repetibilidade. Para BURBIDGE (1975) a maior simplicidade do fluxo de materiais é a sua maior vantagem econômica;
- (iii) sistema de produção repetitivo. Pelo menos 75% dos itens têm alta repetibilidade;
- (iv) sistema de produção semi-repetitivo. Pelo menos 25% dos itens têm alta repetibilidade e pelo menos 25% dos itens têm baixa repetibilidade;
- (v) sistema de produção não-repetitivo. Pelo menos 75% dos itens têm baixa repetibilidade.
- (vi) sistema grande projeto.

Os tipos (i) e (vi) não são objeto de estudo nesta tese. Os tipos (ii), (iii), (iv) e (v) pertencem ao 'roll' dos sistemas intermitentes (produção em lotes de itens discretos).

O tipo (ii), tipicamente corresponde ao 'lay-out' em linha, todos os itens de uma mesma linha possuem o mesmo roteiro de fabricação (padrão de fluxo 'flow-shop'), produtos padronizados permitindo algumas variações pouco significativas (por exemplo, várias cores mas o produto continua sendo o automóvel), e o fluxo produtivo é simples.

O tipo (v), tipicamente corresponde ao 'layout' funcional, onde cada item particular possui um roteiro de fabricação próprio (padrão de fluxo 'job-shop'). O fluxo produtivo é complexo e lembra um "bolo de espagete".

Os tipos (iii) e (iv) são intermediários. Podemos ter para ambos o 'layout' em grupo, porém no tipo (iii) o fluxo no interior de cada célula é 'flow-shop', enquanto que no (iv) não é, sendo que existem contra-fluxos e transbordamentos (figura 12). No tipo (iv) os produtos são semi-padronizados, por exemplo fabrica-se pontes rolantes semi-padronizadas já que o cliente pode definir o vão livre, a capacidade de carga e velocidades do carro guincho.



Obs: A, B e C representam estações de trabalho

FIGURA 12: FLUXO TÍPICO NA MANUFATURA CELULAR SEMI-REPETITIVA

Embora na nossa classificação não levamos em conta o fato da produção ser por encomenda ou para estoque, para fins de definição do sistema de controle da produção, ela é suficiente.

4.1.2 Definições de Controle da Produção

O Controle da Produção (CP) é uma atividade gerencial das mais importantes, que visa regular o fluxo de materiais na fábrica. No CP as funções gerenciais de planejar e controlar têm um papel muito mais relevante que as outras duas funções, a de organizar e dirigir.

De há muitos e muitos séculos a utilização dos recursos de forma eficiente, ou seja evitando desperdícios, se colocou como um problema para a humanidade. Isso nos explica o por quê do aparecimento das quatro funções gerenciais (organização, planejamento, direção e controle) há tanto tempo.

Segundo GEORGE Jr (1972), por volta do ano 4000 a.C., os egípcios reconheceram a necessidade de planejar, organizar e controlar (prova disso foi terem viabilizado a construção das grandes pirâmides, além de terem sido conservados manuscritos da época). Essas funções e mais a de dirigir (comandar, coordenar, liderar) tinham suas necessidades reconhecidas pelos chineses por volta de 1100 a.C. (GEORGE Jr, 1972).

De forma resumida essas funções assim se relacionam: tendo um objetivo, estabelecemos um plano para que esse objetivo seja atingido. Mas antes de colocá-lo em ação, temos que organizar nossos recursos humanos e materiais. Isso envolve: estruturar, hierarquizar, atribuir responsabilidades, contratar pessoas, treinar, motivar, etc. E para que as coisas aconteçam, precisamos simultaneamente: dirigir os recursos humanos para que eles ajam sobre os recursos materiais, e controlar para que o rumo tomado seja compatível com o plano estabelecido. Esse controle ainda compreende uma verificação constante do objetivo, e uma redefinição freqüente do plano. O processo decisório é notadamente marcante nas funções de planejar e controlar.

Dado que quanto maior o horizonte de planejamento, maior a imprevisibilidade do futuro (quebra de máquinas, absenteísmo, greves, flutuações na demanda, medidas governamentais, ...), só há sentido regular o fluxo de materiais com base em programas de curto prazo (no máximo um ou dois meses).

Há muita confusão entre as atividades de Controle da Produção (CP) e a de Planejamento da Produção (PP). Para ambas as funções de planejar e controlar são essenciais. Porém o objetivo do PP é muito diferente. O Planejamento da Produção trata de questões de médio prazo (um a dezoito meses), tais como: planejamento da capacidade produtiva para tentar compatibilizá-la com o comportamento esperado da demanda futura, fornecer diretrizes e parâmetros para que contratos de fornecimento de médio prazo possam ser firmados, etc.

Isso difere da concepção de BURBIDGE (1971b) que

entende que o Planejamento da Produção é a função de gerenciamento que projeta o sistema de fluxo de materiais, e assim compreende: (i) a escolha dos materiais, (ii) a escolha dos equipamentos e demais recursos produtivos, (iii) a escolha dos roteiros de fabricação, (iv) a escolha do sistema de armazenagem e do sistema de movimentação de materiais, e (v) a escolha do 'lay-out'. Para nós, essas atividades fazem parte do Projeto do Sistema Produtivo.

Questões de longo prazo (horizonte de pelo menos um ano) são tratadas no âmbito do Planejamento Estratégico (PE). Exemplos: grandes alterações na linha de produtos, grande expansão ou supressão da capacidade produtiva, incorporação ou desativação de fábricas, etc.

Naturalmente, a amplitude dos horizontes que colocamos não é rígida. Para cada caso adaptações são necessárias. Por exemplo: se internamente o Sistema de Produção (SP) é instável, o CP deve atuar num horizonte menor ainda; quanto mais instável for o ambiente do SP, menor o horizonte a ser trabalhado pelo PE. Na teoria do enfoque sistêmico, ambiente é sempre externo ao sistema. O PP sofre efeitos tanto internos quanto externos. Em suma, quanto maior a instabilidade, menor deve ser o horizonte de planejamento.

Isso difere um pouco da opinião de BURBIDGE (1975; 1983) que é seguida por WARNECKE & KOLLE (1979) e que nas palavras desses ficou: "O Controle da Produção planeja, controla e monitora a produção. ... pode ser dividido em planejamento de médio e longo prazos, planejamento e controle de curto prazo".

Devido ao fato da situação brasileira ser sempre altamente instável, excluimos a função de planejar no médio prazo, do âmbito do Controle da Produção (CP).

Convém destacar que em 1985, BURBIDGE (1985) afirmava que tinha convicção de que ao homem não foi dada a capacidade de prever o futuro e que portanto, o CP deveria se restringir ao curto prazo. Contudo em 1990, BURBIDGE (1990) volta a colocar que no âmbito do Controle da Produção fazem parte a programação de curto e a de longo prazos.

⇒ Nossa diferenciação das atividades de PE, PP e CP é limitada à área de produção. Categorizações mais abrangentes existem, sendo ANTHONY (1965) um exemplo marcante: visualiza o planejamento e o controle como área de atuação, e foi o primeiro livro que tentou organizar tal área fornecendo uma estrutura de análise.

WARNECKE & KOLLE (1979) colocam que o Sistema de Controle da Produção se insere no Sistema Organizacional. Esse por sua vez faz parte do sistema maior da empresa, ou seja o Sistema de Produção (figura 13).

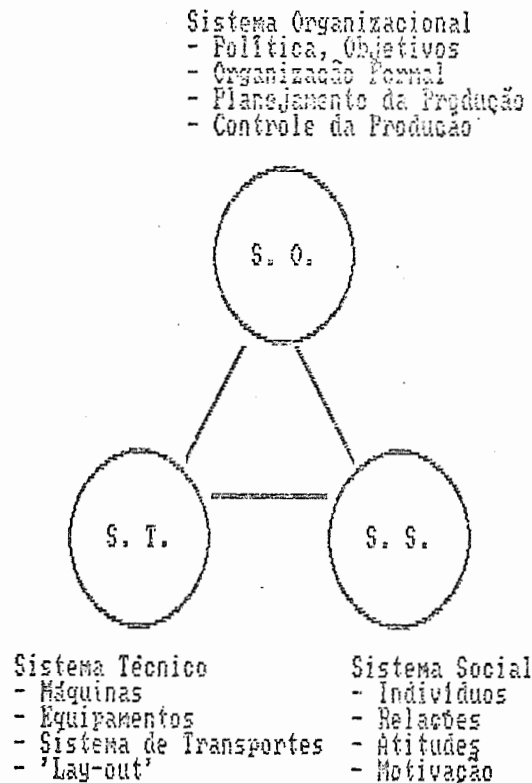


FIGURA 13; INTERAÇÃO DOS SISTEMAS ORGANIZACIONAL, SOCIAL E TÉCNICO

Fonte: WARNECKE & KOLLE (1979)

Quanto maior a empresa, mais improvável que um Sistema de Controle da Produção (SCP) informal possa ser efetivo. Muitas empresas tiveram graves perdas por não adaptar o SCP ao seu crescimento. Por outro lado, um sistema com um formalismo além do necessário, é igualmente desaconselhável.

4.1.3 Fatores que Afetam o Fluxo

Vimos na seção anterior que o controle da produção (CP) visa regular o fluxo de materiais no chão da fábrica.

⇒ Num sistema de manufatura, o fluxo pode ser afetado por: mudança do 'mix' de produtos da carteira de pedidos; no volume demandado dos vários itens; no aumento ou diminuição da capacidade produtiva em alguma estação de trabalho do sistema; mudanças no 'leadtime' de suprimento; alterações no volume de materiais recebidos dos fornecedores; paralização de máquinas para manutenção; mudança no 'lay-out'; mudança no tempo de preparação; mudanças no tempo de processamento, etc. Mudanças no tempo de preparação e/ou no tempo de processamento, afetam tanto o tempo de fila quanto o 'leadtime' de produção o qual é igual à soma dos tempos de fila, mais os tempos de preparação e mais os tempos de processamento de todos os componentes do produto em questão.

Dentre os fatores que afetam o fluxo, o tempo de preparação influencia tanto a forma com que o controle da produção deve ser realizado, que lhe reservamos a próxima seção.

4.1.4 Tempo de Preparação

As estratégias de fabricação que estão revolucionando a área de Gerência da Produção, têm íntima dependência e relação com o tempo de preparação.

A Tecnologia de Grupo (TG) de modo a viabilizar a

necessidade de se produzir grande variedade de itens em pequenos lotes, forçou a queda do tempo de preparação ao fabricar numa mesma célula (grupo de máquinas), peças similares (família de peças).

O 'Just-in-Time' (JIT) para conseguir diminuir drasticamente o 'leadtime' de produção (o que leva a obtenção de trunfos de vendas, diminuição do estoque em processo, ...), o que implica em produzir em pequenos lotes, tem como pré-requisito que os tempos de preparação sejam o menor possível (para SHINGO (1985), no máximo 10 minutos).

Segundo BURBIDGE (1975; 1985) o engenheiro italiano Patrignani, um dos pioneiros da Tecnologia de Grupo, especializou-se em preparação de máquinas e realizou verdadeiros prodígios nesse sentido na década de 40.

Já na década de 70, o sistema SMED ('Single Minute Exchange of Die') do japonês SHINGO (1985) da Toyota, passou a ter grande repercussão em empresas japonesas e atualmente também no exterior. O sistema SMED se compõe de três procedimentos básicos para a redução drástica de tempos de preparação:

- (i) separar 'set-up' interno de externo. Interno é aquele que só é possível realizar com a máquina parada. Externo é o que é possível de ser realizado com a máquina em funcionamento;
- (ii) converter 'set-up' interno em externo;
- (iii) esmiuçar todos os aspectos da operação de preparação com vistas a simplificá-la ao máximo ('set-ups' complicados, entre outras coisas aumentam os riscos de acidentes), e a eliminar ajustes, que entre outras coisas, são causas de problemas de qualidade.

BURBIDGE (1975) coloca que os princípios da Tecnologia de Grupo (TG) estão relacionados com o tempo de preparação cuja diminuição é responsável diretamente pelo aumento da flexibilidade do sistema produtivo. Ele aponta que foi a TG que demonstrou que o tempo de preparação não é uma constante, mas uma variável que pode ser facilmente reduzida, e lista os principais métodos para reduzi-lo, a

saber:

- 1) seqüência planejada da carga de trabalho;
- 2) famílias de ferramental e peça composta;
- 3) treinamento dos preparadores;
- 4) pré-preparação;
- 5) ajuste coordenado e com leitura digital;
- 6) melhoria dos instrumentos de medição;
- 7) melhoria do projeto do ferramental.

A redução de 'set-up', além de aumentar a capacidade da empresa em responder a tempo às alterações nos padrões de demanda (isto é, aumentar a flexibilidade da empresa), reduz drasticamente o 'leadtime' de produção e o estoque em processo, propicia um maior aproveitamento dos gargalos, diminui a obsolescência, aumenta a produtividade e as taxas de rentabilidade, etc (SHINGO, 1985).

SHUSTER (1982, apud AGOSTINHO (1985)) observa que a flexibilidade comporta várias dimensões: flexibilidade à readaptação do equipamento devido à troca de peças; flexibilidade à mudanças do equipamento a novos produtos; flexibilidade para compensar flutuações na carga de trabalho; flexibilidade para compensar perturbações no fluxo de produção; flexibilidade para compensar erros de previsão. Conforme comentários de AGOSTINHO (1985):

- a) a flexibilidade à troca de peças é precipuamente dependente do 'set-up';
- b) à medida que a vida do produto diminui, aumenta a necessidade de flexibilidade a mudanças de produto;
- c) à medida que a diversidade de produtos aumenta, aumenta a necessidade da flexibilidade à troca de peças;
- d) a flexibilidade à troca de peças é a medida do esforço necessário na mudança entre peças programadas e conhecidas, dentro da estrutura de um programa de produção normal. Ela influi fundamentalmente na chamada flexibilidade de curto prazo;
- e) a flexibilidade a mudanças de produtos é a medida do esforço necessário para cumprir programas de produção contendo produtos que não se sabia, quando da instalação do sistema produtivo, que viriam a ser produzidos. Ela in-

flui fundamentalmente na flexibilidade de longo prazo.

4.1.5 O Balanceamento do Fluxo

Pode ocorrer de uma alteração no fluxo ser capaz de alterar o ponto de estrangulamento (gargalo) do sistema. Nesse caso um rebalanceamento de fluxo se torna necessário.

Muitas vezes é necessário usar simulação para prever onde será o novo gargalo; quando por exemplo se adquire uma quantidade significativa de equipamentos (LUNDRI-GAN, 1986).

Para entendermos o que é balanceamento de fluxo, é útil relembrarmos o que é balanceamento da capacidade e portanto o que é balanceamento de linha.

Balanceamento de linha é uma atividade muito comum no processo de controle da produção dos sistemas de produção em massa. Essa atividade consiste em computar o tempo de ciclo requerido em cada estação de trabalho, dado o conteúdo de trabalho contido na alocação feita para cada estação. Essa alocação é refeita até que se consiga um tempo de ciclo em cada estação, o mais próximo possível. Nesse caso é dito que a linha está balanceada.

Balancear a capacidade é um conceito que deriva do conceito balancear a linha, com a diferença que ele é mais abrangente por se aplicar também aos outros tipos de sistemas de produção. Dado um conjunto de n estações de trabalho de um sistema de produção qualquer, se conseguirmos alocar uma carga igual de trabalho para todas elas, dizemos que a capacidade está balanceada.

Embora com o balanceamento da capacidade, consegue-se maximizar a utilização dos equipamentos, ele tem dois inconvenientes sérios:

- (i) leva a um estoque em processo alto. Isso tem vários aspectos negativos amplamente divulgados na literatura;
- (ii) não se produz componentes de forma balanceada; por exemplo, produto A se compõe de uma unidade de componente X e duas de Y, e num momento temos produzidas

dez unidades de X e cinco de Y, o que só dá para obter um volume de produção igual a duas unidades. Portanto, geralmente não se obtém uma maximização do volume de vendas e ocorrem perdas por obsolescência.

Finalmente, balancear o fluxo significa produzir componentes de forma balanceada (no exemplo anterior, num momento qualquer deveríamos ter para cada unidade de X, duas unidades de Y), com vistas à montagem de produtos a serem vendidos em certo intervalo de tempo.

Na produção em massa e na produção repetitiva, num intervalo curto de tempo praticamente todos os itens estão sendo produzidos, isso faz com que seja mais fácil balancear o fluxo.

Na manufatura em massa, e na maioria das vezes na manufatura repetitiva, se produz por taxas (u unidades por unidade de tempo) e não por ordens de fabricação, assim quanto maior o grau de repetibilidade menor a necessidade de documentos necessários para regular o fluxo de materiais.

4.2 ESTRUTURA DECISÓRIA DO CONTROLE DA PRODUÇÃO

O cerne do Controle da Produção (CP) é o processo decisório que deve ser realizado em etapas sucessivas indo do todo para o particular, do geral para o detalhe, ou seja é um processo que deve seguir o enfoque sistêmico.

BURBIDGE (1975) delineaia três etapas sucessivas, as quais ele denomina de níveis de Controle da Produção:

- 1) Plano de Produção: planeja o volume de produção de produtos acabados;
- 2) Emissão de Ordens: planeja a entrada de materiais de fornecedores e o volume de produção de peças dos setores produtivos. As Ordens de Serviço podem ser:
 - * Ordens de Fabricação, para itens de fabricação própria;
 - * e Ordens de Compra, para componentes e matérias-primas fornecidos por terceiros;
- 3) Liberação ('dispatching'): programação diária do volume de produção por máquina, ou carga de máquina, necessária para completar as ordens na data devida.

A nosso ver a concepção de controle da produção de Burbidge é mais consistente que a visão convencional de dividir as atividades do PCP em: planejamento, programação e controle, entendendo a programação como atividade intermediária entre o planejamento e controle. Na realidade, a programação é uma atividade de planejamento que recebe diferentes nomes conforme o nível de detalhamento focado, isto é se estamos no nível de produtos, de itens ou de operações. E o planejamento é a função de gerenciamento vital para qualquer processo decisório, que por sua vez é o âmago da atividade de controle da produção.

Nessa estrutura proposta por BURBIDGE (1975), vamos fazer duas modificações:

- (i) o primeiro nível de Controle da Produção será considerado como um plano de produção de curto prazo (algumas semanas), conforme justificamos na seção 4.1.2. A esse plano chamamos de Programa Mestre de Produção (PMP).

PMP é um termo amplamente empregado nos sistemas MRP, mas com a conotação de plano de produção de médio prazo (vários meses, no geral, acima de dez meses);

- (ii) na terceira etapa vamos isolar e só considerar a programação de operações. Ainda fazem parte da liberação uma série de atividades rotineiras (por exemplo, providenciar para que as ferramentas e os dispositivos necessários para realizar uma dada programação de operações estejam nos locais e no momento necessários, etc), mas para efeito de processo decisório, que é o que nos interessa neste trabalho, podem ser deixadas de lado.

Assim, na figura 14 está sumarizada a estrutura de CP que adotamos, dando ênfase ao processo decisório. Nessa figura ainda estão sintetizadas e explicadas as atividades de monitoração, comparação e reação que completam o processo de controle da produção.

Ao afirmar na figura 14 que o estoque é um subproduto do sistema de controle da produção (SCP), queremos dizer que o tipo de SCP empregado afeta diretamente os níveis de estoque.

Consideraremos a seguir, cada um dos três níveis do processo decisório do controle da produção.

4.2.1 Programa Mestre de Produção

Cabe ao Programa Mestre de Produção (PMP) estabelecer que produtos e em que quantidades deverão ser fabricados num determinado período de tempo.

Quanto maior o grau de repetibilidade do sistema de produção, mais fácil o estabelecimento de um PMP. Quanto mais instável o sistema de produção e seu ambiente, mais se torna necessário trabalhar com horizonte de curta duração.

Na grande maioria dos casos, esse horizonte é de curto prazo, uma vez que via de regra, é impossível regular o fluxo de materiais baseando-se num PMP de médio prazo, já que esse sofreria tantas mudanças radicais que acabaria se

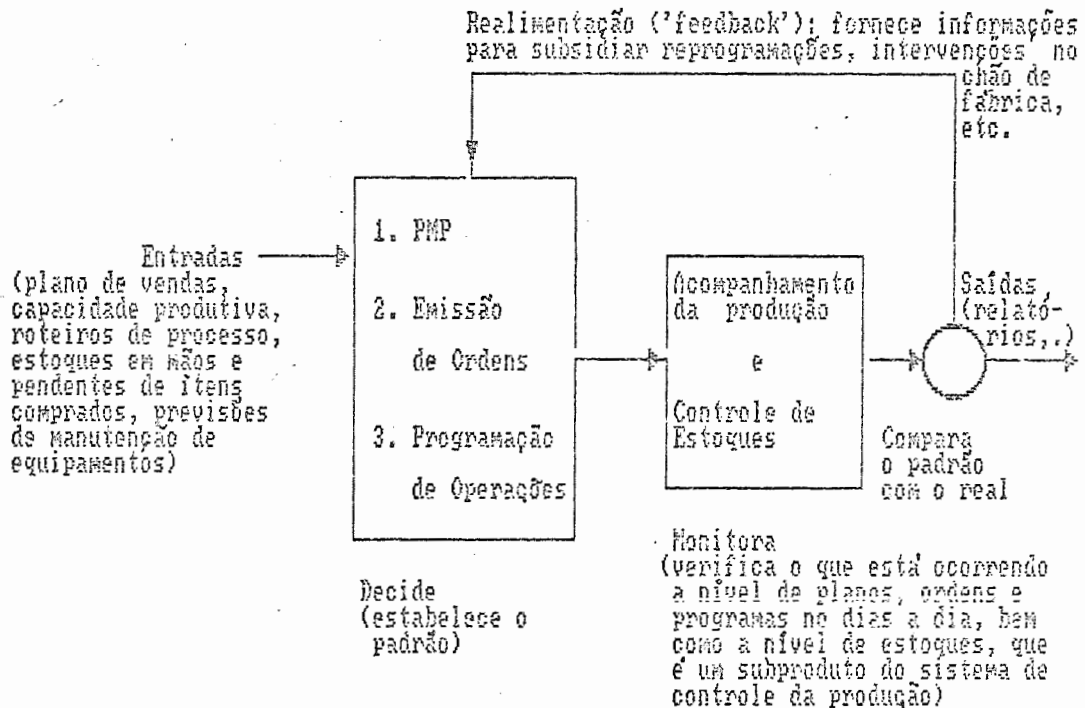


FIGURA 14: ESTRUTURA DO CONTROLE DA PRODUÇÃO ADOTADA

tornando inútil e substituído na prática por um sistema informal paralelo. Isso no caso do Brasil, dada a sua conjuntura econômica, é mais sintomático.

Como a grande maioria dos autores encara o PMP como sendo de vários meses, o resultado é a divisão do horizonte de planejamento em três: "plano flexível, plano firme e plano congelado" (BOSE & RAO, 1988). Isso para o controle da produção representa uma complicação sem contra-partida

clara em muitos casos.

BERRY et alii (1989) descrevem as atividades relativas ao PMP em oito empresas norte-americanas, e apresentam, na forma de um 'check-list', os princípios gerais do PMP.

Segundo GELDERS & WASSENHOVE (1985) a definição do PMP é difícil e requer um planejamento elaborado. Na realidade a maior parte da dificuldade reside em se trabalhar com PMP de muitos meses tentando assim, contornar o problema dos grandes 'leadtimes' de suprimento e de produção. Porém essa é uma direção errada, a única solução de fato efetiva, é empreender esforços exatamente na redução desses 'leadtimes'.

4.2.2 Emissão de Ordens

Por Emissão de Ordens não queremos nos referir ao processo de preencher uma papeleta dizendo que peça(s) deverá(ão) ser feita(s), qual a quantidade, qual a data devida, qual a data de liberação etc.. [Por Emissão de Ordens queremos significar o processo de converter as necessidades colocadas no PMP em produtos finais, para a forma de necessidades em termos de itens componentes.] O resultado dessa conversão depende do particular Sistema de Controle da Produção (SCP) usado: pode ser o preenchimento de um impresso, ou pode ser o armazenamento de registros num arquivo de dados.

Portanto, Sistema de Emissão de Ordens é um Sistema de Informações que visa converter as necessidades dadas em produtos finais, para necessidades em termos de itens componentes (comprados ou fabricados).

4.2.2.1 Classificação dos sistemas de emissão de ordens

BURBIDGE (1983) classifica os Sistemas de Emissão de Ordens (SEOs) em três grupos:

- (i) sistemas para fazer de acordo com o pedido;
- (ii) sistema de estoque controlado. São sistemas onde o nível de estoque de cada item é controlado de forma independente uns dos outros e de forma independente do PMP (plano de produção na terminologia de Burbidge). O nível de estoque deve ser tal que, no momento em que a montagem precisar de um item particular, ele deverá estar disponível;
- (iii) sistemas de fluxo controlado. São sistemas que determinam as necessidades de itens (em termos de tempo e quantidade) diretamente a partir do PMP.

Alterando essa classificação, propomos uma taxonomia dos SEOs de cinco categorias, que se por um lado são muitas categorias para o número de SEOs existentes, por outro lado, ajuda a entender melhor tais sistemas e nos permite enquadrar o sistema Kanban, o que não é possível com a classificação acima. As categorias são:

(I) Sistema de Pedido Controlado.

São usados nos sistemas de produção grande projeto e possivelmente no não repetitivo. Esses dois tipos de sistemas de produção não são objeto de estudo deste trabalho, portanto não iremos analisar os sistemas da categoria (I), a saber: (1) sistema da programação por contrato; (2) sistema da alocação de carga por encomenda;

(II) Sistema de Estoque Controlado que Puxa a Produção.

Se compõe do: (3) sistema de estoque mínimo;

(III) Sistema de Estoque Controlado que Empurra a Produção.

Pertence a essa categoria o: (4) sistema de estoque-base. Esse sistema é classificado por BURBIDGE (1983) na categoria (i), portanto muito diferente desta;

(IV) Sistema de Fluxo Controlado que Empurra a Produção.

Comporta os seguintes sistemas: (5) PBC ('Period Batch

Control' = sistema do período padrão); (6) MRP; (7) Opt (sistema de emissão de ordens do sistema de controle da produção OPT); (8) sistema dos lotes componentes; (9) sistema do lote-padrão; (10) sistema do controle maxmin;

- (V) Sistema de Fluxo Controlado que Puxa a Produção. Constitui-se do sistema: (11) Kanban. É um sistema híbrido já que, com base no PMP são requisitadas as peças que são usadas na montagem, assim é um sistema de fluxo controlado; por outro lado, a solicitação de produção (ou fornecimento) de peças é feita com base no estoque controlado com produção puxada.

Para a produção em lotes, os sistemas mais importantes, dada a ênfase que vêm recebendo na literatura, são os de número (3), (5), (6), (7) e (11), os quais enfocaremos neste capítulo. Os demais são apresentados em BURBIDGE (1983), sendo que os sistemas (4), (8) e (9) estão apresentados de maneira mais clara em ZACCARELLI (1987).

4.2.2.2 Sistema PBC

PBC é um sistema de emissão de ordens do tipo fluxo controlado muito usado na Inglaterra. A nível de programação ele tem a característica de puxar as várias etapas do processo produtivo, e a nível de execução ele faz com que a produção seja empurrada. Isso também ocorre com outros sistemas, por exemplo o MRP.

Ele é um sistema de ciclo único (todos os itens têm emissão de ordens num mesmo ciclo) e de fase-única (todos os itens são emitidos na mesma série de dias, por exemplo primeiro dia útil de cada quinzena, e com a mesma série de datas devidas para todos os itens).

É usado principalmente para a emissão de ordens de materiais e peças (empregados na montagem de produtos padronizados) na produção em massa e na manufatura repetitiva.

Seu criador foi um consultor inglês chamado R.J. Gigli que adaptou sistemas semelhantes, já existentes e usados na produção em massa, para a manufatura repetitiva.

Seu esquema básico é o seguinte:

Etapa 0: recebe-se o Programa Mestre de Produção (PMP) definido para vários ciclos de igual tamanho;

Etapa 1: é feita a "explosão" do PMP para definir a quantidade que deve ser feita de cada item para o ciclo em questão;

Etapa 2: atribui-se tempos para a

A) emissão das ordens mais a produção ou entrega de matérias-primas usadas no processamento;

B) processamento ou entrega de componentes;

C) montagem;

D) vendas

Essa atribuição de tempos é repetida para todos os ciclos obtendo-se um programa-padrão (figura 15).

Vendas da semana	sema- na					...
	1-2	3-4	5-6	7-8	9-10	
7-8	A	B	C	D		
9-10		A	B	C	D	
11-12			A	B	C	

FIGURA 15: PROGRAMA-PADRÃO

No exemplo da figura 15: o ciclo é de duas semanas e as vendas futuras devem ser previstas com uma antecipação máxima de oito semanas (duração do programa padrão).

Quanto menor o horizonte da previsão de vendas, naturalmente mais confiável se torna a previsão.

Outra importante vantagem de trabalhar com ciclos curtos é que o sistema se torna "mais flexível e pode rapidamente seguir as alterações na demanda do mercado, com um mínimo investimento em estoque" (BURBIDGE, 1975).

Por outro lado, quando definimos o ciclo como sendo por exemplo de duas semanas, estamos assumindo que é possível executar as montagens em duas semanas, produzir e receber os itens em duas semanas, produzir e receber as matérias-primas em duas semanas.

Portanto, quanto menor pudermos estabelecer o ciclo, melhor; porém há algumas limitações que devem ser levadas em conta:

- (i) "O ciclo não pode ser menor que o 'leadtime' de produção de qualquer dos componentes" (BURBIDGE, 1975) Itens com 'leadtime' de produção muito longo que não pode ser reduzido, devem ser controlados por outro sistema que não o PBC;
- (ii) Diminuir o tamanho do ciclo implica em aumentar a proporção do tempo de preparação. Se isso provocar uma diminuição da capacidade produtiva a um nível inferior à requerida para se atender a demanda, alguma providência deve ser tomada; por exemplo: controlar os itens de pouco valor (classe C) pelo sistema de estoque mínimo, ou se aumenta a capacidade (horas extras, ...), ou o tamanho do ciclo deverá ser aumentado;
- (iii) A duração do 'leadtime' de suprimento deve ser levado em conta no estabelecimento da duração do programa-padrão e do tamanho do ciclo. Eventualmente por problemas de 'leadtime' de suprimento longo demais, certos itens poderiam ser controlados por outro sistema que não o PBC. Outra possibilidade é termos um contrato de longo prazo que prevê a entrega no início de cada ciclo (por exemplo a cada duas semanas) de Q unidades do

componente C, onde Q estaria numa faixa $X \pm Y$ pré-estipulada no contrato e, desde que respeitada essa faixa, a quantidade Q seria especificada com antecipação de L dias. As mesmas considerações são válidas para a aquisição de matérias-primas.

BURBIDGE (1975) aponta que o primeiro fator é muito mais limitante quando se trabalha num sistema de manufatura com 'lay-out' funcional do que com o 'lay-out' celular, o qual permite várias maneiras de se reduzir o 'leadtime' de produção, pelo menos para os itens críticos, por exemplo usando sobreposição ('overlapping').

Da mesma forma, a Tecnologia de Grupo fornece meios para que a segunda limitação seja amplamente atenuada: como a emissão de ordens é feita em conjunto para todos os itens, pode-se tirar vantagens de um planejamento conveniente da sequência da carga de trabalho.

Outros detalhes do sistema PBC podem ser encontrados em BURBIDGE (1975; 1983) e ZACCARELLI (1987).

4.2.2.3 Sistema de estoque mínimo

Apesar de ser conhecido há muito tempo que se houver variação na demanda (algo usual) o sistema de estoque mínimo não funciona satisfatoriamente, até pelo menos meados da década de 70 era o sistema de emissão de ordens mais empregado na produção em lotes.

Ele se fundamenta na conhecidíssima curva dente de serra (figura 16) que segundo SWANN (1984) foi introduzida por R.H. Wilson em 1934.

Como se pode observar na figura 16, quando o nível de estoque (do item considerado) for menor ou igual a P unidades, é emitida uma ordem de serviço de Q unidades, sendo que decorrido um tempo L ('leadtime') o lote torna-se disponível.

O sistema de estoque mínimo possui várias variantes, de acordo como são estabelecidos P e Q (figura 17).

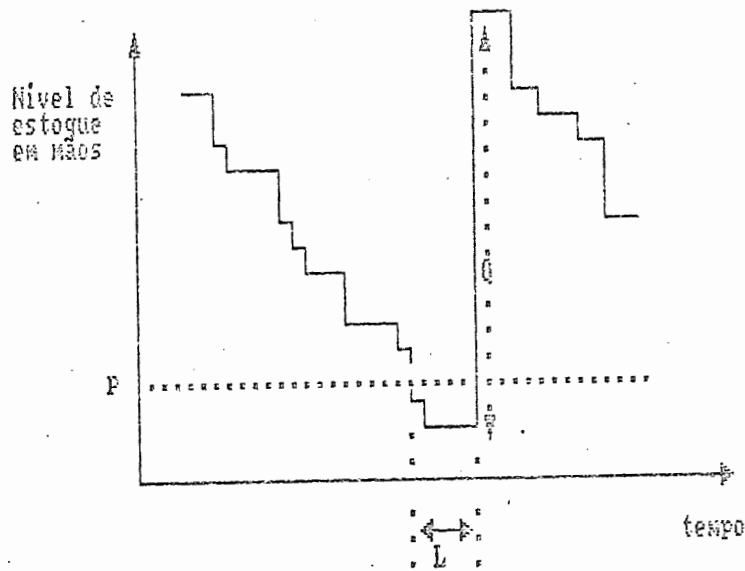


FIGURA 16; CURVA DENTE DE SERRA

denominação da variante	Formas de definição do	
	P	Q
Sistema de revisão visual	juízo	juízo
Sistema de duas gavetas	quando está esgotado o conteúdo da primeira "gaveta", emite-se a ordem e passa-se a usar o conteúdo da segunda "gaveta"	Conteúdo de uma "gaveta" (gaveta, saco, prateleira, ...)
Sistema Estatístico de Controle de Estoques (SIC)	$P = (\text{demanda média durante o 'leadtime'} + (\text{o estoque de reserva para um dado nível de serviço (NS)})$ Ou equivalente/, a Probab. da demanda durante o 'lead time' ser menor ou igual a P, é igual ao NS	Lote Econômico

FIGURA 17: VARIANTES DO SISTEMA DE ESTOQUE MÍNIMO

Na sua versão mais sofisticada, o SIC ('Statistical Inventory Control'), o sistema de estoque mínimo apresenta uma aparente racionalidade científica devido ao uso da antiga teoria do lote econômico (EOQ= 'Economic Order Quantity') que segundo ERLINKOTTER (1989), F.W. Harris apresentou em 1913 e não 1915 como vem sendo referenciado.

Provavelmente o primeiro a contestar de forma patética o EOQ foi Burbidge, que passou a atacá-lo já no início da década de 60.

Abaixo explicamos vários argumentos contra o EOQ:

- (i) o lote econômico tenta contrabalançar de forma racional o problema do custo de preparação pelo aumento do lote, até que se igualem o custo de preparação e o custo de manter estoques, o que matematicamente equivale a obter o lote de menor custo total. Isso é no fundo, resolver certo o problema errado. O correto é reduzir drasticamente o tempo de preparação e então a teoria do lote econômico perde seu sentido, já que nesse caso, achar o 'trade-off' entre esses dois custos passa ser irrelevante (BURBIDGE, 1985).
Isso tem muito a ver com a colocação de BURBIDGE (1975): toda teoria que concebe o sistema de produção como sendo imutável, à semelhança dos sistemas naturais, é uma idéia obsoleta;
- (ii) EOQ impõe que o lote de corrida, o lote de transferência, o lote de preparação e o lote pedido sejam iguais. BURBIDGE (1985) explica claramente a distinção entre esses conceitos, e afirma que muitas vezes é conveniente que o tamanho desses vários lotes sejam distintos. Para nós, para que o lote de corrida Q_1 (também chamado de lote de processo) seja diferente do lote de transferência Q_2 , deve haver um forte motivo de forma que, os inconvenientes de deixar $(Q_1 - Q_2)$ itens para trás, e portanto em processo, seja compensada por algum ganho concreto;
- (iii) o tempo (custo) de preparação pode variar muito, por exemplo com a mudança dos gargalos e/ou mudança da seqüência das tarefas. Levar isso em conta no EOQ

- é praticamente inviável (para definir onde estão os gargalos e qual a seqüência, temos que antes definir os lotes, mas para definir os lotes pelo EOQ é necessário determinar o custo de preparação que depende, por sua vez, dos gargalos e da seqüência das tarefas se for determinado de forma precisa);
- (iv) alguém poderia dizer que um sistema sofisticado poderia resolver a questão (iii), mas aí cria-se outro problema: ele perde "sua única vantagem real que é a sua simplicidade" (BURBIDGE, 1983);
- (v) no EOQ, o investimento total em estoque não está baseado no montante efetivo do capital disponível para investimento (BURBIDGE, 1983);
- (VI) impõe o uso de um sistema de emissão de ordens de fase múltipla (que é o caso do sistema de estoque mínimo) e com isso perde-se a oportunidade de planejar a seqüência da carga de trabalho (BURBIDGE, 1983) bem como, aumenta o custo esperado de obsolescência já que o fluxo não é balanceado.

Na literatura recente, um dos poucos a defender o uso do sistema de estoque mínimo é SWANN (1984). Para ele, aplicando o SIC de forma consciente, isto é, reavaliando constantemente a demanda, obtem-se resultados excelentes, e ainda afirma que o mais importante para se obter sucesso, não é a escolha do sistema mas sim a sua execução. Provavelmente um sistema melhor mas pobremente implantado, deve ter menos êxito que um sistema não tão bom mas executado de forma impecável.

Mas muitos autores defendem o uso do sistema de estoque mínimo em situações particulares. BURBIDGE (1975) acredita que ele pode ser usado eficientemente para itens classe C e itens comprados, particularmente se são peças comuns e têm portanto, um baixo risco de obsolescência. SCHONBERGER (1983) defende-o quando for extremamente difícil relacionar as necessidades dos componentes com as do produto final, devido a por exemplo, grandes diferenças dos 'leadtimes' dos vários componentes.

4.2.3 Programação de Operações

Para muitos autores seqüenciamento e 'scheduling' são sinônimos. Para CONWAY et alii (1967), seqüenciamento é a ordenação das tarefas em uma única máquina e 'scheduling' é o seqüenciamento simultâneo e sincronizado em várias máquinas. Para ASHOUR (1972), seqüenciamento é a ordenação das tarefas nas várias máquinas, e 'scheduling' é a ordenação das tarefas nas várias máquinas através da especificação do momento de início ou conclusão de operações das tarefas, ou seja, decisões de seqüenciamento focalizam-se no arranjo dos eventos, enquanto que decisões de 'scheduling' focalizam-se no tempo de eventos. Preferimos a de CONWAY et alii (1967) e explicitando que, no caso do 'scheduling' cada tarefa é formada por um conjunto de operações.

Vimos que a programação aparece nos três níveis do controle da produção: Programa Mestre de Produção (ao nível de produto), Emissão de Ordens (ao nível de componentes) e Programa de Operações (ao nível de operações).

O último nível é o mais detalhado e o mais complexo dada sua intrincada natureza combinatorial. "Nenhum sistema existente é ainda resposta para todos os problemas de programação de operações" (JACOBS, 1983).

Em CONWAY et alii (1967), o primeiro livro escrito na área de 'scheduling', e ainda hoje considerado um dos mais importantes, os problemas de 'scheduling' são classificados em: problemas estáticos, quando o conjunto das tarefas a serem executadas é pré-conhecido, e problemas dinâmicos, onde se assume um comportamento estocástico das chegadas das tarefas.

As abordagens formais existentes para resolver tais problemas são:

- a) para problemas estáticos:
 - a1) métodos algébricos otimizantes;
 - a2) métodos heurísticos com ou sem emprego de técnicas de Inteligência Artificial;

b) para problemas dinâmicos:

b1) teoria dos processos estocásticos;

b2) e/ou simulação com ou sem emprego de técnicas de Inteligência Artificial.

Embora não explicitado na literatura, a categoria do problema é função do tipo de Sistema de Emissão de Ordens empregado. Por exemplo, o Sistema de Estoque Mínimo leva a um problema dinâmico, enquanto que o sistema PBC leva a um problema estático. Isso deve explicar o porquê de vários autores na década de 70 considerarem o enfoque dinâmico mais real na maioria dos casos; simplesmente, nessa época e em épocas anteriores, o Sistema de Estoque Mínimo era o mais usado.

Como atualmente a maioria dos principais sistemas de emissão de ordens gera um problema estático, e é o que acontece com o sistema que proporemos no capítulo VII, só consideraremos o caso estático.

Os problemas de 'scheduling' são identificados por quatro informações: A/B/C/D onde

A: especifica o processo de chegadas (por exemplo, a letra M indica o processo Markoviano de chegadas, ou seja o número de chegadas por unidade de tempo tem distribuição de Poisson). No caso estático A é igual ao número de tarefas a serem programadas;

B: número de máquinas;

C: o padrão de fluxo na fábrica. Pode ser:

F: padrão de fluxo 'flow-shop'

G: padrão de fluxo 'job-shop'

R: padrão com roteiro aleatório. Comum no caso das máquinas serem processadores de dados, mas completamente incomum no caso da indústria mecânica

Se B=1, então o parâmetro C é omitido;

D: descreve o critério a ser usado para avaliar a programação.

Exemplo de identificação: n/2/F/M (ou problema

de JOHNSON (1954)), programa um número arbitrário de tarefas em duas máquinas organizadas segundo o processo 'flow-shop', de modo a minimizar o 'makespan' (duração total da programação).

Além dos livros clássicos da teoria de 'scheduling', CONWAY et alii (1967), BAKER (1974), COFFMAN (1976), FRENCH (1982) e DEMPSTER et alii (1982), periodicamente surgem artigos que fazem uma revisão sobre o tema, entre eles: CARLIER & CHRÉTIENNE (1982). Eles apresentam: os métodos clássicos de 'scheduling' (método PERT/CPM, método dos potenciais, gráfico de Gantt e métodos de listas); conceitos importantes envolvidos com esse problema (tarefas, recursos, máquinas, restrições potenciais e função-objetivo); e alguns resultados mostrando as maneiras distintas de abordar os problemas (métodos exatos, métodos heurísticos, cálculo de limites,...).

O método de Gantt é considerado por muitos como a maior contribuição ao problema de 'scheduling'. Mas mesmo podendo ser um instrumento de auxílio para a elaboração de programas de operações, ele não é propriamente um método de solução mas sim, o principal método de apresentação de resultados de uma programação.

As restrições potenciais englobam as restrições de sucessão (operação k só pode ser feita após a operação j tiver sido executada) e as restrições de localização temporal (tarefa i deve ser realizada até tal data e/ou tarefa i não deve começar antes de certa data). Matematicamente uma restrição potencial é da forma $t_k - t_j > a_{kj}$, onde t_k é a data de início da operação k e a_{kj} um parâmetro que pode ser por exemplo função do tempo de processamento da operação j .

CARLIER & CHRÉTIENNE (1982) concluem que o campo de pesquisa que resta é muito aberto e que falta por exemplo, concatenar certos resultados teóricos às aplicações práticas.

