

# Capítulo 4

## *Planejamento de Processos, Recursos e Agendamento da Manufatura*

### **INTRODUÇÃO**

Na manufatura de peças discretas, o planejamento de processos envolve o ato de elaborar o plano de processos, que contém informações sobre as operações, rotas, máquinas, dispositivos de fixação e parâmetros necessários para transformar as peças num produto acabado. Pode-se ver que essa atividade não possui o elemento de tempo associado a ela. É o agendamento (“scheduling”) que possui a componente de tempo. Ele envolve o arranjo ordenado no tempo de um conjunto de tarefas (peças) a serem processadas num conjunto de processos (máquinas) visando otimizar alguma medida de desempenho. Uma tarefa certamente pode conter mais do que uma operação. A diferença principal entre o planejamento de processos e o agendamento é que o último é diretamente ligado ao tempo, enquanto o planejamento de processos é o responsável pelo que acontece com as zonas de tempo agendadas.

### **PLANEJAMENTO DE PROCESSOS**

A maioria das atividades de planejamento de processos na indústria hoje ainda envolve a preparação manual dos planos ou então o planejamento semi-automático.

O planejamento de processos envolve a tradução de dados para instruções de trabalho visando produzir uma peça ou um produto. O processista normalmente usa as informações apresentadas no desenho de engenharia e na lista de materiais para elaborar um plano executável. O planejamento de processos é ainda preparado manualmente na maioria das indústrias. O plano pode conter detalhes complicados ou ele pode ser simples. Por exemplo, numa fábrica onde os operadores são altamente habilidosos, os planos são únicos, e geralmente mostram rotas de estações de trabalho. Os outros aspectos do plano são deixados para os operadores decidirem. Em contraste, quando um produto é produzido por uma linha transfer automatizada, o plano de processos normalmente contém detalhes das atividades passo a passo. Estes dois exemplos são casos extremos; porém a produção em lotes é onde normalmente o planejamento de processos é mais frequentemente requisitado, e o processista típico deve possuir o seguinte conhecimento:

- habilidade para interpretar um desenho de engenharia;
- conhecimento de processos e práticas de manufatura;
- conhecimento de ferramental e dispositivos de fixação de peças;

- conhecimento dos recursos disponíveis na fábrica;
- conhecimento de como usar livros de referência, tais como manuais de usinabilidade;
- conhecimento de como executar análises de tempos e custos;
- conhecimento de matérias-primas;
- conhecimento dos custos relativos dos processos, ferramental e matéria-prima.

## **PLANEJAMENTO DE PROCESSOS AUTOMATIZADO**

Com a disponibilidade do computador, tentativas foram feitas para automatizar a maioria dos passos acima. Um software de CAPP deve possuir as seguintes características:

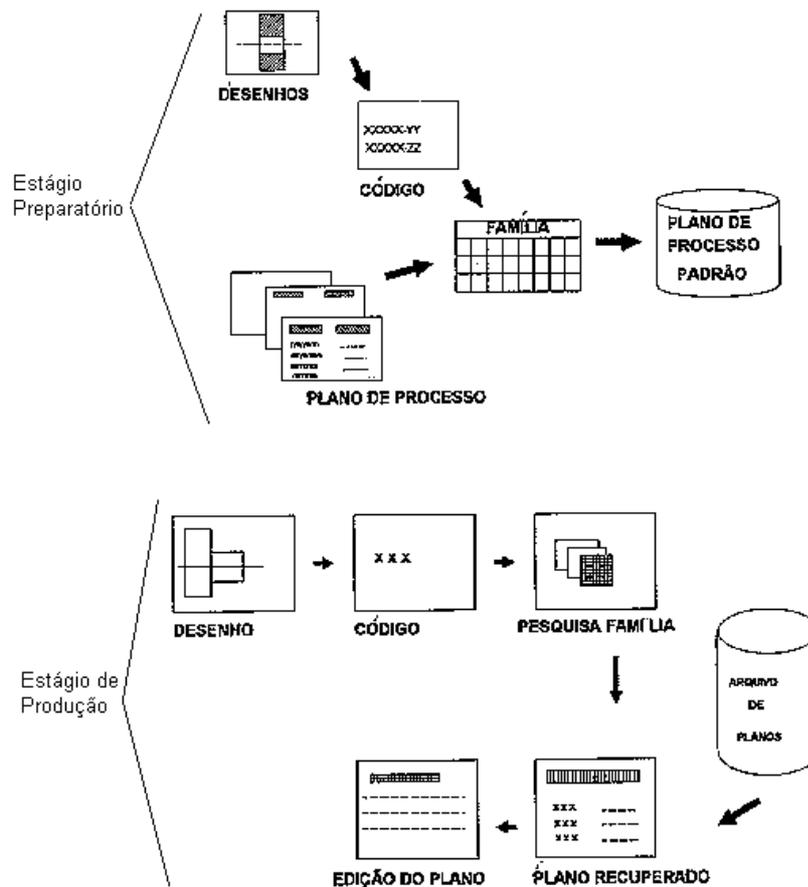
- Ele deveria operar como um auxílio integrado ao planejamento que obtém dados de entrada automaticamente da engenharia e vendas, para gerar um conjunto completo de planos para serem usados pelo planejamento da produção, bem como pelo controle da manufatura, de materiais e da qualidade;
- Ele deve fornecer dados básicos para o roteamento de ordens, agendamento da fabricação e liberação de materiais;
- Ele deve ser genérico por natureza para considerar uma grande variedade de peças;
- Ele deve possuir uma interface amigável com o usuário para maximizar o potencial do computador;
- Ele deve ser modular para permitir uma fácil expansão, modificação e manutenção;
- Ele deve dar resultados econômicos após a sua implementação.

Em suma, os elementos mais importantes do planejamento de processos incluem a seleção de materiais (que também pode ser decidida pelo projetista), seleção de operações, seleção de máquinas, seqüenciamento de operações, seleção de ferramentas e seleção de dispositivos de fixação. Inúmeros fatores influenciam o planejamento de processos: a forma geométrica da peça, as suas tolerâncias, acabamento superficial, tamanho, tipo de material, quantidade e o próprio sistema de manufatura.

Muitas das atividades acima são efetuadas hoje manualmente. Quando muitas das funções acima forem implementadas no computador, elas exigirão pouco tempo por parte do processista para executá-los. Existem várias vantagens do planejamento de processos computadorizado:

- redução no tempo de planejamento de processos;
- redução da habilidade necessária do processista;
- redução nos custos devido a um uso eficiente dos recursos;
- aumento na produtividade e na racionalização dos processos;
- elaboração de planos precisos e consistentes.

Existem dois tipos de abordagens de sistemas CAPP: variante e generativa. A abordagem variante usa a classificação e codificação das peças para iniciar a atividade de planejamento de processos. Quando um plano necessita ser elaborado para a fabricação de um novo produto, um plano padrão para um produto similar é extraído e modificado para o novo produto. O plano pode ser um modelo não-parametrizado da peça, e o usuário apenas introduz os parâmetros da peça que ele precisa descrever. Essa abordagem é geralmente útil em casos onde existe muitas similaridades entre produtos. Esta abordagem é ilustrada na figura 4.1.

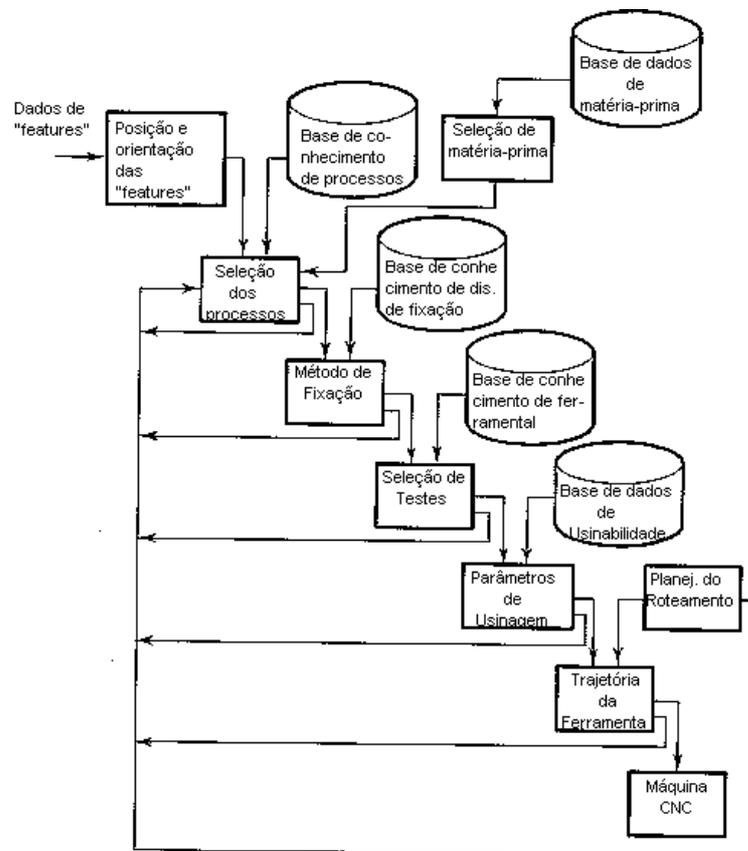


**Figura 4.1.** Módulos de um sistema CAPP variante

A abordagem generativa não usa qualquer plano padrão armazenado. Quando deseja-se gerar um plano, o sistema usa informações sobre a geometria de uma peça, dados de usinagem, dados de montagem, máquinas (incluindo robôs) e seus parâmetros, bem como regras de planejamento, como auxílio à tomada de decisões. Pode-se dizer que ainda não existe atualmente um sistema CAPP generativo efetivo. Sistemas existentes ainda requerem intervenção humana e somente funcionam para peças com geometria não-complexa.

Se uma família de peças possui elementos de forma (“features”) comuns, então é freqüentemente possível descrever “macros” para o planejamento desses elementos. Portanto, um

método híbrido de planejamento de processos pode ser concebido a partir de ambas as abordagens. A figura 4.2 ilustra os módulos de um sistema CAPP generativo.



**Figura 4.2.** Módulos de um sistema CAPP generativo

Nessa figura, os dados de projeto são transmitidos para os processistas pelo sistema de modelagem, que captura as “features” de projeto, funções e intenções gerais do projetista para o produto. Essas informações junto com o conhecimento do processo e matéria-prima são usados para efetuar a seleção de processos. O restante dos processos são semelhantes a um CAPP variante. A diferença maior é que o sistema CAD é muito importante na geração de novos planos, e portanto a descrição da peça não é mais feita através de código que acessa rotas e planos pré-armazenados. Estas podem agora ser geradas de acordo com a geometria da peça e o contexto da manufatura daquela geometria.

## O PLANO DE PROCESSOS

Para entender a natureza do documento produzido normalmente pelo procedimento tradicional de planejamento de processos, um plano de processos manual simplificado é apresentado na figura 4.3. O plano contém as seguintes informações: o cabeçalho identifica o plano, sua origem, datas

importantes, número de peças a serem fabricadas, e assinaturas importantes para verificar seu conteúdo. Tem-se as informações relacionadas à peça, que incluem a sua identificação, o desenho, a classificação, a família, e seus parâmetros físicos. O terceiro aspecto das informações mostra o número e descrição da operação, máquinas a serem usadas, ferramentas, e tempos de operação e de setup.