BEDWORTH & BAILEY (1987) desenvolvem um sistema computacional em BASICA denominado SEQ.BAS para sequenciar a produção em três casos: (i) uma máquina; (ii) M máquinas

em paralelo; (iii) M máquinas organizadas segundo o padrão de fluxo 'flow-shop'. SEQ.BAS é um Sistema de Apoio à Decisão embrionário, por sinal os autores o denominam de Ferramenta de Apoio à Decisão, já que a interação usuário/sistema é bastante limitada e o próprio 'software' é bastante restrito, por exemplo não armazena dados em arquivo. Acessando o programa, aparece um menu com 4 opções: (1) N/1, (2) N/M em paralelo, (3) N tarefas/M máquinas em série sendo o padrão de fluxo 'flow-shop', (4) sai do programa. A seguir, conforme o que foi selecionado na tela anterior, aparece um conjunto de regras que podem ser aplicadas para a obtenção de tantos seqüenciamentos quanto forem as regras escolhidas. Se a opção foi (3) o programa só aplica a regra CDS (algoritmo de Campbell/Dudek/Smith). Se a opção foi (1), o usuário pode receber impressas até 7 soluções, conforme o seu desejo, correspondentes à aplicação das regras SPT, EDD, etc. de um total de 7 regras. Para cada solução é apresentada a seqüência encontrada e mais os valores das seguintes variáveis de resposta: tempo médio de permanência, tempo médio de permanência ponderado, atraso médio, tempo médio de atraso, tempo máximo de atraso e número de tarefas com atraso. Como dados de entrada, para cada tarefa o usuário fornece seu nome, seu(s) tempo(s) de processamento, sua data devida e seu "peso" (importância em relação às outras tarefas).

Na seção 6.4 faremos uma revisão dos métodos de 'scheduling' criados para a manufatura celular.

4.3 SUPER-SISTEMAS DE CONTROLE DA PRODUÇÃO

Super-sistemas de Controle da Produção são SCPs que permeiam todas as atividades do processo de CP. Embora esses sistemas cubram atividades que estão fora do âmbito do CP, por exemplo o planejamento da capacidade produtiva de médio prazo, que é do âmbito do planejamento da produção, nos restringiremos apenas às atividades do CP conforme definimos em seções anteriores.

Sistemas de Controle da Produção (SCP) do porte do JIT, MRPII e OPT, se baseiam em certos princípios que formam o que chamamos de estratégia de controle da produção (JIT, MRPII ou OPT) que é parte da estratégia de fabricação (JIT, MRPII ou OPT) formada por princípios mais gerais.

O sistema de emissão de ordens do SCP JIT é chamado de Kanban, o do MRPII de MRP e o do OPT chamamos de Opt.

Portanto os termos JIT, MRPII e OPT, ou se referem a uma estratégia de fabricação, a um sistema de produção (no qual foi implantada uma dessas estratégias de fabricação), a uma estratégia de controle da produção ou a um sistema de controle da produção. Só aparecerão no texto com significado diferente, se estivermos referenciando algum autor que os define de outra maneira.

4.3.1 Sistema de Controle da Produção 'Just-in-Time' (JIT)

Estratégia de manufatura JIT é um conjunto de princípios coesos e coerentes entre si que fornecem diretrizes para que a empresa consiga trunfos competitivos, através de uma busca de melhorias permanentes, tais como:

- (i) ampliar a fatia de mercado que a empresa detem;
- (ii) atender o cliente o mais rápido possível;
- (iii) eliminar desperdícios: refugo, retrabalho, tempo de paralização ('downtime') de equipamentos, 'leadtime' excedido, super produção, má utilização do espaço (BOCKERSTETTE, 1988) e, melhorar o desempenho em todas

as áreas e funções da empresa; ou seja, eliminar atividades que não adicionam valor ao produto o que leva a uma redução de custos.

Para facilitar a consecução desses objetivos existem os princípios básicos e duas metas básicas da estratégia de fabricação JIT. Produção com zero defeito, zero atraso, zero estoque, zero quebra e zero papel ("os cinco zeros") e as duas metas: a) produzir em pequenos lotes; b) obter 'leadtimes' curtos.

A observância desses princípios e dessas metas exigem muitos esforços. FINCH & COX (1986) apontam como fundamentais os seguintes:

- (i) uma fábrica focalizada. É um tipo de 'layout' concebido para rápida movimentação de materiais dentro da fábrica (diretamente para o ponto de uso se possível) entre centros ou estações de trabalho, e fora da fábrica (FUNK, 1989);
- (ii) redução dos tempos de preparação;
- (iii) emprego da Tecnologia de Grupo;
- (iv) emprego do TPM (Manutenção Preventiva Total);
- (v) empregados com treinamento cruzado (operários polivalentes ou multifuncionais);
- (vi) obtenção de uma carga de trabalho uniforme;
- (vii) obter que as entregas de componentes comprados sejam feitas do item certo, na quantidade (e qualidade) certa e no momento certo (entregas 'just-in-time');
- (viii) uso do método kanban para controlar a produção.

A estratégia de controle da produção JIT é formada pelos seguintes princípios:

- (i) puxar a produção em todos os estágios do sistema produtivo. Por exemplo, o cliente puxa o que ele precisa da montagem, a montagem da usinagem, a usinagem da fundição, a fundição dos fornecedores;
- (ii) regular o fluxo de materiais de um sistema produtivo que esteja linearizado entre estágios de produção e intra-estágios, a partir do uso de células de fabrica-

ção que internamente devem funcionar com um padrão de fluxo 'flow-shop';

- (iii) eliminar ao máximo a mão-de-obra indireta para executar as atividades do CP, atribuindo aos operários grande responsabilidade na regulagem do fluxo de materiais e assim, ligando fortemente muitas das atividades do CP ao próprio processo produtivo;
- (iv) trabalhar em cima de um programa de produção nivelado para que a carga de trabalho seja uniforme.

Com o JIT tem-se uma implantação longa e continuada, que exige um ambiente suficientemente estável e de alto grau de repetibilidade, o que implica em poucas opções de produtos, poucas mudanças de engenharia e a curto prazo, pequenas mudanças no 'mix' de produtos (RIBEIRO, 1984; GELDERS & WASSENHOVE, 1985; LUNDRIGAN, 1986; ANTUNES et alii, 1989; entre outros).

Outra dificuldade para a implantação do JIT é a alocação de pulmões ('buffers') para amortecer variações no ciclo de produção, uma vez que sistemas que puxam a produção são muito sensíveis a elas (SIPPER & SHAPIRA, 1989).

Finalizando a seção, quatro pontos valem destacar:

- (i) o tipo de cultura do povo japonês facilita a implantação com sucesso do JIT. RUBINSTEIN (1986) aponta que para os japoneses é fundamental a manutenção da harmonia e cortesia; por exemplo, nos Estados Unidos a situação é bem distinta, lá existiam por volta de 1984, 600 mil advogados enquanto que no Japão apenas 12 mil;
- (ii) em essência a estratégia JIT visa reduzir a variedade para poder implantar com sucesso um sistema de controle da produção simples e de baixa variedade. Por outro lado, existem inúmeros fatores que podem levar a um aumento da variedade de um sistema de produção, e pela lei cibernética de Ashby (somente variedade pode destruir variedade (BEER, 1966)), isso fatalmente levaria um sistema de controle da produção de baixa variedade tornar-se caótico, cujos principais sintomas são: prazos de entrega não atendidos, baixa produtividade e

altos custos de produção. Os principais fatores que aumentam a variedade do sistema de produção são: não conseguir estabilizar a demanda através de contratos de longo prazo com clientes; não conseguir estabilizar o fornecimento através de contratos de longo prazo com fornecedores; o processo não conseguir fabricar segundo as especificações; aumento das taxas de refugo e retrabalho; não conseguir reduzir tempos de preparação; grandes diferenças nos tempos de preparação e processamento dos vários itens nos vários processos de fabricação; falta de um programa eficiente de manutenção preventiva e o nível elevado de absenteísmo;

- (iii) o propalado zero-estoque não deve ser tomado como inexistência de estoques de matéria-prima, em processo e de itens e produtos acabados. Na realidade dificilmente existe na prática um sistema que elimine totalmente os estoques, em conformidade com a opinião de LELE (1986) de que é quase impossível operar linhas de produção sem quaisquer inventários. No fundo zero estoque deve ser traduzido como a intenção de fabricar só o que é necessário, na quantidade necessária e no momento necessário;
- (iv) o JIT regula o fluxo de materiais de forma a produzir o item certo, na quantidade certa e no momento certo, o que é conseguido pelo método das tentativas e erros, ajustando-se o sistema produtivo ao retirar ou acrescentar cartões kanban (seção 4.3.1.2) o que acarreta diminuição ou aumento do estoque em processo, transferir operários de uma estação para outra, conforme as necessidades do Programa de Montagem ou por iniciativa dos operários para socorrer as estações que estão perdendo o passo de sincronização, etc. Num ambiente que não seja repetitivo e estável, esses ajustes seriam tão frequentes e consumiriam tanto tempo que as características louváveis do sistema se perderiam.

4.3.1.1 Programa Mestre de Produção

No JIT o Programa Mestre de Produção (PMP) é estabelecido numa base diária e representa apenas a demanda real (BOSE & RAO, 1988), e não a demanda prevista ou a demanda prevista mais a demanda real como em outros sistemas.

No sistema JIT o PMP pode ser melhor denominado por Programa de Montagem, dado que a necessidade do cliente é colocada no programa de montagem.

Esse programa deve ser detalhado (GELDERS & WASSENHÖVE, 1985), estável (BOSE & RAO, 1988) e nivelado (MONDEN, 1984). A necessidade desse nivelamento é que o sistema de controle da produção JIT só é exeqüível se não existir o efeito "onda" na produção, e segundo BERTRAND (1986) certos tipos de variações do PMP acarretam grandes variações na produção no curto prazo.

Dado os níveis muito baixos de estoque em processo, para haver um balanceamento da carga de trabalho por toda a fábrica, o plano liberado deve estar nivelado ou seja, em pequenas doses e de forma a se obter uma seqüência que intercalando os produtos finais, nos forneça ao final do dia o que necessitamos; por exemplo temos que fabricar num dia 1000 unidades do produto A, 500 do B e 500 do C, um programa de montagem nivelado seria: A-B-A-C-A-B-A-C-... .

Em casos reais, nada simples como o exemplo acima, "obter a seqüência ótima do programa do 'mix' de produção é um tanto difícil, mas a Toyota está tentando determinar um pela aplicação de um programa heurístico por computador" (MONDEN, 1984). Esse algoritmo heurístico está no apêndice 2 do livro de MONDEN (1984).

4.3.1.2 Sistema de Emissão de Ordens

Conforme definido na secção 4.2.2, Kanban é um sistema de emissão de ordens de fluxo controlado que puxa a

produção. Uma definição comumente adotada é a seguinte: "Kanban é um sistema de informações para controlar harmoniosamente as quantidades de produção em todos os processos" (MONDEN, 1984).

4.3.1.2.1 Funcionamento Básico

O Kanban se utiliza de dois tipos de cartões:

- (i) cartão de requisição (também chamado de cartão de transferência) que envia a informação de que o estágio de produção posterior está requisitando determinado item na quantidade especificada pelo cartão. No geral essa quantidade representa o conteúdo de um 'container' ou de um 'pallet';
- (ii) e o cartão de ordem de produção que converte a necessidade expressa no cartão de requisição em ordem de produção no estágio antecessor.

Quanto ao número de cartões kanban, existem equações matemáticas para o seu cálculo (MONDEN, 1984), sendo o número de cartões de requisição igual ao número de cartões de ordem de produção (quanto mais cartões, maior o estoque em processo e menor a possibilidade de faltar material num certo setor).

O cartão kanban pode assumir várias formas: etiqueta, anel, placa etc, e existe até o kanban eletrônico para estações de trabalho distantes (BOSE & RAO, 1988).

De modo a explicar com mais detalhes o funcionamento do sistema, tomemos a figura 18. Nela o centro produtivo B é o centro sucessor, enquanto que o A é o antecessor. Nessa figura vale a pena destacar que:

- (i) o cartão de requisição circula entre dois setores produtivos (por exemplo, fundição e usinagem, ou estoque de matéria-prima e usinagem, ou usinagem e montagem, etc) consecutivos;
- (ii) o cartão de ordem de produção circula dentro de um único setor;

- (iii) o cartão ordem de produção empurra a produção dentro do setor;
- (iv) o cartão de requisição puxa a produção que está no setor precedente para o setor sucessor;
- (v) para cada item processado, temos dois pontos onde são acumulados os cartões de requisição (R) e o de ordem de produção (P), respectivamente: o posto de kanban de requisição (PR) e o posto de kanban de ordem de produção (PP). Há um terceiro posto, o de seqüenciamento da produção (PSP) onde é possível colocar cartões P, com maior prioridade para serem processados, na frente de outros cartões;
- (vi) o momento em que será feita a requisição pode ser definido de duas maneiras:
 - (1) quando o número de cartões de requisição atinge um número de x unidades (sistema Kanban de ponto de requisição);
 - (2) a intervalos de tempo definidos (sistema Kanban de requisição periódica);
- (vii) quando chegou o momento de efetuar a requisição, o abastecedor do setor subsequente pega os cartões de requisição e igual número de 'containers' vazios; os 'containers' ele deixa em local definido no setor precedente, e com os cartões de requisição ele vai até o estoque de itens acabados do setor A, e para cada cartão ele pega um 'container' cheio, retira o cartão de ordem de produção do 'container' e coloca em seu lugar o cartão R. O cartão P é levado ao posto de kanban de ordem de produção (PP), e o 'container' para a fila do estoque de entrada do setor B;
- (viii) o sistema Kanban de requisição periódica, praticamente só é utilizado se o setor precedente for um fornecedor;
- (ix) quando o número de cartões P acumulados no posto PP for maior ou igual que y unidades, z cartões são colocados no posto PSP;
- (x) no momento em que a primeira estação de trabalho do

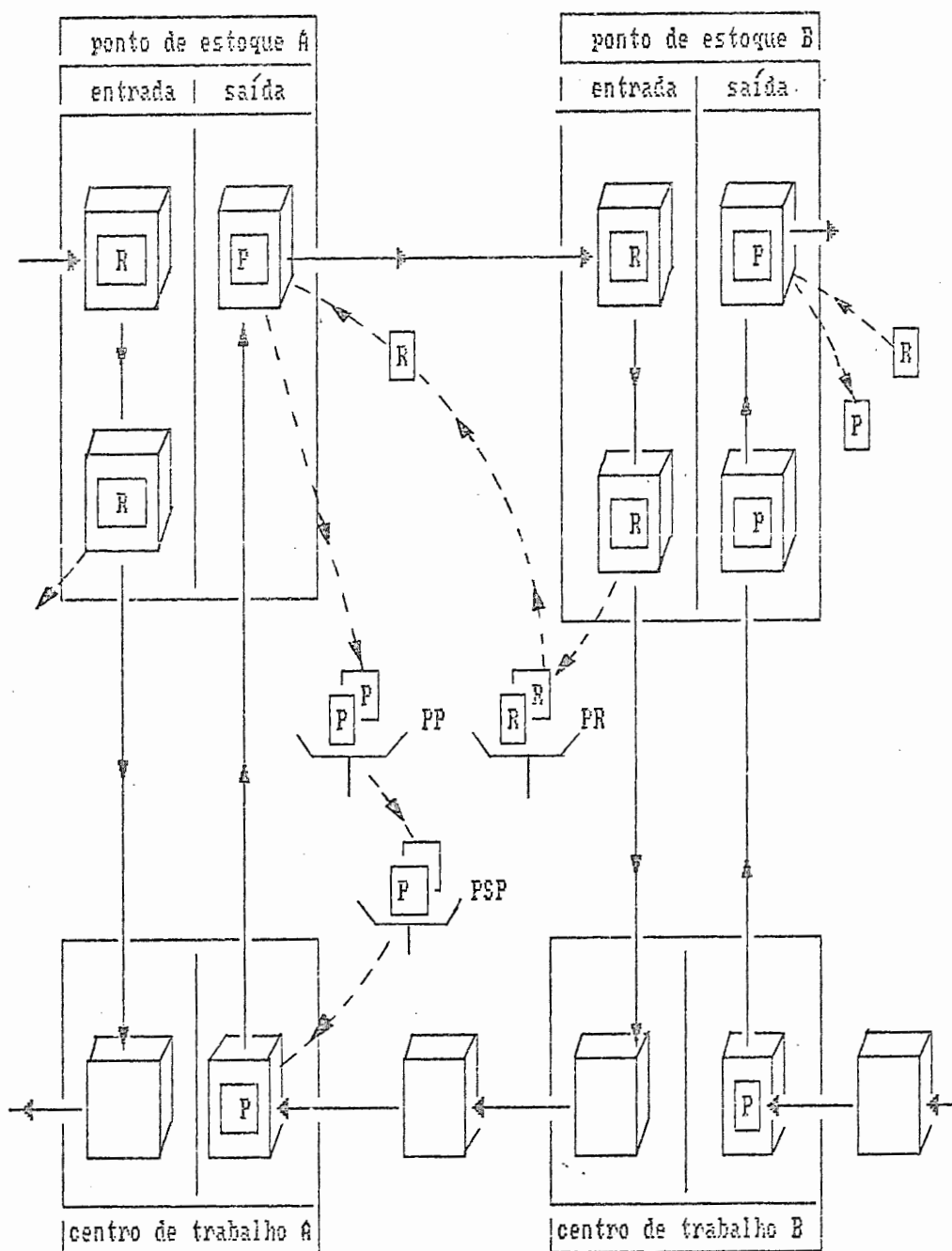


FIGURA 18: FUNCIONAMENTO DO SISTEMA KANBAN
Baseada em: GRAVEL & PRICE (1988)

setor produtivo vier a ficar desocupada, o alimentador desse setor pega o kanban que está em primeiro lugar na fila do PSP, coloca esse cartão P num 'container' vazio, e então o 'container' com seu cartão P é empurrado pelos estágios sucessivos nesse setor produtivo.

4.3.1.2.2 Variantes do Kanban

Na literatura constam variações do esquema básico descrito na seção anterior, que diferem deste de forma significativa. Focalizaremos três delas:

- (a) sistema com apenas o cartão de requisição;
- (b) sistema com apenas o cartão de ordem de produção;
- (c) sistema com quadro de decisão.

(a) sistema com apenas cartão de requisição,

Segundo SCHONBERGER (1983) , a grande maioria das empresas do Japão que usam o sistema Kanban, não têm o sistema de duplo cartão como no sistema original que foi desenvolvido pela Toyota, mas sim um sistema de cartão único (o cartão de requisição), e afirma que é fácil iniciar com um sistema de cartão único e então adicionar o kanban de ordem de produção posteriormente, se isso parecer benéfico.

Como vimos, no sistema com duplo cartão, em cada centro de trabalho há dois pontos de estoque (o de entrada e o de saída). Com um único cartão só há o de saída. Ao ser requisitado algum item do centro de trabalho anterior, o material vai direto para a linha (ou célula) de produção do centro de trabalho sucessor. Isso evita confusão nas proximidades dos pontos de estocagem e duplicação de pontos de estoque de um mesmo item. Mas, por outro lado, com cartão único há criação de mais estoque que com cartão duplo, já que se o centro de trabalho sucessor for paralizado por algum motivo, o centro anterior continua produzindo segundo o programa do dia, e isso cria um excedente de estoque na saída desse centro.

SCHONBERGER (1983) argumenta que quanto mais

complexo o produto (por exemplo, um automóvel comparado com uma motocicleta); existe maior potencial para ocorrerem atrasos no centro de trabalho sucessor; isso nos leva a concluir que nesse caso, é preferível o engenhoso sistema de duplo cartão.

(b) Sistema com apenas cartão de ordem de produção

Essa variante aparece em RIBEIRO (1984) que coloca que: "o sistema Kanban é mais compatível com o sistema de produção em série, sendo mais eficiente no controle dos itens padronizados e de produção repetitiva. Entretanto o Kanban pode funcionar numa fábrica por encomenda ('job-shop'), mediante o controle dos itens padronizados, ou como se fosse uma ordem de serviço para iniciar a produção".

Dado que esse sistema perde a característica de puxar a produção, já que essa característica é dada pelo cartão de requisição, poder-se-ia questionar se esse é um legítimo sistema Kanban. Contudo, ele mantém a característica de que compete à montagem detonar o processo de produção dos componentes.

RIBEIRO (1984) faz uma interessante aplicação numa grande fábrica com 'lay-out' funcional, mas somente a um produto altamente repetitivo (500 mil aparelhos/mês) composto de apenas 23 peças, e com pequena variação no consumo de peças na linha de montagem (25 mil aparelhos/dia).

O cartão Kanban fazia um trajeto, junto com um 'container' apropriado, que ia do ponto onde o item era consumido para o início do processamento desse item, colocando aí no 'container' a matéria-prima do item (figura 19).

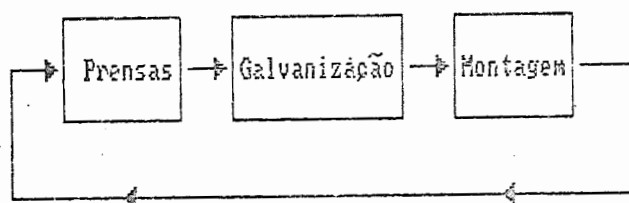


FIGURA 19: FLUXO DO CARTÃO KANBAN RELATIVO À PEÇA ALAVANCA

Fonte: RIBEIRO (1984)

(c) sistema com quadro de decisão

A aplicação de GRAVEL & PRICE (1988) ocorreu numa pequena fábrica do tipo intermitente e 'lay-out' funcional ('job-shop') de confecção de artigos de tecidos resistentes para atividades de 'camping', caça e outras, composta de poucas linhas de produtos. Segundo GRAVEL & PRICE (1988) nessa aplicação os tempos de operação podiam ser considerados estáveis, e como as operações eram similares, os tempos de preparação ou eram nulos ou insignificantes, o que facilita em muito a produção em pequenos lotes.

Um determinado produto foi escolhido para a implantação do sistema. Foi estipulado que cada kanban corresponderia a um lote de 10 unidades. Para cada operação foi associado um kanban. Máquinas do mesmo tipo eram agrupadas e para cada tipo de máquina havia um Quadro de Decisão (QD), bem como um depósito de peças vindas de outras operações para realização de operação em uma das máquinas do tipo considerado. Existiam sete tipos de máquinas.

Esse QD funciona de uma forma bem diferente do posto de cartões já descrito, e ele fornece uma maneira de se usar regras de despacho diferentes da FIFO.

A forma como esse esquema foi concebido, torna-o inexecuível de ser implantado em fábricas de médio e grande porte, devido ao grande número de deslocamentos de todos os operários pela fábrica carregando pequena quantidade de peças.

4.3.1.2.3 Avaliação do Kanban

Com o sistema Kanban o número de itens na célula (ou linha) não deve ser grande por alguns motivos, e dentre eles se destacam:

- (i) como os lotes são pequenos e rapidamente muda-se o processo para outro item, se o item não for freqüentemente produzido, isso tudo teria um efeito negativo sobre a curva de aprendizado;
- (ii) quanto maior o número de itens mais provável do padrão

de fluxo na célula não ser 'flow-shop', e se esse padrão não ocorrer, certamente o Kanban não funcionará a contento. Nisso novamente está implícito a questão da repetibilidade: para um pequeno número de peças distintas ser suficiente para carregar convenientemente a célula, é necessário que o(s) produto(s) final(is) tenha(m) alta repetibilidade e de preferência não tenha(m) sazonalidade ou outras grandes variações de demanda (exceto no caso de complementaridade dos produtos, por exemplo a célula C fabrica 10 itens do produto P1 de inverno e 12 itens do produto P2 de verão).

GELDERS & WASSENHÖVE (1985) são taxativos em afirmar que se as condições para que o sistema Kanban funcione bem estiverem presentes, ele é o sistema ideal.

Se as condições de manufatura forem propícias (tempos de operações estáveis, demanda suavizada, linha bem balanceada,...), com o Kanban se obtém grandes reduções de estoque em processo e melhora-se o cumprimento dos prazos de entrega (HUANG et alii, 1983; RITZMAN et alii, 1984).

AGGARWAL (1985) relata que o aumento médio de produtividade de empresas japonesas, com o emprego do Kanban por pelo menos cinco anos, foi de 30% e, a redução média de estoques foi de 60%.

4.3.1.3 Programação de Operações

Como visto anteriormente, a seqüência com que as operações são realizadas geralmente segue a ordem dos cartões de ordem de produção P no posto de seqüenciamento da produção (PSP). Na maioria das vezes a seqüência é ditada pela regra FIFO.

Porém a aplicação de outras regras da teoria de 'scheduling' é possível, como ilustrado por GRAVEL & PRICE (1988). Naturalmente, dado o caráter do sistema Kanban de comunicação pessoal, muitas regras tornam-se difíceis (às vezes até impossíveis) de se implantar.

4.3.2 Sistema de Controle da Produção MRPII

O MRPII é um sistema de planejamento e controle da produção. De acordo com nossa diferenciação entre atividades de controle da produção (CP) e de planejamento da produção (PP), como sistema de PP ele trata das questões de médio prazo: de planejamento das necessidades de recursos que auxilia a decidir sobre mudanças nos níveis da capacidade produtiva instalada, de previsão de demanda e da definição de políticas a serem adotadas pelo controle da produção; como sistema de CP ele visa regular o fluxo de materiais que entre outras coisas compreende manter a carga dentro dos limites da capacidade disponível. Para isso o sistema de CP estabelece um programa mestre de produção (PMP), define as necessidades de materiais (matérias-primas e componentes) colocadas nas ordens de serviço (ordens de compras e ordens de produção) e faz a programação de operações ('scheduling'). Outros módulos do sistema MRPII estão na figura 20; nela se observa que têm amplo destaque os módulos que enfocaremos: PMP, MRP (sistema de emissão de ordens) e sistema de programação de operações.

A estratégia de controle da produção MRP que norteia o desenvolvimento do SCP MRPII, repousa nos seguintes pressupostos, conceitos e princípios (ORLICKY, 1975; SWANN, 1986; GELDERS & WASSENHÖVE, 1985):

- (i) a idéia de repor estoques é equivocada. O correto é ter o item disponível no momento necessário;
- (ii) métodos computacionais permitem estabelecer as necessidades em termos de quantidade e numa base de tempo ('time-phased') de forma precisa;
- (iii) métodos não 'time-phased' baseados apenas em médias (por exemplo a demanda média na teoria do lote econômico) são totalmente irrealistas. ORLICKY (1975) mostra dois exemplos com demanda média semanal de 6 unidades:
 - (caso 1) 20-0-40-0-0-0-0-0-0-0
 - (caso 2) 20-0-0-0-0-0-0-0-0-40

Controlar a produção de maneira exatamente igual para ambos os casos é contra-producente. As informações

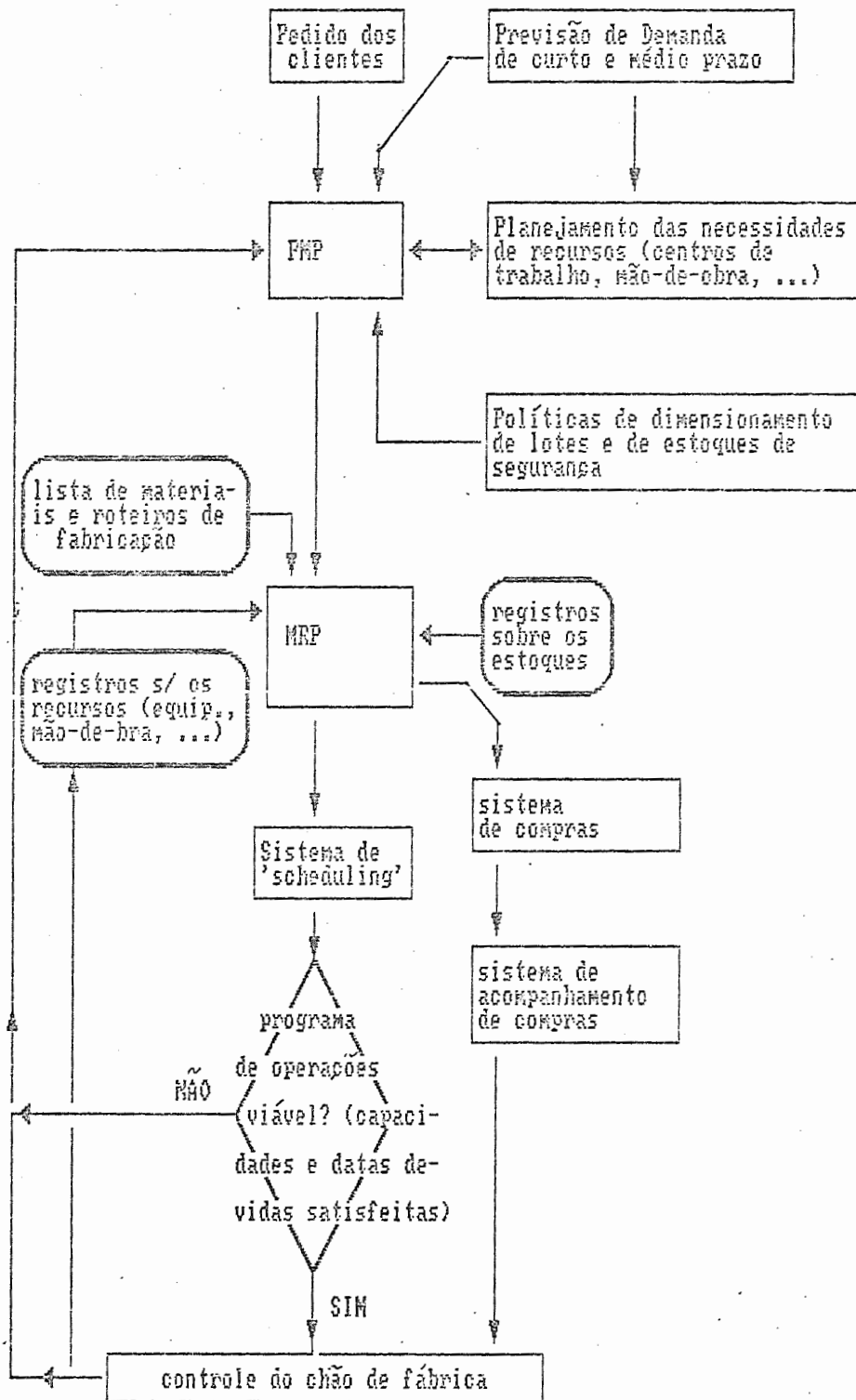


FIGURA 20: O MRP II

Baseada em: GELDERS & WASSENHOVE (1985), SWANN (1984), VOLLMANN (1986), ORLICKY (1975), ...

- 'time-phased', embora aumentem significativamente as necessidades de armazenamento de dados, possuem um valor inquestionavelmente maior.
- (iv) o tamanho do lote é o mesmo para todas as operações de uma mesma tarefa, ou seja não se admite o lote de transferência ser diferente do lote de processamento;
 - (v) o dimensionamento de lotes deve ser feito com técnicas discretas de dimensionamento, descartando portanto o lote econômico clássico;
 - (vi) o emprego dessas técnicas deve ser feito com dados de previsão de demanda de médio prazo (no geral de 10 a 18 meses), já que se admite longos 'leadtimes'. Deve-se trabalhar com o maior horizonte de planejamento possível. Notemos que se fossem reduzidos os tempos de preparação, os tamanhos dos lotes e os 'leadtimes', o grande poder computacional do MRP ficaria totalmente sub-utilizado;
 - (vii) quanto maior a discrepância da demanda de um período para outro, mais o lote Q tenderá a igualar às necessidades de cada período;
 - (viii) deve-se separar o que é controle dos itens físicos e controle dos registros dos itens. No primeiro caso, deve-se aplicar o princípio da curva ABC (lei de Pareto), e no segundo não, uma vez que os registros de todos ou praticamente todos os itens podem e devem receber a mesma atenção. Esse é outro princípio que se baseia no pressuposto de que o sistema será operacionalizado com grande poder computacional;
 - (ix) muito cuidado deve ser tomado com a precisão dos dados que alimentarão o sistema computadorizado, uma vez que se entrar lixo sairá lixo;
 - (x) demanda independente de item deve ser prevista, enquanto que demanda dependente deve ser calculada. Demanda de um item é independente se ela não está relacionada com a demanda de nenhum outro item. Segundo SWANN (1984), a diferença entre demanda dependente e independente foi observada por volta de 1957 por Orlicky. Foi o germe da criação do MRP. É provável que is-

so já havia sido observado; o método 'gozinto', que é baseado em álgebra matricial, é de 1956 (MIZE et alii, 1971); tal método, embora elegante, é computacionalmente inviável (requer a inversão de uma matriz, embora triangular inferior, enorme);

- (xi) o padrão de consumo de peças na manufatura intermitente não segue uma taxa constante. No curto prazo, mesmo que a demanda dos produtos finais seja constante, as necessidades de materiais não são constantes;
- (xii) para estabilizar a demanda dos itens dependentes só dilatando demasiadamente a duração dos períodos. Mas isso leva a estoques em processo imensos, e a uma inviabilização de se obter um controle da produção com um mínimo de eficiência;
- (xiii) os 'leadtimes' de produção e de suprimento podem ser conhecidos pelo usuário e fornecidos ao sistema;
- (xiv) é assumido que o tempo de montagem é pequeno e que no momento em que for liberada uma ordem de montagem, todos componentes devem estar disponíveis e todos eles serão consumidos simultaneamente;
- (xv) é assumido que há independência no processo entre itens distintos; assim, não há como garantir que:
 - (a) operações de itens distintos sejam realizadas simultaneamente (por exemplo, usar uma superfície comum);
 - (b) item A deve ser seqüenciado logo após item B em determinada máquina para usar a mesma preparação;
- (xvi) não é admitida a possibilidade de sobreposição de operações ('overlapping');
- (xvii) é possível prever com precisão e muitos meses de antecedência as necessidades dos produtos finais.

Em BOSE & RAO (1988) tem-se uma listagem dos 'softwares' do MRPII disponíveis comercialmente.

4.3.2.1 Programa Mestre de Produção (PMP)

O PMP é tão importante que ORLICKY (1975) afirma

que sem estabelecer procedimentos para deduzir um PMP, a empresa não pode empregar o sistema MRP. Como se pode verificar na figura 20, no MRPII a determinação de um Programa de Operações factível é competência do PMP.

O PMP determina qual o esforço futuro a ser despendido em termos de : investimento em estoque, carga de produção, entregas dos fornecedores e para os clientes.

Devido aos pressupostos, conceitos e princípios da estratégia de controle da produção MRP, o PMP é um plano de produção que abrange tanto o curto (algumas semanas) quanto o médio prazo (vários meses), diferindo assim de nossa concepção que restringe o PMP apenas ao curto prazo.

Nas palavras de ORLICKY (1975) : "Um PMP serve a duas funções principais:

- (1) no curto prazo, serve como base para o planejamento das necessidades de materiais, para a produção de componentes, o planejamento das prioridades das ordens e o planejamento das necessidades de capacidade de curto prazo;
- (2) na função de longo prazo, serve como base para estimar demandas de longo prazo sobre os recursos da companhia tais como capacidade produtiva (área quadrada, máquinas ferramentas, mão-de-obra), capacidade de armazenagem, equipe de engenharia e capital".

No MRPII uma alternativa ao uso de estoques de reserva de produtos finais , é o uso de 'overplanning' (também chamado de 'hedging planning' e 'contingency planning'). "Super-planejamento em um ambiente MRP significa o planejamento de mais produtos do que o previsto, a fim de lidar com a incerteza da demanda dos clientes que é embutida no PMP" (GRÜNWARD et alii, 1989).

O PMP além de ser a força motriz do MRP (GELDERS & WASSENHOVE, 1985), ele é um meio para se tentar conciliar conflitos inevitáveis entre as divisões funcionais ('marketing', compras, finanças, produção e engenharia), e representa um compromisso entre elas (ORLICKY, 1975).

Apesar de na literatura se falar muito sobre o papel do PMP no sistema MRPII, e que o PMP deve representar

um plano realista, praticamente nada se fala sobre os detalhes da elaboração do PMP. Mas fica claro que a chave de tudo é o processo de tentativa e erro de verificar de uma forma um tanto grosseira, o que aconteceria se ("simulação") o PMP proposto fosse esse ou aquele, e termina quando um PMP viável "parece" ter sido obtido.

A realização de tantas iterações quantas forem necessárias indo do PMP ao Programa de Operações, até se obter um PMP viável (como sugere a figura 20), na verdade é apenas teórica e totalmente impraticável uma vez que, cada iteração dessas requer várias horas de tempo de CPU num computador de grande porte.

Estabelecimento de PMP não propriamente viáveis são freqüentes, já que: a maioria dos sistemas ignoram as limitações de capacidade; nenhum sistema leva em conta fatores importantes tais como o efeito do tamanho dos lotes, do estoque em processo e a dependência dos 'leadtimes' em função das cargas reais; e é comum as "simulações" serem baseadas em dados que já não são mais reais (por exemplo, 'leadtimes' de produção baseados num 'mix' de produtos que foi alterado). Tudo isso causa perda de confiança e nervosidade (freqüentes replanejamentos, ordens de emergência e aumento de custos) no sistema (GELDERS & WASSENHÖVE, 1985). A maioria dos sistemas adota uma atualização semanal do PMP (ANDERSON et alii, 1982).

4.3.2.2 Sistema de Emissão de Ordens

MRP é o sistema de emissão de ordens do sistema de controle da produção MRPII, que empurra a produção para se atingir uma determinada demanda (firme + prevista) especificada no PMP. Definições mais comuns seguem a de ORLICKY (1975): MRP é primariamente um sistema de planejamento da fabricação de componentes. Existem muitas outras definições ou caracterizações, e só para ilustrar: MRP é um modelo de produção incompleto (HACKMAN & LEACHMAN, 1989) e MRP é um complicado sistema de informações (HO, 1989).

É fato que o MRP pode ser mais que um sistema de emissão de ordens, uma vez que ele trabalha não só com dados e informações de curto prazo, mas também com uma fabulosa quantidade de dados e informações de médio e até de longo prazos. No entanto, acreditamos que um sistema de planejamento da produção projetado para tratar de decisões de médio prazo e, um sistema de planejamento estratégico concebido para subsidiar decisões de longo prazo, podem e devem ser muito mais eficazes que aproveitar os excessos de capacidade de um sistema cujo objetivo principal é controlar a produção.

O MRP se tornou possível graças ao avanço da informática. Os primeiros sistemas MRP são do final da década de 50. Consolidou-se na década de 70. A partir de meados da década de 80 passou a ser questionado por alguns autores.

Só o fato de se ter um sistema MRP instalado não indica o grau de aproveitamento que o usuário faz do mesmo. Existem várias categorias de usuários e, no pior caso "... o MRP existe principalmente no processamento de dados. Muitos registros são imprecisos. O sistema informal é usado demais para fazer a companhia funcionar .."(ANDERSON et alii,1982).

4.3.2.2.1 Funcionamento Básico do Sistema MRP

O funcionamento do MRP pode ser decomposto em três etapas:

- (i) explode as necessidades de produtos finais dadas pelo PMP, fornecendo as necessidades em termos de materiais. Esse processo é bem conhecido e denominado de explosão;
- (ii) calcula as necessidades líquidas de materiais numa base de tempo;
- (iii) determina as necessidades de capacidade de outros recursos (equipamentos, mão-de-obra, ...).

A explosão da necessidade de item pai para item filho é feita sucessivamente de nível a nível partindo do

nível 0 dos produtos finais. Por razões de eficiência computacional o MRP processa todos os itens (mesmo de diferentes produtos) num dado nível, antes de considerar seus componentes no nível imediatamente inferior (ORLICKY, 1975).

Tendo-se o item I2 como componente do I1, sendo

Item I1

'leadtime' = 1 período

	Período							
	1	2	3	4	5	6	7	8
necessidades brutas	20		30	10		50		50
recebimentos programados		20			20 (+20)			(+50)
quantidade em mãos	50	30	50	20	10	30 (-20)	0	(-50)
necessidades líquidas						20		50
liberação planejada de ordens					20		50	

Item I2

'leadtime' = 2 períodos

						x2		x2
necessidades brutas	40			40	40			100
recebimentos programados	30		30		(+40)			(+100)
quantidade em mãos	20	10	10	40	0 (-40)	0	(-100)	0
necessidades líquidas					40			100
liberação planejada de ordens			40		100			

FIGURA 21: PROCEDIMENTOS FUNDAMENTAIS DO MRP

Baseado em ORLICKY (1975)

que uma unidade de I1 requer duas unidades de I2, a figura 21 ilustra os procedimentos fundamentais do sistema MRP.

Sobre a terceira etapa muito pouca informação detalhada existe publicada. Mas é certo que num primeiro passo o MRP admite capacidade ilimitada e num segundo passo, verifica a consistência do que deve ser feito com a capacidade disponível (PLENERT & BEST, 1986) mostrando ao usuário ou fornecendo como entrada de um sistema de

planejamento das necessidades de capacidade, os recursos que serão insuficientes de forma a serem tomadas as providências cabíveis.

Existem dois métodos de atualização dos dados do MRP: o regenerativo e o de mudança líquida. Com o primeiro, as atualizações são feitas a intervalos regulares de tempo (a mais comum é a semanal), e com o segundo as atualizações são feitas à medida que os eventos (transações em estoques) vão ocorrendo. "A maioria dos sistemas MRP (90%) são regenerativos, aparentemente evitando a nervosidade e a ansiedade experimentadas com alguns sistemas de alteração líquida" (ANDERSON et alii, 1982). Por outro lado, o sistema MRP regenerativo, tende a funcionar mais satisfatoriamente quanto mais estável for o ambiente, já que no geral ele está desatualizado (ORLICKY, 1975).

Outras características operacionais do MRP que vale mencionar são:

- (i) no MRP três parâmetros estão atrelados entre si: o número de uma ordem de serviço, o número da peça e o tamanho do lote dessa ordem. Portanto definir tamanho de lote por operação, implicaria em uma peça em diferentes estágios de fabricação, receber diferentes números de identificação (SWANN, 1986). Isso naturalmente é inviável;
- (ii) a complexidade da lista de materiais (BOM) pode causar flutuações no nível de estoque em processo (GUTZMANN & WYSK, 1986).

4.3.2.2.2 Avaliação do MRP

Não há dúvida que na década de 70, o MRP representou um avanço em termos do que era feito no Controle da Produção anteriormente. Esse avanço não se deu pelo uso de uma matemática mais poderosa, mas sim pelo melhoramento do processamento de dados (ORLICKY, 1975). Mas, embora sua lógica seja consistente, ele repousa em alguns princípios que levam a um sistema de eficácia duvidosa.

Para que liberar com muita antecedência ordens com base num 'leadtime' do qual, mais de 90% representa tempo de espera em filas e esse tempo de fila é grande exatamente devido ao acúmulo de ordens liberadas precocemente?

Os adeptos do MRP afirmam que, o MRP tem a habilidade de gerar ordens para os itens certos, nas quantidades certas e no momento certo (ORLICKY, 1975). Defendem que ele possui capacidade para tratar ambientes instáveis e turbulentos, que assim prescindem da presença de sistemas informais os quais são demasiadamente ineficientes, e que é mais importante ter capacidade para lidar com situações instáveis do que se esforçar em estabilizá-las.

Por outro lado, todos admitem que as saídas do sistema MRP nem sempre são válidas em termos de 'leadtimes', disponibilidade de capacidade e de materiais, particularmente quando o sistema é guiado por um PMP irreal.

Finalizando, o MRP como sistema de emissão de ordens é um sistema extremamente oneroso e agigantado, e acaba sendo usado em outras atividades fora do âmbito do controle da produção. Como já dissemos, isso não é consequência de uma falha em sua lógica, que é bastante coerente, mas sim é decorrente dos princípios e pressupostos da estratégia de controle da produção MRP.

4.3.2.3 Programação de Operações

O sistema de programação de operações do MRPII trabalha em cima de duas restrições:

- (a) as datas devidas estabelecidas pelo MRP;
- (b) a disponibilidade de capacidade dos recursos.

Levando em conta (a) e (b) o sistema de 'scheduling' visa determinar um programa viável. Contudo nem sempre é possível respeitar as datas devidas e/ou a capacidade.

Uma das limitações que mais é preciso reconhecer no MRPII é o seu sistema de 'scheduling' (LUNDRIGAN, 1986). Uma limitação relevante é a escala de tempo ser em dias, enquanto deveria ser pelo menos em horas (JACOBS, 1984).

4.3.3 Sistema de Controle da Produção OPT

OPT é um produto israelense cujo criador é Eliyahu Goldratt . Foi introduzido nos EUA pela empresa COI.

Até o início da década de 80, o OPT era acrônimo de 'Optimized Production Timetable', e como tal vários autores, como por exemplo JACOBS (1983), visualizavam-no como um sistema de programação de operações. O OPT acabou evoluindo para um SCP e se tornou 'Optimized Production Technology' na segunda metade da década de 80.

Dentre os super-sistemas de controle da produção existentes, o OPT é o que mais faz uso das técnicas de PO. Contudo como isso é feito, não é divulgado. Muitos acham que o ruim do OPT é ter que acreditar num sistema que é praticamente uma caixa preta. "OPT é tudo menos transparente, ele é verdadeiramente difícil de entender" (VOLLMANN, 1986). "Deve-se pagar até 500 mil dólares por um sistema cuja operação é um mistério, na esperança de que ele funcione conforme propalado" (MELETON, 1986).

O que é de fato divulgado, são avaliações do sistema bem como suas características que, em grande parte, são conseqüências dos princípios e pressupostos do que chamamos de estratégia de controle da produção OPT.

Essa estratégia é composta de 10 princípios (GOLDRATT & COX, 1986; JACOBS, 1984; GELDERS & WASSENHÖLVE, 1985; LUNDRIGAN, 1986: ...):

- (1) balancear o fluxo e não a capacidade. Balancear a capacidade, isto é manter uma carga de trabalho de 100% em todos os recursos produtivos na manufatura intermitente, só há uma forma de ser tentada, manter um alto volume de estoque em processo e adiantar a fabricação de peças componentes de produtos de venda num futuro incerto. Já balancear o fluxo significa usar a capacidade de acordo com as necessidades exatas; assim sendo, ela será usada 100% apenas nos recursos gargalos;
- (2) utilização dos não-gargalos é determinada pelas restrições. Os recursos gargalos marcam o passo de todos os recursos do sistema produtivo, ou seja, o nível de uti-

- lização de um recurso não-gargalo é determinado pelas necessidades dos recursos gargalos que restringem o volume de produção que é vendido e que gera lucros;
- (3) ativar nem sempre é igual a utilizar. Se o que um recurso não-gargalo produz puder ser absorvido por um recurso gargalo, então se diz que o recurso não-gargalo foi utilizado; caso não possa ser absorvido, o recurso não-gargalo foi apenas ativado mas não utilizado;
 - (4) uma hora perdida em um gargalo é uma hora perdida em todo o sistema. Essa hora perdida não vai poder ser recuperada; houve um volume de produção do sistema como um todo, que simplesmente deixou de ser produzido;
 - (5) uma hora economizada num não-gargalo é uma miragem. Essa "economia" ou acaba sendo utilizada na produção de itens que não podem ser absorvidos pelos gargalos, ou acaba aumentando o tempo ocioso desse não-gargalo. Em qualquer caso perdeu-se dinheiro, já que o custo de se obter essa redução de tempo não se converteu em benefício algum;
 - (6) gargalos governam o volume de produção e o volume de estoques em processo. É um corolário dos princípios anteriores;
 - (7) lote de transferência nem sempre é igual ao lote de processo. Na figura 22, Q é o lote de processo, Q_1 e Q_2 são lotes de transferência, respectivamente o lote de entrada e o lote de saída da operação i . Conforme a conveniência para se manter o fluxo continuamente nos gargalos, esses lotes podem e devem assumir valores diferentes. Existem autores que parecem confundir lote de processo com lote da ordem de produção, por exemplo

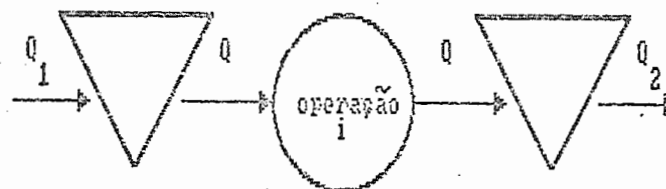


FIGURA 22: LOTE DE TRANSFERÊNCIA DE ENTRADA E DE SAÍDA

LUNDRIGAN (1986) diz que na linha de montagem de Ford o lote de processo era infinito enquanto que o lote de transferência era igual a uma unidade;

- (8) por motivos similares ao princípio anterior, os lotes de processo devem ser variáveis, não fixos;
- (9) a lei de Murphy (se algo de errado puder ocorrer, ele vai ocorrer) é conhecida e seus transtornos podem ser isolados e minimizados, usando-se capacidade e estoque de seguranças em pontos estratégicos para imunizar o programa de produção contra refugos, quebras de máquinas, etc;
- (10) a soma dos ótimos locais no geral não é igual ao ótimo global. Essa máxima do enfoque sistêmico, no controle da produção significa que todas as restrições e objetivos devem ser levados em conta simultaneamente. Isso é extremamente difícil de ser conseguido.

Além das características do OPT que são decorrências óbvias de seus princípios, têm-se as seguintes: (JACOBS, 1983; JACOBS, 1984; SWANN, 1986; GRUNWALD et alii, 1989):

- (a) uma capacidade de modelagem da produção bastante grande permitindo que se especifiquem os níveis desejados de estoques em cada operação, os limites dos tamanhos de lotes por operação e as folgas na programação de operações;
- (b) como no MRPII, é possível usar o sistema para o planejamento da capacidade de produção de médio prazo, dependendo do horizonte que os dados cobrem;
- (c) tenta maximizar o volume de produção vendável. Na realidade esse é um corolário dos princípios do OPT;
- (d) não considera custo de nenhuma forma (o MRPII também não exceto em algumas técnicas de dimensionamento de lotes);
- (e) o sistema pode ser dirigido quer pela meta de produzir um 'mix' de produtos fixado, ou por pedidos individuais de clientes com prescrição de prazos de entrega, ou pela combinação de ambos;

- (f) os recursos modelados com o OPT podem ser homens (equipes de trabalho), ou máquinas (centros de máquinas);
- (g) admite a sobreposição ('overlapping') de operações;
- (h) escala de tempo da programação de operações é em horas (no MRPII é em dias);
- (i) OPT defende que o tamanho do lote deve ser determinado em função de dados dinâmicos, e não estáticos como no MRPII. Por exemplo, o custo de certa preparação de máquina, pode tanto ser milhares de dólares ou zero, caso o item passe ou não por gargalos;
- (j) como incertezas fazem variar as capacidades dos gargalos, o OPT tem dificuldade em lidar com incertezas.

4.3.3.1 Funcionamento Básico do OPT.

Todos os dados de entrada, tanto manual (o PMP; bloco 1, figura 23), quanto os arquivos de dados do MRP (lista de materiais ou seja o BOM, roteiros de fabricação com tempos de processamento e de preparação, 'status' dos estoques; bloco 2, figura 23), são combinados pelo módulo 'BUILTNET' (bloco 3, figura 23), e armazenados numa rede consolidada ('PRODUCT NETWORK'; bloco 4, fig. 23) para cada produto final, de forma a agilizar o tempo de processamento do computador. Na rede cada operação de manufatura é representada por 24 campos. Segundo MELETON (1986) construir e manter os dados requeridos para a operação do OPT, é a tarefa mais difícil e que mais consome tempo.

Após termos dado entrada um PMP qualquer, o OPT avalia quão realizável ele é convertendo no módulo SERVE (bloco 5, fig. 23) as necessidades em termos de produtos finais para necessidades em termos de componentes. O módulo SERVE é absolutamente similar ao MRP (ambos admitem capacidade ilimitada). Com base no cálculo de capacidades necessárias dos recursos feito pelo SERVE, o módulo SPLIT (bloco 6, fig. 23) separa os recursos gargalos dos não-gargalos, e então se entra na fase de programação de

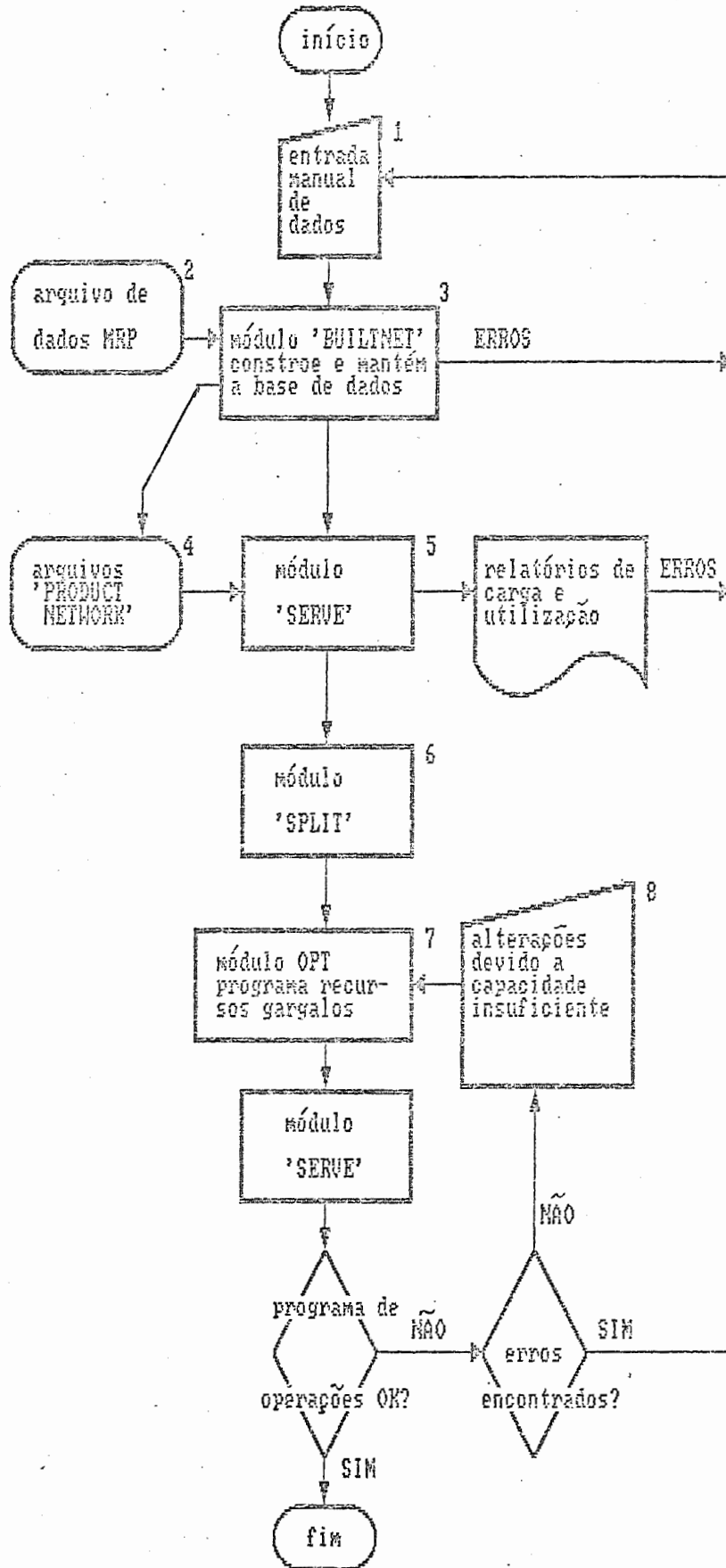


FIGURA 23: FLUXOGRAMA DE FUNCIONAMENTO DO OPT
 Fonte: MELETON (1986)

operações:

- (a) às operações processadas em recursos gargalos é aplicado o algoritmo secreto de Goldratt (bloco 7, fig. 23) que elabora uma programação detalhada;
- (b) às operações processadas em recursos não-gargalos, o próprio módulo SERVE, que segue a lógica do MRP, fornece uma programação não detalhada.

Se o PMP fornecido ao sistema, levou a um programa de operações não exeqüível, o sistema retorna indo ao bloco 8, figura 23. Nesse terminal são alteradas as disponibilidades dos recursos gargalos (horas extras, turnos extras, ...) e/ou certas tarefas são subcontratadas e/ou são alteradas datas devidas. O processo é iterativo até que o PMP se torne exeqüível.

E se não houver gargalos como o OPT funciona? "Ele reduz os tamanhos de lotes até o ponto onde alguns recursos quase se tornem gargalos" (VOLLMANN, 1986). Isso nos faz cogitar que em épocas de dificuldades, ao invés de demitir pessoas, o OPT implicitamente leva a uma redução dos tamanhos dos lotes com ganhos em flexibilidade, o que traz trunfos de vendas que pode levar a uma retomada das vendas; isso parece que representa uma interessante propriedade cibernética de auto-controle.

Notemos que não ocorre o processo de, literalmente, emitir ordens de serviço, porém o processo de converter as necessidades de produtos finais para necessidades de materiais (matérias-primas e componentes) é feito pelo módulo SERVE. Portanto, esse módulo corresponde, segundo nossa definição, a um sistema de emissão de ordens.

O que são propriamente impressas são as ordens de execução de operações emitidas nos relatórios. Descrição dos relatórios pode ser vista em LUNDRIGAN (1986), sendo que resumidamente temos: um relatório para o estoquista (dizendo que materiais e em que quantidades, ele deve alimentar que recursos e em que exato momento), um relatório de despacho para o supervisor de produção (mostra a programação de operações nos equipamentos gargalos que deve ser cumprida á

risca, e a dos não gargalos que deve apenas ser cumprida), um relatório diário de acompanhamento para o supervisor da produção (especifica em que ponto deveriam estar cada tarefa para que, se houver atrasos, ele tome providências) e um relatório de necessidades de matérias-primas.

4.3.3.2 Avaliação do Sistema OPT

Muitas vantagens atribuídas ao OPT estão relatadas na literatura (MELETON, 1986; VOLLMANN, 1986; PLENERT & BEST, 1986; ...):

- (a) diminuição do estoque em processo e aumento do volume de produção, o que acarreta diminuição dos custos operacionais e diminuição da necessidade de espaço físico;
- (b) rapidez no processamento do computador (há relatos de que um programa para uma semana gasta um tempo de CPU de 3 a 5 horas num IBM 4341), principalmente quando comparado ao lento MRPII;
- (c) capacidade para simular conseqüências de: mudança no PMP, alteração do arranjo-físico, introdução de novos roteiros de fabricação;
- (d) capacidade para lidar com muitas estações de trabalho;
- (e) permite que se faça um 'trade-off' entre os custos de preparação e o desempenho nas entregas, isto é, querendo-se melhorar esse último piora-se o primeiro e vice-versa;
- (f) diminuição do 'leadtime' pelo menos em relação ao MRPII;
- (g) as datas devidas (prioridades) estabelecidas no MRP nem sempre são respeitadas ao nível de programação de operações, enquanto que essas incongruências são difíceis de ocorrer com o OPT.

Existem pessoas tão otimistas quanto às qualidades do sistema, que chegam a afirmar que ele combina o melhor do MRPII com o melhor do sistema JIT (por exemplo LUNDRIGAN (1986) responsável por uma implantação bem sucedida do OPT

numa fábrica da GE americana), e outros vêem o OPT como um aprimoramento do MRPII (por exemplo VOLLMANN (1986)).

Segundo VOLLMANN (1986) o algoritmo secreto de Goldratt fornece bons resultados num tempo razoável, dependendo de pelo menos os seguintes fatores da situação particular: porcentagem dos recursos gargalos, número total de recursos ou centros de trabalho, tamanho da estrutura do produto e o nível de detalhe ("granularidade") do arquivo de roteiro de fabricação.

Para que não haja nem falta nem excesso de produtos, tal qual no MRPII, o OPT exige uma previsão de demanda precisa. Contudo analisando os princípios da estratégia de controle da produção MRPII e OPT, o número de meses da previsão é maior com o MRPII.

Ao que nos consta, apenas dois artigos que falam sobre o OPT discordam de alguma forma das opiniões que alardeiam espetaculares resultados do mesmo. JACOBS (1983) avaliou, após determinado número de testes com o OPT, que o estoque em processo era muito maior que o necessário, que parecia existir uma considerável dose de arte associada ao uso do sistema e que portanto, cada programa de operações deveria ser criticamente revisto. Por outro lado, JACOBS (1983) faz uma ressalva de que nunca encontrou um sistema que fosse resposta a todos os problemas de programação da produção. GELDERS & WASSENHÖVE (1985) afirmam que tem sido observado que o sistema muito freqüentemente, desrespeita alguns de seus princípios básicos.

Já SWANN (1986) e MELETON (1986) apresentam uma postura um tanto cética.

Como todo super-sistema baseado no computador, o OPT tem seus gigantismos, há grande esforço e dificuldade para alimentação e atualização dos dados, há necessidade de especialistas em computação para implementá-lo e, o mau uso do sistema leva a resultados desastrosos. Como todo super-sistema ele exige um alto grau de disciplina no chão da fábrica. E como já foi dito, um grande empecilho é a obscuridade das informações sobre seu funcionamento, o que inviabiliza uma avaliação mais concreta.

4.3.4 Alguns Comentários sobre Combinar Super-Sistemas

Embora as dificuldades em combinar super-sistemas de controle da produção sejam evidentes, e talvez até inviável devido aos vultosos investimentos necessários com retornos imprevisíveis, alguns autores têm proposto possíveis sinergias de forma a utilizar as virtudes de um para suprir as deficiências de outros. Nas figuras 24 e 25 citamos duas sugestões, sendo a primeira auto-explicativa e condensa de forma gráfica sugestões de outros autores (GELDERS & WASSENHÖLVE, 1985; BOSE & RAO, 1988; ...).

	s/ restrições de capacidade	c/ restrições de capacidade
Muitos produtos + muitas mudanças de engenharia + muitas mudanças no 'mix' de produtos	MRPII	OPT + MRPII
situação intermediária (alguma padronização + alguma repetibilidade)	MRPII+JIT	OPT+MRPII+JIT
Poucos produtos + poucas mudanças de engenharia + poucas mudanças no 'mix' de produtos a curto prazo	JIT	JIT

FIGURA 24: ESQUEMA GERAL DE SINERGIA ENTRE MRPII, JIT e OPT
Fonte: ANTUNES et alii (1989)

Na figura 25, embora tenhamos modificado a terminologia e eliminado alguns detalhes, mantivemos a idéia básica de RIBEIRO (1984). Ele propõe um interessante esquema para escolher a maneira de controlar a produção de peças num ambiente intermitente. Define

\bar{X}/Q = coeficiente de repetibilidade

S/\bar{X} = coeficiente de variação



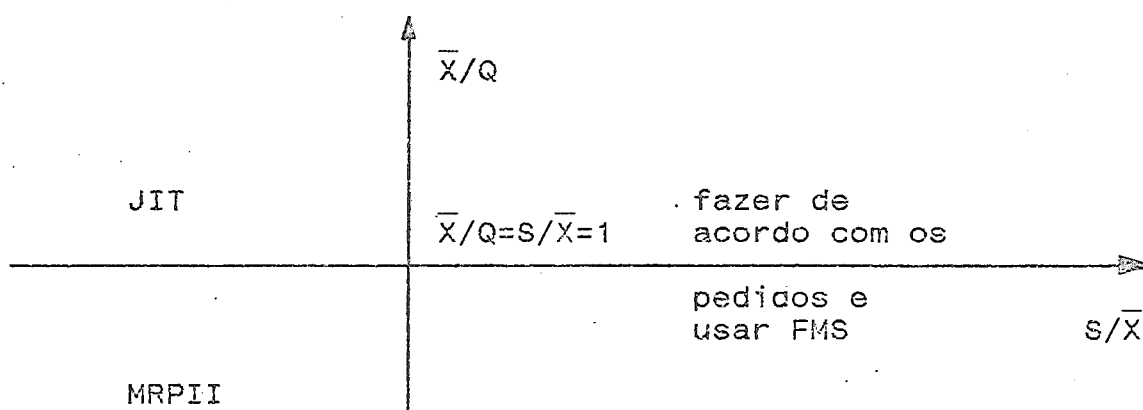


FIGURA 25: ESCOLHA DO SISTEMA DE CONTROLE DA PRODUÇÃO
Adaptado de RIBEIRO (1984)

onde: \bar{X} = consumo médio das peças em dez dias
 Q = valor do lote econômico de produção
 S = desvio-padrão do consumo das peças em dez dias

Como se pode ver na figura 25 (RIBEIRO, 1984):

- peças com alta repetibilidade ($\bar{X}/Q > 1$) e coeficiente de variação baixo ($S/\bar{X} < 1$), que representam em média 10% do número total de peças num sistema de produção intermitente, é aconselhável o sistema JIT;
- ambos os coeficientes baixos, uso do MRPII (em média 30% das peças);
- as demais peças (em média 60%), que no geral têm baixa repetibilidade e grande variação no consumo, deve-se fazer conforme os pedidos, e como forma de melhorar a produtividade nesse caso, a perspectiva é o uso de FMSs.

Na prática, combinações de super-sistemas de controle da produção são raras, e uma das poucas divulgadas é a da Yamaha com seu MRP sincronizado (HALL, 1981 apud (SCHONBERGER, 1983)), onde o MRPII (mais especificamente o MRP) é usado para planejar a capacidade necessária para a produção no médio prazo e para controlar a produção dos itens de baixa repetibilidade, e o JIT (mais especificamente o sistema Kanban de duplo cartão) para controlar os itens de alta repetibilidade.

CAPÍTULO V

MANUFATURA CELULAR

5.1 MANUFATURA CELULAR E TECNOLOGIA DE GRUPO (TG)

Embora seja contra-senso pensar em células de manufatura sem o uso de Tecnologia de Grupo (TG), o uso de TG sem implantar células é, pelo menos em alguns casos particulares, possível embora não seja o ideal. Uma situação dessas seria uma fábrica que já possui arranjo físico funcional extremamente difícil de mudar para o celular e, além disso, o 'mix' de produtos varia tanto e de tal forma, que seria impossível conseguir uma distribuição de carga de trabalho nas células não excessivamente discrepante.

Uma das proposições menos polêmicas quanto a sua potencialidade em aumentar a eficácia e a eficiência dos sistemas de produção de peças em pequenos e médios lotes, é a estratégia de fabricação Tecnologia de Grupo, formada por princípios e conceitos, sendo os princípios mais básicos os seguintes:

- (a) formação de família de peças semelhantes em termos de projeto (forma/tamanho/tolerâncias/material) e/ou processo;
- (b) formação de grupos de equipamentos cada um dos quais, na medida do possível, fabricando uma família de peças.

Pode-se afirmar que a TG tem, embora em níveis diferentes, a possibilidade de afetar de forma positiva, os quatro fatores estratégicos que definem o sucesso de uma empresa, e para nós na seguinte ordem: produtividade,

flexibilidade, adaptabilidade e qualidade. Isso é devido basicamente à padronização e organização que a TG proporciona, por exemplo facilita a recuperação de informações, agilizando o projeto e evitando a criação de projetos redundantes. Além disso a TG propicia a diminuição dos tempos de preparação, que permite diminuir o tamanho dos lotes, e com isso reduzir os 'leadtimes' de produção e os estoques em processo.

Como tudo, existem vantagens e desvantagens, as quais estão sumarizadas em várias referências (BURBIDGE, 1975; RATHMILL et alii, 1977; HOLLIER, 1980; GALLAGHER & KNIGHT, 1986; entre outras), e entre os benefícios se destacam os aspectos sociais e comportamentais. Todas elas concordam que os benefícios sobrepujam os custos. Entre esses custos se destacam os investimentos. Segundo GALLAGHER & KNIGHT (1986) de longe o maior custo para a implantação da TG é o desenvolvimento e implantação de um sistema de codificação e classificação. Mas cremos que os investimentos em equipamentos são relevantes: pensemos no caso em que já temos uma fábrica organizada em células; existem células onde por exemplo as fresadoras são menos usadas, em outras as furadeiras etc. Se agora passarmos para o 'lay-out' funcional, é óbvio que o setor de fresadoras e de furadeiras ficarão com excesso de capacidade (exceto no caso excepcional onde os tempos de preparação aumentem demasiadamente devido a essa mudança), e assim algumas dessas máquinas poderiam ser vendidas; por isso é que na manufatura celular geralmente o número de operários é menor que o número de máquinas, bem como pelo fato das máquinas estarem próximas um operário pode operar mais que um equipamento (operário polivalente ou multifuncional); assim se consegue um melhor balanceamento de fluxo enquanto que o balanceamento da capacidade tem uma atenção secundária. Enfatizamos que se não houver investimentos em equipamentos ao se passar da manufatura convencional para a celular, o tempo de espera nas filas deverá aumentar (o trabalho de FLYNN & JACOBS (1986) serve para ilustrar essa questão) e com isso poderá comprometer a grande redução do 'leadtime'

de produção.

Poucas críticas têm sido feitas contra a TG, e talvez as únicas que mereceram atenção foram as de LEONARD & RATHMILL (1977a; 1977b) que afirmaram que:

- (a) tem sido demonstrado que a manufatura celular é mais eficiente que um 'job-shop' ineficiente. Entretanto por razões relacionadas com treinamento de mão-de-obra, satisfação no trabalho e utilização de máquinas, TG não pode competir com um 'job-shop' eficiente;
- (b) tamanhos de lotes podem ser reduzidos apenas nos casos onde se pode adotar um sistema de emissão de ordens de ciclo único, e o número desses casos é relativamente pequeno;
- (b) em geral, só há vantagens em se usar a TG se o padrão de fluxo obtido nas células é o do 'flow-shop', e assim TG é uma filosofia de fabricação restrita.

Já para BURBIDGE (1975), TG é um fato consumado que já provou que se bem implantada há ganhos em produtividade e em satisfação no trabalho para os operários.

BURBIDGE (1973; 1975) prova usando a técnica AIDA que o essencial para o sucesso da TG é:

- (a) mudança do 'lay-out' funcional para o 'lay-out' em grupo;
- (b) mudança no controle da produção do sistema de estoque controlado de ciclo múltiplo, para o sistema de fluxo controlado de ciclo único;
- (c) uma grande redução nos ciclos de emissão de ordens;
- (d) introdução de uma seqüência planejada da carga de trabalho.

Vários pesquisadores, entre eles KRUSE et alii (1975) e DALE & MALIK (1977), compartilham a opinião de que, embora estudos prévios no sentido de racionalizar a linha de produtos (análise de valor e simplificação de projeto); codificação e classificação para a redução de variedade; extenso desenvolvimento de ferramental; algum investimento em uma nova instalação, sejam importantes, eles não são pré-

requisitos para implementar TG, sendo o fundamental o 'lay-out' em grupo e um sistema de controle da produção apropriado.

Embora TG tenha ganho em importância e em sistematização somente nas últimas três décadas, seus princípios são bem mais antigos. GALLAGHER & KNIGHT (1986) reportam que em 1925, Flanders publicou um artigo na ASME dizendo que dificuldades de fabricação e de controle da produção podiam ser evitados usando-se uma abordagem que no fundo era uma embrionária Tecnologia de Grupo.

Porém, foram consagrados como pioneiros o russo MITROFANOV (1966), o italiano Patrignani (citado em BURBIDGE (1975)) e o alemão OPITZ (apud GALLAGHER & KNIGHT (1973)). A contribuição de Mitrofanov foi o conceito de peça composta (que pode ser visto também em GALLAGHER & KNIGHT (1973)), a de Patrignani na redução de 'set-up' e a de Opitz no conhecido sistema de codificação de peças que leva seu nome. Assim, no seu início, TG teve um caráter tecnológico, mas que logo tomou impulso na direção dos problemas gerenciais. Pode-se dizer que atualmente a importância da TG é significativamente maior na esfera gerencial que na tecnológica.

É bem conhecido que o aumento da importância da TG é uma consequência do aumento da diversidade de produtos e da diminuição da quantidade de cada produto, o que foi causado por mudança de hábitos dos consumidores. MERCHANT (1971) inclusive previu que em 1990, 75% das indústrias com produção em lotes nos EUA estariam usando Tecnologia de Grupo.

Nesse ambiente, produção em pequenos lotes e grande variedade de itens, o controle da produção se torna complexo e assim entre outras coisas, a TG se torna uma importante estratégia de controle da produção por juntar itens semelhantes no afã de diminuir essa diversidade, e portanto além de diminuir a complexidade do controle da produção, manter alto nível de flexibilidade sem abrir mão da produtividade. Lembremos que os 'job-shops' são flexíveis mas improdutivos, enquanto que as linhas de produção têm

alta produtividade e têm grande inércia na absorção de novos produtos e se o mercado exigir mudanças com certa freqüência na linha de produtos, elas apresentarão baixa flexibilidade.

Além do controle da produção, que abordaremos com detalhes no capítulo VI, a TG tem importância em outras áreas. Além de sua atuação no campo da codificação e classificação de peças (OPITZ et alii, 1969; GALLAGHER & KNIGHT, 1973; OPITZ & WIENDAHL, 1971; ARN, 1975; RANSON 1972; HYDE, 1981), TG forma a base para os desenvolvimentos (pela padronização do projeto e do processo de fabricação) em sistemas CAD/CAPP/CAM (GROOVER, 1980; HYDE, 1981; GALLAGHER & KNIGHT, 1986), para os desenvolvimentos em automação flexível (WELCH & EMANG, 1982; SURESH & MEREDITH, 1985) como também forma o conjunto de princípios nos quais se assentam os Sistemas de Manufatura Integrados por Computador (CIMSS), ou seja TG é fundamental para o avanço dos sistemas de manufatura convencionais em direção aos CIMSS (MERCHANT, 1982; GALLAGHER & KNIGHT, 1986). Num contexto mais específico, ENGELBERGER (apud GALLAGHER & KNIGHT (1986)) considera TG um requisito essencial para usar robôs na produção em lotes, e estabelece que se peças são classificadas em famílias e máquinas agrupadas, o manuseio e movimentação das peças se torna uma tarefa propícia para o uso de robôs: o projeto da garra se torna eficiente, pois as peças que o robô "pegará" são similares.

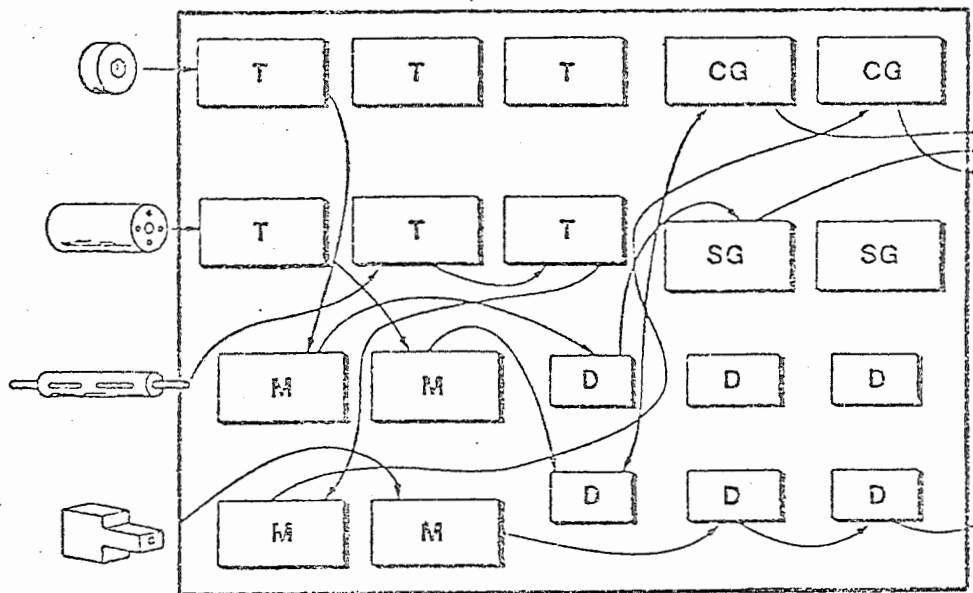
5.2 O CONCEITO DE CÉLULA DE MANUFATURA

Uma célula de produção é um conjunto de máquinas que possuem certas características:

- (a) devem estar agrupadas não pelas suas próprias similaridades (especialização por processo), mas sim porque são capazes de juntas, realizar um conjunto de operações dissimilares, que salvo nas exceções (o chamado 'blacksheep' onde a peça para ser completada precisa visitar mais que uma célula), são suficientes para completar uma gama de peças (especialização por item);
- (b) se uma família de peças puder ser usinada num certo número de máquinas todas elas do mesmo tipo, ainda assim esse conjunto de máquinas formarão um grupo (célula) legítimo (BURBIDGE, 1975);
- (c) o tamanho da célula varia muito, no geral de 1 a 25 máquinas. Quanto menor o grupo melhor (facilita o controle) porém é mais provável haver necessidade de investir em equipamentos. "Para uma célula permanecer uma unidade de manufatura social e economicamente viável ao longo de um horizonte de tempo útil, seus recursos devem estar agrupados de maneira próxima; ela deve ter flexibilidade em seu 'mix' de capacidade, ser grande o suficiente para continuar funcionando com um único absentismo e ser pequena o suficiente para o controle detalhado ser praticado por um único indivíduo" (PULLEN, 1976).

Na figura 26, extraída de HYER & WEMMERLÖV (1982), tem-se um 'lay-out' funcional e um 'lay-out' celular ideal (padrão de fluxo 'flow-shop'). Na figura 27 (extraída de HAM et alii (1985)) tem-se os três tipos básicos de 'lay-out' (por Produto, por Grupo e por Processo) como função da diversidade e da quantidade dos itens.

'lay-out' funcional



célula com padrão de fluxo 'flow-shop'

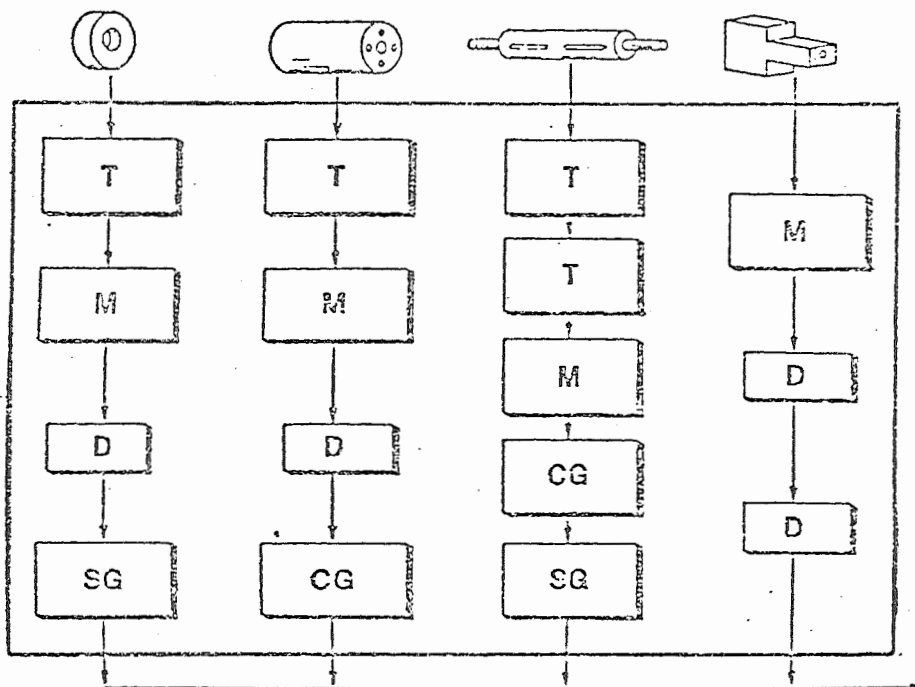
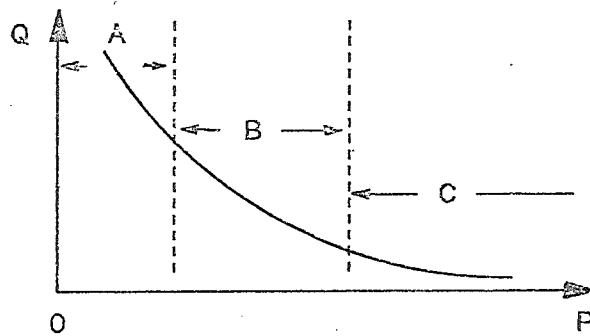


FIGURA 26: 'LAY-OUT' FUNCIONAL E 'LAY-OUT' CELULAR COM PADRÃO DE FLUXO 'FLOW-SHOP'

Fonte: HYER & WEMMERLÖV (1982)



P= número de produtos; Q= quantidade de produção
 'lay-out': A= por produto; B= por grupo; C= por processo

FIGURA 27: GRÁFICO P-Q

Fonte: HAM et alii (1985)

Naturalmente, o caso ideal é termos que toda a família é feita numa única célula e o padrão de fluxo é 'flow-shop'. Contudo, na maioria das vezes não se consegue o caso ideal. Consideramos, como a maioria dos autores, que o principal é que as peças de uma mesma família sejam feitas numa única célula. Mas há alguns autores que buscam a qualquer custo o padrão 'flow-shop' em cada conjunto de máquinas, mesmo que a peça tenha que passar por vários deles. Por exemplo, FLYNN & JACOBS (1986) estudam um caso onde certamente o 'job-shop' tradicional seria a melhor solução: tamanho do lote igual a 1, o processo tem um roteiro complexo e por demais longo (17 a 42 operações por peça). FLYNN & JACOBS (1986) agruparam as máquinas em grupos I, II, III, ..., e então todas as peças que passam por qualquer grupo passam por todas as máquinas e na mesma ordem, contudo a peça 1 pode passar pelos agrupamentos VII-I-II-I-II-III-I-V-IV, ou seja por 9 agrupamentos; no caso o número médio de agrupamentos que passa cada peça é 7,3 !!! FLYNN & JACOBS (1986) chamam-no de célula, mas esse tipo de agrupamento para nós não forma uma célula.

5.3 FORMAÇÃO DE CÉLULAS

A criação das células é dependente da formação das famílias de peças. Um dos melhores e dos mais conhecidos métodos para formação de famílias e células é o método PFA criado por BURBIDGE (1963; 1971). O PFA consiste em encontrar as famílias de peças e os correspondentes grupos de máquinas através de uma análise progressiva das informações contidas nos roteiros de fabricação. Assim, em última instância, peças que usam as mesmas máquinas devem pertencer à mesma família. Essa última questão tem sido tratada por vários algoritmos, por exemplo o de CHAN & MILNER (1982). Outro conjunto de métodos importantes são os baseados nos sistemas de codificação e classificação. Uma revisão sobre a formação de famílias de peças e grupos de máquinas pode ser encontrada em KING & NAKORNCHAI (1982).

OLIVA-LOPEZ & PURCHECK (1979) consideram como aspectos mais relevantes para avaliar uma possível configuração de células, os seguintes:

- (a) investimento em equipamentos;
- (b) flexibilidade do sistema;
- (c) distribuição da carga de trabalho.

Eles assumem algumas regras para formar as células, por exemplo: não haver células com mais de 20 tipos de equipamentos e eliminar células cuja capacidade seja seriamente subutilizada. Além disso, consideram razoável que as células sejam de tamanho aproximadamente igual de forma que os controles sejam similares, e que componentes problemáticos que não possam ser fabricados no sistema, sejam fabricados numa área a parte, organizada nos moldes convencionais.

Na formação de grupos, deve ser dada uma atenção à carga de trabalho nas células a médio e longo prazo, evitando-se que haja grande discrepância de carga entre as células nesse horizonte, e isso é competência do planejamento da produção e do projeto do sistema produtivo.

Obter uma carga não demasiadamente discrepante no curto prazo compete ao controle da produção. Os algoritmos para formação de células no geral não levam isso em conta, estão basicamente preocupados em formar o maior número de células com o menor número de 'blacksheeps'. O que se faz na melhor das hipóteses, é tendo-se obtido através de um algoritmo uma formação de famílias e grupos, analisa-se qual a carga de longo prazo e então, num processo de modificação das famílias e grupos seguido da análise da carga para a nova configuração, faz-se várias iterações até se obter um resultado satisfatório.

RODRIGUEZ & ADANIYA (1985) propõem o uso do resultado do trabalho de HAESSLER & HOGUE (1976), para avaliar a formação de células no tocante à sua viabilidade em atender um programa de produção de prazo infinito em que cada item utiliza uma máquina da célula a um intervalo de tempo T (período ou ciclo de fabricação) onde T é determinado levando em conta o custo de preparação e o custo de manter estoques. O método é aproximado, e podemos dizer que sua possível utilidade se restringe às situações de alta repetibilidade e portanto com poucos itens.

O objetivo desta Tese não é considerar o projeto das células, mas sim a operação das células; assim, com essa seção apenas queremos lembrar que o desempenho operacional das células, depende não apenas de seu sistema de controle da produção. O projeto, e portanto a formação das células em muito influenciara o desempenho operacional. Nesta Tese supomos que uma adequada formação de células já tenha sido realizada.

5.4 O CONCEITO DE CÉLULA FLEXÍVEL

Já definimos anteriormente, o conceito de flexibilidade mais usual: capacidade do processo produtivo conseguir se adequar em tempo hábil às necessidades do mercado.

No contexto da manufatura celular, esse conceito aparece na literatura com pelo menos cinco significados. As células são flexíveis se:

- (1) para várias peças existirem células alternativas, ou seja, dependendo das flutuações da demanda de período para período, a peça *i* pode ser feita numa ocasião na célula A e em outra ocasião na B, de forma a se poder balancear a carga das células (DALE & RUSSELL, 1983; PERA, 1974 (apud SINHA & HOLLIER, 1984), entre outros);
- (2) o sistema de carga é por 'pallets' (SINHA & HOLLIER, 1984);
- (3) há 'overflow' (transbordamento), ou seja o fluxo teria padrão 'flow-shop' exceto que pode haver saltos de máquinas, isto é a peça não necessariamente terá operações em todas as máquinas (WITTROCK, 1985);
- (4) muitos itens diferentes podem ser produzidos;
- (5) o tempo de preparação é pequeno, portanto o lote pode ser pequeno e assim o 'leadtime' de produção também, e com isso pode-se responder às variações da demanda de forma rápida.

A definição (1) tem uma preocupação muito mais em termos de eficiência produtiva (produtividade) que em termos de flexibilidade. Assim o nome mais apropriado seria manufatura celular com células alternativas.

As definições (4) e (5) em conjunto, representam totalmente o conceito de flexibilidade; é fato que nessas circunstâncias, é provável que no fluxo da célula haja contra-fluxo e transbordamento.

Todas essas definições, principalmente a (2), têm relação com a forma de classificar as células que veremos a seguir.