Nº do plano de processos:					Dados:	
Nº da peça:		Nome da peça:		Nº do desenho:		
Origem:		Verificado:	Mudanças:	Aprovado:		
Nº de peças:		Material:		Peso:		
Nº da operação	Operação	Máquina	Ferramenta	Dispositivo	Tempo de setup (hrs)	Tempo de operação (hrs)
5	Torneamento (d)	Torno 4	T5	Pl. 3 cast.	0,2	0,2
10	Torneamento (a)	Torno 2	T3	Pl. 3 cast.	0,1	0,2
15	Furação	Furadeira 2	B5	Disp. c/ guia	0,15	0,1
20	Chanframento	Furadeira 2	C3	Disp. c/ guia	0,1	0,07
25	Rebaixamento	Furadeira 2	B1	Disp. c/ guia	0,1	0,09
30	Trat. térmico	Forno			0,15	0,09
35	Retificação	Retificadora			0,15	0,06

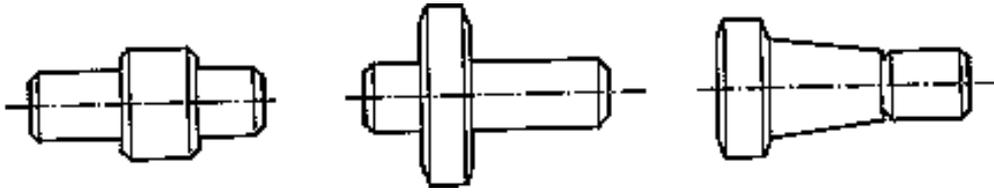
**Figura 4.3.** Um plano de processos

Essas informações são necessárias independentemente do método de planejamento, seja ele manual ou computadorizado.

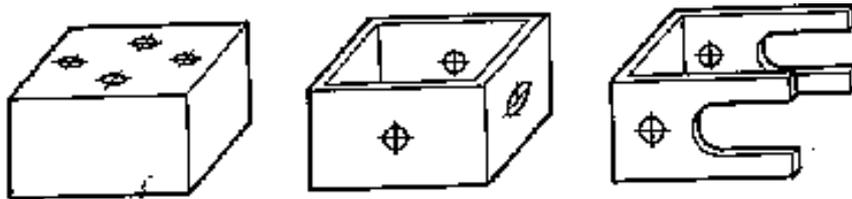
## TECNOLOGIA DE GRUPO

Quando uma peça é projetada para a manufatura, ela deve requerer várias operações sucessivas. Se existem muitas peças diferentes exigindo diferentes operações, será necessário que as peças compartilhem equipamentos de processamento. Mas somente peças que pelos seus atributos compartilham operações podem beneficiar-se das máquinas compartilhadas. Portanto, o reconhecimento de similaridades é essencial para a classificação de peças de acordo com suas similaridades geométricas e métodos de fabricação.

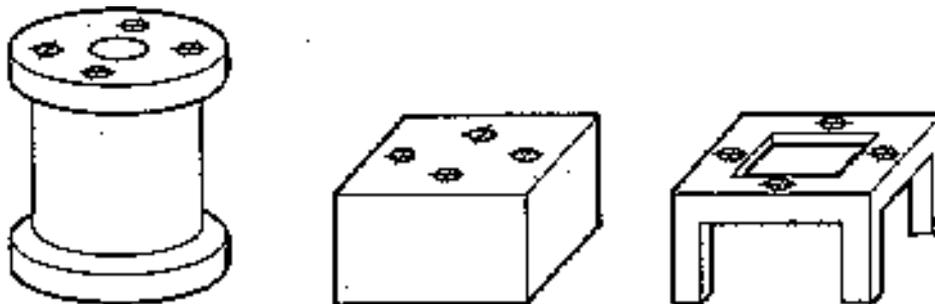
As figuras 4.4 a 4.7 mostram atributos diferentes de similaridade. Na figura 4.4 as três peças pertencem à mesma família de peças rotacionais e requerem operações similares de torneamento. A figura 4.5 mostra peças que não parecem que são similares, mas podem de fato ser fabricadas por um centro de usinagem com vários eixos que utiliza as mesmas ferramentas. A figura 4.6 mostra peças que têm uma operação em comum, que é a furação de quatro furos. Finalmente, a figura 4.7 mostra duas peças completamente idênticas no projeto, mas fabricadas a partir de materiais diferentes. Devido a isso, a peça de plástico será obtida por injeção, enquanto a peça de aço será torneada.



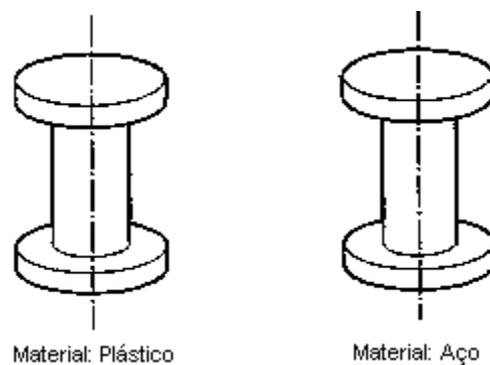
**Figura 4.4.** Família de peças rotacionais que exigem operações similares de torneamento



**Figura 4.5.** Peças prismáticas similares que exigem operações semelhantes de fresamento



**Figura 4.6.** Peças não-similares que exigem operações similares (furação, fresamento)



**Figura 4.7.** Peças similares que requerem processos de fabricação completamente diferentes

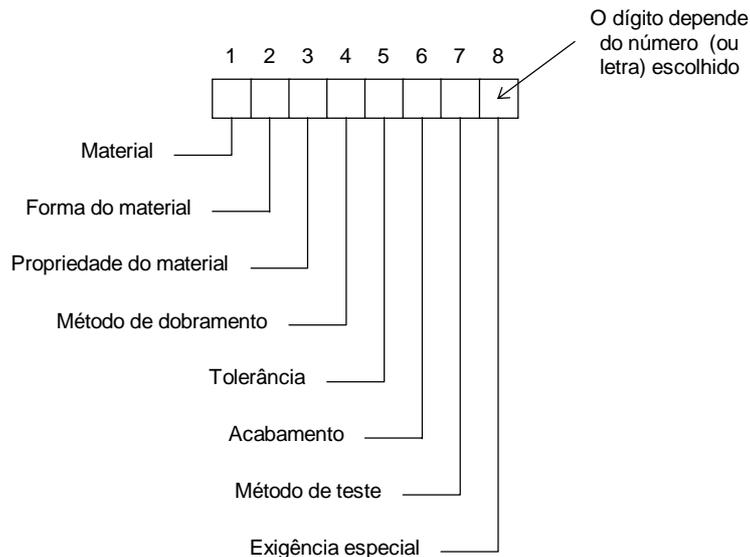
GT é uma tentativa de encontrar processos comuns de manufatura e agendar peças através do chão de fábrica para maximizar a utilização dos recursos disponíveis. Os grupos obtidos contêm conjuntos de códigos nos quais cada elemento do código descreve algum atributo associado à peça. Esses atributos variam desde informações geométricas até processos de fabricação. O código é bem diferente do número da peça, apesar de algumas organizações usarem o código GT como o número da peça. Os números da peça são simplesmente uma identidade para a peça individual.

O conceito de GT tem várias aplicações. GT é a realização de que vários objetos e situações possuem similaridades que torna possível fornecer soluções ou análises genéricas para todos os membros daquele grupo, poupando-se assim uma grande quantidade de recursos, tempo e esforço.

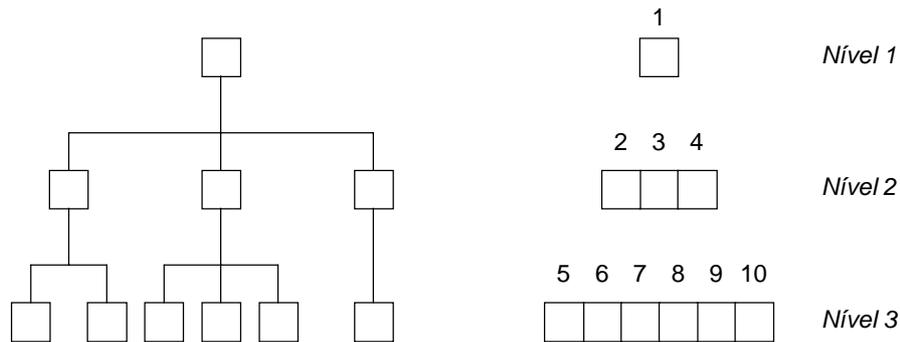
### ESTRUTURA DE CODIFICAÇÃO

Um sistema de codificação consiste de uma seqüência de símbolos que identificam o projeto da peça e/ou atributos de manufatura. Os símbolos são alfanuméricos, apesar de que a maioria dos sistemas usam somente números. As três estruturas básicas de códigos são:

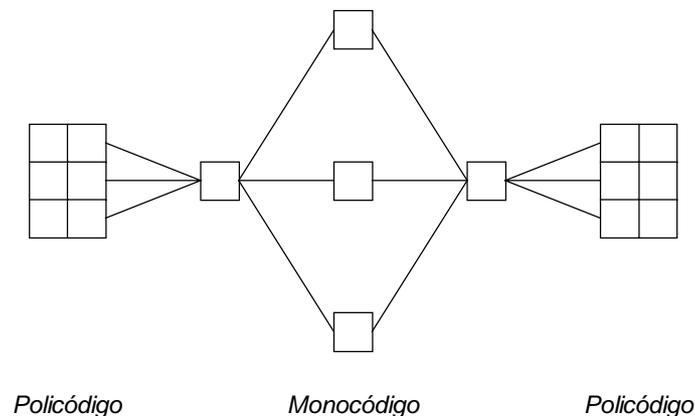
- (a) em cadeia, tabela ou policódigo (figura 4.8)
- (b) hierárquica, árvore ou monocódigo (figura 4.9)
- (c) híbrida ou combinada (figura 4.10)



**Figura 4.8.** Código com estrutura em cadeia



**Figura 4.9.** Código com estrutura hierárquica



**Figura 4.10.** Estrutura híbrida

A maioria dos sistemas C&C comerciais usados na indústria são uma combinação das estruturas em cadeia e a hierárquica. A estrutura híbrida é uma tentativa de alcançar as melhores características e ambos os códigos. Códigos híbridos são construídos tipicamente como uma série de pequenos policódigos. Dentro de cada uma dessas pequenas cadeias, os dígitos são independentes, mas um ou mais símbolos no código completo são usados para classificar a população de peças em grupos, como numa estrutura hierárquica. Os códigos variam desde 6 até 30 dígitos. Ao implementar um sistema C&C, a maioria das empresas preferem comprar um pacote comercial disponível em vez de desenvolver o seu próprio.

Em geral, a codificação pode ser aplicada em toda a empresa. As aplicações (por exemplo: marketing, engenharia, manufatura, compras, controle de materiais) podem ser consideradas de acordo com os tipos de dados necessários e dentro de um domínio específico da aplicação. Por exemplo, na manufatura pode-se codificar os dados de processos e dentro de um domínio de componentes mecânicos.

Apesar da intenção na lista de aplicações apresentada na tabela 4.1 é permitir desenvolver-se o código para cada segmento na lista, é possível desenvolver o código pra uma combinação de segmentos. Por exemplo, na manufatura, a extração de planos de processo pode ser combinada com a padronização de planos, roteamento da manufatura, extração de ferramental, e planejamento de máquinas para obter uma estrutura de código que pode ser utilizada na automatização do planejamento de processos.

**Tabela 4.1.** Aplicações que poderão ser consideradas para a codificação de manufatura

<i>Aplicação</i>	<i>Exigências de Dados</i>
Marketing	<ul style="list-style-type: none"> <li>• extração de dados de projeto</li> <li>• extração de dados de manufatura</li> <li>• extração de dados de custos</li> <li>• análise do produto</li> </ul>
Engenharia	<ul style="list-style-type: none"> <li>• análise do projeto</li> <li>• padronização do projeto</li> <li>• análise de valor</li> <li>• estimativa de custos</li> <li>• custos de manufatura</li> </ul>
Planejamento de Manufatura	<ul style="list-style-type: none"> <li>• padronização de planos de processo</li> <li>• roteamento da manufatura e análise de custos</li> <li>• família de programas NC</li> <li>• extração e padronização de ferramental</li> <li>• planejamento de máquinas</li> <li>• projeto de FMS</li> <li>• projeto de alimentação de peças</li> </ul>
Manufatura	<ul style="list-style-type: none"> <li>• células</li> <li>• FMS</li> </ul>
Compras	<ul style="list-style-type: none"> <li>• família de item comprado</li> <li>• análise de fornecedores</li> <li>• substituição</li> </ul>
Controle de Materiais	<ul style="list-style-type: none"> <li>• padronização de matéria-prima</li> <li>• redução de estoque intermediário</li> <li>• reutilização de estoque</li> <li>• resposta rápida às exigências de manutenção de peças</li> <li>• estoque de itens parcialmente completados para produzir uma família de peças</li> </ul>

Existem normalmente quatro tipos genéricos de dados: dados de produto; dados de processo; dados de recursos; dados de medições.

Os dados de produtos podem incluir o número da peça, número do desenho e tolerâncias. Os dados de processos incluem o código do processo, o plano padrão, plano alternativo, etc. Dados de recursos podem incluir o número do centro de trabalho, ferramental, habilidade do operador e código da máquina. Finalmente, os dados de medições incluem a quantidade anual, peso, tamanho de lote, etc.

A tabela 4.2 ilustra um detalhamento das exigências em cada uma das classes de dados genéricos.

**Tabela 4.2.** Exigências por classe genérica

<i>Classe de dados genéricos</i>	<i>Exigências</i>	
Produto	número da peça número do desenho descrição nível de revisão tamanho do desenho localização do desenho código da forma código da função dimensões	material dureza tolerâncias acabamentos camada de proteção ("coating") cor padrão de projeto unidades inglesas/métricas
Processo	código do processo tratamento térmico plano padrão plano alternativo número do programa NC para a família identificador de compra/fabricação própria	dados de testes processista tempos padrões data efetiva nível de revisão do plano
Recursos	número da estação de trabalho código da máquina seção de manufatura localização na planta equipamentos	ferramental habilidade do operador fornecedor primário fornecedor alternativo
Medições	quantidade anual tamanho de lote custo de material custa da manufatura	peso lead time tempo de setup tempo de processamento

O domínio para o código determina se a aplicação é sobre a matéria-prima ou peças acabadas. Dentre esses itens, tem-se: itens comerciais; fabricação; montagem; ferramental; máquinas e equipamentos.

Na construção do código para a representação de peças, os seguintes fatores são importantes:

- (a) o tipo de peças (chapas, rotacionais, prismáticas, etc.)
- (b) o domínio a ser representado;
- (c) o tipo de estrutura do código;

Quanto menor o número de dígitos que podem representar completamente uma peça, melhor.

Sistemas de codificação são normalmente construídos de tal maneira que os parâmetros mais importantes são descritos nos primeiros campos, e os menos importantes nos campos seguintes. O sistema de planejamento de processos deve ser capaz de selecionar o processo de fabricação e as ferramentas a partir do código.

## **DADOS DE PROJETO E PLANEJAMENTO DE PROCESSOS AUTOMATIZADO**

A maioria dos sistemas CAPP existentes não são generativos. Dentre os poucos sistemas generativos disponíveis, alguns utilizam o sistema CAD como a base para o planejamento. Mesmo assim, o grande gargalo na geração automática do plano de processos é a questão do reconhecimento de formas e o seu mapeamento em funções que podem originar operações de usinagem. O sistema CAD do futuro deve capturar mais do que informações geométricas. Ele deve capturar a visão do

projetista sobre o projeto e a fabricação da peça, que inclui a preparação das informações de processos. Porém a compreensão da geometria das peças a serem fabricadas ou montadas é bastante complexo. Certamente as “features” são elementos essenciais para sistemas CAPP generativos.

Uma “feature” pode ser definida como um elemento geométrico que contém informações importantes para o projeto e manufatura de uma peça (ou produto) (p.ex. furo, eixo, ranhura).

Existem três formas de identificar quais “features” existem numa peça:

- **Manual:** A primeira é usando-se métodos manuais para introduzir informações de fabricação num sistema CAPP. Esse método é tedioso e torna o sistema não-automatizado.
- **Reconhecimento de “features”:** Na segunda abordagem projeta-se livremente as peças, e então extrai-se as “features” da peça usando uma combinação de algoritmos de geometria computacional e IA. Essa abordagem é muito difícil de implementar e soluções de extração de “features” têm funcionado somente para domínios limitados de geometria, apesar de trabalhos mais recentes relatarem extratores mais robustos.
- **Projeto por “features”:** A terceira abordagem requer que “features” sejam simbolicamente projetadas na peça de forma que a peça “se lembre” que ela possui as “features”.

Um exemplo de plano de processos para a fabricação de uma peça de uma chapa metálica é ilustrado na figura 4.11.

### **Seleção de Dispositivos de Fixação**

A seleção de dispositivos de fixação tende a ser feita em pouco tempo no computador, onde o projetista pode selecionar os dispositivos e executar a fixação do material, e testar ao setup do ponto de vista de integridade estrutural, isto sem construir um modelo físico de testes. Sistemas especialistas provavelmente serão as ferramentas mais importantes para soluções de fixação. Isto porque a experiência de fixação pode convenientemente ser representada pela apresentação do conhecimento baseado em regras.

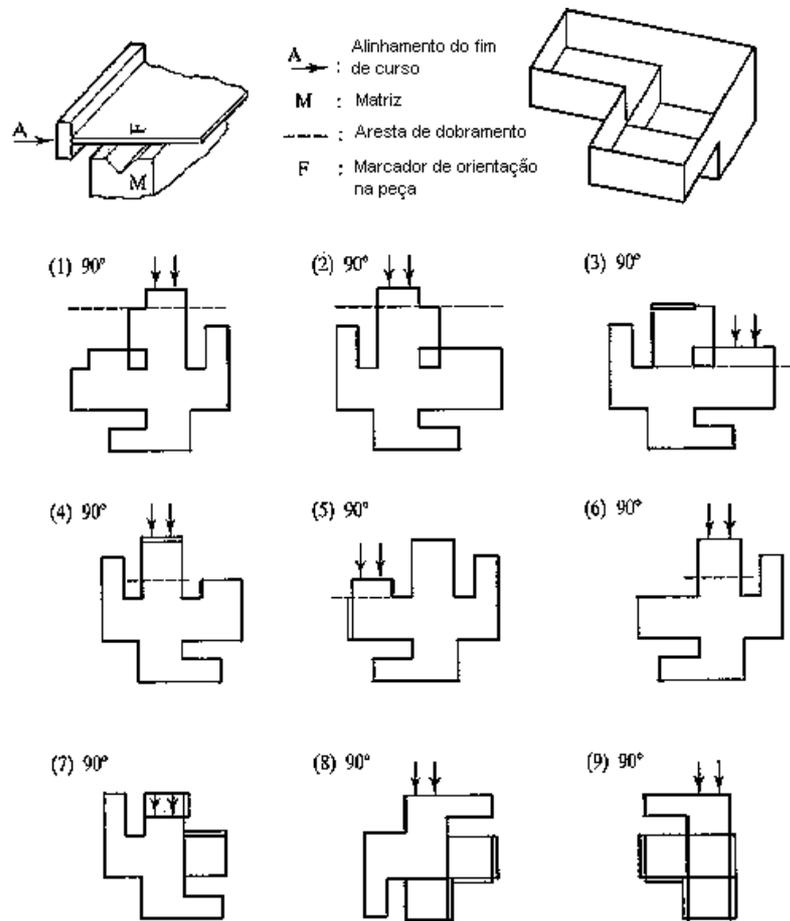
As funções do planejamento de fixação são as seguintes<sup>1</sup>:

- a seleção de elementos de fixação aproximados;
- mantê-los na base de dados e manusear as questões relevantes;
- “entender” a peça globalmente e escolher o esquema apropriado de fixação;
- fazer uma análise geométrica detalhada para determinar a localização e orientação dos elementos de fixação em relação à peça;
- determinar as interferências com as “features” para um setup particular;

---

<sup>1</sup> M. Kanumury, J.J. Shah e T.C. Chang, “An Automated Process Planning System for OTC-An Integrated CAM and CAM System”, Technical Report, School of Engineering, Purdue University, EUA, 1989

- mapear as orientações relativas dos elementos de fixação das coordenadas da peça para as coordenadas da máquina;
- conduzir uma análise de forças baseada nas ferramentas selecionadas;
- avaliar o esquema de fixação resultante.



**Figura 4.11.** Sequências de dobramento para uma peça feita a partir de uma chapa metálica

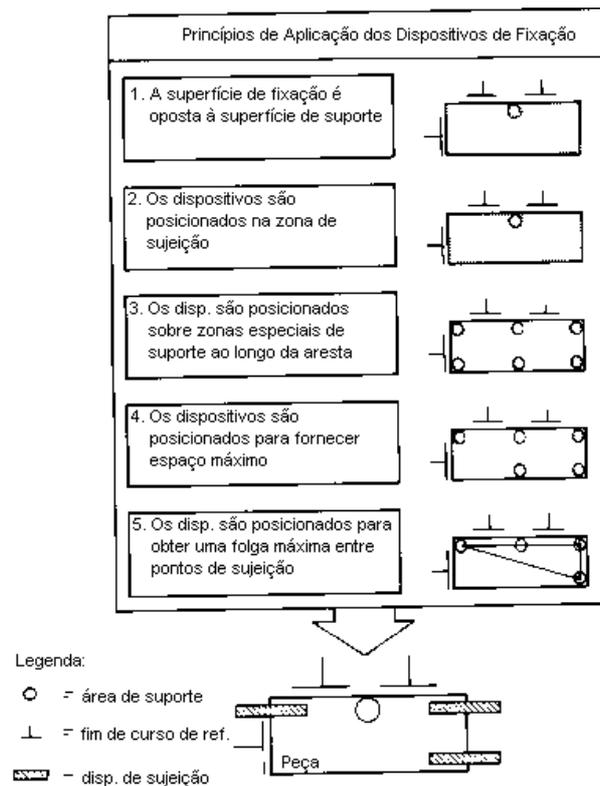
A figura 4.12 mostra métodos de apresentar-se o conhecimento para fixação.

### PLANEJAMENTO DE RECURSOS DE MANUFATURA (MRP II)

As questões em MRP II incluem o plano mestre de produção (MPS), o planejamento de requisitos de materiais (MRP), o planejamento de requisitos de capacidade, planejamento de liberação de ordens e seqüenciamento de operações (figura 4.13).

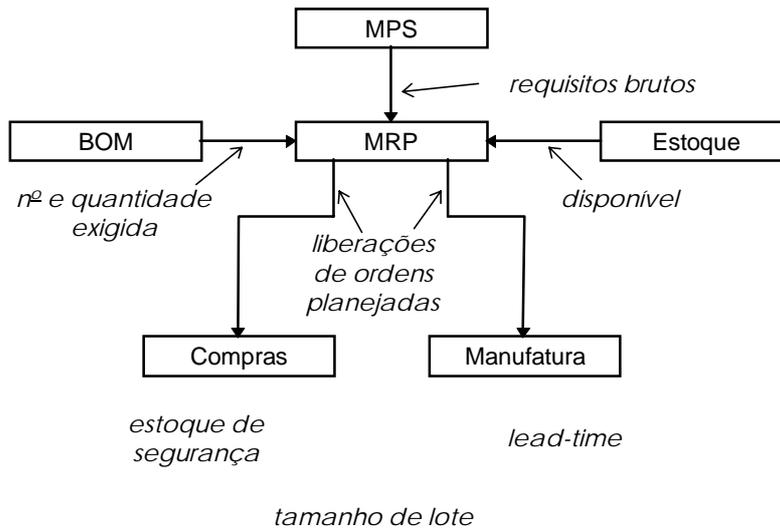
O planejamento de recursos inicia com um plano de longo prazo onde as atividades de produção são projetadas no futuro. O planejamento de mercado fornece informações de pesquisa sobre o mercado potencial, a demanda do consumidor externo, demografia, recursos, processos, novas

invenções, competição, etc. Desses planos de longo prazo, planos de médio e curto prazos podem ser obtidos. Planos de longo prazo podem ter um horizonte de cinco anos, de médio prazo de menos de 12 meses, e de curto prazo de duas semanas a um mês. Antes dos planos de médio e curto prazos serem ativados, deve haver uma liberação da ordem e o projeto do produto deve ser conhecido, bem como os seus métodos e seqüências de manufatura.