5.5 TAXONOMIA DA MANUFATURA CELULAR

Diversas classificações dos tipos de células são possíveis.

PERA (1974, apud SINHA & HOLLIER (1984)) sugere três tipos de células:

- (a) células flexíveis. Tarefas que foram planejadas para serem executadas numa célula, podem ser transferidas, por questão de conveniência, para uma outra célula;
- (b) células baseadas na descrição dos itens. Por exemplo, células de engrenagens;
- (c) células baseadas nos roteiros de processo.

Baseado no tipo de 'lay-out', ARN (1975) classifica as células em três categorias:

- (a) linha de produção de TG. Parecida com a linha de produção; a diferença é que nesta, o número de produtos fabricado é um (admitindo variantes do mesmo), e na TG é unitário o número de famílias. Em ambas, o padrão de fluxo é 'flow-shop';
- (b) célula de TG. Padrão de fluxo 'job-shop'. Consideramos como sendo a célula de ocorrência mais usual;
- (c) centro de TG. As máquinas do centro são todas do mesmo tipo; assim a racionalização é feita para um único tipo de operação (por exemplo torneamento); representa o nível de racionalização mais baixo no contexto da TG, e pode ser aplicado com o 'lay-out' funcional. As peças que são processadas num dado centro de TG, são agrupadas em famílias.

Células com um número grande de máquinas, superior a aproximadamente 15 máquinas, são usualmente chamadas de células do tipo mini-fábrica.

PETROV (1968, apud SINHA & HOLLIER (1984)) considera que as células são basicamente linhas de produção

com múltiplos produtos e as classifica como:

- (a) linhas de produção variáveis. Poucos tipos de itens e só um entra na célula por vez. Antes de mudar para outro, todas as máquinas são preparadas;
- (b) linhas de produção de grupo com repreparação de equipamentos. Número substancial de componentes, podendo haver produção de diferentes itens em paralelo (simultaneamente);
- (c) linhas de produção de grupo sem repreparação de equipamentos. Em cada máquina passa sempre o mesmo conjunto de componentes de tal modo que não há repreparação de máquinas.

Já SHAW (1988a) considera:

- (a) células flexíveis. Compostas de máquinas universais usadas e preparadas para realizar uma grande variedade de operações;
- (b) células orientada por produto. Por exemplo, células de engrenagens;
- (c) células de montagem por robô.

GALLAGHER & KNIGHT (1986) classificam as células segundo a complexidade do sistema de movimentação de materiais:

- (a) célula integrada. Uso integrado de esteiras transportadoras para o controle do fluxo de materiais na célula;
- (b) célula semi-integrada. Uso de esteiras transportadoras para finalidades apenas de transporte e armazenagem do estoque em processo;
- (c) célula simples. Sem aparatos de movimentação;
- (d) trabalho agrupado em uma única máquina, e em particular usando a abordagem do componente composto.

Outra classificação consiste em apenas diferenciar as células de fabricação e células de montagem. Estas últimas podem ser (GALLAGHER & KNIGHT, 1986):

- (a) grupos em série. Os problemas de balanceamento são reduzidos com a inserção de pulmões ('buffers') entre cada

dois grupos consecutivos;

- (b) grupos em paralelo. Cada um monta o produto completo, e o número deles é determinado pelo volume de produção requerido;
- (c) grupos ramificados. Submontagens em paralelo, seguidas de montagem (ns) final (is).

Já as células providas com automação flexível podem ser classificadas em (SPUR & MERTINS, 1982):

- (a) Linha de Transferência Flexível (FTL). Características: inter-ligação interna; usinagem de multi-estágios; transporte cíclico; fluxo direcionado do material; versatilidade parcial do equipamento de processamento com tempos de preparação relativamente curtos;
- (b) Sistema Flexível de Manufatura (FMS). Características: inter-ligação externa; usinagem de mono ou multi-estágio; transporte não-cíclico; fluxo de material automatizado; preparação não-manual para 'spectrum' limitado de peças;
- (c) Célula Flexível de Manufatura. Características: máquinas isoladas sem inter-ligação; usinagem de estágio único; troca automatizada de ferramentas; é um centro de usinagem contendo ainda um 'magazine' para ferramentas e outro para 'pallets' contendo peças.

Para fins de controle da produção, a característica mais importante de uma célula é o padrão de fluxo que ocorre na mesma. "A complexidade de um sistema de controle da produção é diretamente relacionado com a complexidade do fluxo de trabalho na área de fabricação" (DALE & RUSSELL, 1983). Assim sendo, fazemos uma classificação baseada no fluxo no interior da célula:

- (i) Célula mono-estágio. Por exemplo o centro de usinagem.
- (ii) Célula mono-estágio com máquinas em paralelo.
- (iii) Célula multi-estágio uni-direcional. Corresponde ao 'flow-shop'.

- (iv) Célula multi-estágio uni-direcional variado. Admite saltar máquinas ('overflow').
- (v) Célula multi-estágio uni-direcional com máquinas em paralelo. Corresponde ao 'flow-line'.
- (vi) Célula multi-estágio uni-direcional variado com máquinas em paralelo. WITTRICK (1985) denomina de 'Flexible Flow-Line'.
- (vii) Célula multi-estágio multi-direcional. Admite saltos de máquinas bem como contra-fluxos. Corresponde ao padrão de fluxo 'job-shop'.
- (viii) Célula multi-estágio multi-direcional com máquinas em paralelo.

5.6 PROBLEMAS DE IMPLANTAÇÃO

Começando por BURBIDGE (1975) vários autores (KRUSE et alii, 1975; DALE & RUSSEL, 1983) acreditam que o fundamental para se obter os maiores benefícios da TG são: 'lay-out' celular e um sistema de controle da produção adequado, que de preferência devem ser implantados simultaneamente. Estudos empíricos em empresas confirmam esses fatos (BOWEY apud DALE & RUSSELL(1983); IVANOV, 1968).

Estudos de DALE & RUSSELL (1983) evidenciam vários problemas de não se ter no ambiente TG implantado um sistema de controle da produção apropriado. Entre os mais típicos se destacam:

- (i) assegurar cargas balanceadas às células e manter, internamente em cada célula, todos os membros da equipe ocupados e maximizando a utilização dos equipamentos principais;
- (ii) perturbações no fluxo:
 - (a) algumas máquinas muito carregadas e outras muito sub-utilizadas na célula;
 - (b) processamento de tarefas em célula errada;
 - (c) interferência das ordens que entram na célula com extrema urgência;
 - (d) muito trabalho que deve ser acessado em outras células;
 - (e) interferência na seqüência de trabalho. Por exemplo, se tarefas similares são separadas por uma operação, os operários tendem a não executar esta esperando a próxima;
 - (f) provavelmente a maior fonte de perturbação do fluxo é a existência de equipamentos-chaves que são compartilhados por mais de uma célula. Isso causa grande descontinuidade e confusão na programação de operações dessas células, com conseqüente desperdício de tempo.

BURBIDGE (1978) aponta que o interesse pela TG na Inglaterra havia diminuído enormemente e dos cinco motivos assinalados todos estão direta ou indiretamente relacionados a falhas de implantação, por exemplo dar grande ênfase nos sistemas de codificação e classificação e deixar de lado aspectos muito mais essenciais. Um motivo não citado mas que é provável que tenha tido influência, é que a TG criou grande expectativa na Inglaterra, que é um dos berços da TG (o outro é a URSS, e em grau bem menor a Alemanha e a Itália). Os benefícios então propalados pelos pesquisadores ingleses eram por demais auspiciosos. Algo análogo ocorreu com a Inteligência Artificial nos EUA, que na década de 50 prometia verdadeiras proezas, e caiu em descrédito nas décadas de 60 e 70, só vindo a tomar novo impulso na década de 80 (*).

Já o interesse em outros países, que era pequeno quando na Inglaterra estava no auge, vem aumentando, particularmente nos EUA (HYER & WEMMERLÖV, 1982).

O estado da arte sobre os aspectos conceituais e de implantação da TG pode ser visto em MOSIER & TAUBE (1985). Nessa referência é citado que Shunk, em sua Tese de doutoramento, usa simulação para medir os efeitos de criar células num contexto de TG, e que as conclusões principais estabelecem que a implantação de TG, ao menos parcialmente tem méritos, e que de fato é possível que a implantação parcial seja mais vantajosa economicamente que forçar uma implantação total.

Até aqui deve ter ficado claro a importância do controle da produção na manufatura celular. No capítulo VI, fazemos uma revisão bibliográfica detalhada sobre o assunto.

(*) CARDOSO, ELERI: "INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL", Palestra proferida no ICMSC-USP em 1988.

CAPÍTULO VI

CONTROLE DA PRODUÇÃO NA MANUFATURA CELULAR

6.1 INTRODUÇÃO

Como vimos, TG é a estratégia de manufatura que explora as similaridades existentes entre componentes, de forma a melhorar o fluxo de materiais quer através do 'lay-out' celular quanto através de um controle da produção mais eficiente. Toda melhora no fluxo tem como conseqüência uma melhora na produtividade.

Vimos também que no controle da produção, o processo decisório é realizado através da programação da produção em três níveis hierárquicos.

Segundo MOSIER & TAUBE (1985), a programação da produção é a área "menos explorada de todos os tópicos de TG, embora seja uma das mais importantes para o praticante".

Até aqui não há um trabalho sistematizado publicado na literatura especializada, que demonstre se o controle da produção é de fato mais simples na manufatura celular que no 'job-shop', como crêem a maioria dos especialistas entre os quais BURBIDGE (1975), RANSON (1972) e EDWARDS (1971).

Não há dúvida que dentro da célula, o controle da produção a nível de programação de operações é mais simples que no 'job-shop', mas por outro lado há a necessidade de fazer uma prévia carga das células de forma a balancear o trabalho nas mesmas, problema que no 'job-shop' não existe. Além disso, como a capacidade de produção vai depender de como será feita a carga de células e é mais simples analisar a capacidade quando se tem várias máquinas do mesmo tipo colocadas juntas do que quando as máquinas estão espalhadas por várias células, os aspectos carga e capacidade são mais

complexos na manufatura celular. Isso só não é verdade, na manufatura celular repetitiva, onde tem-se poucos itens, de baixa variabilidade e de alta repetibilidade a ponto dos gargalos de cada célula raramente mudarem.

Além das características que já citamos da manufatura celular que afetam o controle da produção (sistema trabalha com menos folga já que são menores os lotes e os estoques em processo e assim o controle da produção deve ser mais preciso; é possível usar 'overlapping'; é possível haver necessidade de investimentos em equipamentos para reduzir os tempos de espera e garantir a grande redução dos 'leadtimes' de produção; problema da carga de células e análise de capacidade), enumeramos mais as seguintes:

- (i) enquanto que com o 'lay-out' funcional o 'leadtime' de produção não depende do tamanho do lote (GALLAGHER & KNIGHT, 1986), na manufatura celular ele tem uma influência preponderante (BOUCHER, 1984);
- (ii) o acompanhamento do trabalho em progresso é facilitado. Isso explica o por quê da redução de quase 42% da mão-de-obra utilizada no acompanhamento da produção na manufatura celular apontada na pesquisa de DALE & WILLEY (1981) em 35 companhias que implementaram TG;
- (iii) na célula, geralmente há menos operários que máquinas em operação, o que não é o caso nem do 'job-shop' nem do 'flow-shop'. Além disso, é comum o emprego de operários capazes de operar mais de um tipo de máquina, muitas vezes simultaneamente. Admite-se uma baixa utilização de máquinas secundárias e portanto menos caras, e o balanceamento do fluxo deve privilegiar a utilização das máquinas gargalos, que são as que determinam o volume de produção comercializável. Essa abordagem minimiza os problemas de capacidade já citados;
- (iv) é muito mais provável na manufatura celular do que no 'job-shop', termos num dado momento um conjunto de peças a serem feitas em uma máquina, onde elas usem praticamente o mesmo 'set-up'. Assim o lote de preparação não é igual ao lote de preparação de cada peça isolada mas sim, a soma dos tamanhos de lotes de todas elas.

Existem duas razões para isso:

- (a) a própria formação de famílias de peças,
 - (b) e é muito mais factível poder planejar a chegada de determinadas peças num dado momento numa máquina na manufatura celular (devido ao tipo de sistema de emissão de ordens que se pode adotar), que no 'job-shop', onde a chegada via de regra é aleatória;
- (v) se mudanças grandes no 'mix' de produtos forem verificadas, pode haver um desbalanceamento muito grande de carga entre as células. Nesse caso acreditamos que para contornar esse problema, há a necessidade de se trabalhar com roteiros de fabricação alternativos que possibilitem uma alocação alternativa de células para certas peças. Já no 'job-shop' basta trabalhar com um único roteiro (o roteiro mais econômico) porque, dado os grandes estoques em processo, os efeitos do desbalanceamento de carga são mínimos.

Pretendíamos estruturar este capítulo segundo os três níveis de programação, contudo faremos uma modificação por dois motivos:

- (a) encontramos na literatura apenas uma contribuição a respeito da elaboração do PMP para a manufatura celular. No final desta seção fazemos um resumo desse trabalho, o de DAS & SARIN (submetido em 1990);
- (b) entendemos que na elaboração do PMP a carga de células deve ser levada em conta, já que essa carga tem grande influência na exeqüibilidade do PMP (em nossa proposta no capítulo VII, assim procederemos, e isso faz ainda mais sentido dado o sistema de emissão de ordens que adotaremos), contudo a literatura que consultamos considera que um PMP já tenha sido estabelecido, e que a carga de células é uma atividade intermediária entre a emissão de ordens e a programação de operações, embora no geral, isso não seja admitido explicitamente.

Assim, neste capítulo teremos as seguintes seções:

(6.2) Emissão de Ordens, (6.3) Carga de Células, (6.4) Programação de Operações, (6.5) Conclusões.

DAS & SARIN (submetido em 1990) formulam um modelo que combina o plano agregado de produção e o PMP no que eles denominam de Programa Agregado de Produção. A característica de agregação se dá principalmente pelo fato de que se trabalha com família de produtos e não produtos finais (X_{ij} =quantidade de produtos da família i a ser produzida no período j), e ainda os períodos são longos e os recursos são células e não máquinas. A formulação é um modelo de programação inteira mista (MIP) de grande porte, com uma função-objetivo multi-critério: (1) minimizar os custos de estoques; (2) minimizar os custos operacionais; (3) maximizar o nível esperado de qualidade; (4) minimizar a sub-utilização de capacidade; (5) minimizar a variação sobre um nível desejado de estoques; (6) minimizar as perdas de vendas devido a estoque negativo. Todas as perdas são avaliadas por uma função-custo (função penalidade). Os tipos de restrições considerados são: (1) de demanda; (2) de capacidade das células, e (3) de capacidade dos recursos de transporte (AGVs) que os autores consideram importante nos CIMSS. A partir dos testes computacionais feitos com o uso do MPSIII (um programa comercial de programação inteira mista para computadores de grande porte, o qual incorpora recentíssimos desenvolvimentos da teoria de programação matemática), os autores passaram a adotar uma solução sub-ótima ao abortar o processo antes da solução ótima ser atingida, devido ao tempo computacional proibitivo.

Atualmente esse estudo (resultado de uma Tese de Doutorado) é altamente teórico e pretencioso, não só pela dificuldade computacional de modelos MIP de grande porte, mas principalmente pela dificuldade de obter os valores dos parâmetros das funções-custo envolvidas. Nas indústrias brasileiras atuais, mesmo nas mais organizadas, essa abordagem é impraticável.

6.2 EMISSÃO DE ORDENS

Os ingleses foram os primeiros a focar o controle da produção na manufatura celular e defenderam o uso do PBC (BURBIDGE, 1975; KRUSE et alii, 1975; KELLOCK, 1976; DALE & MALIK, 1977; NEW, 1977) o qual abordamos no capítulo IV. Para SINHA & HOLLIER (1984) a redução dos lotes, o PBC (desde que a demanda seja razoavelmente estável) e mais o seqüenciamento planejado da carga, levam a um desejado nível de volume de produção e mantêm um ótimo volume de estoque em processo na célula, além disso eles concordam com BURBIDGE (1975) de controlar com o PBC os itens mais caros e de maior uso (classes A e B) e usar o sistema de estoque mínimo com os itens classe C.

Outro sistema que tem sido cogitado, principalmente nos EUA, para ser usado na manufatura celular é o MRP. Porém, além dos problemas que já apontamos no capítulo IV, o MRP tem que ser modificado e estendido (HYER & WEMMERLÖV, 1982) para o uso na manufatura celular. CHOUBINEH (1984) aponta algumas adaptações que são necessárias no sistema MRP para esse fim. Várias tentativas têm sido feitas mas até aqui nada completamente convincente foi publicado.

MAHANY & TOMPKINS (1977, apud CHOUBINEH (1984)) num nível filosófico discutiram as vantagens de combinar o MRP e a TG.

O uso da TG em aplicações práticas tem levado a reduções do 'leadtime' de produção na ordem de 70% em média e em alguns casos tem chegado a 97% (NEW, 1977). Isso pode facilitar o emprego do MRP já que o MRP exige que esses tempos sejam previstos. Mas mesmo assim, NEW(1977) considera que o MRP apenas parcialmente evita os problemas do Sistema de Estoque Mínimo, já que ele continua não garantindo que a carga e a capacidade sejam melhor balanceados, que os itens produzidos formem conjuntos balanceados, nem que itens com mesmo 'set-up' sejam liberados juntos. Para contornar esses inconvenientes, NEW (1977) defende o uso da TG mais o MRP

com as seguintes modificações: trabalhar com ciclos de produção curtos, não usar regras de dimensionamento de lotes que causam a produção de conjuntos desbalanceados de itens, e todos os itens devem ser ordenados no mesmo ciclo e com a mesma fase. Mas, com essas modificações o MRP deixa de ser o MRP e passa a ser um PBC informatizado.

Para RABBI & LAKHMANI (1984) a TG afeta o cálculo dos lotes do MRP ao considerar que a família de peças só tem um tempo de preparação para a família toda e não um para cada peça individual. Assim eles propõem uma forma de integrar o MRP e a TG. Os benefícios da proposição são dependentes principalmente do número de peças na família e na utilização de eficientes métodos de 'set-up' de grupo para a família. O procedimento é o seguinte:

- (a) o MRP faz a explosão e o cálculo das necessidades líquidas das peças;
- (b) um sistema à parte (chamado de GRP) recebe essas informações e mais os dados de um sistema de codificação de forma que:
 - (b1) identifica as peças da mesma família;
 - (b2) calcula o lote para cada família toda e não para as peças individuais, usando a técnica LTC.

Para GALLAGHER & KNIGHT (1986), a TG faz com que o MRP trabalhe com menor quantidade de dados e aumente as possibilidades de sucesso; a TG deveria ser implantada antes do MRP já que ela diminui o número de peças e o número de roteiros de fabricação, bem como os dados dos roteiros e as listas de materiais podem ser armazenadas para famílias de peças. Observemos que essa diminuição de dados pela racionalização que a TG propicia, pode ser aproveitada por qualquer outro sistema.

DARROW & GUPTA (1989) aplicam o conceito de família de peças da TG à produção com 'lay-out' funcional em que está implantado o sistema MRP, o que possibilita ganhos de 'set-up' ao programar a produção de famílias de peças. Isso é feito da seguinte maneira (hipóteses e procedimentos):

- (a) há um 'set-up' inicial (preparação da família) e então

os 'set-ups' complementares para cada peça individual da família são dependentes da seqüência em que serão processadas essas peças. O tempo de preparação da família foi tomado como o tempo de preparação de uma peça representativa da família;

- (b) um custo representativo (não diz qual, mas provavelmente médio) de manter uma peça da família em estoque durante um período, bem como um custo representativo por hora de preparação, foram levantados e assumidos como sendo os valores para todas as peças da família (o objetivo é minimizar o custo total de manter estoque mais o custo total de preparação);
- (c) para dimensionar os lotes, todas as necessidades da família de peças foram examinadas simultaneamente;
- (d) as necessidades individuais dos itens foram consideradas ao nível de seqüenciamento da produção. Não necessariamente todas as peças serão incluídas em cada uma das corridas de produção da família;
- (e) no caso em estudo, fabricação de engrenagens, tem-se três processos (torneamento, retifica de desbaste e de acabamento). Embora todas as peças da família usem os três processos na mesma seqüência, cada um deles foi considerado independente dos outros, e foi considerado que o tempo total de preparação é igual a soma dos tempos de preparação em cada um dos processos. Escolhe-se a melhor seqüência para cada processo de forma isolada, ou seja no processo 1 a seqüência pode ser tarefa $t_1/t_3/t_2$, no 2 ser $t_3/t_2/t_1$ e no processo 3 outra qualquer;
- (f) a lógica do dimensionamento é aplicada apenas ao nível de componente, prática aliás, adotada pelo MRP;
- (g) definindo como variável de decisão o número de peças i a serem produzidas no período n , foi formulado um modelo de programação dinâmica (PD) que é uma extensão do algoritmo de PD de WAGNER & WHITIN (1958), já que aqui se considera o 'set-up' como dependente da seqüência;
- (h) como essa formulação de PD foi considerada complicada, dado que as variáveis de decisão e estado eram multi-dimensionais, além de exigir grande esforço computacional,

os autores propuseram uma heurística sendo que a ilustram minuciosamente através de um exemplo.

Como visto no capítulo IV, a técnica do lote econômico possui vários inconvenientes. Esses inconvenientes são ainda mais agravados quando ela é diretamente usada na manufatura celular. Para aliviar esse último tipo de problema, BOUCHER (1984) fornece um modelo para dimensionamento do lote que leva em conta o custo de manter estoque em processo. Baseado no fato de que na manufatura celular há uma relação direta e dedutível entre o tamanho de lote e o estoque em processo, já que o 'leadtime' de produção depende do tamanho do lote, BOUCHER (1984) considera

$$LP(Q) = S + m \cdot Q$$

$$W = (M + v/2) \cdot D \cdot LP(Q)$$

onde $LP(Q)$ = 'leadtime' de produção que depende do tamanho de lote Q

W = valor anual médio do estoque em processo

M = custo unitário do material

v = valor adicionado por unidade

D = demanda anual

S = a soma dos tempos de preparação para todas as máquinas a serem usadas na produção

m = tempo total de usinagem por unidade do item

Adicionando o custo W aos outros custos tradicionais considerados na formulação do lote econômico, ele chega, após diferenciar a função, a uma extensa expressão do lote econômico para a TG. Por trás dessa formulação está a hipótese de que a taxa de demanda é constante. Segundo BOUCHER (1984) numa célula TG há provavelmente consideráveis variações nas taxas anuais de demanda e nos tempos de usinagem entre os componentes dos grupos e conclui, através de testes empíricos, que a formulação é útil nos casos em que o produto de D por m tem um valor alto.

6.3 CARGA DE CÉLULA

Uma célula é dita viável com relação a uma dada peça, se esta puder ser fabricada inteiramente naquela célula.

Já vimos que exceto na manufatura repetitiva, há conveniência de uma peça poder ser alocada a uma ou outra célula. Assim surgiram os conceitos de célula primária e célula secundária. CHOUBINEH (1984) define a célula primária como a célula viável em que não há retorno da peça a alguma máquina em que ela já foi processada e, o custo de produção é o menor possível, enquanto que a célula secundária é a célula viável onde o custo de produção unitário é maior devido ao aumento no custo de preparação e no de movimentação do material.

PERA (1974, apud SINHA & HOLLIER (1984)) define a seguinte estratégia para a carga de células:

- (i) tarefa que só pode ser feita em uma célula, é alocada a ela;
- (ii) quanto às tarefas restantes:
 - (a) selecione o roteiro de fabricação de carga total mais alta;
 - (b) se existem dois ou mais roteiros de fabricação tendo a mesma carga total, selecione o roteiro que tem o maior número de tipos de máquinas;
 - (c) se os roteiros têm a mesma carga total e o mesmo número de tipos de máquinas, selecione o roteiro que tem a maior carga de máquina individual;
 - (d) aloque a carga selecionada à célula de número mais alto ou mais baixo entre aquelas que a carga pode ser atribuída e a capacidade da célula não seja excedida;
 - (e) repita os passos de (a) a (d) até que todo trabalho tenha sido alocado.

Utilizando os procedimentos de limitação e ramificação do método 'branch-and-bound', HITOMI & HAM (1977) desenvolveram um algoritmo que determina, a partir de uma formulação de um modelo de programação inteira, que peças (dentro um conjunto dado) devem ser produzidas em uma máquina e em que quantidades (permite-se lotes parciais). O objetivo é maximizar o volume de produção, tendo como restrição o tempo disponível da máquina. O modelo é o seguinte:

$$\max z = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{N_j} w_{ij} x_{ij}$$

sujeito a

$$\sum_{i=1}^M \left(\sum_{j=1}^{N_j} P_{ij} x_{ij} + S_i X_i \right) \leq d$$

onde

$x_{ij} = 1$ se a peça j do grupo i for produzida
 $= 0$ em caso contrário

$X_i = 1$ se alguma peça do grupo i for produzida
 $= 0$ se nenhuma peça do grupo i for produzida

$$1 \leq w_{ij} \leq l_{ij}$$

$N_j =$ número de peças do i -ésimo grupo

$l_{ij} =$ tamanho do lote necessário da peça j do grupo i

$P_{ij} =$ tempo total de processamento da peça j do grupo i

$S_i =$ tempo de preparação da máquina para que se possa processar as peças do grupo i

$d =$ tempo disponível

HITOMI & HAM (1978) resolvem o mesmo problema anterior porém considerando a velocidade de corte de usinagem (v_c) como sujeita a alteração. Consideram três casos:

- (a) se a carga total é igual a d , todas tarefas são realizadas com a v_c de máxima produção;
- (b) se a carga total $> d$, resolve-se o modelo de programa-

ção inteira conforme HITOMI & HAM (1977);

- (c) se a carga total $< d$, todos $x_{ij} = 1$, porém falta diminuir a v_c , mas não abaixo de v_c de mínimo custo, de forma que a carga seja igual a d e o custo de usinagem seja reduzido. O modelo resultante é um modelo de programação não-linear que é resolvido por um algoritmo construído a partir da dedução para esse modelo das condições necessárias de Kuhn-Tucker.

HITOMI & HAM (1982) expandem o estudo anterior para a situação onde se tem múltiplos estágios; o estágio k tem uma disponibilidade d_k .

LEONG (1986) resolve o mesmo problema que HITOMI & HAM (1977) ou seja, seleciona as peças (de um total de N que é a soma das peças agrupadas em i grupos) a serem fabricadas em uma máquina com disponibilidade d . As diferenças dos dois trabalhos são:

- (i) o algoritmo de Leong só permite lotes completos;
- (ii) Leong usa dois critérios, (a) maximizar o volume de produção, e (b) minimizar o custo de produção. Na solução é usado o método lexicográfico onde os objetivos são priorizados. no caso o objetivo (a) é considerado primário, e o (b) secundário.

GREEN em Tese de doutoramento de 1980 (apud CHOUBINEH (1984)) desenvolveu técnicas heurísticas para atribuir tarefas às células de tal forma que a carga entre e dentro das células fique balanceada. Ele também construiu um modelo de programação inteira mista (MIP) com uma das seguintes funções-objetivo opcionais: minimizar ou o tempo de permanência, ou o tempo total de duração da programação ('makespan'), ou o atraso médio. Green concluiu que o modelo MIP era intratável computacionalmente exceto nos problemas de porte muito pequeno.

CHOUBINEH (1984) admitindo que um item pode ser feito na célula primária ou secundária, define as seguintes variáveis:

x_{ijt} = número de unidades do item i produzido pela célula j

no período t ;

R_{jt} = total de horas regulares de mão-de-obra necessárias pela célula j no período t ;

E_{jt} = total de horas extras de mão-de-obra necessárias pela célula j no período t ;

I_{it} = estoque do item i no final do período t , e então constrói um modelo MIP que minimiza a soma dos custos diretos de produção e dos custos de manter estoques ao longo do horizonte de planejamento. Ele não admite que haja atrasos nas ordens, ou seja, o estoque no início de cada período não pode ser negativo. São ainda levadas em conta as seguintes restrições: a capacidade de produção da mão-de-obra e os tempos de produção alocados às células devem ser aproximadamente iguais.

A nosso ver essa última restrição nem sempre deveria ser estabelecida. Suponhamos que temos que produzir 6 itens em 2 células, onde 5 deles têm como célula primária a A e um a B, e devemos escolher entre as alternativas:

- (a) célula A fabrica os 5 itens que a tem como célula primária implicando numa utilização de 90% de sua capacidade, e a B faz o item que a tem como célula primária levando a uma utilização de 15% de sua capacidade;
- (b) cada célula realiza 3 itens fornecendo 55% e 50% de utilização de A e B respectivamente;
- (c) realizar tudo na célula A havendo necessidade de 5% de hora extra, e desativar no período a célula B para manutenção preventiva e dar férias para os seus operários.

Pelas restrições colocadas no modelo de CHOOBINEH (1984) entre essas 3 alternativas, a alternativa (b) seria escolhida, contudo dependendo dos custos e de outros fatores, uma das outras duas alternativas pode ser muito mais vantajosa. Esse exemplo simples já serve para ilustrar o que chamamos, na seção 3.3, de falta de flexibilidade (ou "jogo de cintura") dos modelos de PO.

Além disso, o modelo de Choobineh admite que um lote pode ser parcialmente fabricado em uma célula e o restante do lote em outra, o que é inapropriado sob o ponto

de vista gerencial. No exemplo numérico apresentado em CHOUBINEH (1984), 121 unidades do item 1 são produzidos na sua célula primária e 4 unidades na sua célula secundária.

SHAW (1988a) descreve um método dinâmico para (i) carga de célula e outro para (ii) programação de operações. O (ii) é tratado por uma abordagem de Inteligência Artificial. O (i) é tratado por um mecanismo distribuído de atribuição de tarefas através de rede local de interligação (LAN); ao chegar uma nova tarefa para ser processada, é enviado a cada célula que pode executá-la, um pedido de licitação, e as células respondem informando quando poderão terminar a tarefa e a que custo; ao receber todos os orçamentos o gerente então seleciona a célula à qual será atribuída a tarefa. Nesse esquema de negociação está implícito que o sistema visualiza cada célula como um fornecedor autônomo. Num trabalho bastante similar, SHAW (1987b) foi o primeiro a usar explicitamente as redes locais de interligação como elemento essencial para a programação da produção: após terminadas as operações de uma tarefa em uma célula, a unidade de controle verifica se ainda existem operações remanescentes; se existirem, novamente o esquema de negociação é utilizado para que se possa decidir para qual célula será enviada a tarefa para que tais operações sejam executadas.

6.4 PROGRAMAÇÃO DE OPERAÇÕES

Dentre as atividades de controle da produção na manufatura celular, a programação de operações de longe é a atividade mais enfocada nos trabalhos acadêmicos.

Conforme veremos na revisão dos trabalhos já publicados, a programação de operações em máquinas em células de manufatura pode abranger um ou mais dos seguintes aspectos (conforme o tipo de célula e/ou hipóteses assumidas):

- (i) alocação de carga às máquinas da célula;
- (ii) seqüência em que as peças entram na célula;
- (iii) seqüência em que as operações são executadas nas máquinas;
- (iv) momento em que as operações serão iniciadas e terminadas nas máquinas.

Há várias formas de se classificar os trabalhos publicados atinentes à programação de operações nas células, por exemplo: (1) classificação por critério de desempenho, (2) classificação por tipo de células; (3) classificação por tipo de sistema produtivo; (4) classificação por técnica empregada. Contudo nos parece mais conveniente fazermos uma classificação híbrida; assim os trabalhos serão enquadrados em uma das seguintes classes:

- (i) Trabalhos Específicos, os quais assumem várias hipóteses explicitadas na seção 6.4.1;
- (ii) Minimização do Tempo de Preparação;
- (iii) Trabalhos Empregando Simulação;
- (iv) Programação de Operações na Manufatura Celular Repetitiva;
- (v) Programação de Operações de FFLs;
- (vi) Programação da Produção de FMSs.

Vários trabalhos poderiam ser enquadrados em mais que uma classe, e a escolha do enquadramento fazemos pela característica mais marcante do trabalho.

6.4.1 Trabalhos Específicos

Nos desenvolvimentos, todos pertencentes ao caso estático, de Ham, Hitomi, Yoshida e Nakamura, os modelos de 'scheduling' para o sistema de manufatura celular repousam nas seguintes hipóteses (NAKAMURA et alii, 1978; HITOMI & HAM, 1976):

- (1) tarefas a serem processadas são classificadas em vários grupos e tarefas do mesmo grupo são processadas em sucessão;
- (2) tempo de processamento do grupo requerido para completar o grupo consiste do tempo de preparação do grupo mais a soma dos tempos de processamento das tarefas do grupo;
- (3) tempo de preparação do grupo é independente da seqüência dos grupos;
- (4) tempo de preparação necessário para executar certa tarefa é independente da seqüência das tarefas do grupo e é incluído no tempo de processamento da tarefa;
- (5) no caso de um sistema de produção de multi-estágios, todas as tarefas e grupos são processados com padrão de fluxo 'flow-shop'. Além disso, a ordenação de grupos e tarefas é assumida como sendo a mesma em cada máquina.

6.4.1.1 Seqüenciamento em uma Máquina

Na manufatura convencional os dois resultados básicos do seqüenciamento em uma máquina são:

* a seqüência que minimiza o tempo médio de permanência (ou de fluxo) é obtida processando as tarefas segundo a regra SPT (ordem não decrescente dos tempos de processamento). Demonstração em CONWAY et alii (1967).

* a seqüência que minimiza o maior tempo de atraso, é obtida processando-se as tarefas segundo a regra EDD (ordem não decrescente dos prazos de entrega). Resultado de JACKSON (1955, apud CONWAY et alii (1967)).

Para o caso da célula com uma máquina HAM et alii (1985) tratam o problema de minimizar o tempo total de fluxo F (que é equivalente a minimizar o tempo médio de permanência F), como também o tempo médio de fluxo ponderado (F_w). Tais critérios têm impacto, por exemplo, no estoque em processo. O resultado original foi apresentado numa publicação japonesa de 1973 de YOSHIDA et alii (apud HAM et alii (1986)) e é o seguinte:

* para minimizar F a ordenação das tarefas de cada grupo deve seguir a regra SPT e o seqüenciamento dos grupos deve ser tal que, quanto menor a relação $(S_i + P_i)/N_i$ mais o grupo i tem prioridade para estar no início da seqüência, Onde

S_i = 'set-up' do grupo i

N_i = número de tarefas do grupo i

P_i = soma dos tempos de processamento das tarefas do grupo i , ou seja soma dos p_{ij} .

Se as tarefas não tiverem a mesma importância pode-se usar o critério F_w , que consiste em associar pesos aos tempos de permanência de cada tarefa. Usando esse critério, a seguir apresentamos um exemplo extraído de HAM et alii (1985):

Exemplo - critério F_w

Tabela de dados

Grupo	G_1		G_2			G_3		
S_i	2		3			1		
tarefa	J_{11}	J_{12}	J_{21}	J_{22}	J_{23}	J_{31}	J_{32}	J_{33}
P_{ij}	4	3	6	2	5	5	4	3
peso w_{ij}	2	1	2	1	3	2	1	1

A seqüência dentro de cada grupo segue a ordem não decrescente da relação p_{ij}/w_{ij} , portanto

no grupo 1 a seqüência obtida é $J_{11} - J_{12}$,
 " " 2 a seqüência obtida é $J_{23} - J_{22} - J_{21}$,
 " " 3 a seqüência obtida é $J_{31} - J_{33} - J_{32}$.

Já a seqüência dos grupos deve seguir a ordem não decrescente da relação:

$$R_i = (S_i + P_i) / \sum_{j=1}^{N_i} w_{ij}$$

calculando, temos

$$R_1 = \frac{2 + (4 + 3)}{2 + 1} = 3; \quad R_2 = \frac{3 + (6 + 2 + 5)}{2 + 1 + 3} = 16/6; \quad R_3 = 13/4$$

portanto a seqüência dos grupos deve ser: $G_2 - G_1 - G_3$.

NAKAMURA et alii (1978) propuseram alguns algoritmos para tratar do seqüenciamento em uma máquina na célula tendo como critério o tempo total de atraso. A família de peças é dividida em M grupos. Determina-se a seqüência dos grupos e dentro de cada grupo a seqüência das tarefas. Dois algoritmos são propostos: um leva à solução ótima no caso da seqüência das tarefas dentro de cada grupo já ter sido pré-especificada e o outro leva a uma boa solução, não necessariamente ótima, e serve para o caso em que a seqüência das tarefas não está pré-especificada. Os resultados são extensões dos desenvolvimentos de EMMONS (1969).

6.4.1.2 'Scheduling' na Manufatura Celular Multi-estágios

Para HAM et alii (1985) o problema de 'scheduling' na manufatura celular multi-estágios, tal como no 'flow-shop', é intratável para a maioria dos critérios e coloca que, em ambas as situações, o critério mais tratável é a minimização do 'makespan' M (tempo total para concluir toda a programação). Segundo HAM et alii (1985) o problema de minimizar M na manufatura celular foi resolvido por eles em trabalhos anteriores através de três abordagens: teórica; 'branch-and-bound' e heurística.

6.4.1.2.1. Minimizar o 'Makespan' pela Abordagem Teórica no Seqüenciamento de uma Célula com Duas Máquinas

Para o problema de minimizar o 'makespan' no seqüenciamento de uma célula com duas máquinas, o ponto de partida é a adaptação do resultado de JOHNSON (1954) do seqüenciamento de 'flow-shop' com duas máquinas, a saber: é suficiente considerar apenas as programações de grupos em que a mesma ordem dos grupos e das tarefas ocorre em ambas as máquinas.

A solução do problema pode ser encontrada pela aplicação de duas regras (HAM et alii, 1985):

regra 1: J_{ig} precede J_{ih} se

$$\min(p_{ig}^{(1)}; p_{ih}^{(2)}) < \min(p_{ih}^{(1)}; p_{ig}^{(2)})$$

onde $p_{ig}^{(k)}$ é o tempo de processamento da tarefa g do grupo i (J_{ig}) na máquina k;

regra 2: grupo G_i precede grupo G_j se $A < B$ onde

$$A = \min [C; D]$$

onde:

$$C = (S_i^{(1)} - S_i^{(2)} + \max_{1 \leq v \leq N_j} (\sum_{g=1}^v p_{ig}^{(1)} - \sum_{g=1}^{v-1} p_{ig}^{(2)}))$$

$$D = (\max_{1 \leq v \leq N_j} (\sum_{g=v}^{N_j} p_{jg}^{(2)} - \sum_{g=v+1}^{N_j} p_{jg}^{(1)}))$$

$$B = \min [E; F]$$

onde:

$$E = (S_j^{(1)} - S_j^{(2)} + \max_{1 \leq v \leq N_j} (\sum_{g=1}^v p_{ig}^{(1)} - \sum_{g=1}^{v-1} p_{jg}^{(2)}))$$

$$F = (\max_{1 \leq v \leq N_j} (\sum_{g=v}^{N_j} p_{ig}^{(2)} - \sum_{g=v+1}^{N_j} p_{ig}^{(1)}))$$

Exemplo: minimizar M

Tabela de Dados

grupo	G ₁		G ₂			G ₃	
S _i ⁽¹⁾ = 'set-up' em M1	3		3			1	
S _i ⁽²⁾ = 'set-up' em M2	1		2			2	
tarifa	J ₁₁	J ₁₂	J ₂₁	J ₂₂	J ₂₃	J ₃₁	J ₃₂
p _{ij} ⁽¹⁾	5	8	8	5	10	9	3
p _{ij} ⁽²⁾	9	7	7	9	6	6	7

* Seqüência nos grupos

no grupo 1

min (5, 7) < min (8, 9) logo J₁₁ - J₁₂

no grupo 2

min (8, 9) > min (5, 7) acarreta J₂₂ antes de J₂₁

min (5, 6) < min (10, 9) acarreta J₂₂ antes de J₂₃

$\min(8, 6) < \min(10, 7)$ acarreta J_{21} antes de J_{23}
 logo a seqüência é $J_{22} - J_{21} - J_{23}$

no grupo 3

$\min(9, 7) > \min(3, 6)$ logo $J_{32} - J_{31}$

* Seqüência dos grupos

da regra 2 decorre o seguinte algoritmo (HAM et alii, 1985):

(1) para cada grupo tendo como seqüência a encontrada pela regra 1, calcule

$$X_i = S_i^{(1)} - S_i^{(2)} + \max_{1 \leq v \leq N_i} \left(\sum_{g=1}^v p_{ig}^{(1)} - \sum_{g=1}^{v-1} p_{ig}^{(2)} \right)$$

$$Y_i = \max_{1 \leq v \leq N_i} \left(\sum_{g=v}^{N_i} p_{ig}^{(2)} - \sum_{g=v+1}^{N_i} p_{ig}^{(1)} \right)$$

- (2) encontre o menor valor entre os X_i 's e os Y_i 's (em caso de empate a escolha é arbitrária)
- (3) se for X_i , então coloque G_i no início e, se for Y_i , coloque G_i na última posição
- (4) remova do problema o grupo atribuído e vá para o passo 2

Solução do exemplo:

$$X_1 = 3 - 1 + \max(5; 5 + 8 - 9) = 7$$

$$Y_1 = \max(9 + 7 - 8; 7) = 8$$

$$X_2 = 3 - 2 + \max(5; 5 + 8 - 9; 5 + 8 + 10 - 9 - 7) = 8$$

$$Y_2 = \max(9 + 7 + 6 - 8 - 10; 7 + 6 - 10; 6) = 6$$

$$X_3 = 1 - 2 + \max(3; 3 + 9 - 7) = 4$$

$$Y_3 = \max(7 + 6 - 9; 6) = 6$$

aplicando os demais passos do algoritmo, chegamos à solução ótima $G_3 - G_1 - G_2$ com 'makespan' = 61, cujo gráfico de Gantt está na figura 28.

HAM et alii (1979) minimizam M entre as seqüências que possuem o menor número de tarefas com atraso (n_T). Além disso, a velocidade ótima de corte de mínimo custo é

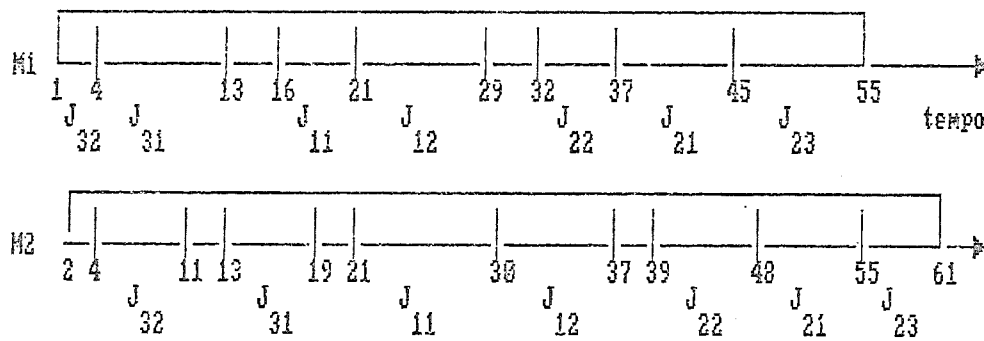


FIGURA 28: GRÁFICO DE GANTT DA SOLUÇÃO DO PROBLEMA
(2+3+2) TAREFAS/2 MÁQUINAS/PRODUÇÃO EM GRUPO/M

deduzida sob a seqüência ótima. Nesse artigo o que os autores chamam de 'total flow time', não é a soma dos tempos de permanência de todas as tarefas como os demais autores da área entendem, e sim é o maior tempo de permanência o F_{max} , mais conhecido como 'makespan' (no caso o tempo decorrido que vai desde o instante em que a primeira tarefa do primeiro grupo entra na célula, até o instante em que a última tarefa sai da célula). De forma resumida o problema é resolvido em três etapas:

- (1) com as v_c de máxima produção, encontram-se as programações de menor $n\tau$;
- (2) entre elas determina-se a de menor M ;
- (3) para essa programação, são diminuídos ao máximo possível os tempos ociosos, ao diminuir as velocidades de corte (mas nunca abaixo da velocidade de mínimo custo) onde for factível; a seleção das operações que terão v_c alteradas é feita com base numa função chamada de função de sensibilidade de eficiência.