**Figura 4.12.** Vários princípios de aplicação de dispositivos de fixação a uma peça prismática

O *plano mestre de produção (MPS)* é produzido considerando-se as encomendas do cliente e a previsão baseada na pesquisa de mercado ou histórico do desempenho do produto no mercado. O MPS consiste de uma lista de produtos finais a serem fabricados, as quantidades encomendadas e as datas de entrega. O plano contém uma matriz que lista o número de produtos a serem completados numa dada escala de tempo (figura 4.14). O MPS normalmente é utilizado como entrada para o MRP que inclui o planejamento de estoque, planejamento da capacidade e planejamento de liberação de ordens.



**Figura 4.13.** Um modelo operacional de um MRP II

	Nº do período									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Previsão										
Disponível depois										
MPS										
Disponível antes										

**Figura 4.14.** Um plano mestre de produção

O MRP II começa com a concepção do MPS. O horizonte para o agendamento produzido aqui é normalmente um ou vários anos. Esse agendamento é usado para tomar decisões de capacidade para a planta, novos processos de manufatura, equipamentos e mão-de-obra.

O *planejamento de capacidade* refere-se ao fornecimento de recursos de manufatura quando eles são necessários para a produção. O horizonte de planejamento é normalmente em meses, com incrementos em semanas. Quando um ajuste de capacidade é necessário, ele deve incluir o equipamento de produção, subcontratação e planejamento de recursos humanos.

A *liberação de ordens* fornece detalhes para a produção interna. Quando a capacidade não puder ser agendada economicamente, ou quando problemas ocorrem com o equipamento de produção, então deve-se subcontratar ou introduzir horas extras. O horizonte de planejamento aqui é dias durante várias semanas à frente.

O *seqüenciamento de operações* refere-se à fila de operações em cada estação de trabalho. O sistema de seqüenciamento de operações tenta maximizar a utilização dos equipamentos e satisfazer as datas de entrega. O horizonte de planejamento é o turno do dia, e os incrementos são minutos ou horas.

## **PLANEJAMENTO DA PRODUÇÃO**

A função de planejamento da produção fornece uma estrutura para resolver conflitos devido a mudanças no marketing do produto e nos recursos de produção. Suponha que o marketing antevê uma oportunidade de expandir para um novo mercado e requisita os recursos de produção para um novo produto. Com um plano específico de produção, os recursos para um novo produto não podem ser alocados sem reduzir a produção de um outro produto. O processo de planejamento da produção obriga que o planejamento de recursos desenvolvido pela gerência seja consistente com a capacidade de produção necessária para o plano de produção. Depois que questões de marketing e finanças estejam resolvidas, e um plano de produção de médio prazo estiver pronto, a missão da manufatura para a empresa estará claramente definida. O plano de produção fornece para o planejamento da manufatura e para o chão de fábrica as ordens necessárias para satisfazer os objetivos da empresa.

O plano de produção é normalmente estabelecido em reais, dólares, ou em unidades agregadas por mês. Deve-se mencionar que o plano de produção não deve ser considerado como uma previsão; ele corresponde à produção planejada estabelecida para a qual todos na empresa são responsáveis. Por exemplo, a demanda prevista pode exceder as unidades agregadas no plano de produção. Uma decisão da gerência para produzir menos do que a demanda prevista pode ser tomada devido a várias razões: desejo de ter menor quantidade e maior qualidade, desejo de investir em equipamentos, desejo de alocar os recursos financeiros em outras áreas. O plano de produção fornece um meio para a tomada de decisões importantes quanto aos objetivos da empresa.

### **O Processo de Planejamento da Produção**

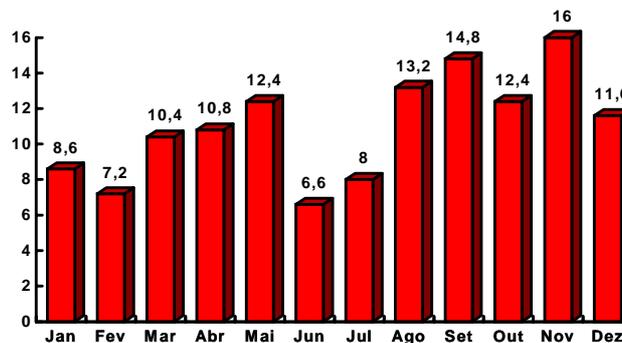
O planejamento da produção começa com uma boa previsão para o ano seguinte que leva em consideração as variáveis de mercado. O plano da produção é revisado em intervalos regulares para inclusão de mudanças requisitadas. Por exemplo, muitas empresas bem sucedidas freqüentemente revêem o plano de produção mensalmente e fazem mudanças trimestralmente. Uma grade de tempo freqüentemente estabelece limites que permitem identificar se mudanças podem ser feitas no ciclo de planejamento. Por exemplo, a grade de tempo pode impor que nenhuma mudança pode ser feita no período atual ou mais próximo e que não mais do que 10% de mudanças podem ser feitas no próximo período. Revisões rotineiras no plano de produção mantêm a comunicação aberta entre a gerência e a manufatura.

### **Planejamento da Produção e Gerenciamento Variável da Manufatura**

O plano de produção declara os objetivos da produção para todos os produtos fabricados pela empresa. Por exemplo, considere o plano de produção declarado em dólares por mês para uma

empresa que chamaremos aqui de XYZ, ilustrada na figura 4.15. Convertendo esta previsão num plano de produção requer uma decisão quanto aos recursos. Um estudo revela os seguintes fatos:

- o pico das vendas ocorre em novembro
- junho é o mês com menores vendas, i.e. \$6,6 milhões
- dois picos de vendas ocorrem, na primavera e no outono
- o total de vendas para o ano é de \$132 milhões



**Figura 4.15.** Previsões de vendas mensais para a empresa XYZ (milhões de dólares)

Antes que os recursos variáveis sejam alocados para satisfazer este plano de produção, as vendas em dólares por período deve ser convertida para horas de mão-de-obra por período. A conversão é efetuada usando-se uma estimativa, obtida dos registros de contabilidade da empresa, que relaciona o valor em dólares das vendas às horas de mão-de-obra direta. Numa situação de produção de baixa tecnologia, que depende de mão-de-obra manual, por exemplo, cada hora de mão-de-obra direta pode corresponder a \$30 de vendas. No caso da utilização de equipamentos de alta tecnologia, poder-se-ia chegar a \$100 de vendas resultantes de cada hora de mão-de-obra direta. Usando o fator de conversão de \$100, a tabela de figura 4.16 foi obtida para o plano de produção da figura 4.15. A coluna “Vendas” resulta diretamente da previsão (figura 4.15). A coluna “Horas de mão-de-obra” é calculada dividindo-se os dólares de venda pela taxa de conversão (i.e.  $\$86.000.000 / 100 = 86.000$  horas de mão-de-obra direta). A coluna de “Dias trabalhados” indica o número de dias úteis em cada período no mês. Note que a fábrica está fechada em junho por 10 dias úteis devido às férias dos empregados.

	Vendas (milhões de dólares)	Horas de mão-de-obra (dólares)	Dias trabalhados	Força de trabalho variável	Semana de trabalho variável
jan	8,6	86.000	21	512	29,72
fev	7,2	72.000	20	450	26,12
mar	10,4	104.000	23	565	32,81
abr	10,8	108.000	20	675	39,19
mai	12,4	124.000	22	705	40,90
jun	6,6	66.000	10	825	47,89
jul	8,0	80.000	21	476	27,64
ago	13,2	132.000	22	750	43,54
set	14,8	148.000	21	881	51,14
out	12,4	124.000	22	705	40,90
nov	16,0	160.000	20	1000	58,05
dez	11,6	116.000	20	725	42,09
	132	1.320.000	242	689	40,00

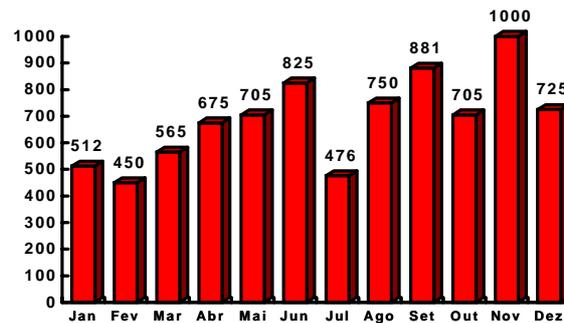
**Figura 4.16.** Dados da estratégia de produção “chase” (“perseguição”)

Um estudo da figura 4.16 indica que 160.000 horas de mão-de-obra direta são necessárias em novembro para satisfazer o valor máximo de vendas de \$16 milhões, e somente 66.000 horas serão necessárias em junho para satisfazer a demanda do período mais baixo de vendas. Esta grande variação nos requisitos de recursos humanos é a base para o planejamento dos recursos variáveis. Três estratégias diferentes de planejamento da produção são usadas para solucionar essa variação nas horas de mão-de-obra necessárias. Tais estratégias são: “chase”, “level” e combinada. Uma descrição de cada uma dessas estratégias é feita nas próximas seções.

### Estratégia de Produção “Chase” (“Perseguição”)

Essa estratégia requer que a produção em cada período seja igual à produção planejada para aquele período. Isto implica que o nível de estoque do produto no começo de cada período seja zero, uma vez que toda a produção planejada para aquele período seria produzida durante o período. Uma estratégia “chase” pura requer que ou o número de empregados ou as horas trabalhadas por semana por cada empregado deve mudar para satisfazer a produção planejada para o período.

Dados para a estratégia “chase” para a empresa XYZ, por exemplo, são fornecidos nas últimas duas colunas na figura 4.16. Na figura 4.17 é dado o gráfico de emprego mensal. A coluna na figura 4.16 denominada “Força de trabalho variável” indica o número de empregados em tempo integral necessários a cada mês para satisfazer exatamente a produção planejada. O número de empregados é determinado calculando-se o total de horas trabalhadas por cada empregado no período (21 dias trabalhados vezes 8 horas por dia = 168 horas por período por empregado). O número de empregados necessários por período é então calculado dividindo-se o total de horas de mão-de-obra para o período (86.000) pelas horas dos empregados (168) por período (86.000 horas de mão-de-obra dividido por 168 horas por empregado = 512 empregados).



**Figura 4.17.** Número mensal de empregados em tempo integral na estratégia “chase”

Uma análise dessa estratégia indica que a quantidade de empregados varia de 450 em fevereiro até 1.000 em novembro. Uma mudança nessa magnitude no número de empregados em tempo integral ao longo de 12 meses seria difícil de suportar. As únicas indústrias que podem usar esse tipo de estratégia com sucesso normalmente requerem somente uma pequena habilidade da mão-de-obra.

Uma outra abordagem usada na estratégia “chase” mantém o número de empregados constante e varia as horas trabalhadas por semana (ver figura 4.16, na coluna “Semana de trabalho variável”). O número médio de empregados necessários para uma produção anual (689) é indicada na parte inferior da coluna anterior. Essa estratégia mantém a força de trabalho em 689 e varia as horas trabalhadas por semana para satisfazer exatamente a produção planejada. Note que a carga semanal de trabalho varia de 26,12 em fevereiro até 58,05 em novembro. As horas necessárias por semana de trabalho para a estratégia “chase” são calculadas determinando-se inicialmente as horas por mês por empregado (86.000 horas de mão-de-obra por mês dividido por 689 empregados = 124,8 horas de mão-de-obra por empregados por mês). Dividindo-se o valor acima pelos dias úteis no mês resulta nas horas trabalhadas por dia por empregado ( $126,1 / 21 = 5,94$  horas trabalhadas por dia por empregado). Finalmente, multiplicando-se as horas diárias pelos 5 dias resulta no total de horas semanais para cada empregado.

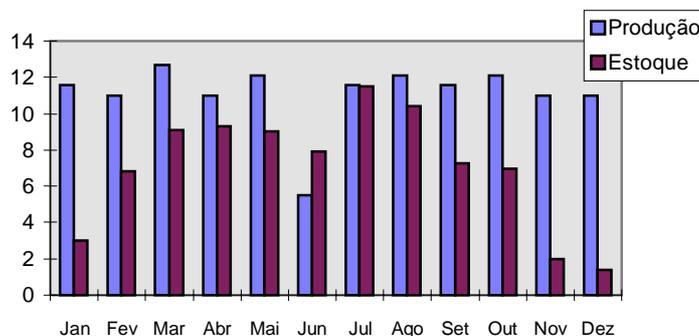
### **Estratégia de Produção “Level” (“Nivelamento”)**

Essa estratégia requer que a produção em cada período seja igual à produção média mensal calculada a partir dos valores totais da produção para o ano. Com essa estratégia a força de trabalho e horas de trabalho semanal são constantes, e a produção é aproximadamente a mesma a cada mês. Como resultado, em alguns meses produtos produzidos não são vendidos, e o estoque de peças cresce para cobrir os meses em que a demanda de mercado é maior do que a produção. Os resultados da produção mensal são listados na figura 4.18 nas colunas “Produção mensal” e “Balanço de estoque”. Note que a força de trabalho é mantida em 689 empregados, e a semana de trabalho é de 40 horas. A

produção mensal é calculada multiplicando-se o número de empregados (689) por 8 horas por dia por dias trabalhados (21) pelo fator de conversão dólar-vendas (\$100) por hora trabalhada. O balanço de estoque em dólares é a diferença entre os dólares de vendas e os dólares de produção. A estratégia “level” é ilustrada graficamente na figura 4.19, com o nível de produção e o balanço de estoque plotados. A produção não é nivelada exatamente porque o número de dias trabalhados por mês varia um pouco de mês para mês. O balanço de estoque aumentou inicialmente, atingiu um máximo em julho, em preparação para a alta demanda no outono.

	Vendas (milhões de dólares)	Horas de mão-de-obra (dólares)	Dias trabalhados	Força de trabalho nivelada	Produção mensal (milhões de dólares)	Balanço de estoque (milhões de dólares)
jan	8,6	86.000	21	689	11,58	2,98
fev	7,2	72.000	20	689	11,02	6,80
mar	10,4	104.000	23	689	12,68	9,08
abr	10,8	108.000	20	689	11,02	9,30
mai	12,4	124.000	22	689	12,13	9,03
jun	6,6	66.000	10	689	5,51	7,94
jul	8,0	80.000	21	689	11,58	11,52
ago	13,2	132.000	22	689	12,13	10,44
set	14,8	148.000	21	689	11,58	7,22
out	12,4	124.000	22	689	12,13	6,95
nov	16,0	160.000	20	689	11,02	1,97
dez	11,6	116.000	20	689	11,02	1,40
	132	1.320.000	242	689	11,12	7,05

**Figura 4.18.** Estratégia de produção “level”



**Figura 4.19.** Gráfico resultante da implementação da estratégia “level”

Cada método possui suas vantagens e desvantagens. A vantagem da estratégia “chase” é que não há estoque; entretanto, há uma variação da força de trabalho, que representa um alto custo na contratação e demissão de empregados. Na implementação da semana variável, há a desvantagem do custo de turnos extras e da implementação de semanas mais curtas. A vantagem da estratégia “level” é a força de trabalho e a semana constantes, mas isto resulta num custo de estoque. Como resultado, muitas empresas usam uma combinação das duas estratégias

### Estratégia de Produção Combinada

A estratégia combinada usa as melhores qualidades das estratégias “chase” e “level” (ver figura 4.20). Note que a força de trabalho é mantida nivelada em 610 empregados para os primeiros 7 meses, e então aumenta para 809 empregados para os últimos 5 meses. Os números no gráfico assumem uma semana constante de 40 horas para todos os períodos. Usando esse método, o estoque médio é reduzido de \$6,31 milhões para \$3 milhões. Os recursos economizados com o estoque devem ser superiores aos custos de mudanças na força de trabalho duas vezes no ano.

	Vendas (milhões de dólares)	Dias trabalhados	Força de trabalho nivelada	Produção mensal (milhões de dólares)	Balanco de estoque (milhões de dólares)
jan	8,6	21	610	10,25	1,65
fev	7,2	20	610	9,76	4,21
mar	10,4	23	610	11,22	5,03
abr	10,8	20	610	9,76	3,99
mai	12,4	22	610	10,74	2,33
jun	6,6	10	610	4,88	0,61
jul	8,0	21	610	10,25	2,86
ago	13,2	22	809	14,24	3,89
set	14,8	21	809	13,59	2,69
out	12,4	22	809	14,24	4,52
nov	16,0	20	809	12,94	1,47
dez	11,6	20	809	12,94	2,81
	132	242	689	11,23	3,00

**Figura 4.20.** Estratégia de produção combinada

### PLANO MESTRE DE PRODUÇÃO (MPS)

O principal método usado para representar dados de MPS é o registro de períodos, ilustrado na figura 4.14. O registro é usado para mostrar a relação entre a taxa de saída, previsão de vendas, e o balanço de estoque esperado. O número de períodos indicado no registro é uma função da empresa específica e do produto. A previsão representa o número de unidades de itens-fim que a gerência antevê que será vendida naquele período. Dependendo da estratégia de produção, as unidades mostradas na linha de previsão serão números do produto (no caso de produção para estoque) ou então informações do BOM (no caso de produção por encomenda).

A linha “Disponível depois” representa o balanço de estoque no fim do período ou o número de unidades disponíveis para venda no próximo período. A linha “MPS” indica o número de unidades agendadas para a produção durante o período e disponível para satisfazer a previsão para o período. A linha “Disponível antes” é o número de unidades presentes no estoque no início do primeiro período.

O registro ilustrado na figura 4.21 mostra todos os dados para 10 períodos de produção. Note que há uma previsão de venda de 5 unidades por período até o período 6, e 20 unidades por período até o período 10. O processo de produção é determinado a partir das entradas na linha de MPS. Como o plano propõe a produção de 11 unidades em cada período, tem-se a estratégia “level”.

O agendador MPS começa com o registro que possui valores na linha de “previsão” e “disponível antes”. Dependendo da política da empresa e recursos disponíveis, decide-se aplicar uma das três estratégias descritas anteriormente. Para esse registro (figura 4.21), optou-se pela estratégia “level”. O número de unidades de MPS por período foi determinado somando-se a previsão para 10 períodos (110 unidades) e dividindo-se pelo número de períodos, chegando-se à taxa de produção no período (11). Note que o estoque aumenta nos primeiros seis períodos para cobrir a maior taxa de vendas nos últimos quatro períodos. Com os valores na linha MPS inseridos no registro, o agendador calcula a linha disponível começando no período 1. O valor disponível no fim do período 1 é igual ao balanço mais as unidades produzidas no período 1 menos as vendas previstas para o período ( $20 + 11 - 5 = 26$ ). O mesmo processo repete-se para o período 2, exceto que o valor disponível no período 1 torna-se o valor disponível para o período 2 ( $26 + 11 - 5 = 32$ ).

	Nº do período									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Previsão	5	5	5	5	5	5	20	20	20	20
Disponível depois	26	32	38	44	50	56	47	38	29	20
MPS	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
Disponível antes	20									

**Figura 4.21.** Um registro de períodos num MPS

Como já mencionado anteriormente, em muitas situações de produção os produtos e peças são produzidas em tamanhos de lote. No registro de MPS mostrado na figura 4.21, a hipótese foi feita que 11 unidades era um tamanho de lote econômico para o produto. Se um tamanho de lote diferente for necessário para a fabricação econômica do produto, isto deve-se refletir no registro de MPS. Para demonstrar esse conceito, assumamos que um tamanho de lote de 30 unidades é o menor valor para a estratégia “level”. O novo registro é ilustrado na figura 4.22. Note que o MPS proporia a produção de 30 unidades nos períodos 1, 4, 7 e 10. Compare a linha “Disponível depois” nos registros das figuras 4.20 e 4.21. Note que os níveis de estoque são maiores quando maiores tamanhos de lote são necessários. Além disso, o valor do MPS para o período 10 é zero porque as 20 disponíveis no período 9 satisfazem a previsão de 20 para o período 10. Entretanto, isto significa que o estoque para o período 11 é zero. Se existe um nível mínimo de estoque ou *estoque de segurança* necessário para a manufatura, uma ordem MPS de 30 unidades no período 10 seria necessária.

	Nº do período									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Previsão	5	5	5	5	5	5	20	20	20	20
Disponível depois	45	40	35	60	55	50	60	40	20	0
MPS	30			30			30			
Disponível antes	20									

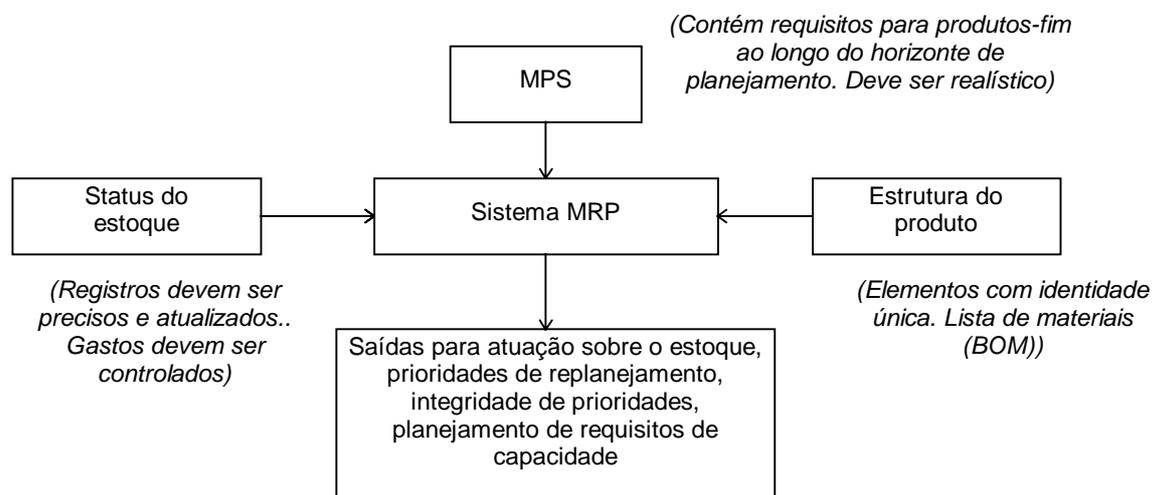
**Figura 4.22.** Um registro de períodos num MPS com tamanhos de lote

Se nenhum tamanho de lote for necessário, o sistema de produção produz lote a lote, ou apenas o que for necessário; entretanto, devido ao tempo de setup e um número de outras operações que adicionam custo à manufatura do produto, muitas operações de manufatura estabelecem um tamanho de lote mínimo para a produção.

### PLANEJAMENTO DE REQUISITOS DE MATERIAIS (MRP)

Estoque é muito caro porque ele amarra recursos financeiros que poderiam ser usados por outras áreas da manufatura. Como foi mencionado nos Capítulos 1 e 2, em estruturas de manufatura modernas, uma tentativa é feita para trabalhar sem estoque ou para reduzi-lo ao mínimo. Entretanto, freqüentemente o fornecedor é exigido a estocar e usar as peças quando há a necessidade. Na maioria das funções da manufatura, necessita-se algum estoque ou estoque de segurança.