6.4.1.2.2 Minimizar o 'Makespan' pela Abordagem 'Branch-and-Bound'

Essa abordagem 'branch-and-bound' aplicada ao problema de minimizar o 'makespan' em células com 3 ou mais

estágios, está descrita em HAM et alii (1985) bem como em HAM (1987) em português.

6.4.1.2.3 Minimizar o 'Makespan' pela Abordagem Heurística

Todo método heurístico não garante a obtenção de solução ótima a qual é, por exemplo, garantida pelo 'branch-and-bound'. Por outro lado, um bom procedimento heurístico deve levar a uma boa solução, não necessariamente ótima, com um tempo computacional não proibitivo em situações práticas (normalmente contêm grande número de tarefas).

O método heurístico apresentado em HAM et alii (1985) é a adaptação para a manufatura celular do método de PETROV (1968, apud HAM et alii (1985)). O método de Petrov é uma adaptação heurística para o caso de três ou mais estágios do método exato de JOHNSON (1954) para dois estágios.

Heurística:

(Passo 1) divida os tempos de 'set-up' dos grupos nas máquinas m ($S_i^{(m)}$), bem como os tempos de processamento das tarefas j dos grupos i nas máquinas m ($p_{ij}^{(m)}$) em dois componentes a saber:

$$S_i^{(A)} = \sum_{m=1}^h S_i^{(m)} \quad \text{para } i=1, \dots, N$$

$$S_i^{(B)} = \sum_{m=h'}^k S_i^{(m)} \quad \text{para } i=1, \dots, N$$

$$p_{ij}^{(A)} = \sum_{m=1}^h p_{ij}^{(m)} \quad \text{para } i=1, \dots, N; j=1, \dots, N_j$$

$$p_{ij}^{(B)} = \sum_{m=h'}^k p_{ij}^{(m)} \quad \text{para } i=1, \dots, N; j=1, \dots, N_j$$

onde $h = k/2$ e $h' = h + 1$ se k for par e $h = h' = (k + 1)/2$ se k for ímpar;

(Passo 2) aplique o algoritmo otimizador da seção 6.4.1.2.1 do caso de duas máquinas, aos grupos contendo dois 'set-ups' fictícios (como se tivéssemos apenas máquinas A e B) e às tarefas com 2 tempos de processamento fictícios, obtidos no Passo 1. O resultado final é quase ótimo.

Como essa heurística já fornece bons resultados, omitimos aqui uma segunda heurística apresentada por HAM et alii (1985).

Em TAYLOR & HAM (1981) podem ser encontradas informações sobre uma implementação computacional do algoritmo heurístico de Petrov.

6.4.1.2.4 Outros Critérios

CHO et alii (1982) propõem um algoritmo heurístico com vistas a minimizar o tempo total de atraso no sistema de múltiplos estágios, e consideram dois casos. Na primeira seqüência das tarefas dentro de cada grupo já está pré-determinada. No segundo, ela não está pré-determinada.

6.4.2 Minimização do Tempo de Preparação

O critério de minimizar o tempo total de preparação é bastante abordado sendo que desde os primeiros estudos percebeu-se que esse problema pode ser modelado como um problema do caixeiro viajante (GAVETT, 1965; CONWAY et alii, 1967; YOUNG, 1967) que pode ser tratado por métodos heurísticos, pelo método 'branch-and-bound' e através da programação dinâmica (BAKER, 1974).

Se a produção da família completa vai ser ou não repetida seqüencialmente, o modelo emolda-se no caso cíclico ou acíclico, respectivamente, do problema do caixeiro viajante (TSP= 'Travelling Salesman Problem').

O modelo do caso cíclico é o seguinte (FOO & WAGER, 1983):

$$\begin{aligned} \min z &= \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N s_{ij} x_{ij} \\ \text{sujeito a} \\ \sum_{i=1}^N x_{ij} &= \sum_{j=1}^N x_{ij} = 1 \\ u_i - u_j + N x_{ij} &\leq N - 1 \quad \text{para } 1 \leq i \neq j \leq N \end{aligned}$$

onde

u_i e u_j são valores reais arbitrários que garantem que não ocorrerá uma seqüência que comece e termine numa certa tarefa, sem contemplar todas as N tarefas;

s_{ij} = tempo de preparação quando a tarefa i (J_i) é seguida pela tarefa j (J_j);

x_{ij} = 1 ou 0, se respectiva/ J_i for seguida ou não pela J_j .

Para solução desse modelo, além de alguns métodos heurísticos, se destacam os seguintes: programação dinâmica (BELLMANN, 1962; HELD & KARP, 1962) e 'branch-and-bound' (LITTLE et alii, 1963).

O caso acíclico foi tratado por WHITE & WILSON (1977) de duas maneiras:

(a) assumem que (h_1) a primeira tarefa é pré-especificada,

(h2) todas as tarefas são processadas em uma única máquina, (h3) o tempo de preparação é dependente do seqüenciamento, (h4) todas as tarefas estão disponíveis simultaneamente; e então mostram que o problema pode ser resolvido como um TSP cíclico fazendo-se a seguinte modificação na matriz de tempos de preparação S : elemento $(1,1) = \infty$, e os demais elementos da coluna 1 iguais a zero ($(u,1) = 0$, para $u \neq 1$);

- (b) através de uma heurística baseada num método estatístico e na regra "vizinho mais próximo", que é um procedimento simples onde o programador seleciona como a próxima peça a ser colocada na máquina, aquela peça, entre as peças disponíveis, que tem o menor tempo de preparação com relação à peça que está na máquina. Se todas as peças a serem programadas estiverem disponíveis, essa regra coincide com a regra "a próxima é a melhor" de GAVETT (1965). No caso (b) a hipótese (h4) é relaxada.

FOO & WAGER (1983) empregam a Programação Dinâmica (PD), assumem (h2), (h3) e (h4), e relaxam a primeira hipótese introduzindo uma tarefa fictícia J_0 sendo que, s_{0j} é o tempo de preparação estando a máquina vazia e a próxima tarefa a ser processada é a J_j , e $s_{j0} = 0$. Embora não referenciem YOUNG (1967), este já havia sugerido anteriormente a introdução da variável fictícia. A novidade de FOO & WAGER (1983) foi demonstrar empiricamente, que acrescentar variável fictícia é melhor computacionalmente que resolver o problema N vezes, cada uma das quais iniciando o seqüenciamento por cada uma das N tarefas, e então por comparação das N soluções escolher a melhor.

WILBRECHT & PRESCOTT (1969) propõem uma regra, denominada de SIMSET, para sequenciar tarefas. Para cada tarefa é atribuído um valor de 'set-up', e consideram que o tempo de preparação quando J_i é o predecessor e J_j o sucessor, é igual a diferença absoluta entre o valor de 'set-up' de J_i e o de J_j . Pela regra SIMSET a próxima tarefa é a que tem o menor tempo de preparação. Esse procedimento é um tanto grosseiro e é questionado por AGGARWAL (1973).

FURTH & ROUBOS (1983) apresentam um 'software' chamado 'Mischchedule' destinado ao seqüenciamento de tarefas

em máquinas ferramentas agrupadas em células em pequenas e médias empresas, que leva em conta as similaridades entre as peças em termos de forma/ dimensão/ necessidades de usinagem/usinabilidade. 'Mischedule' faz a carga de trabalho das estações, efetuando-se: o cálculo do tempo total de processamento requerido por estação; a soma do tempo de transporte (entre as operações) com o tempo de processamento, obtém-se o tempo total da ordem; e então pelo uso do calendário e dos dados das estações de trabalho, são calculadas as disponibilidades (em horas) das máquinas. Se não é possível compatibilizar os tempos da ordem e a disponibilidade de tempo dos recursos, então reduz-se os tempos de transporte (dentro de uma certa porcentagem). Se houver sucesso nessa compatibilização, então a capacidade requerida de máquinas é reservada; se não houver, é fornecida uma mensagem de que não é possível ter a ordem terminada até a sua data devida. Quando uma operação é terminada informa-se ao sistema qual a duração da operação e o número de peças perfeitas produzidas. Daí a ordem vai para a fila de sua próxima operação e uma nova prioridade interna para aquela ordem é determinada. Os atributos similares de uma peça da fila são detectados através de três testes de verificação de características a partir do conteúdo do código de 12 dígitos da peça (4 de forma, 4 de dimensão, 2 de tolerância e 2 de material!). Desta forma a fila é organizada em 3 subfilas. Por exemplo, para atender a lógica da subfila 1, o primeiro dígito do código deve ser 1 ou 3, o segundo 1 ou 6 etc; esses dados estão armazenados numa matriz. As peças de cada subfila numa máquina-ferramenta, são seqüenciadas de forma similar, segundo outras características mais específicas (por exemplo, cortar segundo a ordem decrescente dos diâmetros e/ou, cortar segundo o tipo de material). Segundo FURTH & ROUBOS (1983) organizando as filas dessa maneira, é possível reduzir os tempos de preparação de 50 a 75%, o que pode levar a um ganho de 20% de disponibilidade da máquina, já que do tempo útil da máquina é comum 40% dele ser usado em preparação.

OZDEN et alii (1985) consideram que as tarefas estão agrupadas, e que há um 'set-up' de grupo bem maior que o 'set-up' de tarefa. Minimiza o tempo total de preparação em uma máquina usando PD. São seqüenciados os grupos e dentro de cada grupo as suas tarefas, e eles concluem que essa característica permite tratar por PD um número muito maior de tarefas do que é possível no caso convencional onde as tarefas não são agrupadas.

ROTHBLUM et alii (1983) estudam o seqüenciamento ótimo de operações num sistema de produção com dois estágios (duas máquinas em série) usando programação dinâmica, tendo como critério a minimização do tempo de preparação e com a restrição de que toda tarefa realize operação no estágio 1 e a seguir no estágio 2. Células com duas máquinas e tal restrição são raríssimas, contudo o estudo é mais um desenvolvimento no sentido de dominar o problema de 'scheduling'. Convém observar que o 'makespan' é afetado pelos tempos de preparação.

HITOMI et alii (1977, apud MOSIER et alii (1984)) usam simulação para testar, num ambiente TG, duas regras concernentes ao tempo de preparação: a regra SST (seleciona a tarefa com menor tempo de preparação) e a regra TSS (seleciona as tarefas de acordo com a seqüência dada pelo problema do caixeiro viajante). Quando a relação do 'set-up' entre as peças é bem definido, TSS cria uma seqüência que minimiza o tempo de preparação. Segundo os autores quando a razão do tempo de preparação pelo tempo de processamento é grande, a SST e a TSS demonstram um grande potencial em relação a outras regras.

Sobre o tempo de preparação existem duas questões:

- (a) como a TG por si só já traz uma redução do tempo de preparação, usar como critério de programação de operações a minimização do tempo de preparação nas células de manufatura, traz um aumento significativo da capacidade produtiva da célula? A conclusão do estudo de FLYNN (1987) através de simulação mostra que sim;
- (b) como obter a matriz de preparação? Algumas respostas

foram publicadas entre as quais destacamos duas:

(b1) ELGOMAYEL & NADER (1983) desenvolveram um método computadorizado para cálculo do tempo de preparação no processo de torneamento. Esse método identifica uma preparação como uma combinação de preparações elementares para as quais se tem um tempo padrão, tanto de colocação como de retirada de determinados dispositivos ou ferramentas que fazem parte das preparações elementares. Toda vez que se passa da operação i da peça p , para a operação j da peça q , ocorre uma combinação específica de preparações elementares. A soma dos tempos de preparação elementares fornece os s_{ij} da matriz de preparação.

Para ELGOMAYEL & NADER (1983) esses valores podem ser tratados como coeficientes de similaridades (quanto menor s mais as peças antecessora e sucessora são semelhantes) e portanto eles poderiam ser usados para formar famílias de peças similares com relação ao ferramental. O melhor arranjo de ferramentas deve ser determinado após ter sido encontrada a seqüência de peças que minimiza o tempo total de preparação;

(b2) observando a dificuldade em estimar os $(N^2 - N)$ elementos da matriz de preparação, onde N é o número de peças a seqüenciar, IRANI et alii (1988) propõem uma heurística para seqüenciar um conjunto de peças classificadas em famílias pela TG, que não requer que a matriz de preparação seja estimada. A heurística de seqüenciamento proposta agrupa peças com atributos similares em famílias, o que transforma o problema em selecionar a família mais próxima e a peça vizinha mais próxima.

6.4.3 Trabalhos Empregando Simulação

Os trabalhos de simulação visam testar regras de despacho e avaliar qual a melhor em termos de estoque médio em processo, volume de produção, tempo médio de espera, entre outros critérios de desempenho. A regra de despacho mais conhecida é a SPT, e dado os resultados teóricos e os resultados empíricos obtidos nos testes, aliados à facilidade de implementá-la, a regra SPT desponta como a principal em termos de valor prático.

DALE & DEWHURST (1984) desenvolvem um modelo de simulação para uma célula do tipo mini-fábrica (26 máquinas, 14 operários) que fabrica 18 tipos de válvulas. A célula executa a usinagem, montagem e teste do produto completo, e o agrupamento foi feito por produto e não por família de peças, usando o conceito esboçado por WOLSTENHOLME et alii (1980). Segundo DALE & DEWHURST (1984) uma série de problemas com o controle da produção foram encontrados: nível de estoque em processo muito alto; perda da possibilidade de combinar pequenos lotes; falta de um planejamento da seqüência da carga de trabalho o que leva a tempos ociosos e de preparação da máquina que poderiam ser evitados; aumento do volume de transferências de trabalho entre as células; comprometimento dos prazos de entrega de muitos clientes. O modelo de simulação além de uma série de hipóteses simplificadoras, só trata da parte da célula relativa à usinagem e de apenas 3 dos 18 produtos. Como era de se esperar, nenhuma regra de despacho se mostrou como a melhor em todas as medidas de desempenho. A SPT resultou na melhor quanto ao estoque em processo (avaliado em termos de número de tarefas), menor atraso ('lateness') médio, maior utilização de máquina e menor tempo médio de permanência.

A regra SPT foi considerada a melhor por VAITHIANATHAN & McROBERTS (1982) que testaram seis regras de despacho, sendo que a SPT se mostrou a melhor em três de um total de cinco critérios de desempenho considerados.

Segundo um estudo da 'Production Engineering Research Association' (PERA, 1976, apud GALLAGHER & KNIGHT

(1986)) que comparou cinco regras (LPT, SPT, COVERT, FCFS e aleatória) em três células de uma fábrica, concluiu que em média as melhores regras foram SPT e COVERT.

MOSIER et alii (1984) simulam três regras de despacho concebidas especialmente para operar num ambiente TG. A célula hipotética usada no experimento, consiste de quatro máquinas, onde para cada uma das três primeiras máquinas, três filas são formadas de acordo com as necessidades de 'set-up'. Cada tarefa visita de duas a quatro máquinas sendo que necessariamente a quarta onde ela sofre uma operação final. Com essa configuração, a quarta máquina é forçada a representar um gargalo e assim simplifica a avaliação da utilização da célula, bem como o pré-teste do modelo de simulação pode ser feito pela comparação com resultados analíticos da teoria das filas para um único servidor, que é o caso que tem sido extensivamente analisado por essa teoria. Para seleção da tarefa são consideradas no estudo as seguintes regras:

- (1) folga dinâmica (DS), seleciona a tarefa com o menor valor para a data devida menos a data atual;
- (2) CR1, escolhe a tarefa com a menor razão crítica (tempo que resta até a data devida, dividido pelo tempo total de processamento remanescente);
- (3) SPT;
- (4) CR2, razão crítica (tempo que resta até a data devida, dividido pelo número remanescente de operações);
- (5) FIFO ('First-in First-out').

Para seleção da fila são consideradas as seguintes regras especiais para o ambiente TG:

- (1) AVE, quando é terminada uma tarefa e uma nova tarefa vai ser selecionada, primeiro calcula-se para as três filas qual a prioridade média das tarefas quanto à similaridade com a tarefa que acabou de ser processada e o número de tarefas na fila no momento da seleção é contado (digamos n), e então n tarefas serão processadas;
- (2) WORK, escolhe a fila que tem o maior conteúdo total de trabalho, programa as tarefas dessa fila até que ela fique vazia;

(3) ECON, quando uma tarefa termina, um 'trade-off' econômico é realizado entre se vale a pena continuar processando uma tarefa dessa fila ou se é conveniente mudar de fila.

O estudo de MOSIER et alii (1984) resulta em um experimento de 4 fatores ($3 \times 5 \times 2 \times 2$) e 5 replicações. Primeiro fator a escolha da fila (3 regras), segundo fator a escolha da tarefa (5 regras), terceiro fator o nível de congestionamento da quarta máquina (96,875% ou 77,5%) e quarto fator, razão de 'set-up' (0,71428 ou 0,36). Cada observação do experimento é representada por $Y(i, j, k, l, m)$, significando a m -ésima observação da medida de desempenho Y , quando foi usada a regra i de seleção de fila, a regra j de seleção de tarefa, etc. O estudo prossegue dando detalhes do delineamento do experimento, contudo não oferece conclusões gerais e categóricas. Consideramos difíceis de implantar na prática, várias das regras consideradas.

6.4.4 Programação da Produção na Manufatura Celular Repetitiva

Além do super-sistema de controle da produção JIT, que engloba a programação de operações e como vimos no capítulo IV é extremamente apropriado para a manufatura celular repetitiva, existem alguns estudos destinados a esse ambiente.

Por exemplo, SPENCER (1988) propõe um método iterativo do tipo tentativa e erro para seqüenciamento de operações na manufatura repetitiva (poucos produtos, demanda alta e estável, ...) onde o tempo de preparação é relevante, e ajustes da capacidade do gargalo da célula são feitos alterando-se o tamanho dos lotes. O lote é determinado inicialmente pela seguinte modificação na equação do lote econômico: o custo de preparação é igual ao custo de preparação propriamente dito mais o custo da produção que deixou de ser efetivada devido ao tempo perdido com a preparação; e depois, se houver sobra na capacidade diminui-se os lotes, e se houver falta, aumentam-se os lotes até que a capacidade efetiva do gargalo seja quase toda usada. Como o trabalho de SPENCER (1988) se presta ao caso em que o tempo de preparação é relativamente alto, e a estrutura do produto é a mais simples possível, ele de fato não concorre com o JIT, o qual se aplica em situações onde o tempo de preparação é o menor possível, e a estrutura do produto final pode ser bastante complexa.

6.4.5 Programação de Operações de FFLs

Um tipo de sistema celular pouco estudado na literatura, ao qual Wittrock se dedica, é a FFL ('Flexible Flow Line' = linha de produção flexível). Sua característica principal é que a peça pode saltar estações de trabalho (formada cada uma delas por máquinas idênticas), mas não há contra-fluxo.

Uma FFL é um caso mais geral de linha de produção ('flow line') onde toda tarefa visita um dos equipamentos de cada estação de trabalho. O caso mais conhecido é o 'flow-shop' que é um caso particular do 'flow line' contendo apenas um equipamento em cada estação.

Usando o método 'branch-and-bound' SALVADOR (1973) minimiza o 'makespan' do 'flow line'. Nesse estudo não se permite filas diante das máquinas, e o tempo de preparação para troca de item na linha é considerado desprezível. Foi primeiramente desenvolvido para o processo de polimerização de 'nylon'. O método é impraticável para problemas de porte razoavelmente grande (número significativo de estações e de tarefas a serem seqüenciadas).

WITTROCK (1985) assume várias premissas, entre elas: em cada estação a peça é processada no máximo por uma máquina; não há tempo de preparação ao se mudar de uma peça para outra; em frente a cada máquina individual há uma fila com prioridade FIFO e, há um sistema de transporte automatizado para mover peças de qualquer máquina para qualquer outra. Ele trata 3 subproblemas, todos eles através de heurísticas:

- (1) alocação de máquina (qual máquina da estação executará a operação);
- (2) seqüenciamento (em que ordem as peças entram no sistema);
- (3) 'timing' (determina o momento exato em que cada peça entra no sistema).

Para a alocação de máquina WITTROCK (1985) usa a regra LPT proposta inicialmente em GRAHAM (1969) e a tarefa é atribuída à máquina com menor carga já acumulada.

Os dois últimos subproblemas são baseados na programação periódica; por exemplo temos que produzir 3000 peças A por dia, 2000 B e 1000 C, então o conjunto mínimo de peças (CMP) é 3 A, 2 B e 1 C: seqüencia-se o CMP e então o repete sucessivamente até obter o volume de produção requerido para cada peça.

WITTRUCK (1988), reconhecendo limitações na abordagem da programação periódica, reestuda o problema de seqüenciamento e 'timing' e propõe uma interessante heurística chamada de WLA ('workload-approximation'). Ele deduz um limitante inferior para o 'makespan', e conclui que uma programação ideal seria aquela que atingisse esse limitante inferior e sem nenhuma fila (portanto, o estoque em processo seria mínimo). O germe da heurística proposta é esse conceito de programação ideal.

6.4.6 Programação da Produção de FMSs

Os procedimentos de controle da produção dos CIMs devem:

- * levar explicitamente em conta as possibilidades de falhas das máquinas dos FMSs. Falhas em algumas máquinas não podem provocar o colapso do sistema;
- * levar em conta as disponibilidades para armazenagem das peças nos FMSs, já que o espaço para armazenagem é reduzido;
- * manter o fluxo normal ou quase normal nas condições mais adversas (falta de material, quebra de equipamentos, etc);
- * segundo BUZACOTT & YAO (1986b), na medida do possível, levar em conta o comportamento transitório dos FMSs, embora esse estudo seja computacionalmente mais difícil que o estudo das situações de equilíbrio. BUZACOTT & YAO (1986b) citam algumas referências que podem ser úteis para esse estudo;
- * ser norteados por critérios que devem mudar segundo as variações das condições internas e externas. Por exemplo, TERSINE et alii (1986) mostram que quando a demanda diminui é conveniente reduzir os tamanhos de lotes, de modo que, controlando a taxa de produção dessa maneira, melhora-se o atendimento aos clientes, diminuem-se os níveis de estoque e os recursos de mão-de-obra na manufatura celular e robôs nos FMSs serão usados na preparação dos equipamentos, ao passo que com lotes grandes, ficariam ociosos; ou seja, se a carga de trabalho é pequena, a minimização do tempo de preparação não é um bom critério para a programação da produção.

Para BUZACOTT & YAO (1986b), a concordância dos resultados entre os modelos de controle simplificados do FMS usando processos estocásticos e os modelos de controle detalhados usando simulação, sugerem que é possível de serem obtidos modelos mais simples em termos de informações exigidas e ainda assim serem capazes de controlar efetivamente o FMS, através de regras de controle que estão ainda por serem criadas.

Algumas revisões sobre modelagem das operações de FMSs têm sido publicadas. BUZACOTT & YAO (1986b) enfatizam

os modelos analíticos de Pesquisa Operacional (PO). GERSHWIN et alii (1986) revisam modelos de PO no contexto do controle em vários níveis dos Sistemas de Manufatura. BUZACOTT & YAO (1986a) revisam os modelos de filas para a programação de operações dos FMSs.

Sobre o emprego de Inteligência Artificial na programação de operações de FMSs, podem ser consultados entre outros: STEFFEN (1986); SHAW (1987a; 1988b) e SHAW & WHINSTON (1989).

SINGHAL et alii (1987) fazem algumas referências sobre trabalhos que usam Inteligência Artificial (IA), ou que combinam modelos de PO com abordagens de IA, o que, para eles, parece promissor.

KIMEMIA & GERSHWIN (1985) usam uma abordagem de otimização do fluxo em rede para determinar o roteamento ótimo de peças, num FMS modelado como uma rede de filas. Definem as variáveis de controle Y_{ijk} como sendo a taxa de fluxo das peças do tipo i na estação j para realização da operação k . Chega-se a um modelo de programação não-linear onde as restrições são lineares. Ele é resolvido iterativamente onde a cada iteração é solucionado um modelo de programação linear. Um dos resultados da otimização é a proporção das peças que deveriam ser fabricadas por cada um dos roteiros de fabricação disponíveis.

BUZACOTT & YAO (1986b) fazem um apanhado do que tem sido feito em termos de modelos analíticos (portanto excluindo os modelos de simulação) para o FMS. Resumimos aqui os esforços direcionados para a área de controle.

Na Tese de doutoramento de 1980 de HILDEBRANT (apud BUZACOTT & YAO (1986)) foram considerados pela primeira vez os problemas totais de planejamento e controle da produção de FMSs. Ele classificou as decisões envolvidas em dois tipos:

(a) decisões de recursos. É o tipo mais importante e foi estruturado em vários níveis:

(nível 1) encontre o 'mix' de tarefas que entrarão no sistema e em que máquina será executada cada operação de cada tarefa levando em conta as máquinas que estão em

condição de trabalho, a fim de minimizar o 'makespan';
 (nível 2) encontre a seqüência em que as tarefas do 'mix' entrarão no sistema levando em conta as condições de falha, a fim de maximizar a taxa média de produção;
 (nível 3) encontre o tempo de entrada para cada tarefa e a próxima operação para cada tarefa em cada condição de falha, a fim de minimizar a demora no sistema.

No nível 1 usa-se, entre outros modelos, um de programação não-linear. No nível 2, tenta-se seqüenciar de tal modo que o fluxo não seja interrompido. No nível 3, duas regras gerais foram propostas: entre com as peças no sistema tão logo estejam disponíveis em estoque e atribua uma tarefa para a máquina com a menor fila de espera em frente a ela;

- (b) decisões temporais. BUZACOTT & YAO (1986b) colocam que "deve ser notado que, enquanto quebras de máquinas são consideradas, as estratégias de controle são desenvolvidas com a suposição de que, durante cada condição de falha, o sistema está em equilíbrio. Ou seja, o período transiente que se segue a cada mudança de estado é ignorado. Num sistema real, o equilíbrio pode levar mais tempo para ser alcançado que a duração do estado de falha, particularmente quando quebras curtas e freqüentes são características do comportamento do sistema de produção. Assim, as estratégias de controle de Hildebrant podem não ser ótimas numa situação real. Ele recomendou que a estratégia deveria ser revista à medida que mais informações se tornassem disponíveis. Uma nova carga de produção deveria ser deduzida ao subtrair as tarefas que já tenham sido processadas".

GERSHWIN et alii (apud BUZACOTT & YAO (1986b)) desenvolveram uma versão melhorada do modelo de controle da Tese de doutoramento de Kimemia de 1982 do MIT. Nessa versão tem-se os seguintes níveis de controle:

(nível 1) regula a taxa de produção de cada tipo de tarefa resolvendo em 'off-line' um modelo de programação dinâmica;

(nível 2) implementa em 'on-line' a solução do nível 1 através da formulação de um problema de programação linear; (nível 3) o esquema de intervalo de carregamento do sistema com tarefas a serem seqüenciadas é melhorado em relação ao de Kimemia, de modo a contornar os problemas deste quando os sistemas estão super-carregados.

Já COHEN et alii (apud BUZACOTT & YAO (1986b)) apresentam um modelo de controle determinístico de FMSs.

BUZACOTT (1982) estabelece um modelo de planejamento e controle com os seguintes níveis hierárquicos de decisão:

(nível 1) planejamento da pré-liberação. Decide que tarefas devem ser fabricadas identificando restrições na seqüência de operações;

(nível 2) controle da entrada. Determina a seqüência e momento de liberar as tarefas para o sistema;

(nível 3) controle operacional. Assegura movimentação entre máquinas e decide que tarefa será a próxima a ser processada por uma máquina.

SEIDMANN & SCHWEITZER (1984) formulam o problema de controle de um FMS como um problema de decisão semi-markoviano, sendo que a decisão é tomada quando o FMS completa uma peça e deve decidir que tipo de peça será a próxima a ser processada.

WILHELM & SHIN (1985) apresentam um esquema para controle da produção com operações alternativas. Começa num nível de pré-programação, ou seja, uma alocação de recursos. Um modelo de programação linear define quantas peças do tipo i serão produzidas nas seqüências de operações j na máquina k de forma a balancear a carga de trabalho entre todas as máquinas; redefinições da seqüência em tempo-real devem ser providas de forma a contornar os imprevistos.

No projeto do sistema de controle por computador, SCOTT et alii (1983) usam programação dinâmica para obter uma configuração hierárquica de controle de mínimo custo para um dado processo de produção. O modelo estima o número e a capacidade dos computadores hierárquicos necessários

para controlar um sistema de manufatura automatizado específico. Uma subsequente análise mais detalhada seria feita através de simulação.

COSTA & GARETTI (1985) apresentam um sistema de controle para a produção num FMS de um 'mix' de produtos com demanda muito pouco previsível. As atividades do sistema são divididas em:

(conjunto 1) ligadas aos problemas tecnológicos (planejamento do processo, roteiro de operações, alocação de ferramentas, roteamento);

(conjunto 2) ligadas aos problemas gerenciais (planejamento, 'scheduling', controle operacional do sistema).

Aspectos computacionais da conversão do roteiro de operações do PMS ('Piece Manufacturing Specifications' = especificações da fabricação de peça) em atividades de trabalho na célula, através da linguagem CPL ('Cell Programming Language' = linguagem de programação de célula), também são explorados.

6.5 CONCLUSÕES

Embora a revisão relativa aos FMSs não seja exaustiva, pode-se observar que os estudos sobre 'scheduling' no ambiente CIM, não considerando os trabalhos de Inteligência Artificial, têm mostrado duas vertentes:

- * na manufatura celular, ou adota-se a abordagem estática, tendo à frente Ham e alguns pesquisadores japoneses onde os trabalhos mais práticos têm um caráter heurístico, ou adota-se a abordagem dinâmica aparecendo a simulação e a teoria das filas como os métodos usados;
- * no FMS, ou se usa simulação, ou teoria das filas, ou teoria do controle.

Uma diferença marcante nas duas situações, células e FMSs, é que na literatura, o 'scheduling' dos FMSs é feito evidenciando uma preocupação com um esquema de controle realimentado, enquanto que nas células a preocupação é apenas com o planejamento. Com isso as proposições sobre o controle da produção dos FMSs, tendem a apresentar uma maior capacidade de se readaptar às mudanças, quer internas (quebra de máquinas, variação nos níveis de estoques de matérias-primas, etc), como externas (mudanças nas necessidades dos clientes, nos prazos de fornecimento, etc).

Acreditamos que o enfoque dado no caso do FMS é mais real e pode ser adaptado à manufatura celular. Além disso na manufatura celular pode-se contar com a intervenção do ser humano para se conseguir um sistema de controle da produção mais flexível e adaptativo, isso nos leva aos Sistemas de Apoio à Decisão (SADs).

Para finalizar, ainda muita pesquisa é necessária sobre o controle da produção na manufatura celular. Só para se ter uma idéia das controvérsias existentes, VAITHIANATHAN & McROBERTS (1982) acreditam que o tamanho do problema de 'scheduling' é menor nas células que nos 'job-shops', assim pode-se aplicar métodos mais sofisticados e precisos. Já DALE & RUSSELL (1983), acham que não se deveria usar procedimentos formais para o controle interno da produção das células: os próprios operários poderiam realizá-lo.

CAPÍTULO VII

CONCEPÇÃO DE UM NOVO SISTEMA PARA
CONTROLE DA PRODUÇÃO NA MANUFATURA CELULAR

7.1 INTRODUÇÃO

As principais questões colocadas no âmbito do gerenciamento da produção (ou seja, o que, quanto, onde e quando fazer), nos conduzem ou ao Planejamento da Produção ou ao Controle da Produção.

O Planejamento da Produção, por trabalhar com um horizonte de médio prazo (de vários meses a alguns anos), trata de questões mais gerais que visam orientar a modificação do volume de recursos da organização, para fazer frente às necessidades futuras. Para esse fim, geralmente os produtos não precisam ser vistos como unidades isoladas, e sim, pelo contrário podem ser agregados para se avaliar a capacidade produtiva como um todo. A questão tempo é considerada em intervalos grandes, por exemplo vários períodos de um ou dois meses cada um. A questão onde, não é em que máquina, mas sim em que departamento e até mesmo em que fábrica. O planejamento da produção tal como o entendemos não é objeto de estudo neste trabalho.

Já o Controle da Produção, tema de nosso trabalho responde às mesmas questões (o que, quanto, onde e quando fazer) mas no curto prazo, e portanto é responsabilidade sua, regular o fluxo de materiais no chão da fábrica.

Como vimos, o processo decisório no Controle da Produção envolve três níveis de programação da produção como mostra a figura 29.

Nível	Horizonte de Programação	Etapa do Controle da Produção
do Produto Final	alguns meses	Programa Mestre de Produção
das Peças Componentes	algumas semanas	Emissão de Ordens
das Operações	alguns dias	Programa de Operações

FIGURA 29: OS NIVEIS DE CONTROLE DA PRODUÇÃO

O que propomos é um sistema de Controle da Produção (SCP) que contempla os três níveis, desenvolvido para operar na manufatura celular semi-repetitiva.

Por que na manufatura celular? Já o respondemos nos capítulos II e V, e uma das razões é que ela é a base dos desenvolvimentos rumo à fábrica do futuro. Além disso, ainda não existe um SCP plenamente satisfatório para a manufatura semi-repetitiva.

Estruturamos este capítulo em mais três seções: Sistema de Elaboração do Programa Mestre de Produção, Sistema de Emissão de Ordens e Sistema de Programação de Operações.

Neste trabalho, damos ênfase ao tratamento do problema como um todo. Ele não inclui a implementação computacional do sistema. No capítulo VIII fazemos considerações a respeito de como pretendemos conduzir tal implementação.

7.2 SISTEMA DE APOIO À DECISÃO PARA ELABORAÇÃO DO PROGRAMA MESTRE DE PRODUÇÃO

7.2.1 Introdução

Como vimos no capítulo IV, o Programa Mestre de Produção (PMP) como inicializador do processo de regulação do fluxo de materiais, deve ser elaborado para um horizonte de apenas alguns períodos (de uma ou duas semanas cada um).

Para tratar esse problema propomos um Sistema de Apoio à Decisão (SAD) que denominamos de SADEPMEP (Sistema de Apoio à Decisão para Elaboração do Programa Mestre de Produção) onde o usuário (provavelmente o gerente de produção) interage com o sistema composto por uma interface que gerencia o diálogo usuário/sistema, uma base de dados, um modelo de programação inteira (modelo I) e um algoritmo heurístico (algoritmo H).

Um objetivo que não é considerado na literatura sobre programação da produção é o da maximização do Valor Presente, muito usado na avaliação de alternativas de investimentos financeiros. Dada a inflação significativa que via de regra, acompanha a economia brasileira, acreditamos que esse critério é da maior importância em nosso país. Admitiremos que, resguardadas as restrições e condições de contorno, é melhor entregar o produto X no período j e entregar um produto Y de menor valor num período posterior a j, do que o inverso.

Os dados necessários para o funcionamento do modelo I são:

- (a) um Plano de Vendas (usualmente a Carteira de Pedidos) de curto prazo cobrindo alguns períodos (por exemplo 8 semanas); esses pedidos são agregados por produtos;
- (b) uma taxa de atratividade que espelhe o que vale em termos monetários para a empresa, ter uma entrada em caixa postergada em um período (por exemplo, a ex-taxa semanal do 'overnight', a taxa referencial de juros semanal,..);
- (c) as formas de pagamento dos clientes pelos produtos

requeridos (por exemplo, \$2000 na entrega mais \$2000 daí a 30 dias).

Com esses dados, o sistema monta a função-objetivo (maximizar o Valor Presente) e a primeira restrição de que a demanda (deduzida a partir da carteira de pedidos) deve ser atendida. Para essa restrição, o usuário especifica o estoque previsto de cada produto para o início do primeiro período considerado no horizonte de programação, e o estoque desejado para o início do primeiro período após o horizonte de programação considerado.

O período corrente, no início do qual consideramos que está sendo elaborado o PMP, denominamos de h . O horizonte de programação cobrirá HP períodos, a saber: $h+2$, $h+3$, ..., $h+HP+1$. Se o PMP elaborado especificar que x unidades do produto X deverão ser concluídas no período $h+2$, admitimos (veja seção 7.3: Sistema de Emissão de Ordens) que nos períodos h e $h+1$ serão fabricadas as peças do produto X , e no período $h+2$ serão montadas as x unidades desse produto.

A segunda restrição trata da mão-de-obra de montagem. A capacidade da mão-de-obra não pode ser ultrapassada bem como deve atingir um nível mínimo desejado pelo usuário. Quanto mais prioridade ele der a utilização da mão-de-obra, maior deverá ser o limite inferior, por ele especificado, dessa restrição. A mão-de-obra de fabricação é considerada pelo usuário quando ele interage com o Algoritmo H (seção 7.2.5) e, especifica as células a serem ativadas no período em questão.

Consideramos a possibilidade de introduzir no modelo uma restrição que levasse em conta o nível desejado de capital investido em estoque. Contudo, para o usuário obter controle total sobre o estoque de produtos finais basta que ele especifique o nível desejado de estoque dos produtos finais no início do primeiro período após o horizonte de programação, e isso é realizado pelo usuário na especificação da restrição 1. Esse fato decorre da suposição que fazemos de que se um produto estiver pronto e há pedido em carteira do mesmo, ele é imediatamente entregue para

fazer caixa. Além disso, como as peças serão produzidas em conjuntos balanceados, não há problema de estoque de peças fabricadas. Assim, só resta para ser tratado o estoque de componentes adquiridos de terceiros. Essa questão não trataremos neste trabalho cuja atenção está voltada para os itens de fabricação própria; o controle da produção apenas especificará para a área de compras, com uma antecipação de dois períodos dado o Sistema de Emissão de Ordens que adotamos na seção 7.3, a quantidade mínima necessária de cada componente fornecido por terceiros; e assim toda a definição de políticas de controle de estoques de tais itens, principalmente os itens com 'leadtime' de suprimento maior que 2 períodos, consideramos neste trabalho como sendo tratada fora do Sistema de Controle da Produção aqui proposto.

Como terceira restrição a ser tratada temos o nível desejado de utilização das células e a própria capacidade produtiva das mesmas.

Na manufatura celular semi-repetitiva, a utilização da capacidade dos equipamentos depende da alocação de carga às células, já que admitimos que existem peças que podem ser realizadas em sua célula primária ou em sua célula secundária. BUZACOTT (1983, apud KASSICIEH & SCHULTZ (1987)) sustenta que existem duas alternativas aos Sistemas de Manufatura: (a) uma é a flexibilidade de tarefa onde a tarefa pode ser realizada por pelo menos dois processos alternativos; (b) a outra é a flexibilidade de máquina onde as máquinas são re-preparadas de modo a realizar as diferentes operações requeridas por diferentes tarefas. A alternativa (a) depende de uma programação da produção eficiente, enquanto que a (b) depende principalmente de recursos tecnológicos de modo que essas re-preparações sejam rápidas para que a produtividade não caia.

Com processos alternativos (primário e secundário), levar em conta a restrição (3) do modelo acima na manufatura celular, é bem mais complicado que no caso da manufatura convencional. Assim a restrição (3) tratamos à parte.

Para levar em conta a carga das células, devemos considerar as peças e não os produtos. Pensamos em tratar a restrição (3) através de um modelo de programação inteira, porém como o número de peças é muito maior que o número de produtos, esse modelo de programação inteira teria um número exorbitante de variáveis, o que o tornaria intratável computacionalmente. Assim tal restrição tratamos por intermédio de um método heurístico que propomos e denominamos de Algoritmo H.

Obtida uma solução da interação usuário com o modelo I, é ativado o algoritmo H que partindo desta solução e da informação das células que o usuário especificar como sendo desativadas no período para manutenção, busca uma atribuição de carga às células que seja viável. O algoritmo H trata um período de cada vez.

Pode então acontecer que:

- (i) o usuário considere que a solução obtida apresenta uma baixa utilização da capacidade da célula; assim ele poderá aumentar o número de células deixadas desativadas e o algoritmo H é novamente acionado;
- (ii) a capacidade de alguma(s) célula(s) seja excedida; nesse caso ou o usuário aumenta a capacidade da(s) mesma(s), por exemplo por meio de horas extras, ou ativa alguma(s) que foi(ram) considerada(s) como desativada(s), e então o algoritmo H procede a busca de nova solução. Pode ocorrer que mesmo ativando todas as células possíveis de serem ativadas, ainda assim a capacidade não é suficiente. Nesse caso o usuário, após observar os períodos onde há sub-utilização de capacidade, deve providenciar a elaboração de um novo PMP, que será uma nova entrada para o algoritmo H, ou alterando o período de produção de alguns produtos, ou voltando a interagir com o modelo I. Esse processo terminará quando for obtido pelo menos um PMP satisfatório segundo a visão do usuário. Ao final do processo, dentre os PMPs viáveis, o usuário escolhe o que ele achar melhor, e dentre as atribuições de carga às células viáveis relativas a esse PMP, o usuário

seleciona uma.

A saída do SADEPMEP, que é uma entrada para o Sistema de Emissão de Ordens (seção 7.3), é portanto a quantidade de cada produto final a ser montada no período j ($j = h+2, \dots, h+HP+1$), a quantidade de cada peça (correspondente ao PMP do período j) cuja produção deve ser iniciada no período $j-2$ bem como em que célula cada uma delas deve ser fabricada.

A estrutura do SADEPMEP (Sistema de Apoio à Decisão para Elaboração do Programa Mestre de Produção) está colocada na figura 30.

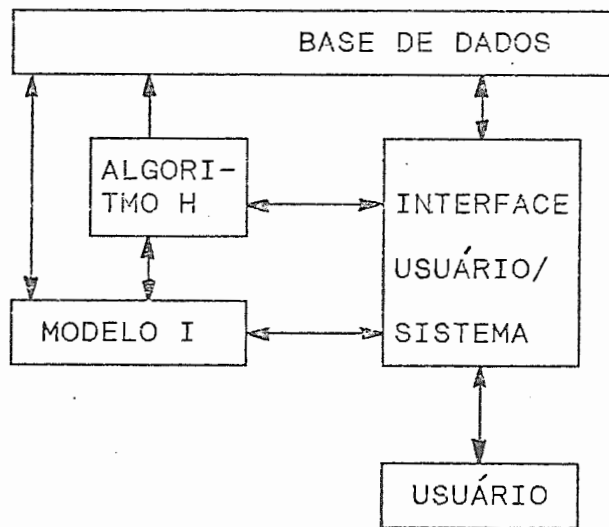


FIGURA 30: A ESTRUTURA DO SISTEMA SADEPMEP

Na seção 7.2.2 descrevemos o projeto da interface usuário/ sistema, na seção 7.2.3 descrevemos, sem detalhes, o projeto da base-de-dados, na seção 7.2.4 apresentamos o modelo I e, na seção 7.2.5 apresentamos o algoritmo H.