O MRP é um tipo de sistema de gerenciamento de estoque. A figura 4.23 mostra a relação geral do MRP e outras atividades de planejamento.

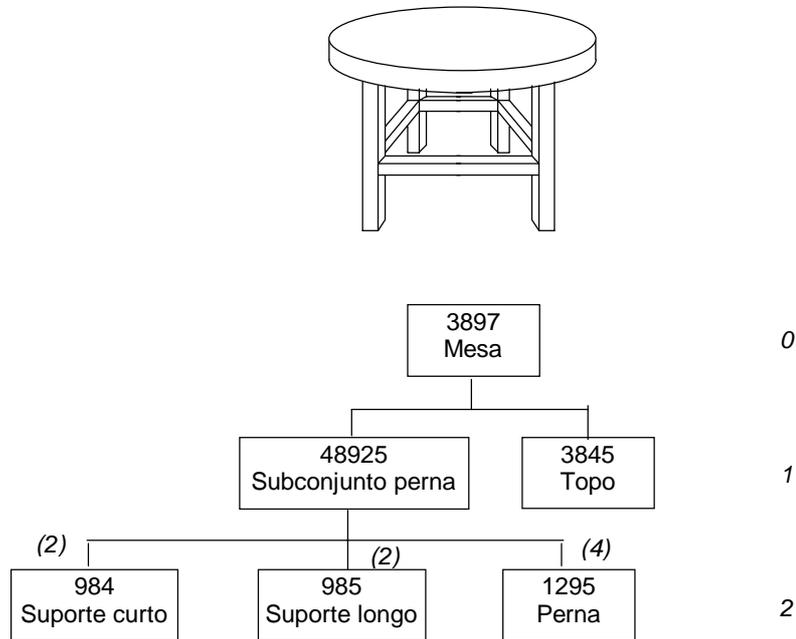


**Figura 4.23.** Relação do sistema MRP com outros sistemas de planejamento

Duas entradas tradicionais, o BOM e o estoque atual, fornecem informações críticas para um sistema MRP efetivo. As entradas dessas duas fontes devem ser sincronizadas e precisas para um sistema formal de MRP funcionar. Atualizações do sistema de controle de estoque para mudanças no estoque devido ao movimento de peças na manufatura ou compras devem ser contínuas. Por exemplo, em algumas operações de manufatura, peças de fornecedores chegam diariamente, e portanto o controle de estoque é atualizado quando as peças chegam, visando fornecer informações sincronizadas para os planejadores.

Na maioria das instalações de MRP, uma precisão do BOM de 95% ou mais é exigido, enquanto que uma precisão de localização e contagem de peças acima de 98% são necessários. O

BOM fornece para o MRP o número da peça e a quantidade de todas as peças necessárias para construir e montar o produto. Sistemas de controle de estoque fornecem para o MRP o balanço de peças disponíveis e dos materiais listados no BOM. Um exemplo de um BOM é ilustrado na figura 4.24.



**Figura 4.24.** Um exemplo de lista de materiais (BOM)

A saída de um MRP, que são as liberações de ordens planejadas, são direcionadas ou para compras ou para a manufatura interna, baseado em estudos sobre comprar ou fazer. Os cálculos de MRP que geram as ordens planejadas são afetadas por outras três variáveis: estoque de segurança, tamanho de lote e lead time. Um registro de MRP, ilustrado na figura 4.25, é usado para registrar manualmente os dados associados aos cálculos do MRP.

### Cálculos de MRP

O registro do MRP na figura 4.26 ilustra os valores presentes no registro antes dos cálculos. Os *requisitos brutos* (16 unidades) podem advir tanto do próximo nível mais elevado do diagrama da estrutura do produto ou do MPS. O valor dos *recebimentos agendados* (três vezes o tamanho de lote de 5, i.e. 15 unidades) representa liberações de ordens planejadas que tornaram-se ordens firmadas quando estas foram liberadas para a manufatura ou para o fornecedor no último período. O estoque disponível para o início do primeiro período (4 unidades mostradas na caixa) é determinado a partir do registro do MRP referente ao último período, e é frequentemente verificado por uma contagem do estoque de peças. O lead time, tamanho de lote e o estoque de segurança são valores estabelecidos pelos departamentos de compras e manufatura.

N <sup>o</sup> da peça	Número do Período									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Requisitos brutos										
Recebimentos agendados										
Disponível antes										
Recebimentos de ordens planejadas										
Liberações de ordens planejadas:										
Lead time =										
Tamanho de lote =										
Estoque de segurança =										

**Figura 4.25.** Um registro de MRP

N <sup>o</sup> da peça	Número do Período									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Requisitos brutos	16		8	15	21		12	15		28
Recebimentos agendados	15									
Disponível antes	4									
Recebimentos de ordens planejadas										
Liberações de ordens planejadas:										
Lead time = 1										
Tamanho de lote = 5										
Estoque de segurança = 0										

**Figura 4.26.** Registro básico de MRP com valores iniciais

Os cálculos do registro iniciam com o primeiro período e prosseguem até o último. Os cálculos determinam o balanço projetado disponível e a necessidade de uma liberação de ordem planejada. Se o balanço de estoque projetado for positivo e acima do nível de estoque de segurança, nenhuma ação é necessária para aquele período. Entretanto, se o balanço for negativo ou menor do que o estoque de segurança exigido, uma liberação de ordem é necessária e deve ser incluída nos cálculos do balanço de estoque. Os cálculos são fáceis de entender quando ilustrados por um exemplo usando os dados na figura 4.26. Os resultados são apresentados na figura 4.27.

*Cálculos no Período 1:*

$$\text{Estoque inicial} + \text{recebimentos agendados} - \text{exigências brutas} = \text{balanço projetado disponível}$$

$$4 + 15 - 16 = 3 \text{ unidades}$$

O balanço projetado disponível de 3 unidades estaria disponível no início do segundo período.

*Cálculos no Período 2:*

$$\text{Estoque inicial} + \text{recebimentos agendados} - \text{exigências brutas} = \text{balanço projetado disponível}$$

(ou recebimentos de ordens planejadas)

$$3 + 0 - 0 = 3 \text{ unidades}$$

O estoque inicial para o período 2 é o estoque final para o período 1. O período 2 poderia ter ou um recebimento agendado ou um recebimento de ordem planejada, dependendo das necessidades da produção e do lead time. Nessa situação não houve necessidade de nenhum dos dois. As equações para todos os períodos subsequentes serão as mesmas que a equação do período 2.

$$\text{Cálculos no Período 3:}$$

$$3 + 5 - 8 = 0 \text{ unidades}$$

$$\text{Cálculos no Período 4:}$$

$$0 + 15 - 15 = 0 \text{ unidades}$$

$$\text{Cálculos no Período 5:}$$

$$0 + 25 - 21 = 4 \text{ unidades}$$

N <sup>o</sup> da peça	Número do Período									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Requisitos brutos	16		8	15	21		12	15		28
Recebimentos agendados	15									
Disponível antes	4	3	3	0	0	4	4	2	2	2
Recebimentos de ordens planejadas			5	15	25		10	15		30
Liberações de ordens planejadas:		5	15	25		10	15		30	
Lead time = 1										
Tamanho de lote = 5										
Estoque de segurança = 0										

**Figura 4.27.** Registro de MRP completado

Um exemplo de aplicação do MPS e do MRP numa mesma tabela é dado nas figuras 4.28 e 4.29, para dois componentes da mesa ilustrada na figura 4.24.

## INTRODUÇÃO AO CONTROLE DA PRODUÇÃO

O controle da produção, também chamado de controle de chão de fábrica, gerencia o fluxo detalhado de materiais dentro do chão de fábrica. Pode ser definido como os princípios, abordagens e técnicas usadas por gerentes para planejar, agendar, controlar e avaliar a eficiência das operações de produção.

Produto 48925 (subconjunto Perna)	Número do Período									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Previsão	10	10	10	20	10	10	20	20	20	20
Disponível depois	25	15	5	30	20	10	65	45	25	5
MPS	(30)			(45)			(75)			
Disponível antes	5									
		2x			2x			2x		
Peça n <sup>o</sup> 948 (suporte curto)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Requisitos brutos	(60)			(90)			(150)			
Recebimentos agendados	40									
Disponível antes	23	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Recebimentos de ordens planejadas				90			150			
Liberações de ordens planejadas:		90			150					
Lead time = 2										
Tamanho de lote = 5										
Estoque de segurança = 0										

**Figura 4.28.** Interface entre registro de MRP e MPS para peças da mesa da figura 4.24

	Número do Período										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Previsão	10	10	10	20	10	10	20	20	20	20	
Disponível depois	25	15	5	30	20	10	65	45	25	5	
MPS	30			45			75				
Disponível antes	5										
		1x				1x				1x	
<i>Peça no 3897 (mesa)</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Requisitos brutos	30			45			75				
Recebimentos agendados	40										
Disponível antes	5	15	15	15	10	10	10	15	15	15	
Recebimentos de ordens planejadas				40			80				
Liberações de ordens planejadas: Lead time = 3 Tamanho de lote = 20 Estoque de segurança = 0		40			80						

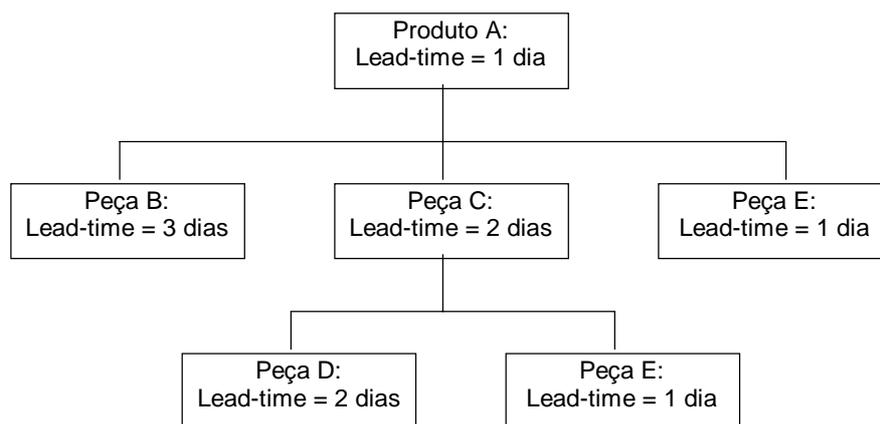
**Figura 4.29.** Interface entre registro de MRP e MPS para peças da mesa da figura 4.24

O controle da produção busca o equilíbrio entre os seguintes objetivos: (1) minimizar o investimento em estoque; (2) maximizar o serviço ao consumidor; (3) maximizar a eficiência da manufatura.

Alguns procedimentos são normalmente usados para agendar a produção, e aqui serão apresentados os seguintes: gráficos de Gantt, e regras de prioridade na estação. Entretanto, antes de discutir essas técnicas, serão introduzidos o diagrama da estrutura do produto, o roteamento da peça e o lead time.

### Diagrama da Estrutura do Produto

Um diagrama de estrutura do produto é praticamente o mesmo que uma lista de materiais, e representa graficamente o produto final em termos de todos os componentes exigidos. Por exemplo, na figura 4.30, o produto A é produzido através da montagem de uma peça B, uma peça C e uma peça E. A peça C é feita por montagem de uma peça D e uma peça E. Os itens no diagrama da estrutura do produto são identificados por níveis, com o nível 0 representando o produto acabado. A estrutura apresentada na figura 4.30 é simples, entretanto a estrutura correspondente a um cortador de grama poderia possuir muitos níveis e centenas de peças.



**Figura 4.30.** Exemplo de um diagrama da estrutura de um produto

### Roteamento de Peças e Lead times

Dados de roteamento e lead time para cada peça no produto são entradas essenciais para um sistema de controle da produção. A folha de roteamento, preparada manualmente pelo departamento de engenharia industrial ou gerado por um software de PCP, especifica cada operação de produção e a localização da estação de trabalho. Uma folha de roteamento (figura 4.31) para as peças D e E (ver figura 4.30) mostra o tempo exigido para cada operação e o total de horas em cada centro de trabalho. O lead time para cada peça na estrutura da figura 4.30 é o mesmo valor usado nos registros de MRP para calcular as datas das liberações de ordens planejadas.

Como o roteamento da figura 4.31 ilustra, o lead time inclui os seguintes elementos:

- **Tempo de processamento:** o tempo do tamanho de lote pela operação ou tempo de processamento da máquina por peça.
- **Tempo de setup:** o tempo para preparar o centro de trabalho independentemente do tamanho de lote agendado.
- **Tempo de movimentação:** tempo necessário para mover um lote de peças ou matéria-prima do centro de trabalho anterior para o centro de trabalho atual.
- **Tempo de espera:** o tempo de espera para processamento no centro de trabalho.

#### Roteamento para a peça D (horas)

Operação	Centro de Trabalho	Tempo de Processamento	Tempo de Setup	Tempo de Movimentação	Tempo de Espera	Tempo Total	Tempo Aproximado
1	201	1,6	0,5	0,4	2,6	5,1	5,0
2	208	1,5	0,3	0,2	2,8	4,8	5,0
3	204	0,1	0,1	0,3	0,6	1,1	1,0
4	209	1,2	0,8	0,3	2,3	4,6	5,0

Lead time total = 16 horas (2 dias)

*Roteamento para a peça E (horas)*

Operação	Centro de Trabalho	Tempo de Processamento	Tempo de Setup	Tempo de Movimentação	Tempo de Espera	Tempo Total	Tempo Aproximado
1	201	1,1	0,4	0,3	1,8	3,6	4,0
2	204	0,2	0,3	0,2	0,5	1,2	1,0
3	205	1,2	0,1	0,4	1,5	3,2	3,0

*Lead time total = 8 horas (1 dia)*

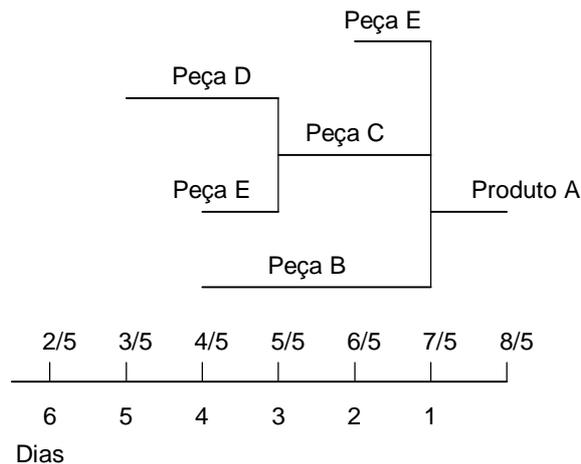
**Figura 4.31.** Roteamento de peças

Os últimos três elementos na lista adicionam custo ao produto, mas não valor; em consequência, a redução ou eliminação dos tempos de setup, movimentação e espera deve ser uma parte do processo de melhoria contínua na fábrica. Além disso, o tempo de espera é freqüentemente aquele que contribui para o lead time e oferece a maior oportunidade para melhoria do lead time. Pequenos tamanhos de lote não são econômicos quando os tempos de setup e movimentação são elevados comparados com o tempo de processamento porque eles aumentam o custo de cada peça.

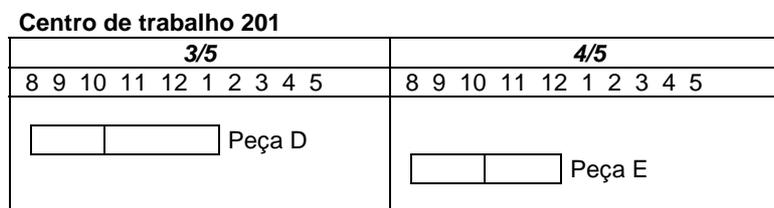
### Gráficos de Gantt e Quadros de Agenda

Gráficos ou diagramas de Gantt são uma ferramenta de controle de chão de fábrica usados geralmente por fabricantes pequenos e médios. O processo inicia com a preparação de um gráfico regressivo (figura 4.32) que mostra as datas de início e fim da manufatura baseada na folha de roteamento (figura 4.31) ou lead times de MRP para todas as peças no produto (figura 4.30). Baseado nos lead times, a produção deve iniciar no dia 3/5, que ocorre 5 dias antes da data de entrega.

Duas situações que dificultam o controle do chão de fábrica são visíveis nesse exemplo: (a) centros de trabalho comuns; e (b) sobreposição das agendas de produção. Ambas as peças usam o centro de trabalho 201 como a primeira operação e o centro de trabalho 204 para uma operação posterior. Além disso, a produção das peças D e E sobrepõem-se no dia 4/5; e também a peça E é agendada para produção em dois dias diferentes. Usando o gráfico regressivo e dados da folha de roteamento para cada peça, elaborou-se o gráfico de Gantt na figura 4.33 para o centro de trabalho 201. O gráfico inclui o lead time total e indica que o centro de trabalho 201 pode manusear ambas as peças. Nenhum conflito ocorre entre as agendas para as peças D e E. A área hachurada na barra indica que há uma componente de espera no lead time total. Se um conflito ocorre no centro de trabalho durante o agendamento de outras peças, os agendadores do centro de trabalho podem usar o tempo de espera para ajustar as agendas da peça encurtando o tempo de espera e processando as peças mais cedo. Freqüentemente, os tempos de movimentação e espera não são incluídos nos gráficos de Gantt para o centro de trabalho, para que o gráfico reflita mais precisamente a produtividade do centro de trabalho.



**Figura 4.32.** Roteamento de peças



**Figura 4.33.** Gráfico de Gantt para o centro de trabalho 201: peças D e E

Em algumas aplicações, empresas colocam o gráfico de Gantt num grande quadro de agendamento onde a atividade planejada para cada centro de trabalho é fácil de ser verificada. O trabalho de agendamento com gráficos de Gantt é bem entendido e efetivo para um número limitado de centros de trabalho e variedade de peças. Entretanto, a manutenção do gráfico atualizado com a última mudança na agenda é difícil quando o número de peças e centros de trabalho aumenta. Além disso, a comunicação de mudanças ao chão de fábrica em tempo real é uma exigência difícil. Algumas empresas atacam esse problema usando microcomputadores no chão de fábrica e software que cria dinamicamente um “quadro de agendamento”.

### Controle de Prioridade e Técnicas de Expedição

A segunda técnica usada para controlar a atividade no chão de fábrica inclui um conjunto de regras de sequenciamento de prioridades. Uma aplicação efetiva das regras requer um sistema PCP com uma base de dados integrada, mecanismo de expedição e regras de prioridades.

### Requisitos do Sistema

O sistema requer uma base de dados integrada para todos os recebimentos agendados da manufatura, com ordens que incluem dados de identificação de peças, informações de roteamento

para todas as operações, datas de operações agendadas, e datas agendadas de conclusão. Além disso, a base de dados deve acumular os seguintes dados sobre estoque intermediário: data real de conclusão, datas de movimento de peças e materiais, utilização de mão-de-obra, e refugo.

Uma segunda exigência requer um mecanismo confiável de expedição, definido como se segue: um mecanismo de expedição é um processo para a seleção e seqüenciamento de tarefas de manufatura em centros de trabalho individuais e um processo de atribuição de tarefas a trabalhadores.

O sistema de expedição efetua quatro funções: (1) determina o ranqueamento relativo através de regras de prioridade para todas as tarefas liberadas para a manufatura; (2) comunica as tarefas ranqueadas para o chão de fábrica através do uso de uma lista de expedição; (3) rastreia o movimento das tarefas em tempo real através do chão de fábrica; (4) monitora e prevê as filas para os centros de trabalho. A lista de expedição, um componente básico do sistema de expedição, fornece uma lista de ordens de manufatura diárias, numa seqüência de prioridade, orientada por centro de trabalho (ver figura 4.34).

Planta: 10		Departamento: 25		Centro de trabalho: 15		Capacidade: 100hrs		Data: 5/9	
Nº pa peça	Nº da ordem	Quantidade	Horas/unidade	Total de horas	Data de entrega				
12-9201	SO 73421	300	0,2	60	20/9				
12-4510	SO 73107	100	0,3	30	22/9				
18-2009	SO 73560	150	0,2	30	28/9				
				120					

Chegada em 6/9					
12-7210	SO 73416	100	0,5	50	4/10
15-0379	SO 73601	100	0,2	20	7/10

**Figura 4.34.** Exemplo de lista de expedição

### **Regras de Prioridades**

As informações na figura 4.35 correspondem a um exemplo de dados usados para o cálculo das prioridades de agendamentos. As datas de entrega e datas de hoje são expressas como o número de dias desde o primeiro dia do ano. Por exemplo, a data de entrega de 7/2 seria mostrada como 38 (isto é, 31 + 7) para esses cálculos.

Nº da ordem	1A	2A	3A
Data de chegada	117	115	116
Data de entrega	125	120	130
Lead time restante (LTR)	8	5	10
Tempo de processamento restante (PTR)	6	4	5
Operações restantes (OR)	1	2	8
Tempo da próxima operação	6	3	1

*Nota: todos os tempos em dias; data de hoje: segunda-feira, 117*

**Figura 4.35.** Dados de ordens para o cálculo de prioridades

- Data de entrega mais próxima:

Prioridade	Data de entrega mais próxima	Nº da ordem
1	120	2A
2	125	1A
3	130	3A

- Próxima operação com tempo mais curto:

Prioridade	Tempo da próxima operação	Nº da ordem
1	1	3A
2	3	2A
3	6	1A

Essa regra ignora as informações sobre a data de entrega e o tempo de processamento restante porque ela processa ordens baseadas na velocidade de execução. Essa regra maximiza o número de ordens de serviço processadas e minimiza o número de espera em fila.

- O primeiro que chega é o primeiro a ser servido:

Prioridade	Data de chegada	Nº da ordem
1	115	2A
2	116	3A
3	117	1A

Essa regra efetua o agendamento com base na data de chegada da peça no centro de trabalho, e resulta na menor média de espera em fila para as peças.

- Regra do quociente crítico:

Essa regra baseia-se no quociente do tempo restante sobre o serviço restante. Se o quociente for igual a 1, a tarefa está no tempo certo; se for maior que 1, a tarefa está adiantada; e se for menor que 1, a tarefa está atrasada. A agenda resultante assegura que as ordens atrasadas são executadas primeiro.

$$CR = \frac{\text{data de entrega} - \text{data de hoje}}{\text{lead time restante}}$$

$$\text{Ordem 1A: } CR = \frac{125-117}{8} = 1$$

$$\text{Ordem 2A: } CR = \frac{120-117}{5} = 0,6$$

$$\text{Ordem 3A: } CR = \frac{130-117}{10} = 1,3$$

Prioridade	Quociente crítico	Nº da ordem
1	0,6	2A
2	1,0	1A
3	1,3	3A

- Regra baseada na folga (“slack”) da ordem:

Essa regra baseia-se no tempo de folga, que é a diferença entre o tempo restante para a produção (data de entrega - data de chegada) e a soma do tempo de setup e do tempo de processamento. A maior prioridade é atribuída à peça com o menor tempo de folga. Um valor positivo da folga indica uma peça adiantada; um valor negativo, uma peça atrasada; e um valor igual a zero, uma peça no tempo certo. A agenda resultante assegura que as ordens com menor folga serão executadas primeiro.

$$\text{folga} = \text{data de entrega} - \text{data de hoje} - \text{tempo de processamento restante}$$

$$\text{Ordem 1A: } CR = 125 - 117 - 6 = 2$$

$$\text{Ordem 2A: } CR = 120 - 117 - 4 = -1$$

$$\text{Ordem 3A: } CR = 130 - 117 - 5 = 8$$

Prioridade	Folga	Nº da ordem
1	-1	2A
2	2	1A
3	8	3A

- Regra baseada no quociente da folga da ordem sobre as operações restantes:

Essa regra baseia-se no quociente do tempo de folga e o número total de operações restantes. A maior prioridade é dada à peça com menor folga para cada operação restante. Um valor positivo indica uma peça com folga nas operações, enquanto um valor negativo indica uma peça com operações insuficientes para satisfazer a agenda, e um valor igual a 1 indica que os tempos das operações estão dentro do previsto. A prioridade maior é atribuída à peça com o menor valor. A agenda resultante assegura que as ordens com folga por operações insuficiente serão executadas primeiro.

$$\text{folga/operação} = \frac{\text{tempo de folga}}{\text{operações restantes}}$$

$$\text{Ordem 1A: } F/O = 2/1 = 2,0$$

$$\text{Ordem 2A: } F/O = -1/2 = -0,5$$

$$\text{Ordem 3A: } F/O = 8/8 = 1$$

Prioridade	Folga/Operação	Nº da ordem
1	-0,5	2A
2	1,0	3A
3	2,0	1A

## **PLANEJAMENTO DE REQUISITOS DE CAPACIDADE (CRP)**

O CRP agenda a capacidade para cada peça independentemente e então soma a capacidade planejada para cada centro de trabalho para cada peça processada. Se um centro de trabalho é usado por muitas peças, é possível que a capacidade planejada exceda as horas disponíveis no período.