7.2.2 A Interface Usuário/Sistema

A interface é responsável pelo gerenciamento do diálogo usuário/sistema. No sistema que propomos, SADEPMEP (Sistema de Apoio à Decisão para Elaboração do Programa Mestre de Produção), esse diálogo é dirigido por menu.

Na figura 31, encontra-se o Menu Principal proposto para o SADEPMEP. Nesta seção damos algumas informações gerais sobre algumas opções do mesmo.

Na opção 1, descreve-se para o usuário as características do sistema.

Na atualização dos dados, além do usuário poder acrescentar pedidos dos clientes, cancelar pedidos, dar baixa em pedidos já concluídos e entregues etc, ele pode alterar o período h corrente, no início do qual ele deve elaborar um PMP (Programa Mestre de Produção), alterar o HP (número de períodos a ser considerado na elaboração do PMP, ou seja, HP é a duração do Horizonte de Programação que não deve ultrapassar 8 períodos, por razões já discutidas no capítulo IV), alterar t (a duração em semanas de cada período, usualmente uma ou duas semanas), alterar o preço e/ou a forma de pagamento dos produtos, etc.

Pela opção 3, o sistema atualiza o arquivo PAP (Pedidos Agregados por Produtos) descrito na seção 7.2.4.

Pela opção 4 do SADEPMEP, o módulo Modelo I (seção 7.2.4) e o módulo Algoritmo H (seção 7.2.5) são executados, havendo intenso acesso à Base de Dados e grande interação com o usuário através da interface.

Se o decisor considerar que as hipóteses assumidas pelos modelos do sistema são muito fortes para uma dada situação, então ele deve acionar a opção 5, e ele mesmo elaborará o PMP com base nas informações solicitadas por ele e contidas no sistema.

As hipóteses assumidas nos modelos são:

- (i) admitimos 2 períodos para a execução das peças. Uma vez que a duração do período é o usuário quem define, essa não é uma hipótese restritiva;

SISTEMA DE APOIO À DECISÃO PARA
ELABORAÇÃO DO PROGRAMA MESTRE DE PRODUÇÃO

* * * S A D E P M E P * * *

MENU PRINCIPAL

OPÇÕES:

1. Conhecer as Características do Sistema
2. Atualizar Base de Dados
3. Agregar Pedidos por Produtos
4. Elaborar um PMP com Apoio de Modelos
5. Elaborar um PMP sem Apoio de Modelos
6. Controlar Pedidos Individualmente
7. Sair do Sistema

ESCOLHA UMA OPÇÃO:

FIGURA 31: MENU PRINCIPAL PROPOSTO
PARA O DIALOGO USUÁRIO/SADEPMEP

- (ii) os pedidos são agregados por produtos, e trabalha-se com produtos e não com pedidos. Poderíamos modelar o problema considerando os pedidos individualmente, contudo para a manufatura semi-repetitiva é razoável que hajam pedidos com produtos comuns, e assim é vantajoso trabalhar a nível de produtos. Para a manufatura não-repetitiva, certamente não haveria vantagem em tratar por produtos, já que muito poucos pedidos poderiam ser agregados dessa forma;
- (iii) o preço de venda e a forma de pagamento para um dado produto é a mesma para todos os pedidos do mesmo. Apesar de ser uma suposição realista, ela é a hipótese mais restritiva. Relaxá-la, forçosamente nos levaria a tratar pedidos individualmente, com o indesejável aumento do porte do modelo I, dada a sua complexidade não-polinomial.

Assim sendo, com a opção 5, o sistema trabalharia como um MIS (Sistema de Informações Gerenciais), conforme a definição que demos na seção 3.3, ou seja, o sistema apenas coloca à disposição do usuário as informações que ele solicitar, mas toda decisão é tomada exclusivamente pelo usuário.

A opção 6 trabalha como um EDP, ou seja em atividades de manipulação de dados para que o usuário se oriente na sua tarefa de "apagar o fogo" (por exemplo, providenciar para que um pedido urgente seja executado imediatamente), quando advirem fatos especiais ou muito anormais. Essa opção permite portanto ao usuário fazer certos tipos de consultas ao sistema, bem como obter certos tipos de relatórios.

Neste trabalho nos ocupamos do projeto da opção 4 do SADEPMEP, a qual é um Sistema de Apoio à Decisão Interativo Baseado em Modelos.

7.2.3 Base de Dados

Fazemos aqui rápidas considerações a respeito da Base de Dados, como também descrevemos ou indicamos em que seção está descrito cada um dos arquivos que a compõe.

O objetivo é termos uma Base que seja o mais simples possível já que a futura implementação computacional, a qual discutimos no último capítulo, provavelmente não será feita por especialistas na área de computação.

Felizmente, a Base de Dados relacional, apesar de simples, contém várias características altamente desejáveis (veja por exemplo SUH & HINOMOTO (1989)) e, tem sido a mais usada e com perspectiva desse uso se tornar um paradigma.

Nesse tipo de Base, os registros de cada arquivo representam as linhas, enquanto que os campos representam as colunas de uma tabela.

Na figura 32, damos o nome de cada arquivo, a seção onde está descrito e a sua finalidade.

Na tabela 1, encontra-se um exemplo de arquivo EPRO (Estrutura de PRODutos). Pela tabela, o produto 1 é constituído por uma peça 1, duas peças 2, uma peça 6 e duas peças 7.

A tabela 2 mostra um exemplo de arquivo AVPMP (Alternativas Viáveis de Programas Mestre de Produção). O campo 1, PMP, especifica o número de identificação do PMP que é uma alternativa viável.

Na tabela 3 tem-se um exemplo de arquivo RAVAC (Resumo das Alternativas Viáveis de Atribuição de peças às Células). No campo ALTER, 2/1 por exemplo, significa a alternativa, de atribuição de peças às células, de número 2 referente ao PMP viável número 1. Na tabela 3, porcentagem maior que 100% significa que o usuário permitiu sobre-capacidade à célula (por exemplo, concedendo horas extras).

ARQUIVO	DESCRÇÃO NA SEÇÃO	FINALIDADE
DF	7.2.4	Fornece os Dados Financeiros (formas de pagamento, preço total e existência ou não de pedidos em carteira) para que o gerador da função-objetivo (FO) monte-a.
MOD	7.2.4	Armazena modelos a serem usados pelo gerador da FO.
VALOR	7.2.4	É um arquivo na forma de um vetor linha que armazena os valores dos parâmetros h, HP, t e TA (veja figura 39), os quais são fornecidos pelo usuário.
PAP	7.2.4	Armazena a quantidade de cada produto que deve ser concluída até o final de cada período do horizonte de programação. Os valores são acumulados de período a período e, representam a agregação dos pedidos em produtos.
EPRO	7.2.3	Armazena a Estrutura dos PROdutos.
AVPMP	7.2.3	Armazena as Alternativas Viáveis de Programas Mestre de Produção.
AVAC	7.2.3	Armazena as Alternativas Viáveis de Atribuição de peças às Células.
TMON	7.2.4	Vetor linha que armazena o tempo para montagem de uma unidade de cada produto.
RAVAC	7.2.3	Armazena o Resumo das Alternativas Viáveis de Atribuição de peças às Células.

FIGURA 32: OS ARQUIVOS DA BASE DE DADOS DO SISTEMA

TABELA 1: EXEMPLO DE ARQUIVO EPRO

PEÇAS	P R O D U T O S		
	1	2	3
1	1	0	1
2	2	1	0
3	0	0	1
4	0	2	1
5	0	0	1
6	1	0	0
7	2	1	0

TABELA 2: UM ARQUIVO AVPMP

PMP	PRODUTO	p e r i o d o s			
		h+2	h+3	h+4	h+5
1	1	2	1	0	1
1	2	0	1	0	0
1	3	0	1	2	0
2	1	1	0	0	1
2	2	1	1	0	0
2	3	0	0	1	0

TABELA 3: UM ARQUIVO RAVAC

ALTER	PERÍODO	c é l u l a s			
		1	2	3	4
1/1	7	90%	95%	105%	0%
1/1	8	90%	90%	100%	0%
1/1	9	95%	95%	105%	0%
1/1	10	80%	100%	100%	0%
2/1	7	94%	95%	105%	0%
2/1	8	90%	96%	100%	0%
2/1	9	95%	95%	105%	0%
2/1	10	83%	103%	100%	0%

A tabela 4 mostra um exemplo de arquivo AVAC (Alternativas Viáveis de Atribuição de peças às Células). O campo ALTER tem o mesmo significado que na tabela 3. No período 7, a alternativa 3/2 especifica que a peça 4 será fabricada na célula 2, e a peça 5 na célula 3.

TABELA 4: UM ARQUIVO AVAC

ALTER	PERÍODO	p e ç a s.						
		1	2	3	4	5	6	7
1/1	7	2	1	2	3	3	1	1
1/1	8	2	1	1	2	3	3	1
1/1	9	2	1	2	3	1	1	2
1/1	10	2	1	1	2	3	3	1
2/1	7	2	1	1	3	3	1	2
2/1	8	1	1	2	2	1	3	2
2/1	9	1	1	2	3	3	1	2
2/1	10	1	1	2	3	3	1	2
1/2	7	1	1	2	3	3	1	1
1/2	8	2	1	2	2	3	3	1
1/2	9	2	1	1	3	1	1	2
1/2	10	2	1	1	2	3	3	1
2/2	7	2	1	1	2	3	1	2
2/2	8	1	1	2	3	1	3	2
2/2	9	1	1	2	3	3	1	2
2/2	10	1	1	1	3	3	1	2
3/2	7	2	1	2	2	3	3	1
3/2	8	1	1	2	2	3	3	2
3/2	9	1	1	2	3	1	1	2
3/2	10	1	1	2	3	3	1	2

7.2.4 O Modelo I

Sendo HP o número de períodos definido pelo usuário, um PMP será elaborado a intervalos máximos de (HP-2) períodos, o qual cobre HP períodos sendo o primeiro dois períodos à frente do instante em que o PMP está elaborado. Isso é devido ao Sistema de Emissão de Ordens que propomos e adotamos na seção 7.3, e à acomodação da variabilidade relativamente alta na manufatura semi-repetitiva. Dessa forma há uma reprogramação para pelo menos dois períodos.

Suponha por exemplo, que HP=4 e um período equivale a uma semana ($t=1$), então se no início da semana 5 for elaborado um PMP (ou seja $h=5$), ele considerará os períodos 7, 8, 9 e 10, e assim no máximo no início da semana 7 será elaborado um novo PMP cobrindo então as semanas de 9 a 12. Pode ocorrer que num caso extremo, já ao fim da semana 5, o usuário note que já não será mais possível respeitar o PMP, assim no início da semana 6 será elaborado um novo PMP compreendendo as semanas de 8 a 11, sendo que a próxima elaboração de PMP fica prevista para o início da semana 8.

Consideramos P como sendo o número de produtos finais distintos produzidos pela empresa, sendo que modelos distintos de um mesmo produto quanto aos componentes usados, são considerados como produtos distintos para efeito de formulação.

A variável de decisão do modelo I é a seguinte:
 X_{ij} = quantidade do produto i a ser concluída e entregue no final do período j ;

onde $1 \leq i \leq P$;

$h+2 \leq j \leq h+HP+1$;

e h representa o início do período em que está sendo elaborado o PMP.

Admitimos como hipótese que todo pedido de um mesmo produto tem a mesma forma de pagamento e o mesmo preço. Se o usuário alterar um deles, essa alteração será

feita para todos os pedidos desse produto.

Após a interface acionar o módulo MODELO I, o gerador da função-objetivo entra em ação e acessa o arquivo DF (Dados Financeiros) na Base de Dados que contem as formas de pagamento e preço total de cada produto. Um exemplo encontra-se na tabela 5.

TABELA 5: UM ARQUIVO DF

Produto	Forma de Pagamento	Preço total (em unidades de Cr\$1.000.000,00)	Existem pedidos em carteira?
1	1	5	sim
2	2	8	sim
3	1	3	não
4	1	2	sim

Se a forma de pagamento for 1, entende-se que o pagamento é à vista contra a entrega; se for 2, entende-se que 50% é pago contra a entrega e 50% daí a 30 dias (ou seja daí a 2 períodos se $t=2$ semanas); se for 3, 33.33% é pago contra a entrega, 33.33% daí a 30 dias e 33.33% daí a 60 dias da entrega, e assim por diante; se a forma de pagamento for 0, significa uma forma especial, que não segue esse padrão, e assim caberá ao usuário definir a parcela da função-objetivo FO correspondente a esse produto.

O gerador da FO acessa o arquivo MOD que contem modelos para as formas de pagamento usuais. Esse arquivo está na figura 33. Nesses modelos, PT significa o preço total contido no arquivo DF, TA a taxa de atratividade por período e t é a duração do período. TA e t encontram-se no arquivo de variáveis VALOR que é um vetor linha conforme a figura 34, e i é o número de identificação do produto em questão.

FORMA DE
PAGAMENTO

MODELO

- 1 $PT * (X_{ih+2} + X_{ih+3}/(1+TA) + X_{ih+4}/(1+TA)^2 + \dots + X_{ih+HP}/(1+TA)^{HP-2} + X_{ih+HP+1}/(1+TA)^{HP-1})$
- 2 $PT/2 * (X_{ih+2} + X_{ih+3}/(1+TA) + X_{ih+4}/(1+TA)^2 + \dots + X_{ih+HP}/(1+TA)^{HP-2} + X_{ih+HP+1}/(1+TA)^{HP-1} + (1+TA)^{-4/t} * (X_{ih+2} + X_{ih+3}/(1+TA) + X_{ih+4}/(1+TA)^2 + \dots + X_{ih+HP}/(1+TA)^{HP-2} + X_{ih+HP+1}/(1+TA)^{HP-1}))$
- 3 $PT/3 * (X_{ih+2} + X_{ih+3}/(1+TA) + X_{ih+4}/(1+TA)^2 + \dots + X_{ih+HP}/(1+TA)^{HP-2} + X_{ih+HP+1}/(1+TA)^{HP-1} + (1+TA)^{-4/t} * (X_{ih+2} + X_{ih+3}/(1+TA) + X_{ih+4}/(1+TA)^2 + \dots + X_{ih+HP}/(1+TA)^{HP-2}) + X_{ih+HP+1}/(1+TA)^{HP-1} + (1+TA)^{-8/t} * (X_{ih+2} + X_{ih+3}/(1+TA) + X_{ih+4}/(1+TA)^2 + \dots + X_{ih+HP}/(1+TA)^{HP-2} + X_{ih+HP+1}/(1+TA)^{HP-1}))$
- ...

FIGURA 33: ARQUIVO MOD DE MODELOS

Parâmetro	Símbolo	Valor
Duração do período	t	1 semana
Taxa de Atratividade	TA	5%/período
Período atual	h	semana 5
Horizonte de Programação	HP	4 semanas

FIGURA 34: UM VETOR VALOR

Já o arquivo PAP (Pedidos Agregados por Produto) congrega os pedidos firmes atuais (ainda não atendidos e

nem cancelados) os quais estão agregados por produto. Esse arquivo é uma matriz. O elemento da i -ésima linha e j -ésima coluna representa a quantidade total acumulada do produto i que deve ser concluída até o final do período j .

Passamos agora a ilustrar a geração da FO através do exemplo abaixo. Os dados do mesmo serão usados também para ilustrar a geração das restrições do modelo I.

Exemplo:

$h = 5$, é o número do período corrente, sendo que no início do mesmo, está sendo elaborado o PMP atual;

$TA = 5\%/semana$, é a Taxa de Atratividade semanal;

$t = 1$ semana, é a duração de cada período;

$HP = 4$, é o número de períodos considerados no Horizonte de Programação.

Os Dados Financeiros encontram-se no arquivo DF da tabela 5.

Na tabela 6 encontra-se o arquivo PAP (Pedidos Agregados por Produtos).

TABELA 6: UM ARQUIVO PAP

Produto	P e r í o d o			
	7	8	9	10
1	3	5	5	6
2	0	0	1	1
3	0	0	0	0
4	4	5	5	7

No exemplo, até o final do período 7 deverão estar concluídos 3 unidades do produto 1 e, até o final do período 9 deverão estar prontas 5 unidades do mesmo produto. Como para todos os períodos, as necessidades do produto 3 são nulas, ele não aparecerá na modelagem.

Considerando como Data Zero do fluxo de caixa o

final do período 7 (daqui a 2 períodos do período atual $h=5$), a função-objetivo (FO) para esse exemplo fica sendo a maximização do Valor Presente da seguinte receita gerada z :

$$\begin{aligned} \max z = & 5*(X_{17} + X_{18}/(1+0.05) + X_{19}/(1+0.05)^2 + \\ & + X_{110}/(1+0.05)^3) + \\ & +4*(X_{27} + X_{28}/(1+0.05) + X_{29}/(1+0.05)^2 + \\ & + X_{210}/(1+0.05)^3 + \\ & + (1+0.05)^{-4}*(X_{27} + X_{28}/(1+0.05) + X_{29}/(1+0.05)^2 + \\ & + X_{210}/(1+0.05)^3) + \\ & +2*(X_{47} + X_{48}/(1+0.05) + X_{49}/(1+0.05)^2 + \\ & + X_{410}/(1+0.05)^3) \end{aligned}$$

Vale a pena ressaltar novamente que, com essa FO fica implícito que quando um produto ficar pronto e houver demanda, o mesmo deve ser entregue o mais rápido possível, já que estamos admitindo que os pagamentos só se iniciam com a entrega do produto. Com essa suposição, por sinal bastante realista, evitamos introduzir uma variável Y_{ij} , quantidade a ser entregue do produto i no final do período j , o que levaria a dobrar o número de variáveis de decisão e aumentar o número de restrições do problema, o que para um modelo de programação inteira (já que as variáveis são inteiras não negativas) é absolutamente indesejável, dada a intratabilidade computacional de modelos de programação inteira de porte (número significativamente grande de variáveis e/ou restrições).

As seguintes restrições deverão ser satisfeitas:

RESTRIÇÃO (1): Restrição relacionada com as necessidades dos clientes colocadas no arquivo PAP.

O usuário deverá especificar o estoque previsto para o início do período $h+2$ (no exemplo que está sendo tratado $h+2=7$) e, o estoque desejado para o início do primeiro período após o Horizonte de Programação, ou seja, período $h+HP+2$ (no exemplo, $h+HP+2=11$).

Seja E_{ij} o estoque do produto i no início do período j .

e VA_{ij} o Valor Acumulado contido no arquivo PAP, o qual representa, a quantidade de unidades do produto i que deverão estar concluídas até o final do período j .

Assim, a restrição (1) fica sendo:

para $i= 1, 2, \dots, P$;

$j= h+2, h+3, \dots, h+HP+1$;

e

X_{ij} variáveis inteiras não negativas:

$$E_{ih+2} + X_{ih+2} \geq VA_{ih+2}$$

$$E_{ih+2} + X_{ih+2} + X_{ih+3} \geq VA_{ih+3}$$

....

$$E_{ih+2} + X_{ih+2} + X_{ih+3} + \dots + X_{ih+HP} \geq VA_{ih+HP}$$

$$E_{ih+2} + X_{ih+2} + X_{ih+3} + \dots + X_{ih+HP+1} = VA_{ih+HP+1} + E_{ih+HP+2}$$

Exemplo:

com os dados do exemplo que está sendo tratado nesta seção, e mais os seguintes dados fornecidos pelo usuário:

produto	estoque previsto p/ o início do período $h+2=7$	estoque desejado p/ o início do período $h+HP+2=11$
1	0	0
2	0	1

$$\begin{array}{ccc} 3 & 1 & 1 \\ 4 & 0 & 0 \end{array}$$

a restrição (1) fica sendo:

$$X_{17} \geq 3$$

$$X_{17} + X_{18} \geq 5$$

$$X_{17} + X_{18} + X_{19} \geq 5$$

$$X_{17} + X_{18} + X_{19} + X_{10} = 6$$

$$X_{27} \geq 0$$

$$X_{27} + X_{28} \geq 0$$

$$X_{27} + X_{28} + X_{29} \geq 1$$

$$X_{27} + X_{28} + X_{29} + X_{20} = 1+1$$

$$X_{47} \geq 4$$

$$X_{47} + X_{48} \geq 5$$

$$X_{47} + X_{48} + X_{49} \geq 5$$

$$X_{47} + X_{48} + X_{49} + X_{40} = 7$$

RESTRIÇÃO (2): Carga da mão-de-obra de montagem

O tempo t_i (em homens-horas) requerido de mão de obra para montar uma unidade do produto i encontra-se no arquivo TMON (Tempo de Montagem).

T_j (em homens-horas) a capacidade disponível da mão-de-obra de montagem no período j , e D_j o nível

mínimo, desejado pelo usuário, de utilização dessa mão-de-obra, devem ser especificados pelo usuário.

Com esses dados, o conjunto de restrições (2) é o seguinte:

$$\sum_{i=1}^P t_{ij} X_{ij} \leq T_j, \text{ para } j= h+2, h+3, \dots, h+HP+1$$

$$\sum_{i=1}^P t_{ij} X_{ij} \geq D_j, \text{ para } j= h+2, h+3, \dots, h+HP+1$$

Com os dados do exemplo que está sendo tratado, do arquivo TMON abaixo e os dados T_j e D_j fornecidos a seguir pelo usuário,

TMON =	[50	30	85	90]
período	7	8	9	10
T_j	800	800	800	400
D_j	400	400	400	0

as restrições do tipo (2) ficam sendo;

$$50 * X_{17} + 30 * X_{27} + 90 * X_{47} \leq 800$$

$$50 * X_{17} + 30 * X_{27} + 90 * X_{47} \geq 400$$

$$50 * X_{18} + 30 * X_{28} + 90 * X_{48} \leq 800$$

$$50 * X_{18} + 30 * X_{28} + 90 * X_{48} \geq 400$$

$$50 * X_{19} + 30 * X_{29} + 90 * X_{49} \leq 800$$

$$50 * X_{19} + 30 * X_{29} + 90 * X_{49} \geq 400$$

$$50 * X_{110} + 30 * X_{210} + 90 * X_{410} \leq 400$$

Como as variáveis são inteiras não negativas e $D_{10}=0$, a última restrição do tipo (2) pode ser suprimida.

7.2.5 Algoritmo H

Dado o PMP provisório obtido pela interação usuário/modelo I/base de dados, para se levar em conta as restrições de capacidade das células, é necessário fazer uma alocação de peças às mesmas. O algoritmo H trata um período por vez, e uma solução possível é aquela que tanto satisfaz as disponibilidades de capacidade das células, quanto o nível mínimo de utilização das mesmas, desejado pelo usuário.

Observação - a capacidade da célula pode ser quantificada pela equação que propomos no (passo 4.4), como um valor geralmente entre 0 e 1. Valores maiores que 1 (100%) dependem de decisões do usuário em conceder sobre-capacidade (horas extras, turnos extras,...).

(Passo 1)

$j := h+2$

(Passo 2)

Se $j \leq h+HP+1$ vá para o (Passo 3)

caso contrário vá para o (Passo 6)

(h =período atual no início do qual está sendo feita a elaboração do PMP para os períodos $h+2, h+3, \dots, h+HP+1$;

HP =número de períodos considerados no Horizonte de Programação)

(Passo 3)

Considerando o PMP até então obtido, calcule o número de peças de cada tipo a terem sua produção iniciada no período $j-2$, pela seguinte equação:

$$N_{pj-2} = \sum_{i=1}^P Q_{pi} * X_{ij}; \quad \text{para } p= 1, 2, \dots, N$$

onde

N_{pj-2} = número de peças (tamanho do lote) do tipo p, a terem sua produção iniciada no período j;

Q_{pi} = quantidade de peças p usadas na montagem de uma unidade do produto i. Esse dado encontra-se no arquivo EPRO (Estrutura de Produtos);

X_{ij} = número de unidades do produto i a ser produzido (montado) no período j;

P = número total de produtos distintos;

N = número total de peças distintas;

(Passo 4)

Aloque a carga às células através do seguinte algoritmo:

Sejam os conjuntos

PUC = conjunto de Peças que podem ser fabricadas numa Única Célula, ou seja peças que só têm célula primária;

PUA = conjunto de Peças que têm célula primária e secundária, mas apenas Uma delas está Ativada no período j;

PNA = conjunto de Peças ainda Não Atribuídas;

CKD = conjunto de células ativadas e ainda com capacidade disponível, ou seja $k_{cj} > 0$, o qual definimos no (Passo 4.4);

Observação - Neste texto, fazer a atribuição de uma peça a uma célula significa: especificar que célula fabricará a peça a partir do período j-2; retirar essa peça do conjunto PNA; recalcular, conforme equação do (Passo 4.4), a capacidade disponível k_{cj-2} da célula em questão; e reordenar as Listas A e B definidas nos Passos (4.6) e (4.7) respectivamente.

(Passo 4.1)

Faça PNA como sendo igual ao conjunto de todas as peças; Peças do conjunto PUC, são atribuídas à sua célula primária. Células nessa condição deverão ser ativadas no período j-2;

Se com essas atribuições a capacidade dessas células

for satisfeita, vá para o (Passo 4.2), caso contrário: é viável aumentar a capacidade das células com capacidade não satisfeita? Se sim, esse aumento é efetivado e vá para o (Passo 4.2), caso contrário:

é mostrado ao usuário o PMP atual, e é solicitado que ele escolha entre acessar a opção 4 do SADEPMEP, ou seja, que ele interaja novamente com o Modelo I para obter novo PMP, ou acessar a opção 5 onde ele mesmo elabora um novo PMP;

(Passo 4.2)

As demais células são exibidas ao usuário para que ele selecione aquelas que serão ativadas no período j;

(Passo 4.3)

As peças do conjunto PUA são atribuídas à sua célula ativada;

Se a capacidade dessas células for satisfeita, faça a atribuição e vá para o (Passo 4.4), caso contrário, para as peças cuja célula teve a capacidade esgotada, antes de atribuí-las é solicitado ao usuário que ative a outra célula, se isso for feito faça a atribuição e vá para o (Passo 4.4); se não for possível, é viável aumentar a capacidade das células com capacidade não satisfeita? Se sim, esse aumento é efetivado e vá para o (Passo 4.2), caso contrário:

é solicitado que ele escolha entre acessar a opção 4 do SADEPMEP, ou seja que ele interaja novamente com o Modelo I para obter novo PMP, ou acessar a opção 5 onde ele mesmo elabora um novo PMP;

(Passo 4.4)

Calcule para as células ativadas qual a sua capacidade disponível em termos de porcentagem através da seguinte equação:

$$K_{Cj-2} = 1 + K_a - f_p - \sum_{p=1}^P Y_{Cj-2p} * N_{pj-2} / D_{Cj-2p}$$

onde

K_{cj-2} = capacidade disponível, após as atribuições já feitas, da célula c no período $j-2$;

i = representa a capacidade da célula se nada a ela foi ainda atribuído, ou seja 100% de capacidade;

K_a = capacidade adicional caso o usuário aloque horas extras para a célula c ;

f_p = fator de preparação. É um número real entre 0 e 1, que representa a perda em termos de porcentagem da capacidade da célula, devido aos tempos de preparação das máquinas. Se existirem dados históricos que possibilitem o cálculo de uma amostra da perda em função dos tipos de peças atribuídas à célula em questão, então f_p pode ser estimado através de um modelo de regressão. Se não for esse o caso, então nesse momento deve ser exibido ao usuário as peças que já foram atribuídas a essa célula, de modo que o usuário estime f_p de forma subjetiva através de sua experiência;

Y_{cj-2p} = 1, se o lote da peça p já foi atribuído para ser fabricado na célula c no período $j-2$,
= 0, caso não tenha sido ainda atribuído;

D_{cj-2p} = número de unidades da peça p que poderiam ser produzidas na célula c no período $j-2$, caso toda a capacidade dessa célula fosse usada para produzir somente peça p ;

Suponha que $D_{cj-2p}=1000$ e $N_{pj-2}=100$, ou seja se a célula c só fabricasse a peça p no período $j-2$, seria possível produzir 1000 unidades e, se for alocada a ela 100 unidades da peça p , então $100/1000= 10\%$ da capacidade da célula c fica comprometida com a peça p ;

(Passo 4.5)

Para cada uma das peças ainda pertencentes ao conjunto PNA (note que todas elas possuem célula primária e secundária ativadas no período $j-2$), calcule a diferença entre o tempo para produzi-la na sua célula secundária e o tempo para produzi-la na sua célula primária, ou seja:

$$d_p = t_{ps} - t_{pp}$$

note que pela definição de célula secundária e primária, o tempo para produzir o lote N_{pj-2} na célula secundária da peça p , é maior que o tempo para fabricar tal lote na célula primária da peça p , ou seja $t_{ps} \geq t_{pp}$;

(Passo 4.6)

ordene esse conjunto de peças segundo a ordem decrescente de d_p . Chamamos essa lista de Lista A;

(Passo 4.7)

as células utilizadas por essas peças, ordene na ordem decrescente do índice K_{cj-2} conforme a equação do (Passo 4.4). Chamamos essa lista de Lista B;

(Passo 4.8)

A atribuição será feita com base na seguinte idéia: quanto mais uma peça estiver no início da Lista A, e quanto mais no início da Lista B estiver sua célula primária, com maior razão devemos atribuir tal peça à sua célula primária.

Assim sendo, propomos a seguinte heurística para continuar a atribuição:

(Passo 4.8.1)

Obtenha para cada peça do conjunto PNA, o 'ranking' multiplicativo que é obtido ao multiplicar a posição ('ranking') da peça na Lista A, pela posição da sua célula primária na lista B. Por exemplo, peça 5 ocupa a primeira posição da Lista A, e a sua célula primária é a terceira na Lista B, então o 'ranking' multiplicativo da peça 5 é $1 * 3 = 3$;

(Passo 4.8.2)

Se o conjunto PNA estiver vazio, então vá para o (Passo 5);

Se não estiver então :

(Passo 4.8.2.1)

determine a peça desse conjunto com o menor 'ranking' multiplicativo. Ela passa a ser a peça em questão;

(Passo 4.8.2.2)

Considere a célula em questão como sendo a célula primária da peça em questão;

(Passo 4.8.2.3)

Se a célula em questão estiver no conjunto CKD (células ativadas com $K_{Cj-2} > 0$), então recalcule o índice K_{Cj-2} dessa célula considerando a atribuição dessa peça a ela.

Se o novo K_{Cj-2} for > 0 , faça tal atribuição e volte para o (Passo 4.8.2);

Se o novo K_{Cj-2} for $= 0$, faça tal atribuição, retire tal célula do conjunto CKD, e volte para o (Passo 4.8.2);

Se o novo K_{Cj-2} for < 0 , então

Se a célula em questão for a célula primária, então vá para o início deste (Passo 4.8.2.3) sendo que a célula secundária passa a ser a célula em questão;

Se não for,

ocorreu da peça em questão não poder ser atribuída diretamente;

considere a célula em questão como sendo a célula primária e vá para o próximo passo;

(Passo 4.8.2.3.1)

Forme o conjunto das peças já atribuídas à célula em questão e que têm tanto sua célula primária quanto a secundária ativadas no período $j-2$. Coloque as peças

desse conjunto, na ordem em que foram atribuídas à célula em questão;

Começando pela última peça desse conjunto, depois se necessário a penúltima, e depois a antepenúltima e assim por diante, verifique se essa peça não pode ser atribuída à uma outra célula com capacidade disponível para recebê-la e ao mesmo tempo liberar capacidade para tratar a peça em questão,

em caso positivo: essas duas atribuições são feitas e volte para o (Passo 4.8.2);

em caso negativo:

se a célula em questão for a célula primária da peça em questão, então vá para o início deste (Passo 4.8.2.3.1) sendo que a célula secundária passa a ser a célula em questão;

Se não for, então

é solicitado ao usuário que ele ative alguma célula que foi colocada por ele como desativada no período, e após a identificação de tal célula deve ser iniciado novamente os procedimentos, e assim vá para o (Passo 1);

Se o usuário colocar que não há célula que possa ser ativada, então o sistema fornecerá o último PMP que foi obtido na última interação usuário/modelo I, e então o usuário deverá escolher entre interagir novamente com o modelo I para conseguir outro PMP (opção 4 do SADEPMEP), ou ele mesmo

alterar diretamente o PMP (opção 5 do SADEPMEP);

(Passo 5)

$j := j+1$ e vá para o (Passo 2)

(Passo 6)

Foi encontrado um PMP viável (armazene-o no arquivo AVPMP - Alternativas Viáveis de Programas Mestre de Produção) e/ou foi encontrada uma atribuição viável (armazene-a no arquivo AVAC - Alternativas Viáveis de Atribuição de peças às células e, no arquivo RAVAC (Resumo das Alternativas Viáveis de Atribuição de peças às Células);

(Passo 7)

Exibir ao usuário a última alternativa viável encontrada, mostrando as capacidades utilizadas das células. Por exemplo:

(célula 1): 90%

(célula 2): 0% (foi considerada desativada)

(célula 1): 105% (hora extra)

(célula 1): 95%

De posse dessas informações, o usuário decide se está satisfeito e então vai para o (Passo 8), ou se pretende ativar ou desativar alguma célula indo então para o (Passo 1), ou se pretende elaborar um novo PMP indo para o módulo Modelo I;

(Passo 8)

Exibir para o usuário as alternativas armazenadas no arquivo AVPMP, e cada PMP com as alternativas de atribuição às células (arquivos AVAC e RAVAC), e então o usuário escolhe o PMP como também a alternativa de atribuição de carga às células, referente a esse PMP, que julgar melhor;

(Passo 9)

Imprimir a escolha do (Passo 8) e enviá-la para o setor de Emissão de Ordens que deverá respeitar a indicação de em qual célula cada peça deverá ser produzida.

7.3 SISTEMA DE EMISSÃO DE ORDENS

Introduzimos modificações no sistema PBC de tal forma que o mesmo, que é apropriado para implantação na manufatura repetitiva (todos os itens são produzidos em todos os períodos e com demanda significativa), possa ser empregado na manufatura semi-repetitiva.

O sistema de emissão de ordens que concebemos e que denominamos de PBC Modificado para Fabricação, consiste dos seguintes procedimentos:

- (i) são acessados os resultados do módulo anterior, ou seja, o PMP para daqui a dois períodos (período j), o tamanho do lote das peças que devem ser fabricadas a partir do período $j-2$, bem como em que célula cada uma delas deverá ser produzida;

* emissão de Ordem de Fabricação

período anterior	período de fabricação P1	período de fabricação P2	montagem p/ obtenção do PMP	
*	período anterior	período de fabricação P1	período de fabricação P2	montagem p/ obtenção do PMP
		*		

FIGURA 35: PBC MODIFICADO (PERÍODO DE FABRICAÇÃO DUPLO)

- (ii) é suposto que são dois os períodos de fabricação e não um como no PBC (figura 35) para ser possível contornar:

(a) problemas de precisão menor dos dados (por exemplo tempo de preparação e tempo de processamento) na manufatura semi-repetitiva do que na repetitiva;

(b) o problema de termos na manufatura semi-repetitiva

- discrepâncias de 'leadtimes' de produção entre os itens maiores do que ocorre na manufatura repetitiva. Nesta todos os itens passam por todas as máquinas seguindo o mesmo roteiro de fabricação, enquanto que na manufatura celular semi-repetitiva, uma peça pode passar por todas as máquinas da célula enquanto que outra peça pode passar por somente uma das máquinas;
- (iii) esse período duplo de fabricação corresponde a um estágio produtivo situado entre estoques de matérias-primas (na forma de forjados, fundidos, barras de aço etc) e de itens acabados para a montagem (figura 36).

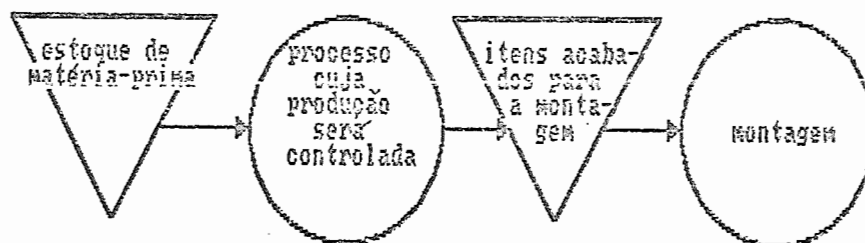


FIGURA 36: POSIÇÃO DO PROCESSO CUJA PRODUÇÃO SERÁ CONTROLADA

Tipicamente, esse processo cuja produção desejamos controlar, é a usinagem ou a usinagem mais o tratamento térmico.

Nosso sistema poderia ser estendido para abranger outros processos anteriores ao estoque de matéria-prima do processo que antecede à montagem, inclusive abrangendo o suprimento de materiais por fornecedores externos. Neste trabalho não faremos a expansão por três motivos:

(a) a usinagem é via de regra, o processo que mais exige atenção do controle da produção, uma vez que,

devido ao grande número de tarefas e recursos envolvidos, apresenta alta complexidade e dificuldade;

(b) a Tese já foi delineada com um escopo bastante amplo;

(c) antes da expansão do sistema, pode-se controlar os itens nos estágios anteriores ao estoque de matérias-primas da figura 36, através de um sistema reativo, por exemplo o uso do Sistema de Estoque Mínimo para os itens mais importantes, e o Sistema de Renovação Periódica para os demais itens. Detalhes sobre esse último sistema podem ser encontrados em BUFFA & MILLER (1979).

Na realidade o PBC Modificado permite o uso de períodos de tamanhos diferentes entre si, ao contrário do PBC onde todos os períodos são do mesmo tamanho. Por exemplo suponha que todos os itens possam ser montados em uma semana, e todos os itens tenham um 'leadtime' de usinagem de uma semana, exceto um cujo 'leadtime' seja de duas semanas. Usando o PBC, o período de fabricação tem que ser igual a duas semanas e como todos os períodos têm que ser iguais, o período de montagem será também de duas semanas. Com isso o ciclo para esses dois estágios já chega a 4 semanas. Empregando o PBC modificado, o ciclo fica em 3 semanas (duas para fabricação e uma para montagem).

Para que o PBC Modificado possa funcionar, introduzimos um esquema de priorização de peças (descrito logo abaixo no item (iv)). Esse esquema, afortunadamente auxilia também a resolver outros problemas que surgem na manufatura semi-repetitiva que apontamos no item (ii) acima; inclusive, se os problemas aí apontados forem muito pronunciados, poder-se-ia trabalhar com período de fabricação triplo ou quádruplo conforme as necessidades, que o PBC Modificado é capaz de absorver;

(iv) no momento da Emissão de Ordens são formados: um conjunto de peças expressas E, um conjunto de peças gargalo G e um conjunto N de peças normais. Esse é um

conceito novo que vai contribuir para o sistema de controle de produção adquirir uma "variedade" capaz de responder inclusive a imprevistos na produção.

O conjunto E será formado pelas peças que não foram completadas no período anterior (seja qual for o motivo: já era esperado que ela não seria completada, greve, 'black-out', quebra de máquina, absenteísmo etc).

G será formado pelas peças relativas ao ciclo que se inicia, e que possuem um 'leadtime' de produção maior que um período simples.

N é o conjunto das demais peças.

Dessa forma as datas devidas são tratadas por apenas três "valores" E, G e N, o que fica muito mais simples (e mais eficaz) que o tratamento dado pelo sistema MRP às datas devidas;

- (v) ao final de cada período (por exemplo, na sexta-feira) o supervisor informa as peças que (não) foram concluídas nesse período. De posse dessa informação o Departamento de Controle da Produção (no sábado por exemplo), emite as relações E, G e N para o próximo período (a se iniciar na próxima segunda-feira). Envia também ao almoxarifado as entregas de matérias-primas às células, por exemplo se as peças E representam 20% da carga e as G representam 40%, como as matérias-primas das peças E já estão nas células, só seriam colocadas as das peças G na terça-feira pela manhã e as das N na quinta-feira pela manhã. Por simplicidade de controle, é conveniente que os dispositivos de fixação e as ferramentas fiquem, na medida do possível, guardados nas próprias células.

Notemos que a Emissão de Ordens recebe um PMP viável para carregamento em um único período, e o PBC Modificado "estica" esse carregamento para uma amplitude de dois períodos. Assim num dado período qualquer estaremos trabalhando com peças relativas a mais que um PMP (geralmente dois e no máximo três). Esse fato é

perfeitamente acomodado pela flexibilidade que o esquema de priorização de peças fornece.

Naturalmente, se alguma(s) peça(s) a ser(em) produzida(s) na célula c com início de fabricação no período j-2, não for(em) terminada(s) nesse período, então se não estiver prevista a ativação da célula c no período j-1, devemos providenciar para que a célula c continue ativada até a conclusão de tal(is) peça(s).

A Emissão de Ordens apesar de ser a etapa mais simples do Controle da Produção, é a mais importante, talvez pela própria posição central que ocupa, entre o PMP e a Programação de Operações. Aliás isso é regra, e não exceção, que pode ser observada em atividades das mais dispares: na sociedade (a política é o centro de convergência das divergências sociais), na política (os políticos de centro são os fiéis da balança), ..., e na própria empresa (figura 37).

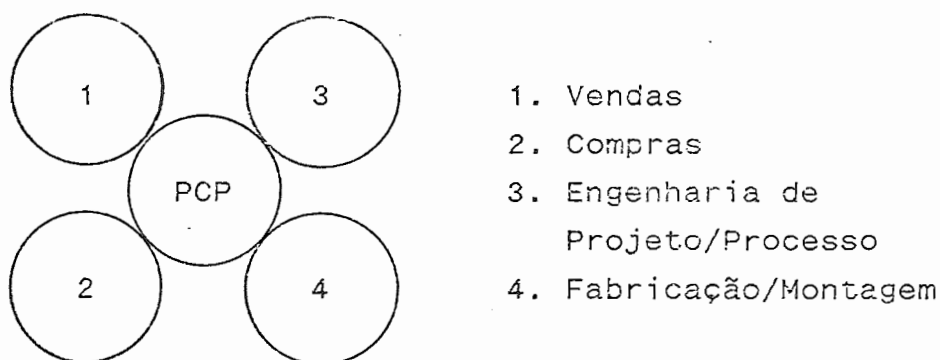


FIGURA 37: A POSIÇÃO "CENTRAL" DO PLANEJAMENTO E CONTROLE DA PRODUÇÃO (PCP)

7.4 SISTEMA DE PROGRAMAÇÃO DE OPERAÇÕES

7.4.1 Introdução

Para resolver o problema de programação de operações numa célula, no caso do padrão de fluxo não ser 'flow-shop', não nos restam dúvidas de que a saída é encontrarmos algum método heurístico que forneça uma boa solução e de uma maneira rápida. Além disso, deverá caber ao supervisor de produção da célula, a escolha da direção de busca a ser feita pelo sistema de 'scheduling', tornando assim tal sistema uma Ferramenta de Apoio à Decisão Interativa baseada em modelos heurísticos.

Notemos que mesmo no caso do tradicional 'flow-shop', se o número de máquinas for superior a três, a literatura recomenda o emprego de métodos heurísticos (DANNENBRING, 1977; TURNER & BOOTH, 1987), e TURNER & BOOTH (1987) apontam que até 1987 o melhor algoritmo era o de NAWAZ et alii (1983), que é superior, por exemplo, à conhecida heurística de CAMPBELL et alii (1970). Para duas máquinas, o famoso algoritmo de JOHNSON (1954) fornece a solução ótima com rapidez. Quanto ao problema de três máquinas, o algoritmo do tipo 'branch-and-bound' proposto por POTTS (1980) fornece a melhor solução permutacional (se a tarefa J_i na primeira máquina precede a J_j , então isso ocorrerá com todas as demais operações nas demais $(m - 1)$ máquinas) e quase sempre num tempo não proibitivo. Em todos esses trabalhos o critério de desempenho empregado é a minimização do 'makespan'.

Muito recentemente, OSMAN & POTTS (1989) propuseram o emprego do método 'simulated annealing' para a programação de operações permutacional no 'flow-shop'.

'Simulated Annealing' é uma técnica recente, criada por KIRKPATRICK et alii (1983), e tem despertado muita atenção dado o seu potencial em tratar problemas combinatoriais de natureza das mais diversas. Resumidamente,

é um método heurístico melhorativo do tipo aleatório. A partir de uma solução inicial, dentro de certas probabilidades serão aceitas soluções que melhorem o valor da função-objetivo.

Consideramos a possibilidade do emprego da técnica 'simulated annealing' em nosso problema, o qual se enquadra no problema do 'job-shop' geral. Decidimos não utilizá-la pela constatação de que para o problema de programação de operações com o padrão de fluxo 'job-shop', a obtenção de uma solução (configuração) inicial ruim é tão trabalhosa quanto a obtenção de uma solução inicial boa, e pela análise das seguintes informações contidas em LAARHOVEN & AARTS (1989):

- (a) a solução obtida por 'Simulated Annealing' não depende da configuração inicial;
- (b) algoritmos 'Simulated Annealing' são mais vagarosos que algoritmos melhorativos iterativos (algoritmos de Busca Local);
- (c) algoritmos 'Simulated Annealing' possuem uma aplicabilidade bastante geral, são robustos, flexíveis, aproximados (isto é heurísticos), capazes de obter boas soluções e geralmente são fáceis de implantar computacionalmente; contudo o tempo computacional pode ser longo e em vários casos algoritmos criados exclusivamente para um problema específico são disponíveis e mais rápidos; para aquelas áreas de problemas onde não existem algoritmos "sob medida" ou se existem e não são satisfatórios, 'Simulated Annealing' é uma poderosa ferramenta de otimização.

Métodos heurísticos de múltiplos estágios (ou fases) são métodos que a cada estágio tentam obter uma solução melhor, partindo da solução obtida no estágio anterior. Os mais usuais são os de dois estágios.

Para o nosso problema, propomos o emprego de um método heurístico de dois estágios. No primeiro estágio propomos uma modificação do método heurístico construtivo apresentado em BAKER (1974), e a utilizamos como base de uma ferramenta de apoio à decisão onde as regras de

prioridade a serem usadas são determinadas com a interação usuário/sistema. Um método heurístico do tipo construtivo é aquele em que a programação vai sendo construída e as decisões que vão sendo tomadas para isso são irreversíveis. A solução então obtida, propomos no segundo estágio, a aplicação de um método heurístico melhorativo (a partir de uma solução inicial ele tenta obter uma melhor) através de um dos dois algoritmos (A2E1 e A2E2) que propomos. Esses dois algoritmos, do tipo 'branch-and-bound', diferem na estratégia de busca adotada e no critério de rejeição de nós adotado. As Figuras 38 e 39 ilustram tais estratégias.

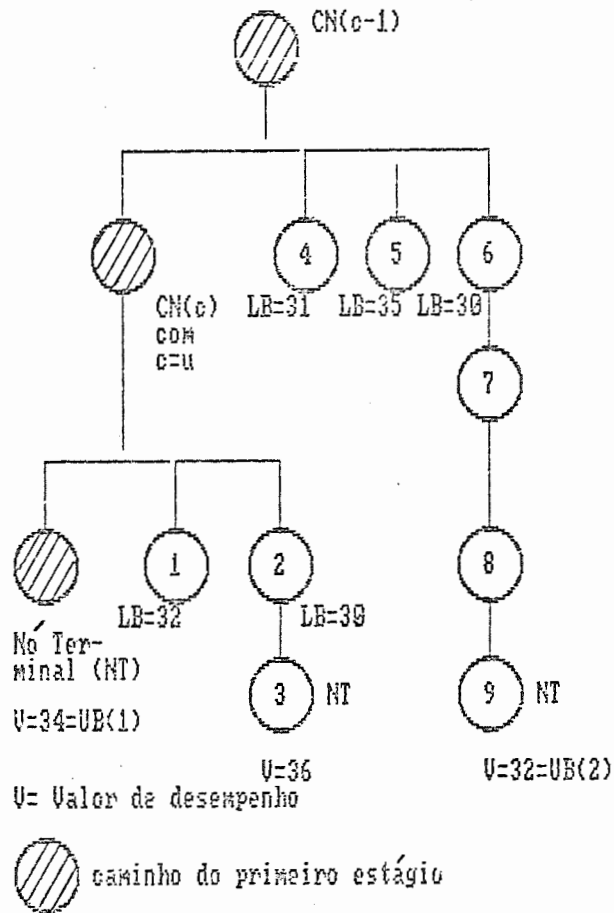


FIGURA 38: ESTRATÉGIA DE BUSCA ADOTADA NO ALGORITMO A2E1

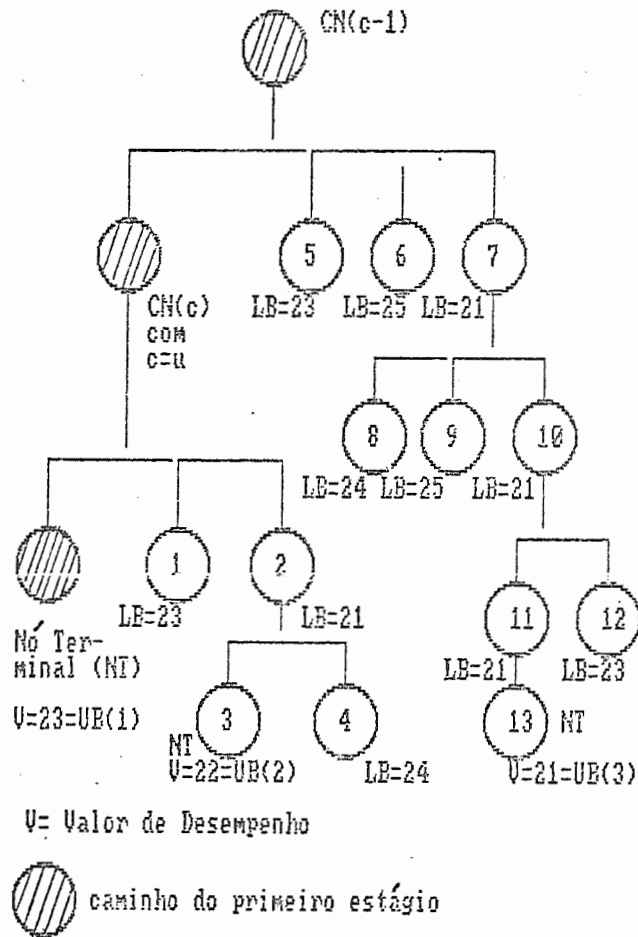


FIGURA 39: ESTRATÉGIA DE BUSCA ADOTADA NO ALGORITMO A2E2

Nestas figuras, $CN(c)$ significa o conflito de número c detectado pelo algoritmo construtivo do primeiro estágio. Na primeira vez que ocorrer um empate no valor da data de início mais cedo (que é definida na próxima seção), ou seja duas ou mais operações estão conflitando no que diz respeito a qual será a próxima a ser colocada na programação, tal conflito denotamos por $CN(1)$. Os conflitos subsequentes denotamos por $CN(2)$, ..., $CN(c)$, ..., $CN(u)$ sendo este o

último conflito detectado.

A estratégia de busca do Algoritmo de Segundo Estágio número 1 (A2E1) é a seguinte (figura 38): o valor de desempenho da solução correspondente ao nó terminal do caminho percorrido no primeiro estágio, representa o limitante superior corrente (UB_1); voltando ao último conflito, o $CN(u)$, calcula-se o limitante inferior (LB) de todas as alternativas pendentes exceto para o nó do caminho do primeiro estágio; ao nó que corresponde o menor LB, aplica-se o critério de rejeição: $LB > UB$?; se o nó for aceito, é feita a ramificação a partir do mesmo, conforme o próprio algoritmo do primeiro estágio detalhado na próxima seção. Estes procedimentos são repetidos seqüencialmente para os nós conflitos $CN(u-1), \dots, CN(c), CN(c-1), \dots, CN(1)$, ou até que se esgote o tempo disponível para a busca do segundo estágio, o qual é alocado pelo usuário.

Já a estratégia de busca do Algoritmo de Segundo Estágio número 2 (A2E2) ilustrada na figura 39, é a estratégia 'best-bound first' (características da mesma podem ser encontradas em IBARAKI (1976)), ou seja o nó ativo que detém o menor limitante inferior é ramificado. Contudo, no nosso caso esta ramificação só é realizada se forem satisfeitas as seguintes condições: o nó a ser ramificado não seja nó do caminho do primeiro estágio, e o nó satisfaz o critério de rejeição que propomos na próxima seção. O primeiro conflito a ser tratado e a partir do qual é realizada esta ramificação, é o $CN(u)$. Após este o $CN(u-1)$, e assim por diante até o $CN(1)$. Ao terminar a ramificação proveniente do conflito $CN(c)$, vamos para o $CN(c-1)$ apenas se não foi esgotado o tempo disponível para a busca do segundo estágio, o qual é alocado pelo usuário.

Na seção 7.4.2 enunciamos o algoritmo de dois estágios PROCEL, que concebemos para a programação de operações em células de manufatura.

7.4.2 PROCEL

O algoritmo que propomos para a programação de operações em células na manufatura semi-repetitiva denominamos de PROCEL. Ele faz parte de todo um sistema de controle da produção que concebemos e que abrange todo o processo decisório relativo à programação, tanto a nível de produto (seção 7.2), de componente (seção 7.3) e de operação (seção 7.4).

Tendo-se o conjunto de peças E, G e N (conforme descrito na seção 7.3), o algoritmo PROCEL primeiramente programa as peças do conjunto E, e após ser aplicado o algoritmo do segundo estágio, é congelada a programação então obtida. Isso significa que para programar então as peças do conjunto G, a escala de tempo não é zero, e varia para cada máquina: inicia na data de "liberação" (desocupação) de cada máquina pela programação das peças E. Aplica-se os algoritmos do estágio 1 e do estágio 2 às peças G, e o resultado obtido é novamente congelado. Finalmente, programa-se as peças N a partir dos instantes em que as máquinas ficam "liberadas" na programação até então congelada.

É dada a opção ao usuário de escolher o critério de desempenho entre os seguintes: (a) minimização do tempo médio de permanência; e (b) minimização do tempo total de conclusão de todo conjunto de peças já em questão (conjunto E; ou conjunto E e G; ou todas as peças).

Se o usuário sentir que o número de peças no período é bastante grande e ele pretende descongestionar rapidamente o sistema, aliviando as áreas de estocagem dentro da célula, ele deve escolher o critério (a); se o objetivo for terminar o mais rápido possível toda a programação, então o usuário deve escolher o critério (b). Isso serve como norte para o usuário decidir enquanto ele

não adquirir suficiente experiência com o sistema, de forma a perceber as diferenças na programação que surgirão entre a escolha de um ou outro critério.

Se o critério (a) for escolhido, o PROCEL usa como regra de prioridade a SPT (e em caso de empate a aleatória). Se o critério (b) for escolhido, o PROCEL usa como regra de prioridade a MWKR (e em caso de empate a aleatória). Em ambos os casos, o PROCEL solicita que o usuário se decida entre o uso do Algoritmo de Segundo Estágio A2E1 ou o A2E2 e que o usuário estabeleça o tempo que ele estará disposto a esperar por uma busca no segundo estágio; esse tempo denotamos por TAB (Tempo Admissível para a Busca).

Lembremos que a SPT seleciona uma operação que utiliza a máquina em questão o menor tempo possível e assim privilegia a diminuição do tempo médio de permanência. Já a MWKR ('Most Work Remaining') escolhe a operação da tarefa que mais tem processamento a ser realizado, e a sua adoção é baseada no fato de que para concluir logo a programação, não é conveniente deixar muito para trás operações de alguma tarefa em particular.

O algoritmo de segundo estágio (A2E1 ou A2E2) será ativado três vezes: uma vez para o conjunto das peças E, outra para as peças G e outra para as N. Assim será alocado pelo computador um tempo de pesquisa, para o algoritmo de Busca Local (A2E1 ou A2E2) proporcional ao número de peças em cada conjunto, ou seja

$$TABE = TAB * |E| / (|E| + |G| + |N|)$$

$$TABG = TAB * |G| / (|E| + |G| + |N|)$$

$$TABN = TAB * |N| / (|E| + |G| + |N|)$$

onde

TABE, TABG e TABN são os Tempos Admissíveis de Busca para as peças E, G e N, respectivamente,

|E|, |G| e |N| são as cardinalidades dos conjuntos E, G e N, respectivamente.

Genericamente definimos TABC como sendo igual a TABE, ou a TABG ou a TABN se o conjunto de peças em questão for o E, o G ou o N, respectivamente.

No nosso problema, o algoritmo construtivo usado



no primeiro estágio do algoritmo PROCEL determina uma boa solução. Assim, parece bastante razoável que se procure de forma rápida se em sua vizinhança existe uma solução melhor, ou seja, se crie para o segundo estágio do algoritmo PROCEL um algoritmo de Busca Local. Tanto A2E1 como A2E2 são algoritmos de Busca Local baseados no método 'branch-and-bound'. SPACHIS & KING (1979) mostraram a viabilidade de se atacar o problema de programação de operações no 'job-shop' através de algoritmo de Busca Local onde, com base no método 'branch-and-bound', são geradas as vizinhanças.

Como limitante superior (UB= 'Upper-Bound') usamos o valor de desempenho da solução corrente (ou seja, a melhor solução até então encontrada). Portanto, inicialmente a solução corrente é a solução obtida com o algoritmo do primeiro estágio.

Enumeramos os conflitos ocorridos no primeiro estágio de acordo com a ordem cronológica em que eles acontecem (CN(c) com $c = 1, 2, \dots, u$). Quanto menor o valor de c , mais no início da árvore (figuras 38 e 39) estamos; assim, maior a probabilidade de haver uma sub-estimação no valor calculado para os limitantes inferiores (LB= 'Lower-Bound') correspondentes aos nós gerados a partir da ramificação do nó que corresponde a um conflito. Dessa forma, vamos propor como critério de rejeição de um nó da árvore que parte de um nó conflito, o seguinte:

Se $c = 1$, ou seja estamos no primeiro conflito, o critério adotado é

se $LB > UB / \{1 + 0.10\}$ então o nó é descartado;

Se $c = u$, ou seja estamos no último conflito, o critério adotado é

se $LB > UB$ então o nó é descartado;

Se $1 < c < u$, ou seja estamos num conflito intermediário, o critério que propomos é $LB > UB / \{1 + 0.10 * k'\}$, e fazendo uma interpolação em k' , obtemos finalmente o seguinte critério de rejeição:

Para $u=1$ (só há um conflito):

Se $LB > UB$ o nó é descartado;

Para $u \geq 2$:

Se $LB > UB / \{1 + 0.10 * (u - c) / (u - 1)\}$ o nó é descartado.

Naturalmente, quando rejeitamos um nó, quanto mais no início da árvore ele estiver, melhor, já que isso poupará muitos cálculos, ou seja, no nosso caso, a vizinhança a ser pesquisada será menor. Isso também justifica esse critério de rejeição que propomos. Na literatura o critério usual é $LB > UB$ e às vezes $LB > UB/K$, onde K é uma constante (por exemplo 1.10).

Como a árvore tratada pelo algoritmo A2E1 é bem menor que a tratada pelo algoritmo A2E2, o critério de rejeição que propusemos acima, só usaremos no algoritmo A2E2. No algoritmo A2E1 será usado o critério de rejeição convencional $LB > UB$.

Antes de descrevermos os Passos do algoritmo, definimos que: um subconjunto de peças que possuem o mesmo roteiro de fabricação é chamado de Subfamília, uma tarefa é uma Subfamília de peças, enquanto que uma operação é uma operação de tarefa.

Passos do algoritmo PROCEL:

(Passo 1) acesse o arquivo EXPRESSO onde está armazenado o conjunto E de peças expressas, fornecido pelo sistema de emissão de ordens PBC Modificado (seção 7.3), que serão fabricadas na célula em questão;

(Passo 2) agrupe essas peças em M subfamílias de peças onde todas as peças da subfamília S_i possuem o mesmo roteiro de fabricação, por exemplo, passam pelas máquinas $M2-M1-M5-M3$ ou seja, dentro de cada subfamília o padrão de fluxo é 'flow-shop';

(Passo 3) para cada subfamília e cada máquina usada pelas peças da subfamília que está sendo considerada, identifique a peça que tem o 'set-up' mais complexo. Essa identificação deve ser feita, por exemplo, pelo supervisor da célula. Ela será a peça pré-determinada a ser a primeira dentro da seqüência de operações das peças da subfamília e máquina em questão. Com isso, há a possibilidade dos tempos ociosos que surgirem na programação, serem usados para a preparação da máquina para essa peça com 'set-up' trabalhoso;

(Passo 4) para cada subfamília encontre a seqüência de peças em cada máquina de forma a minimizar o tempo total de preparação. O problema é acíclico e pode ser resolvido (veja seção 6.4.2) segundo:

(a) WHITE & WILSON (1977), sendo que não precisamos usar o método 'branch-and-bound' do problema do caixeiro viajante N vezes, uma para cada uma das N peças pré-especificada a ser a primeira da seqüência e então escolher a melhor das N soluções. Simplesmente o algoritmo é usado uma vez para cada subfamília e máquina usada pela subfamília, considerando como primeira peça aquela pré-especificada no passo (3). Alguns detalhes encontram-se no Apêndice I, onde ainda aparece referenciado SYSLO et alii (1983);

(b) ou segundo FOO & WAGER (1983) sendo que, não é necessário criar a peça fictícia referida nesse trabalho, já que temos pelo (passo 3), uma peça pré-especificada para ser a primeira da seqüência. Alguns detalhes encontram-se no Apêndice II, onde ainda aparece referenciado HASTINGS (1973);

(Passo 5) determine o tempo de processamento p_{ij} de cada

subfamília S_j em cada máquina j , ou seja

$$P_{ij} = \sum_{k=1}^{N_j} (s_{kij} + p_{kij})$$

onde

s_{kij} = tempo de preparação da máquina j para realizar a peça k da subfamília S_j , sendo que s_{kij} é fornecido levando em conta a seqüência das peças da subfamília S_j obtida no Passo 4,

p_{kij} = tempo de processamento da peça k da subfamília S_j na máquina j ,

N_j = número de peças da subfamília S_j ;

(Passo 6) obtenha uma programação das tarefas S_j (cada subfamília é considerada como uma tarefa) usando o algoritmo heurístico abaixo que é uma modificação do algoritmo geral para o problema do 'job-shop' existente em BAKER (1974). Além de adaptar tal algoritmo para o nosso problema, a principal modificação é que podem ser programadas numa mesma iteração até h operações de tarefas ao invés de apenas uma a cada iteração que é o caso do algoritmo originalmente apresentado em BAKER (1974). O algoritmo segue:

Seja:

PS_t = uma programação parcial na qual já estão programadas t operações;

COC_t = o Conjunto das Operações Candidatas a serem programadas no estágio t , correspondente a uma dada PS_t ;

E_{ij} = data mais cedo de início da operação O_{ij} (operação da subfamília S_j que é feita na máquina j),

$$E_{ij} = \max \{C_{prec}; C_j\}$$

onde

C_{prec} = data de conclusão da operação que precede (no roteiro de fabricação da tarefa S_i) diretamente a operação O_{ij} ,
 C_j = data de "liberação" da máquina j , a qual deverá executar a operação O_{ij} ;

(Passo a) seja inicialmente $t=0$ e PS_t , a programação parcial na qual estão já programadas t operações, sendo a programação nula para $t=0$. COC_0 é o conjunto formado pelas primeiras operações de cada tarefa;

(Passo b) Calcule o valor de E_{ij} das operações O_{ij} pertencentes a COC_t . Determine a menor data entre os E_{ij} das operações O_{ij} pertencentes a COC_t . Denote essa data por E^* ;

(Passo c) identifique as máquinas que executam as operações com $E_{ij} = E^*$;

(Passo c1) programe todas as operações pertencentes à COC_t com $E_{ij} = E^*$ e que não utilizam uma mesma máquina;

(Passo c2) agrupe as operações pertencentes a COC_t com $E_{ij} = E^*$ não programadas no passo anterior, de acordo com a máquina a ser utilizada. Esses grupos constituem os conjuntos de operações conflitantes. Operações conflitantes são aquelas que têm a mesma data de início E^* , e que utilizam a mesma máquina. Para o conjunto de operações conflitantes, com o menor número de operações (desempate arbitrário), calcule o índice de prioridade de acordo com a regra de prioridade RP que é função do critério de desempenho adotado pelo usuário.

Além disso, registre a programação parcial até então obtida sob o rótulo $CN(c)$, ou seja conflito número c , onde c é igual a 1 para o primeiro conflito que ocorrer, $c = 2$ para o

segundo, ... e $c = u$ para o último conflito que ocorrer.

Coloque na programação parcial PS_t a operação com melhor índice de prioridade, programando-a o mais cedo possível;

(Passo d) para a nova programação parcial PS_{t+h} , criada nos passos (c1) e (c2), atualize o conjunto de dados da seguinte maneira:

(i) remova de COC_t as operações já programadas nos passos (c1) e (c2);

(ii) forme COC_{t+h} ao adicionar a COC_t as operações (da mesma tarefa) imediatamente sucessoras de O_{ij} que foram programadas nos passos (c1) e (c2);

(iii) incremente t de h unidades onde h é o número de operações programadas nos passos (c1) e (c2);

(Passo e) retorne ao Passo b, considerando a programação parcial PS_{t+h} gerada, até que uma programação completa tenha sido construída. Essa programação completa passa a ser a solução corrente e seu valor de desempenho passa a ser o UB ('Upper-Bound' = Limitante Superior) corrente, tendo em vista o segundo estágio do algoritmo, conforme segue;

(Passo 7) O computador exhibe para o usuário (por exemplo o supervisor de produção da célula) o número de opções em cada conflito que ocorreu no primeiro estágio, por exemplo:

CN(1): 3 operações alternativas;

CN(2): 4 operações alternativas;

...

CN(u): 2 operações alternativas.

O número de operações alternativas no conflito CN(c) denotamos por k_c .

Com base nessas informações e na sua experiência na utilização do PROCEL, o usuário decide

entre A2E1 e A2E2:

- * se optar pelo algoritmo de segundo estágio A2E1, então vá para o Passo 7a, e aplique A2E1 à parte não congelada da programação. A programação então obtida é congelada;
- * se o usuário optar pelo A2E2, vá para o Passo 7b e aplique A2E2 à parte não congelada da programação. A programação então obtida é congelada;

(Passo 7a) Algoritmo A2E1

Começo

$c := u$

Enquanto o tempo de processamento neste passo for inferior a TABC e $c > 0$, faça

Calcule o Limitante Inferior (LB) para cada uma das $(K_C - 1)$ opções de alocação de operação na programação parcial até então obtida, as quais derivam do conflito $CN(c)$. Das K_C opções no conflito $CN(c)$ despreze a que já foi considerada no primeiro estágio.

Se o critério de desempenho escolhido pelo usuário foi o (a), ou seja minimizar o tempo médio de permanência, então o cálculo dos LBs deve ser feito segundo o método que propomos e que está colocado no Apêndice III;

Caso contrário (ou seja, o critério de desempenho escolhido pelo usuário foi o (b): minimização do tempo total de conclusão de todo conjunto de peças já em questão (conjunto E; ou conjunto E e G; ou todas as peças)), o cálculo dos LBs deve ser feito segundo o método apresentado nas páginas 193 a 195 de BAKER (1974) o qual colocamos no Apêndice IV. Um método A para cálculo de Limitante Inferior

é dito mais forte que um método B se LB_A é sempre maior ou igual que LB_B . O método proposto por LAGEWEG et alii (1976; 1977) é atualmente considerado como o mais forte para o cálculo do LB em questão, porém, dada a sua complexidade não-polinomial (LAWLER et alii, 1982), ele é muito mais lento que o do Apêndice IV. Tendo em vista, principalmente, o objetivo do segundo estágio do algoritmo PROCEL (procurar de forma rápida uma possível solução melhor), optamos pelo consagrado método apresentado em BAKER (1974).

Determine o nó com menor LB o qual passa a ser denotado por LB^* .

Se $LB^* < UB$ então

a partir desse nó continue a programação exatamente como no algoritmo do primeiro estágio (ou seja, a ramificação prossegue com apenas um ramo através do uso das Regras de Prioridade já escolhidas no primeiro estágio).

Se a solução então obtida for melhor que a solução corrente, ela passa a ser a nova solução corrente e o seu valor de desempenho passa a ser o UB corrente.

$c := c - 1$

Fim

Congele a programação até aqui obtida
Vá para o Passo 8.

(Passo 7b) Algoritmo A2E2

Começo

$c := u$

Enquanto o tempo de processamento neste passo for

inferior a TABC e $c > 0$, faça

Calcule o Limitante Inferior (LB) para cada uma das $(K_C - 1)$ opções de alocação de operação na programação parcial até então obtida, as quais derivam do conflito CN(c). Das k_C opções no conflito CN(c) despreze a que já foi considerada no primeiro estágio.

Se o critério de desempenho escolhido pelo usuário foi o (a), então o cálculo dos LBs deve ser feito segundo o método que propomos e que está colocado no Apêndice III;

Caso contrário (ou seja, o critério de desempenho escolhido pelo usuário foi o (b)), o cálculo dos LBs deve ser feito segundo o método apresentado em BAKER (1974) o qual colocamos no Apêndice IV.

Ramifique toda a árvore a partir do conflito CN(c), usando a estratégia de busca que apresentamos na seção anterior e que é baseada na estratégia 'best-bound first' (entre os nós ativos ramifique o que tem o menor Limitante Inferior. Um nó é ativo se ele já foi gerado mas não foi decomposto, nem eliminado e nem terminado).

Para cada novo nó gerado, calcule o seu LB:

- * se o critério de desempenho escolhido pelo usuário foi o (a), esse LB é calculado conforme o método que propomos no Apêndice III;
- * se o critério de desempenho escolhido foi o (b), esse LB é calculado conforme o método apresentado no Apêndice IV.

A todo nó ativo que no momento tiver o menor LB, aplique o critério de rejeição (também chamado de teste de eliminação) que propusemos nas

páginas 201-202, ou seja

Para $u=1$ (só há um conflito):

Se $LB > UB$ o nó é descartado;

Para $u \geq 2$:

Se $LB > UB / \{1 + 0.10 * (u - c) / (u - 1)\}$ o nó é descartado.

Toda vez que for obtido um nó terminal, compare o seu valor de desempenho com o valor da solução corrente, e se for menor, ele passa a ser a solução corrente e o seu valor de desempenho passa a ser o UB corrente.

Se a árvore ramificada a partir do nó conflito $CN(c)$ já foi toda pesquisada, faça $c := c - 1$ e continue

Fim

Congele a programação até aqui obtida

Vá para o Passo 8.

(Passo 8) As subfamílias de peças com que estamos tratando, vieram do conjunto E de peças expressas? Se sim, vá para o Passo 9, caso contrário: se as subfamílias são originárias do conjunto G de peças gargalo vá para o Passo 10 e, se vieram do conjunto N vá para o Passo 11;

(Passo 9) acesse o conjunto G de peças gargalo, vá para o Passo 2 e continue a construção do programa de operações até aqui obtido pela última passagem pelo Passo 7;

(Passo 10) acesse o conjunto N de peças não "especiais", vá para o Passo 2, e continue a construção do programa de operações até aqui obtido pela última passagem pelo Passo 7;

(Passo 11) FIM. A solução a ser apresentada é a obtida na última passagem pelo Passo 7.

Tendo sido acionado o PROCEL tantas vezes quantas forem as células que operarão no período em questão, e obtidas as respectivas programações de operações, termina o último nível de decisão do processo de Controle da Produção.

Passamos agora para o último capítulo deste Trabalho.

CAPITULO VIII

CONCLUSÕES

Este Trabalho sustenta a hipótese de que um sistema de Controle da Produção especialmente concebido para operar no ambiente da Manufatura Celular semi-repetitiva é desejável e possível. O sistema concebido parte de alguns pressupostos que são bastante gerais e que do ponto de vista prático não restringem as perspectivas de aplicabilidade do mesmo. Tais pressupostos são:

- (a) a integração das atividades de manufatura muito depende do desempenho do controle da produção;
- (b) controle da produção é uma atividade gerencial que para ser realizada com êxito deve ser conduzida de forma hierárquica (nível de produto, de componente e de operação);
- (c) esses 3 níveis devem ser conduzidos num horizonte de curto prazo;
- (d) o processo decisório deve ser norteado pelos princípios e conceitos que envolvem a criação dos SADs.

Na extensa bibliografia pesquisada, não encontramos outro trabalho como este, que visa integrar todas as atividades de programação da produção, dentro do contexto de um Sistema de Controle da Produção concebido para operar na Manufatura Celular, e em particular na manufatura celular semi-repetitiva.

As principais contribuições apresentadas são:

- (i) no capítulo II, foram apresentados os conceitos de controle gerencial/controle físico, sistema gerencial/sistema físico;
- (ii) no capítulo III, defende-se o ponto de vista de que a PO como instrumento de controle, terá uma importância muito maior no ambiente CIM, do que a que possui na

Manufatura Convencional; e como flexibilidade é um fator crítico no ambiente CIM, defende-se o seu emprego na forma de Sistemas de Apoio à Decisão para contornar a falta de flexibilidade dos modelos de PO;

(iii) no capítulo IV, fazemos uma distinção entre Planejamento da Produção e Controle da Produção; definimos o que entendemos por manufatura semi-repetitiva (ou sistema de produção semi-repetitivo) sendo que o sistema de controle da produção proposto é particularmente apropriado para a manufatura celular semi-repetitiva, e conseguimos enquadrar os atuais super-sistemas de controle da produção segundo a estrutura hierárquica de decisão proposta por Burbidge, que adotamos como diretriz nesta Tese. As diferenças entre a estrutura que adotamos e a proposta por Burbidge são as seguintes:

(a) o primeiro nível de Controle da Produção consideramos como sendo um programa de produção, em termos de produtos finais, de curto prazo (algumas semanas) dada a incerteza da conjuntura brasileira e, dado que regular o fluxo de materiais no chão de fábrica, que é o objetivo do controle da produção, só pode ser realizado a contento num horizonte onde as necessidades dos clientes são previsíveis com precisão;

(b) o terceiro nível para Burbidge é a Liberação que inclui uma série de atividades. Dentre elas isolamos e só consideramos a programação de operações, que tem um caráter decisório marcante e muito diferente do caráter rotineiro das demais atividades;

(iv) no capítulo V, apresentamos uma classificação das células de fabricação;

(v) no capítulo VI, a seção 6.5 (Conclusões), é uma visão pessoal a respeito dos trabalhos anteriores sobre a programação de operações na manufatura celular;

(vi) e finalmente, o capítulo VII é o cerne do trabalho: a concepção de um sistema original para o controle da produção na manufatura celular, abrangendo os três níveis hierárquicos (PMP, Emissão de Ordens, e Progra-

mação de Operações).

O sistema proposto no capítulo VII compreende:

- (a) o projeto de um Sistema de Apoio à Decisão onde, através da interface usuário/sistema, o usuário interage com um modelo I, um algoritmo H e a base de dados para elaboração do Programa Mestre de Produção;
- (b) o modelo I, que é um modelo de programação inteira cuja função-objetivo se diferencia das tradicionais usadas na programação da produção;
- (c) o algoritmo H, que apresenta como novidade a forma de calcular a capacidade disponível de uma célula de manufatura, e um conjunto original de procedimentos para atribuição de peças às células, incluindo o conceito de 'ranking' multiplicativo;
- (d) o PBC Modificado, que por si só já representa uma significativa contribuição ao controle da produção;
- (e) o algoritmo PROCEL. Levando em conta as peculiaridades da manufatura celular semi-repetitiva e do PBC Modificado, propondo modificações em alguns métodos consagrados e, combinando parcela significativa da teoria relevante sobre 'scheduling', PROCEL é um algoritmo original de dois estágios para a programação de operações, que concebemos sob grande rigor lógico e técnico.

Com a implantação do sistema proposto, podemos esperar os seguintes benefícios:

- (a) ganhos com a melhoria na geração de receitas da empresa, devido ao objetivo colocado para a programação da produção: a maximização do valor presente da receita gerada;
- (b) induzido pela adoção de conjuntos balanceados de peças, o volume de estoques fica represado ao nível do absolutamente necessário;
- (c) melhor aproveitamento da capacidade das células dada a possibilidade de se trabalhar com células primárias e secundárias;
- (d) atendimento mais rápido aos clientes devido aos ciclos curtos de produção e ao esquema proposto de priorização

de peças;

- (e) grande dose de flexibilidade e adaptabilidade que é propiciada pelo sistema PBC Modificado proposto. Como o PBC tradicional foi concebido para a manufatura repetitiva, ele não possui uma "variedade" cibernética suficiente para atuar na manufatura semi-repetitiva;
- (f) para conseguir disciplina e eficiência produtiva no chão das células de fabricação, o supervisor de cada célula poderá contar com o PROCEL que é uma ferramenta poderosa para a programação de operações.

A consecução desses benefícios fica facilitada pelo envolvimento direto do usuário no processo decisório, devido às características de apoio à decisão do sistema proposto.

Um dos méritos do trabalho é abordar o problema como um todo, sem grande sofisticação matemática, com grande atenção à tratabilidade computacional dos modelos e algoritmos propostos e, grande cuidado para que as hipóteses assumidas fossem o menos possível restritivas, uma vez que pretendemos que o sistema venha a ser implantado no futuro, com grande chance de êxito.

O modelo I, apesar de ser um modelo de programação inteira, é perfeitamente tratável computacionalmente dado ao número moderado tanto de variáveis (o nível é o de produtos finais e não peças componentes) quanto de restrições.

Acreditamos que nosso trabalho atinge um ponto de equilíbrio entre os extremos: ser muito específico e portanto com aplicabilidade muito reduzida, e ser muito geral não criando vínculo com nenhuma situação prática.

Naturalmente, uma avaliação mais específica do Sistema proposto só será possível após a implementação computacional do mesmo, seguida de sua implantação em pelo menos algumas fábricas que se enquadram na manufatura celular semi-repetitiva.

Pretendemos conduzir a futura implementação computacional e a implantação do sistema numa situação real,

desenvolvendo os trabalhos a saber:

- * Trabalho A: implementação do SADEPMEP e execução de testes experimentais com o mesmo;
- * Trabalho B: implementação computacional do PBC Modificado e, em caráter experimental, implantação do mesmo e do SADEPMEP numa empresa pertinente;
- * Trabalho C: implementação computacional do PROCEL e execução de testes experimentais com o mesmo;
- * Trabalho D: implantação do sistema completo, em caráter experimental, em uma empresa pertinente, de modo a: avaliar preliminarmente o sistema e sugerir pesquisas posteriores para o aperfeiçoamento do mesmo.

Uma alternativa ideal mas de difícil viabilização no quadro em que atuamos, seria utilizar especialistas da área de Computação para implementar o sistema: "... analistas de sistemas e programadores de computadores são necessários para converter o projeto do sistema em um sistema de informação funcional" (JOHNSON & MONTGOMERY, 1974).

Nossa expectativa quanto aos desdobramentos desta Tese, é a criação de uma linha de pesquisa dentro de um programa de Mestrado em Engenharia de Produção.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACKOFF, R.L. & SASIENI, M.W.: Pesquisa Operacional. Livros Técnicos e Científicos Ed. S.A., Rio de Janeiro, 1979.
- ADELMAN, L.: "Real Time Computer Support for Decision Analysis in a Group Setting: Another Class of DSS". Interfaces, 14 (2), pp. 75-83, 1984.
- ADLER, P.S.: "Managing Flexible Automation". California Management Review, pp. 34-56, Spring 1988.
- AGGARWAL, S.C.: "A note on: The Influence of Setup Time on Job-shop Performance, by Wilbrecht and Prescott". Management Science, 19 (11), pp. 1332-1333, 1973.
- AGGARWAL, S.C.: "MRP, JIT, OPT, FMS? Making Sense of Production Operations Systems". Harvard Business Review, pp. 8-16, September/October 1985.
- AGOSTINHO, O.L.: Estudo da Flexibilidade dos Sistemas Produtivos. São Carlos (Doutorado - Escola de Engenharia de São Carlos/USP), 1985.
- ALTER, S.: "A Taxonomy of Decision Support Systems". Sloan Management Review, 19 (1), pp. 39-56, 1977.
- AMERICAN MACHINIST: "The Interface Challenge". American Machinist, Special Report 772, pp.95-102, January 1985.
- ANDERSON, J.C.; SCHROEDER, R.G.; TUPY, S.E.; WHITE, E.M.: "Material Requirements Planning Systems- The State of the Art". Production and Inventory Management, 23 (4), pp.51-66, 4th Quarter 1982.
- ANTHONISSE, J. M.; LENSTRA, J. K.; SAVELSBERGH, M. W. P.: "Behind the Screen: DSS from an OR Point of View". Decision Support Systems, vol. 4, pp. 413-419, 1988.
- ANTHONY, R.N.: Planning and Control Systems- A Framework for Analysis. Division of Research, Graduate School of Business Administration, Harvard University Press, 1965.
- ANTUNES Jr, J.A.Y.; KLIEMANN NETO, F.J.; FENSTERSEIFER, J.E.: "Considerações Críticas sobre a Evolução das Filosofias de Administração da Produção". Revista de Administração de Empresas, 29 (3), pp. 49-64, 1989.
- APPLEGATE, L.M.; CASH Jr, J.I.; MILLS, D.Q.: "Information Technology and Tomorrow's Manager". Harvard Business Review, pp. 128-136, November/December 1988.

- ARN, E.A.: Group Technology. Springer-Verlag, New York, 1975
- ASHOUR, S.: Sequencing Theory. Springer-Verlag, New York, 1972.
- BAKER, K.R.: Introduction to Sequencing and Scheduling, Wiley, New York, 1974.
- BEDWORTH, D.D. & BAILEY, J.E.: Integrated Production Control Systems. Wiley, New York, 1987.
- BEER, S.: Decision and Control, Wiley, 1966.
- BELLMAN, R.: "Dynamic Programming Treatment of the Traveling Salesman Problem". Journal of the Association for Comput. Machinery, 9 (1), pp. 61-63, 1962.
- BERRY, W. L.; VOLLMANN, T. E.; WHYBARK, D. C.: Master Production Scheduling: Principles and Practice, American Production and Inventory Control Society (APICS), 4th printing, 1989.
- BERTRAND, J.W.M.: "Balancing Production Level Variations and Inventory Variations in Complex Production Systems". International Journal of Production Research, 24 (5), pp. 1059-1074, 1986.
- BISWAS, G.; OLIFF, M.; SEN, A.: "An Expert Decision Support System for Production Control". Decision Support Systems, 4 (2), pp. 235-248, 1988.
- BOCKERSTETTE, J.A.: "Misconceptions Abound Concerning Just-in-Time Operating Philosophy". Industrial Engineering, 20 (9), pp. 54-58, 1988.
- BOER, H. & DURING, W.E.: "Management of Process Innovation-The Case of FMS. A Systems Approach". International Journal of Production Research, 25 (11), pp. 1671-1682, 1987.
- BOSE, G.J. & RAO, A.: "Implementing JIT with MRPII Creates Hybrid Manufacturing Environment". Industrial Engineering 20 (9), pp. 49-53, 1988.
- BOUCHER, T.O.: "Lot Sizing in Group Technology Production Systems". Int. J. of Production Research, 22 (1), pp. 85-93, 1984.
- BRENNAN, J.J. & ELAM, J.J.: "Understanding and Validating Results in Model-Based Decision Support Systems". Decision Support Systems, vol. 2, pp.49-54, 1986.
- BRIGHT, J.R.: Automation and Management. Harvard University Press, Boston, 1958.

- BUFFA, E.S. & MILLER, J.G.: Production-Inventory Systems Planning and Control. Richard D. Irwin, 1979.
- BÜHNER, R. & KLEINSCHMIDT, P.: "Reflections on the Architecture of Decision Support System for Personnel Assignment Scheduling in Production Cell Technology". Decision Support Systems, vol. 4, pp. 473-480, 1988.
- BULLINGER, H.J.; WARNECKE, H.J.; LENTES, H.-P.: "Toward the Factory of the Future". Int. J. of Production Research, 24 (4), pp. 697-741, 1986.
- BURBIDGE, J.L.: "Production Flow Analysis". The Production Engineer, vol. 42, pp. 742-752, 1963.
- BURBIDGE, J.L.: "Production Flow Analysis". The Production Engineer, vol. 50, pp. 139-152, 1971a.
- BURBIDGE, J.L.: Production Planning. William Heinemann Ltd., London, 1971b.
- BURBIDGE, J.L.: "AIDA and GT". Int. J. of Production Research, 11 (4), pp. 315-323, 1973.
- BURBIDGE, J.L.: The Introduction of Group Technology. William Heinemann Ltd., London, 1975.
- BURBIDGE, J.L.: "Whatever Happened to GT?". Management Today, pp. 87-93, September 1978.
- BURBIDGE, J.L.: Planejamento e Controle da Produção. Atlas, São Paulo, 1983.
- BURBIDGE, J.L.: "Production Planning and Control- A Personal Philosophy". Computers in Industry, vol. 6, pp. 477-487, 1985.
- BURBIDGE, J.L.: "Production Control: a Universal Conceptual Framework". Production Planning & Control, 1 (1), pp. 3-16, 1990.
- BUZACOTT, J.A.: "Optimal Operating Rules for Automated Manufacturing Systems". IEEE Transactions on Automatic Control, AC-27 (1), pp. 80-86, February 1982.
- BUZACOTT, J.A. & SHANTHIKUMAR, J.G.: "Models for Understanding Flexible Manufacturing Systems". AIIE Transactions, 12 (4), pp. 339-350, December 1980.
- BUZACOTT, J.A. & YAO, D.D.: "On Queueing Network Models of Flexible Manufacturing Systems". Queueing Systems, 1 (1), pp. 5-27, 1986a.

- BUZACOTT, J.A. & YAO, D.D.: "Flexible Manufacturing Systems: A Review of Analytical Models". Management Science, 32 (7), pp. 890-905, July 1986b.
- CAMPBELL, H.G.; DUDEK, R.A.; SMITH, M.L.: "A Heuristic Algorithm for the n Job, m Machine Sequencing Problem". Management Science, 16 (10), pp. B630-637, 1970.
- CARRIER, J. & CHRÉTIENNE, P.: "Un Domaine Très Ouvert- les Problèmes d'Ordonnancement". RAIRO Recherche Opérationnelle, 16 (3), pp. 175-217, 1982.
- CHADWICK, G.; A Systems View of Planning. Pergamon Press, 1978.
- CHAN, H.M. & MILNER, D.A.: "Direct Clustering Algorithm for Group Formation in Cellular Manufacture". Journal of Manufacturing Systems, 1 (1), pp. 65-75, 1982.
- CHO, K.-K.; ENSCORE Jr, E. E.; HAM, I.; "A Heuristic Algorithm for Multi-Stage Group Scheduling Problem to Minimize Total Tardiness". 1982 Manufacturing Engineering Transactions and 10th North American Manufacturing Research Conference Proceedings (Published by SME), pp. 514-517, May 1982.
- CHOOBINEH, F.: "Optimum Loading for GT/MRP Manufacturing Systems". Computers & Industrial Engineering, 8 (3/4), pp. 197-206, 1984.
- CHURCHMAN, C.W.: Introdução à Teoria dos Sistemas. Vozes, 1972.
- COFFMAN Jr, E.G. (Ed.): Computer and Job-shop Scheduling Theory. Wiley, New York, 1976.
- CONSTABLE, C. J. & NEW, C. C.: Operations Management, a Systems Approach Through Text and Cases. Wiley, London, 1976.
- CONWAY, R.W.; MAXWELL, W.L.; MILLER, L.W.: Theory of Scheduling. Addison Wesley, 1967.
- COSTA, A. & GARETTI, M.: "Design of a Control System for a Flexible Manufacturing Cell". Journal of Manufacturing Systems, 4 (1), pp. 65-84, 1985.
- DALE, B.G. & DEWHURST, F.: "Simulation of a Group Technology Product Cell". Engineering Costs and Production Economics vol. 8, pp. 45-54, 1984.
- DALE, B.G. & MALIK, M.Y.: "Production Control for Jobbing Manufacture in a Group Technology System". Machinery and Production Engineering, 130, pp. 410-415, 1977.

- DALE, B.G. & RUSSELL, D.: "Production Control Systems for Small Group Production". Omega, 11 (2), pp. 175-185, 1983
- DALE, B.G. & WILLEY, P.T.: "How to Predict the Benefits of Group Technology". The Production Engineer, 59 (2), pp. 51-54, 1981.
- DANNENBRING, D.G.: "An Evaluation of Flow Shop Sequencing Heuristics". Management Science, 23 (11), pp. 1174-1182, 1977.
- DARROW, W.P. & GUPTA, J.N.D.: "Integrating Group Technology and MRP Systems Through Lot Sizing and Scheduling". Computers & Industrial Engineering, 16 (2). pp. 287-296, 1989.
- DAS, S.K. & SARIN, S.C.: "An Integrated Approach to Solving the Master Aggregate Scheduling Problem". Submitted to Journal of Manufacturing & Operations Management in 1990.
- DEMPSTER, M.A.H.; LENSTRA, J.K.; RINNOOY KAN, A.H.G. (Eds.): Deterministic and Stochastic Scheduling, D. Reidel Pub. Company, Dordrecht (Holland), 1982.
- EDELMAN, F.: "They Went Thataway". Interfaces, 7 (3), pp. 39-42, May 1977.
- EDP ANALYZER: "APL and Decision Support Systems". EDP Analyzer, 14 (5), May 1976.
- EDWARDS, G.A.B.: Readings in Group Technology. The Machinery Publishing Co. Ltd., Brighton, 1971.
- ELGOMAYEL, J. & NADER, V.: "Optimization of Machine Setup and Tooling Using the Principles of Group Technology". Computers & Industrial Engineering, 7 (3), pp. 187-198, 1983.
- EMMONS, H.: "One-machine Sequencing to Minimize Certain Functions of Job Tardiness". Operations Research, 17 (4), pp. 701-715, July/August 1969.
- ER, M.C.: "Decision Support Systems: A Summary Problems, and Future Trends". Decision Support Systems, vol. 4, pp. 355-363, 1988.
- ERLENKOTTER, D.: "An Early Classic Misplaced: Ford W. Harris's Economic Order Quantity Model of 1915". Management Science, 35 (7), pp. 898-900, 1989.
- FERDOWS, K. & LINDBERG, P.: "FMS as Indicator of the Strategic Role of Manufacturing". Int. J. of Production Research, 25 (11), pp. 1563-1571, 1987.

- FINCH, B. & COX, J.F.: "An Examination of Just-in-Time Management for the Small Manufacturer with an Illustration". Int. J. of Production Research, 24 (2), pp. 329-342, 1986.
- FINLAY, P.N. & MARTIN, C.J.: "The State of Decision Support Systems: A Review". Omega, 17 (6), pp. 525-531, 1989.
- FLOYD, S. A.: "Model-based Decision Support System: an Effective Implementation Framework". Computers and Operations Research, 16 (5), pp. 481-491, 1989.
- FLYNN, B.B.: "The Effects of Setup Time on Output Capacity in Cellular Manufacturing". Int. J. of Production Research, 25 (12), pp. 1761-1772, 1987.
- FLYNN, B.B. & JACOBS, F.R.: "A Simulation Comparison of Group Technology with Traditional Job-shop Manufacturing". Int. J. of Production Research, 24 (5), pp. 1171-1192, 1986.
- FOO, F.C. & WAGER, J.G.: "Setup Times in Cyclic and Acyclic Group Technology Scheduling Systems". Int. J. of Production Research, 21 (1), pp. 63-73, 1983.
- FRENCH, S.: Sequencing and Scheduling: an Introduction to the Mathematics of the Job-shop. Ellis Horwood Ltd, Chichester (England), 1982.
- FUNK, P.: "Throughput Planning Instead of Capacity Planning is Next Logical Step After MRPII". Industrial Engineering pp. 40-44, January 1989.
- FURTH, B. & ROUBOS, P.: "Mischchedule- A Group Technology Approach to Sequencing of Jobs". Annals of the CIRP, 32 (1), pp. 389-392, 1983.
- GALLAGHER, C.C. & KNIGHT, W.A.: Group Technology. Butterworths, London, 1973.
- GALLAGHER, C.C. & KNIGHT, W.A.: Group Technology Production Methods in Manufacture. Ellis Horwood Ltd., Chichester, England, 1986.
- GAVETT, J.W.: "Three Heuristic Rules for Sequencing Jobs to a Single Production Facility". Management Science, 11 (8), pp. 166-176, 1965.
- GELDERS, L.F. & WASSENHOVE, L.N.: "Capacity Planning in MRP, JIT and OPT: a Critique". Engineering Costs and Production Economics, vol. 9, pp. 201-209, 1985.
- GEORGE Jr, C.S.: The History of Management Thought.

Prentice-Hall, 1972.

- GERELLE, E.G.R. & STARK, J.: Integrated Manufacturing Strategy, Planning and Implementation. McGraw-Hill, 1988. *
- GERRITY Jr., T.P.: "Design of Man-Machine Decision Systems: an Application to Portfolio Management". Sloan Management Review, 12 (2), pp. 59-75, Winter 1971.
- GERSHWIN, S.B.; HILDEBRANT, R.R.; SURI, R.; MITTER, S.K.: "A Control Perspective on Recent Trends in Manufacturing Systems". IEEE Control System Magazine, 6 (2), pp. 3-15, April 1986.
- GOLDRATT, E. & COX, J.: A Meta. IMAM (Instituto de Movimentação e Armazenagem de Materiais), São Paulo, 1986.
- GORRY, G.A. & MORTON, M.S.S.: "A Framework for Management Information Systems". Sloan Management Review, vol. 13, pp. 55-70, Fall 1971.
- GRAHAM, R.L.: "Bounds on Multiprocessing Timing Anomalies". SIAM J. Appl. Math., 17 (2), pp. 416-429, 1969.
- GRAVEL, M. & PRICE, W.L.: "Using the Kanban in a Job-shop Environment". Int. J. of Production Research, 26 (6), pp. 1105-1118, 1988.
- GROOVER, M.P.: Automation, Production Systems and Computer-Aided Manufacturing. Prentice-Hall, Englewood Cliffs (NJ) 1980.
- GROOVER, M.P. & ZIMMERS Jr, E.W.: CAD/CAM: Computer-Aided Design and Manufacturing. Prentice-Hall, Englewood Cliffs (N.J.), 1984. *
- GRÜNWARD, H.; STRIEKWOLD, P.E.T.; WEEDA, P.J.: "A Framework for Quantitative Comparison of Production Control Concepts". Int. J. of Production Research, 27 (2), pp. 281-292, 1989.
- GUTZMANN, K.M. & WYSK, R.A.: "Capacity Control Policies for MRP Systems". Int. J. of Production Research, 24 (2), pp. 359-374, 1986.
- HACKMAN, S.T. & LEACHMAN, R.C.: "A General Framework for Modeling Production". Management Science, 35 (4), pp.478-495, 1989.
- HAESSLER, R.W. & HOGUE, S.L.: "A Note on the Single-Machine Multi-Product Lot Scheduling Problem". Management Science, 22 (8), pp. 909-912, April 1976.
- HAM, I.: Aplicações da Tecnologia de Grupo para maior Produ-

- tividade na Fabricação. Publicação 058/87 da Escola de Engenharia de São Carlos/USP, 1987.
- HAM, I.; HITOMI, K.; NAKAMURA, N.; YOSHIDA, T.: "Optimal Group Scheduling and Machining-Speed Decision Under Due-Date Constraints". ASME- Journal of Engineering for Industry, 101 (2), pp. 128-134, May 1979.
- HAM, I.; HITOMI, K.; YOSHIDA, T.: Group Technology: Applications to Production Management. Kluwer-Nijhoff Publishing, Boston, 1985.
- HASTINGS, N. A. J.: Dynamic Programming with Management Applications, Butterworths, London, 1973.
- HELD, M. & KARP, R.M.: "Dynamic Programming Approach to Sequencing Problems". J. Soc. for Industry and Applied Mathematics, 10 (2), pp. 196-210, 1962.
- HITOMI, K.: Manufacturing Systems Engineering. Taylor & Francis, London, 1979.
- HITOMI, K. & HAM, I.: "Operations Scheduling for Group Technology Applications". Annals of the CIRP, 25 (1), pp.419-422, 1976.
- HITOMI, K. & HAM, I.: "Machine Loading for Group Technology Applications". Annals of the CIRP, 26 (1), pp. 279-280, 1977.
- HITOMI, K. & HAM, I.: "Machine Loading and Product-Mix Analysis for Group Technology". ASME- Journal of Engineering for Industry, 100 (3), pp. 370-374, August 1978.
- HITOMI, K. & HAM, I.: "Product-Mix and Machine-Loading Analysis of Multi-Stage Production Systems for Group Technology". ASME- Journal of Engineering for Industry, vol. 104, pp. 363-368, November 1982.
- HO, C.-J.: "Evaluating the Impact of Operating Environments on MRP System Nervousness". Int. J. of Production Research, 27 (7), pp. 1115-1135, 1989.
- HOLLIER, R.H.: "The Grouping Concept in Manufacturing". Int. J. of Operations and Production Management, 1 (1), pp. 71-78, 1980.
- HUANG, P.Y.; REES, L.P.; TAYLOR, B.: "A Simulation Analysis of the Japanese Just-in-Time Technique (with Kanban) for a Multiline, Multistage Production System". Decision Sciences, vol 14, pp. 326-344, 1983.
- HYDE, W.F.: Improving Productivity by Classification, Coding and Data Base Standardization: the key to Maximizing CAD/

- CAM and Group Technology. Marcel Dekker, New York, 1981.
- HYER, N.L. & WEMMERLÖV, U.: "MRP/GT: A Framework for Production Planning and Control of Cellular Manufacturing". Decision Sciences, 13 (4), pp. 681-701, October 1982.
- IBARAKI, T.: "Theoretical Comparisons of Search Strategies in Branch-and-Bound Algorithms". Int. J. of Computer and Information Sciences, 5 (4), pp. 315-344, 1976.
- IRANI, S.A.; DAVACHI, A.; ENSCORE, E.E.: "Single Machine Setup-Dependent Sequencing Using a Setup Complexity Ranking Scheme". Journal of Manufacturing Systems, 7 (1), pp. 11-23, 1988.
- IVANOV, E.K.: Group Production, Organization and Technology, Business Publications, 1968.
- JACOBS, F.R.: "The OPT Scheduling System: A Review of a New Production Scheduling System". Production and Inventory Management, 24 (3), pp. 47-51, 1983.
- JACOBS, F.R.: "OPT Uncovered: Many Production Planning and Scheduling Concepts Can Be Applied With or Without the Software". Industrial Engineering, 16 (10), pp. 32-41, 1984.
- JAIKUMAR, R.: "Postindustrial Manufacturing". Harvard Business Review, pp. 69-76, November/December 1986.
- JOHNSON, L.A. & MONTGOMERY, D.C.: Operations Research in Production Planning, Scheduling and Inventory Control. Wiley, New York, 1974.
- JOHNSON, S.M.: "Optimal Two- and Three-Stage Production Schedules with Set-up Times Included". Naval Research Logistic Quarterly, 1 (1), pp. 61-68, 1954.
- KASSICIEH, S.K. & SCHULTZ, C.R.: "Decision Support Flexible Manufacturing Systems". Omega, 15 (6), pp. 495-502, 1987.
- KEEN, P.G.W.: "Interactive Computer Systems for Managers: A Modest Proposal". Sloan Management Review, vol. 18, pp. 1-17, Fall 1976.
- KEEN, P.G.W.: "Decision Support Systems: Translating Analytic Techniques into Useful Tools". Sloan Management Review, 21 (3), pp. 33-44, Spring 1980.
- KEEN, P.G.W. & MORTON, M.S. SCOTT: Decision Support Systems, an Organizational Perspective. Addison Wesley Pub. Co., 1978.
- KELLOCK, B.C.: "GT plus Computer Time - An Effective Formula

- for Batch Production". Machinery and Production Engineering, 129 (3340), pp. 642-647, 1976.
- KIMEMIA, J.G. & GERSHWIN, S.B.: "Flow Optimization in FMSs". Int. J. of Production Research, 23 (1), pp.81-96, 1985.
- KING, J.R. & NAKORNCHAI, V.: " Machine-Component Group Formation in Group Technology: Review and Extension". Int.J. of Production Research, 20 (2), pp. 117-133, 1982.
- KIRAN, A.S. & LOEWENTHAL, A.: "An Integrated Decision System for Inventory Management". Computers & Industrial Engineering, 9 (4), pp. 379-386, 1985.
- KIRKPATRICK, S.; GELATT, D.C.; VECCHI, M.P.: "Optimization by Simulated Annealing". Science, vol. 220, n. 4598, pp. 671-680, 13-May, 1983.
- KRUSE, G.; SWINFIELD, D.G.J.; THORNLEY, R.H.: "Design of a Group Technology Plant and its Associated Production Control System". The Production Engineer, pp. 417-421, July/August 1975.
- KYDD, C.T.: "Cognitive Biases in the Use of Computer-based Decision Support Systems". Omega, 17 (4), pp. 335-344, 1989.
- LAARHOVEN, R.J.M. VAN & AARTS, E.H.L.: Simulated Annealing: Theory and Applications, Reidel, Dordrecht, The Netherlands, 1989.
- LAGEWEG, B. J.; LENSTRA, J. K.; RINNOOY KAN, A. H. G.: "Minimizing Maximum Lateness on One Machine: Computational Experience and Some Applications". Statistica Neerlandica, vol. 30, pp. 25-41, 1976.
- LAGEWEG, B. J.; LENSTRA, J. K.; RINNOOY KAN, A. H. G.: "Job-shop Scheduling in Implicit Enumeration". Management Science, vol. 24, pp. 441-450, 1977.
- LAWLER, E. L.; LENSTRA, J. K.; RINNOOY KAN, A. H. G.: "Recent Developments in Deterministic Sequencing and Scheduling: a Survey". In: DEMPSTER, M. A. H.; LENSTRA, J. K.; RINNOOY KAN, A. H. G. (Eds.): Deterministic and Stochastic Scheduling, D. Reidel Pub. Company, Dordrecht (Holland), 1982.
- LEAVITT, H.J. & WHISLER, T.L.: "Management in the 1980's". Harvard Business Review, 36 (6), pp. 41-48, Nov/Dec 1958.
- LEFRANÇOIS, P. & CHERKEZ, C.: "Adaptive Limits for PC-based Inventory Control". Int. J. of Production Research, 25 (9), pp. 1325-1337, 1987.

- LELE, M.M.: "Inventory Management: how to Control your Critical Marketing Backfield". Business Marketing, vol. 71, pp. 41-51, 1983.
- LEONARD, R. & RATHMILL, K.: "The Group Technology Myths". Management Today, vol. 66, pp. 66-69, 1977a.
- LEONARD, R. & RATHMILL, K.: "Group Technology - A Restricted Manufacturing Philosophy". Chartered Mechanical Engineer, 24 (9), pp. 42-46, 1977b.
- LEONG, G.K.: "A Search Algorithm for the Bicriterion Group Technology Machine Loading and Product Mix Problem". ASME - Journal of Engineering for Industry, 108 (3), pp. 237-239, August 1986.
- LITTLE, J.D.C.: "Models and Managers: The Concept of a Decision Calculus". Management Science, 16 (8), pp. 466-485, April 1970.
- LITTLE, J.D.C.: "Brandaid". Operations Research, 23 (4), pp. 628-673, May 1975.
- LITTLE, J.D.C.; MURTY, K.G.; SWEENEY, D.W.; KAREL, C.: "An Algorithm for the Traveling Salesman Problem". Operations Research, 11 (6), 972-989, Nov/Dec 1963.
- LUNDRIGAN, R.: "What is this Thing Called OPT?". Production and Inventory Management, 27 (2), pp. 2-11, 2nd Quarter, 1986.
- MATSUDA, T.: "OR/MS, The Interaction With and Benefit from Japanese Organizational Intelligence". Omega, 16 (3), pp. 233-241, 1988.
- McGLENNON, J.: "A Framework for Intelligent Master Planning". Production Planning & Control, 1 (2), pp. 112-120, 1990.
- McKAY, K.N.; SAFAYENI, F.R.; BUZACOTT, J.A.: "Job-Shop Scheduling Theory: What is Relevant?". Interfaces, 18(4), pp. 84-90, July/August 1988.
- MELETON, M.P.: "OPT - Fantasy or Breakthrough?". Production and Inventory Management, 27 (2), pp. 12-21, 2nd Quarter, 1986.
- MERCHANT, M.E.: "Delphi-Type Forecast of the Future of Production Engineering". Annals of the CIRP, 20 (3), pp. 213-225, 1971.
- MERCHANT, M.E.: "Computer-Integrated Manufacturing- its Huge Potential for U.S. Industry". Modern Materials Handling, 37 (1), pp. 64-74, 1982. * *

- MITROFANOV, S.P.: The Scientific Principles of Group Technology. National Lending Library Translation, 1966.
- MIZE, J.H.; WHITE, C.R.; BROOKS, G.H.: Operations Planning and Control. Prentice-Hall, 1971.
- MONDEN, Y.: Sistema Toyota de Produção. IMAM (Instituto de Movimentação e Armazenagem de Materiais), São Paulo, 1984.
- MONEY, A.; TROMP, D.; WEGNER, T.: "The Quantification of Decision Support Benefits Within the Context of Value Analysis". MIS Quarterly, 12 (2), pp. 223-236, 1988.
- MORTON, M.S. SCOTT: Management Decision Systems: Computer-Based Support for Decision Making. Division of Research, Graduate School of Business Administration, Harvard University Press, Boston, 1971.
- MOSIER, C.T.; ELVERS, D.A.; KELLY, D.: "Analysis of Group Technology Scheduling Heuristics". Int. J. of Production Research, 22 (5), pp. 857-875, 1984.
- MOSIER, C.T. & TAUBE, L.: "The Facets of GT and Their Impacts on Implementation: A State-of-the-Art Survey". Omega, 13 (5), pp. 382-391, 1985.
- NAKAMURA, N.; YOSHIDA, T.; HITOMI, K.: "Group Production Scheduling for Minimum Total Tardiness". AIIE Transactions, 10 (2), pp. 157-162, 1978.
- NAWAZ, M.; ENSCORE Jr., E. E.; HAM, I.: "A Heuristic Algorithm for the m-Machine, n-Job Flow-Shop Sequencing Problem". Omega, 11 (1), pp. 91-95, 1983.
- NEW, C.: "MRP> - A New Strategy for Component Production". Production and Inventory Management, 8 (3), pp. 50-62, 1977.
- NOF, S.Y. & GURECKI, R.: "MDSS: Manufacturing Decision Support System". Proceedings AIIE Spring Conference, pp. 274-283, May 1980.
- OLIVA-LOPEZ, E. & PURCHECK, G.F.: "Load Balancing for Group Technology Planning and Control". Int. J. Machine Tool Design Research, vol. 19, pp. 259-274, 1979.
- OPITZ, H.; EVERSHEIM, W.; WIENDAHL, H. P.: "Workpiece Classification and its Industrial Application". Int. J. Machine Tool Design Research, vol. 9, pp. 39-50, 1969.
- OPITZ, H. & WIENDAHL, H.P.: "Group Technology and Manufacturing Systems for Small and Medium Quantity Production". Int. J. of Production Research, 9 (1), pp. 181-

- 203, 1971.
- ORLICKY, J.: Material Requirements Planning. McGraw-Hill, 1975.
- OSMAN, I.H.; POTTS, C.N.: "Simulated Annealing for Permutation Flow-Shop Scheduling". Omega, 17 (6), pp. 551-557, 1989.
- OZDEMIREL, N.E. & SATIR, A.: "Design of a Decision Support System for Detailed Scheduling". Information & Management 12 (5), pp. 247-256, 1987.
- OZDEN, M.; EGBELU, P.J.; IYER, A.V.: "Job Scheduling in a Group Technology Environment for a Single Facility". Computers & Industrial Engineering, 9 (1), pp. 67-72, 1985.
- PENDEGRAFT, N.: "Job-shop Decision Support with a Micro-computer Spreadsheet". Production and Inventory Management Journal, 28 (4), pp.11-14, Fourth Quarter 1987.
- PLENERT, G. & BEST, T.D.: "MRP, JIT and OPT: What's Best?". Production and Inventory Management, 27 (2), pp. 22-29, 2nd Quarter 1986.
- POTTS, C.N.: "An Adaptive Branching Rule for the Permutation Flow-Shop Problem". European J. of Operational Research, 5 (1), pp. 19-25, 1980.
- PULLEN, R.D.: "A Survey of Cellular Manufacturing Cells". The Production Engineer, 55 (9), pp. 451-454, 1976.
- RABBI, M.F. & LAKHMANI, G.: "Relationship Between Group Technology and Material Requirements Planning". 1984 Annual International Industrial Engineering Conference Proceedings, pp. 483-486, 1984.
- RÄNKY, P.: The Design and Operation of FMS- Flexible Manufacturing Systems. IFS (Publications)/ North Holland Pub., 1983.
- RANSON, G.M.: Group Technology: A Foundation for Better Total Company Operation. McGraw-Hill, London, 1972.
- RATHMILL, K.; LEONARD, R.; DAVIES, B.J.: "Characteristics of Future Batch Production Systems". Chartered Mechanical Engineer, 24 (3), pp. 60-63, 1977.
- RATHWELL, M.A. & BURNS, A.: "Information Systems Support for Group Planning and Decision-making Activities". MIS Quarterly, 9 (3), pp. 255-271, Sept. 1985.

- REMUS, W. & KOTTEMANN, J. E.: "Semi-structured Recurring Decisions: an Experimental Study of Decision Making Models and Some Suggestions for DSS". MIS Quarterly, 11 (2), pp. 233-243, June 1987.
- RIBEIRO, P.D.: Kanban. COP Editora, Rio de Janeiro, 1984.
- RICHTER, M.M.: "AI Concepts and OR Tools in Advanced DSS". Decision Support Systems, vol. 4, pp. 441-446, 1988.
- RITZMAN, L.P.; KING, B.; KRAJEWSKI, L.J.: "Manufacturing Performances Pulling the Right Levers". Harvard Business Review, 62 (2), pp. 143-152, 1984. *
- RODRIGUEZ, R. & ADANIYA, O.: "Group Technology Cell Allocation". 1985 Annual International Industrial Engineering Conference Proceedings, IIE, pp. 125-129, 1985.
- ROTHBLUM, U.G.; KARNI, R.; GELFAND, E.: "A Dynamic Programming Formulation of a Production Sequencing Problem". Computers & Industrial Engineering, 7 (1), pp. 69-75, 1983.
- ROY, A.; FALOMIR, E.E.De; LASDON, L.: "An Optimization-based Decision Support System for a Product Mix Problem". Interfaces, 12 (2), pp. 26-33, 1982.
- RUBINSTEIN, M.F.: Tools for Thinking and Problem Solving. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1986.
- SALVADOR, M.S.: "A Solution to a Special Class of Flow-Shop Scheduling Problem". In: ELMAGHRABY, S.E.: Symposium on the Theory of Scheduling and its Applications. Springer-Verlag, Berlin, 1973.
- SANTOS, B. L. Dos & HOLSAPPLE, C. W.: "A Framework for Designing Adaptive DSS Interfaces". Decision Support Systems, vol. 5, pp. 1-11, 1989.
- SCHONBERGER, R.J.: "Applications of Single-Card and Dual-Card Kanban". Interfaces, 13 (4), pp. 56-67, 1983.
- SCOTT Jr, H.A.; DAVIS, R.P.; WYSK, R.A.; NUNNALLY, C.E.: "Hierarchical Control Model for Automated Manufacturing Systems". Computers & Industrial Engineering, 7 (3), pp. 241-255, 1983.
- SEIDMANN, A. & SCHWEITZER, P.J.: "Part Selection Policy for a Flexible Manufacturing Cell Feeding Several Production Lines". IIE Transactions, 16 (4), pp. 355-362, 1984.
- SERIO, L.C.: Tecnologia de Grupo no Planejamento de um Sistema Produtivo. Icone Editora, 1990.

- SHAW, M.J.: "Distributed Planning in Cellular Flexible Manufacturing Systems". INFOR, 25 (1), pp. 13-25, 1987a.
- SHAW, M.J.: "A Distributed Scheduling Method for Computer Integrated Manufacturing: the Use of Local Area Network in Cellular Systems". Int. J. of Production Research, 25 (9), pp. 1285-1303, 1987b.
- SHAW, M.J.: "Dynamic Scheduling in Cellular Manufacturing Systems: A Framework for Networked Decision Making". Journal of Manufacturing Systems, 7 (2), pp. 83-94, 1988a
- SHAW, M.J.: "Knowledge-Based Scheduling in Flexible Manufacturing Systems: An Integration of Pattern-Directed Inference and Heuristic Search". Int. J. of Production Research, 26 (5), pp. 821-844, 1988b.
- SHAW, M.J. & WHINSTON, A.B.: "An Artificial Intelligence Approach to the Scheduling of Flexible Manufacturing Systems". IIE Transactions, 21 (2), pp. 170-183, 1989.
- SHINGO, S.: A Revolution in Manufacturing: the SMED System. Productivity Press, Cambridge, 1985.
- SIMMONS, L.F. & POULOS, L.: "DSS: The Successful Implementation of a Mathematical Programming Model for Strategic Planning". Computers & Operations Research, 15 (1), pp. 1-5, 1988.
- SINGH, I. S. & SADAGOPAN, S.: "A Support System for Optimization Modelling". Decision Support Systems, vol.3, pp. 165-178, 1987.
- SINGHAL, K.; FINE, C.H.; MEREDITH, J.R.; SURI, R.: "Research and Models for Automated Manufacturing". Interfaces, 17 (6), pp. 4-14, 1987.
- SINHA, R.K. & HOLLIER, R.H.: "A Review of Production Control Problems in Cellular Manufacture". Int. J. of Production Research, 22 (5), pp. 773-789, 1984.
- SIPPER, D. & SHAPIRA, R.: "JIT vs. WIP - a Trade-off Analysis". Int. J. of Production Research, 27 (6), pp.903-914, 1989.
- SISKOS, J. & DESPOTIS, D.K.: "A DSS Oriented Method for Multiobjective Linear Programming Problems". Decision Support Systems, vol. 5, pp. 47-55, 1989.
- SPACHIS, A.S. & KING, J.R.: "Job-shop Scheduling with Local Neighbourhood Search". Int. J. of Production Research, 17 (6), pp. 507-526, 1979.

- SPENCER, M.S.: "Developing Finite Schedules for Cellular Manufacturing". Production and Inventory Management Journal, 29 (1), pp. 74-79, First Quarter 1988.
- SPRAGUE Jr., R. H.: "DSS in Context". Decision Support Systems, vol. 3, pp. 197-202, 1987.
- SPRAGUE Jr., R. H. & CARLSON, E. D.: Building Effective Decision Support Systems, Prentice-Hall, Englewood Cliffs (NJ), 1982.
- SPUR, G. & MERTINS, K.: "Flexible Manufacturing Systems in Germany, Conditions and Development Trends". Proceedings of First International Conference on Flexible Manufacturing Systems, pp. 37-47, 1982.
- STABELL, C. B.: "Decision Support Systems: Alternative Perspectives and Schools". Decision Support Systems, vol. 3, pp. 243-251, 1987.
- STEFFEN, M.S.: "A Survey of AI Based Scheduling Systems". Proceedings of the Fall Industrial Engineering Conference, Boston (USA), pp. 395-405, December 1986.
- SUH, E.-H. & HINOMOTO, H.: "Use of a Dialogbase for Integrated Relational Decision Support Systems". Decision Support Systems, vol. 5, pp. 277-286, 1989.
- SURESH, N. & MEREDITH, J.R.: "Achieving Factory Automation Through Group Technology Principles". Journal of Operations Management, 5 (2), pp. 151-168, 1985.
- SWANN, P.E.: "Execution is Key to Success of any System for Manufacturing Material Flow Control". Industrial Engineering, vol. 16, pp. 26-31, October 1984.
- SWANN, D.: "Using MRP for Optimized Schedules (Emulating OPT)". Production and Inventory Management, 27 (2), pp. 30-37, 2nd Quarter 1986.
- SYSLO, M.M.; DEO, N.; KOWALIK, J.S.: Discrete Optimization Algorithms with PASCAL Programs, Prentice-Hall, Englewood Cliffs (NJ), 1983.
- TAYLOR, J.F. & HAM, I.: "The Use of a Micro Computer for Group Scheduling". 1981 Manufacturing Engineering Transactions, 9th North American Manufacturing Research Conference (Published by SME), pp. 483-491, 1981.
- TERSINE, R.J.; FISHER, W.W.; MORRIS, J.S.: "Varying Lot Sizes as an Alternative to Undertime and Layoffs in Aggregate Scheduling". Int. J. of Production Research, 24 (1), pp. 97-106, 1986.

- TURBAN, E.: "Decision Support Systems (DSS) a New Frontier for Industrial Engineering". Computers & Industrial Engineering, 7 (1), pp. 41-48, 1983.
- TURBAN, E. & WATKINS, P.R.: "Integrating Expert Systems and Decision Support Systems". MIS Quarterly, 10 (2), pp. 121-136, 1986.
- TURNER, S. & BOOTH, D.: "Comparison of Heuristics for Flow-Shop Sequencing". Omega, 15 (1), pp. 75-78, 1987.
- VAITHIANATHAN, R. & McROBERTS, K.L.: "On Scheduling in a GT Environment". Journal of Manufacturing Systems, 1 (2), pp. 149-155, 1982.
- VAZSONYI, A.: "DSS, Computer Literacy, and Electronic Models". Interfaces, 12 (1), pp. 74-78, 1982.
- VOLLMANN, T.E.: "OPT as Enhancement to MRPII". Production and Inventory Management, 27 (2), pp. 38-47, 1986.
- VOLLMANN, T.E.; BERRY, W.L.; WHYBARK, D.C.: Manufacturing Planning and Control Systems. Dow Jones Irwin, 1984.
- WAGNER, H.M. & WHITIN, T.M.: "Dynamic Version of the Economic Lot Size Model". Management Science, 5 (1), pp.89-96, October 1958.
- WARNECKE, H.J. & KOLLE, J.H.: "Production Control for New Structures". Int. J. of Production Research, 17 (6), pp. 631-641, 1979.
- WELCH, A. & EMANG, J.T.: "Group Technology, the Heart of Flexible Manufacturing Systems". Proceedings of First International Conference on Flexible Manufacturing Systems, pp. 121-130, 1982.
- WHITE, C.H. & WILSON, R.C.: "Sequence Dependent Setup Times and Job Sequencing". Int. J. of Production Research, 15 (2), pp. 191-202, 1977.
- WILBRECHT, J.K. & PRESCOTT, W.B.: "The Influence of Set-up Time on Job Shop Performance". Management Science, vol. 16, B274-B280, 1969.
- WILHELM, W.E. & SHIN, H.-M.: "Effectiveness of Alternate Operations in a Flexible Manufacturing System". Int. J. of Production Research, 23 (1), pp. 65-79, 1985.
- WITTRICK, R.J.: "Scheduling Algorithms for Flexible Flow Lines". IBM J. Res. Develop., 29 (4), pp. 401-412, 1985.
- WITTRICK, R.J.: "An Adaptable Scheduling Algorithm for Flexible Flow Lines". Operations Research, 36 (3), pp.

445-453, 1988.

WOLSTENHOLME, D.J.; PELHAM, R.J.; DALE, B.G.: "Product Based Group Technology Pays off". Machinery and Production Engineering, 137 (3527), pp. 37-39, 1980.

YOUNG, H.H.: "Optimization Models for Production Lines". The Journal of Industrial Engineering, vol. XVIII, n. 1, pp. 70-78, January 1967.

ZACCARELLI, S.B.: Programação e Controle da Produção, Livraria Pioneira Ed., São Paulo, 8ª ed., 1987.

APÊNDICE I

MINIMIZAÇÃO DO TEMPO TOTAL DE PREPARAÇÃO PELO MÉTODO 'BRANCH-AND-BOUND'

Seja:

N_i = número de peças da sub-família S_i a serem seqüenciadas na máquina em questão;

s_{uv} = tempo de preparação da peça v sendo que sua peça antecessora é a peça u ;

A peça pré-fixada pelo (passo 3) do algoritmo PROCEL (seção 7.4.2) como sendo a primeira peça da seqüência, denotaremos por peça 1. Como, após completadas as N_i peças não necessariamente a máquina vai ser re-preparada para processar a peça 1, o problema de seqüenciar tais peças de modo a minimizar o tempo total de preparação pode ser resolvido como sendo um TSP cíclico fazendo-se a seguinte modificação na matriz de tempos de preparação S (WHITE & WILSON, 1977): elemento $(1,1) = \infty$, e os demais elementos da coluna 1 iguais a zero ($(u,1) = 0$, para $u \neq 1$).

Assim sendo, esse problema TSP pode ser resolvido pelo clássico algoritmo, do tipo 'branch-and-bound', de LITTLE et alii (1963), o qual está programado em PASCAL nas páginas 356-361 de SYSLO et alii (1993).

No problema do caixeiro viajante, s_{uv} representa o custo (tempo ou distância) de se ir da cidade u para a cidade v . Da mesma forma que partindo de uma peça devemos seqüenciar todas as peças uma única vez, no TSP o caixeiro viajante partindo de uma cidade, deve percorrer todas as cidades uma única vez.

Fundamentos do algoritmo de LITTLE et alii (1963):

O conjunto de todas as seqüências é particionado em subconjuntos cada vez menores. Para cada um deles é calculado um limitante inferior (LB) do tempo total de preparação (T_p). Se uma seqüência for encontrada e seu T_p for menor ou igual que os LBs de todos os subconjuntos, então essa seqüência é ótima.

Uma seqüência é representada por um conjunto de N_i pares ordenados, por exemplo:

$s = \{(1,3), (3,2), (2,5), (5,4)\}$ cujo T_p é igual a $T_p(s) = s_{13} + s_{32} + s_{25} + s_{54} + s_{41} = s_{13} + s_{32} + s_{25} + s_{54}$ já que $s_{41} = 0$ com a modificação da matriz S . Note que s é uma seqüência válida, se e somente se na somatória acima, aparece um único elemento da cada linha e coluna de S , o que é fácil de ser visualizado:

$$S = \begin{bmatrix} \infty & & X & & \\ 0 & \infty & & & X \\ 0 & X & \infty & & \\ X & & & \infty & \\ 0 & & X & \infty & \end{bmatrix}$$

Se os elementos identificados com um X forem nulos, dizemos que a matriz está reduzida. Para reduzir uma matriz fazemos operações elementares com linhas e/ou colunas de modo a aparecer pelo menos um zero em cada linha e coluna. Exemplo:

$$S = \begin{bmatrix} \infty & 3 & 2 & 8 & 5 \\ 0 & \infty & 4 & 6 & 3 \\ 0 & 1 & \infty & 7 & 5 \\ 0 & 5 & 3 & \infty & 8 \\ 0 & 6 & 9 & 5 & \infty \end{bmatrix}$$

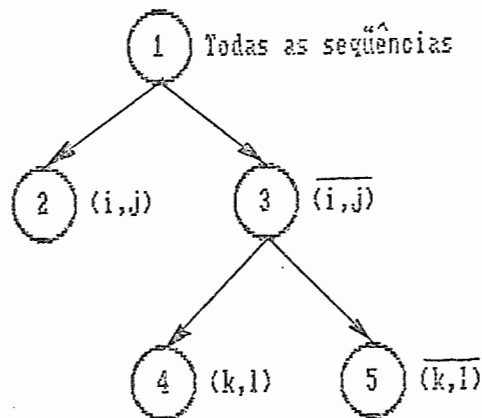
subtraindo 1 da coluna 2, 2 da coluna 3, 5 da coluna 4 e 3 da coluna 5, obtem-se a matriz reduzida R.

$$R = \begin{bmatrix} \infty & 2 & 0 & 3 & 2 \\ 0 & \infty & 2 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \infty & 2 & 2 \\ 0 & 4 & 1 & \infty & 5 \\ 0 & 5 & 7 & 0 & \infty \end{bmatrix}$$

Pode-se provar que a solução do problema S é a mesma do problema R, com apenas a diferença que $T_p(s) = T_p(r) +$ a soma dos valores subtraídos (ou seja, $1+2+5+3=11$).

Então ao invés de resolver S, pode-se resolver R, e a soma dos valores subtraídos é um limitante inferior do problema original. O cálculo dos LBs é baseado exatamente nesse fato.

A estratégia de busca adotada é a 'depth-first' (entre os nós ativos ramifique o que foi gerado primeiro). Já a ramificação é feita da seguinte forma:



O nó 1, representa o conjunto de todas as seqüências. O nó 2, o conjunto de todas as seqüências que contem o arco (i,j) ou seja, onde a peça j sucede na seqüência a peça i. O nó 3, todas as seqüências que não contem o arco (i,j). O nó 4, os que não contem o arco (i,j) e contem o arco (k,l). E assim por diante.

APÊNDICE II

MINIMIZAÇÃO DO TEMPO TOTAL DE PREPARAÇÃO PELA PROGRAMAÇÃO DINÂMICA

Seja:

N_i = número de peças da sub-família S_i a serem seqüenciadas na máquina em questão;

s_{uv} = tempo de preparação da peça v sendo que sua peça antecessora é a peça u ;

$S = [s_{uv}]$ = matriz dos tempos de preparação

$u = 1$ corresponde ao número da peça pré-fixada pelo (passo 3) do algoritmo PROCEL (seção 7.4.2) como sendo a primeira peça da seqüência.

Como, após completadas as N_i peças não necessariamente a máquina vai ser re-preparada para processar a peça 1, o problema de seqüenciar tais peças de modo a minimizar o tempo total de preparação, pode ser resolvido como sendo um TSP cíclico fazendo-se a seguinte modificação na matriz de tempos de preparação S (WHITE & WILSON, 1977): elemento $(1,1) = \infty$, e $(u,1) = 0$ para $u \neq 1$.

Assim sendo, esse problema TSP pode ser resolvido pela PD. Tal formulação foi obtida por BELLMAN (1962) e independentemente por HELD & KARP (1962).

A idéia básica é a seguinte: se numa seqüência ótima, começando pela peça 1, chega-se à peça u e ainda faltam k peças para serem seqüenciadas, então partindo-se da peça u , a seqüência dessas k peças deve ser ótima para a seqüência total ser ótima.

Para resolvermos um problema por PD devemos definir: estágio, estado, ação, a função valor ótimo de um estado e a equação de recorrência (veja HASTINGS (1973)).

Estágio é toda ocasião em que se toma uma decisão: incluir na seqüência uma peça ainda não seqüenciada

O estado $(u: j_1, j_2, \dots, j_k)$ significa que partindo da peça 1, chegamos por alguma seqüência à peça u , e falta ainda seqüenciar as peças j_1, j_2, \dots, j_k .

A função valor ótimo de um estado $f(u: j_1, j_2, \dots, j_k)$ é o valor ótimo do tempo total de preparação que se pode obter a partir do estado $(u: j_1, j_2, \dots, j_k)$.

Naturalmente $f(1: \text{conjunto de todas as demais peças})$ é o valor ótimo da seqüência completa.

A equação de recorrência permite que: tendo-se o valor ótimo de um estado do estágio n (ou seja n peças já foram seqüenciadas), se obtenha o valor ótimo de qualquer estado do estágio $n+1$. Para o problema, tem-se a seguinte equação:

$$f(u: j_1, j_2, \dots, j_k) = \min_{1 \leq m \leq k} \{s_{uv} + f(u: j_1, \dots, j_{m-1}, j_{m+1}, \dots, j_k)\}$$

onde $v = j_m$

HELD & KARP (1962) propõem uma técnica de aproximações sucessivas para tratar problemas de porte não moderado e, FOO & WAGER (1983) colocam o tema sob uma perspectiva relacionada com a Tecnologia de Grupo.

APÊNDICE III

CÁLCULO DE LIMITANTE INFERIOR PARA O CRITÉRIO
MINIMIZAR O TEMPO MÉDIO DE PERMANÊNCIA,
USADO NOS ALGORITMOS A2E1 E A2E2

ALGORITMO

(Passo 1) Tendo a programação parcial até aqui obtida que corresponde ao nó ativo para o qual queremos calcular o Limitante Inferior (LB), obtenha a programação completa ao acrescentar todas as operações que ainda não foram programadas, admitindo-se que o número de máquinas de cada tipo é ilimitado;

(Passo 2) Para essa programação completa, calcule o limitante inferior (LB) para o tempo médio de permanência:

$$LB = \frac{\sum_{i=1}^N f_i}{N}$$

onde

f_i = tempo de permanência da tarefa i conforme o passo 1,

N = número de tarefas.

APÊNDICE IV

CÁLCULO DO LIMITANTE INFERIOR PARA O
CRITÉRIO MINIMIZAR O 'MAKESPAN',
USADO NOS ALGORITMOS A2E1 E A2E2

Sejam

LB_m = o limitante inferior baseado em máquina;
 LB_t = o limitante inferior baseado em tarefa;
 LB = o limitante inferior.

$$LB = \max \{LB_m; LB_t\}$$

Cálculo do LB_m

$$LB_m = \max_{k \in \text{Conjunto de máquinas}} \{g_k + M_k\}$$

onde

M_k = o tempo total de processamento das operações que faltam ser programadas para a máquina k ;
 g_k = a data mais cedo que se pode programar na máquina k alguma operação que ainda não foi programada. Naturalmente g_k é maior ou igual ao tempo de conclusão da última operação que já foi programada na máquina k .

Cálculo do LB_t

$$LB_t = \max_{1 \leq i \leq N} F_i$$

onde

N = número total de tarefas que estão sendo programadas no passo (7b) do algoritmo PROCEL (seção 7.4.2);
 F_i = o tempo de permanência da tarefa i (ou seja, se a última operação da tarefa i tiver sua conclusão prevista para o tempo x , então $F_i = x$), admitindo que não há conflito de recursos (máquinas) para programar as operações que ainda não foram programadas.