O processo inicia com um MPS teórico que é convertido em liberações de ordens planejadas através do MRP. Usando os roteamentos para identificar os centros de trabalho necessários, os requisitos de materiais são convertidos em mão-de-obra e carga-máquina nos centros de trabalho. As carga-máquinas são agendadas através do CRP e verifica-se a capacidade planejada junto com a capacidade disponível. As ordens são liberadas para os centros de trabalho com horas suficientes para produzir as peças. Entretanto, os centros de trabalho com cargas que excedem a capacidade necessária requerem uma mudança ou nos roteamentos ou no MPS para satisfazer a capacidade existente, ou um aumento na capacidade através de horas extras, uso de máquinas adicionais, ou subcontratação.

### **Ponto de Reencomenda**

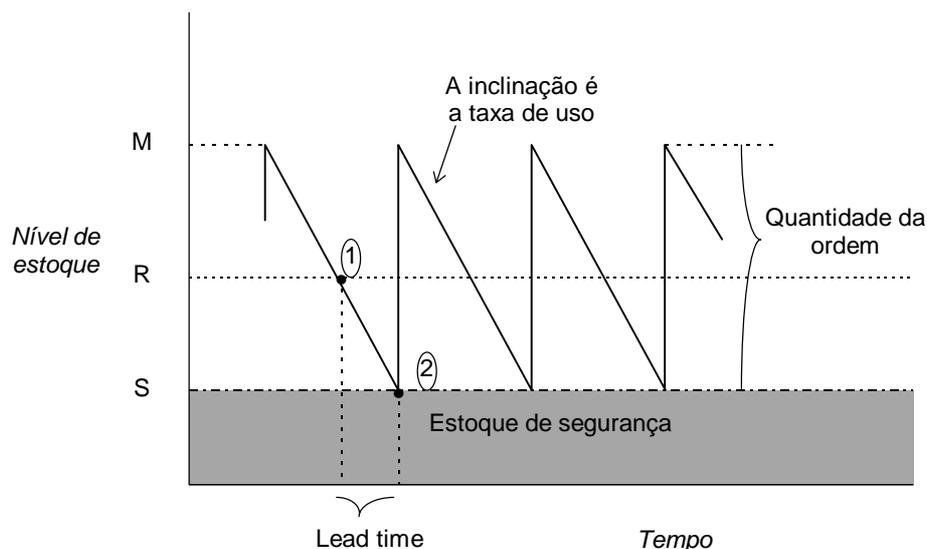
Métodos tradicionais de reabastecimento de estoque têm por objetivo fazê-lo até o seu estado de capacidade original. Porém estoques de manufatura não devem ser enchidos até a sua capacidade total. O princípio de reabastecimento de estoque requer que os itens de estoque estejam disponíveis todo o tempo. Esta abordagem compensa a inabilidade de determinar-se a quantidade precisa e o tempo de necessidade num futuro próximo. O controle de estoque deve ter como objetivo fornecer itens no momento em que forem necessários. Portanto, é necessário determinar-se a quantidade de estoque, no qual um novo suprimento deve ser encomendado, para trazer estoque ao seu nível desejado. Esse ponto é chamado de “ponto de reencomenda”.

Técnicas de determinação do ponto de reencomenda representam a implementação da noção de reabastecimento do estoque. Quase todas elas tentam fornecer algum estoque de segurança para compensar flutuações na demanda. Um dos problemas associados a essas técnicas é que hipóteses falsas sobre a demanda externa observada. Em conseqüência, pode existir um nível elevado de estoque, estoque baixo e também falta de estoque.

Em vista disso, o ponto de reencomenda é um conjunto de procedimentos, regras de decisão e registros que objetivam assegurar a disponibilidade física contínua de todos os itens de estoque em face de uma demanda incerta. Quando o fornecimento alcança o ponto de reencomenda, o estoque é enchido. Para assegurar disponibilidade contínua de fornecimento, o ponto de reencomenda corresponde a um valor positivo, e esse valor é constante para evitar perdas de vendas.

O momento de expedição de ordens de reencomenda sob a regra de ponto de reencomenda é determinado pelo uso de níveis de “disparo”. O nível de estoque é monitorado continuamente, e uma ordem de reencomenda para uma quantidade fixa é expedida quando a contagem de peças cai a um

nível especificado. O gráfico de níveis de estoque é ilustrado na figura 4.36, no qual fica claro o conceito de ponto de reencomenda. As linhas contínuas em forma de serra representam o nível de estoque a qualquer momento durante a produção. O estoque começa no nível mais alto, e cai numa taxa uniforme devido à demanda da produção. Quando o nível de estoque atinge o nível de reencomenda indicado pela linha tracejada “R”, uma ordem é expedida para a quantidade de peças indicada na figura. O lead time necessário para produzir as peças é mostrado na figura entre os pontos 1 e 2. Note que o ponto de disparo é selecionado de forma que uma nova ordem chega enquanto o estoque atual atinge o nível de estoque de segurança. Normalmente, estoque de segurança está presente para peças mais importantes, para evitar a escassez dessas peças.



**Figura 4.36.** Ponto de reencomenda

A seleção do ponto de reencomenda é influenciada por quatro fatores: a taxa de demanda da produção, o lead time necessário para reabastecer o estoque, o grau de incerteza na taxa de demanda e do lead time, e a política da empresa referente à escassez de estoque. Se a taxa de demanda e o lead time têm um grau elevado de certeza, não há necessidade de estoque de segurança e o ponto de reencomenda é facilmente estabelecido. Entretanto, na maioria das operações de manufatura a demanda é raramente constante, e o lead time, especialmente dos fornecedores externos, é afetada pelas condições de mercado. Portanto, houve a necessidade de um sistema mais responsivo à demanda real e a prevista, não um baseado somente em dados históricos. Esse foi um dos motivos do desenvolvimento do MRP.

### O Estoque ABC

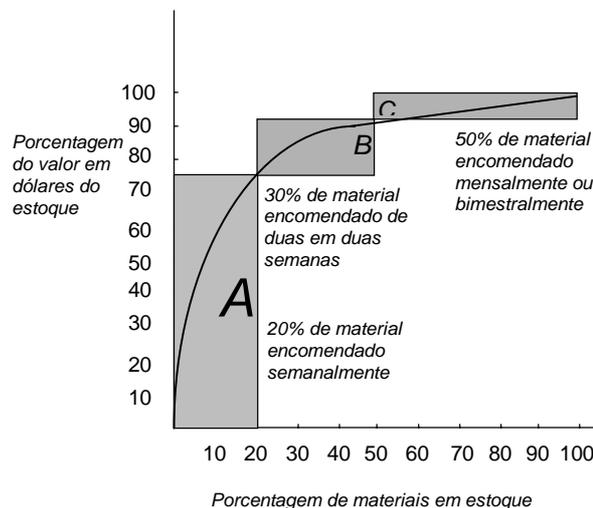
Alguns gerentes consideram o gerenciamento de estoque a técnica que assegura que os materiais estão disponíveis quando necessitados e que não resultam em custos excessivos. Um método

*Sistemas Integrados de Manufatura*

que pode ser aplicado, o qual é simples mas possui a capacidade de classificar os estoques para um melhor gerenciamento, advém da Lei de Pareto (1897). Neste estudo, que refere-se à distribuição de riqueza e dinheiro, Pareto descobriu que o dinheiro estava concentrado numa pequena porcentagem da população. Ele acreditava que isto representava uma tendência universal e portanto formulou um axioma, que diz: *itens significativos num dado grupo normalmente constituem uma pequena porcentagem dos itens totais no grupo e a maioria dos itens no total vão ter uma menor importância.*

Um padrão aproximado da Lei de Pareto, expressa numa relação matemática empírica, mostra que 80% da distribuição corresponde a 20% dos membros. O mesmo padrão se aplica a estoque. Aproximadamente 20% dos itens correspondem a 80% do custo total.

A Lei de Pareto origina, no gerenciamento de estoques, o que se chama “Estoque ABC”. Neste método, estes 20% correspondem aos itens A, e representam 80% do custo. 30% serão os itens B e correspondem a 15% do custo, enquanto o restante 50% dos itens são classificados como itens C e representam apenas 5% do custo total (ver figura 4.37).



**Figura 4.37.** Classificação de estoque baseada na Lei de Pareto

A idéia por trás do princípio ABC é aplicar a maioria dos recursos para o planejamento e controle dos itens A em detrimento dos outros itens encontrados que têm pouco efeito sobre o custo total, ou controlar os itens A com maior precisão do que as outras classes. Isto resulta num controle preciso e revisões mais freqüentes.

## DETERMINAÇÃO DO TAMANHO DE LOTE ECONÔMICO

A teoria para determinação de um tamanho de lote econômico baseia-se de modo geral em definir uma quantidade cujo custo de fabricação seja mínimo, considerando-se os insumos, os valores de trabalho agregado, os tempos de máquina, bem como os custos para manter os estoques. Esses custos normalmente podem ser agrupados em três categorias básicas:

- custo de preparação (ou setup)

- custo unitário de produção
- custo de manutenção do estoque

### **Custo de Setup**

Considera-se aqui todos os custos necessários à preparação de uma rodada de fabricação. Os principais itens computados são:

- mão-de-obra diretamente aplicada na preparação das máquinas;
- custos dos materiais e acessórios envolvidos na preparação;
- outros custos indiretos: administrativos, contábeis, etc.

### **Custo Unitário de Produção**

Nesse item são considerados os custos dos insumos básicos diretamente empregados no processo produtivo, como:

- matérias-primas;
- mão-de-obra diretamente aplicada na produção;
- tempos de máquinas envolvidos.

### **Custo de Manutenção do Estoque**

A posse do estoque tem um custo que, para a indústria, é bastante significativo e normalmente considerado para cada produto por unidade de tempo de armazenagem. Os principais itens que são considerados no seu cômputo são os seguintes:

- juros de capital imobilizado;
- risco de obsolescência do produto;
- prêmios de seguro, taxas e impostos;
- perdas por deterioração;
- despesas com instalações, alugueis, iluminação, etc.

O método mais simples para determinação do lote fundamenta-se na análise econômica dos custos, e foi inicialmente definido para dimensionar lotes de compras, adaptado posteriormente para o ambiente de manufatura, bastando que fossem considerados os tempos de preparação e encomenda como similares.

Num sistema de manufatura tradicional, em que as máquinas produzem para um determinado nível de estoque em função da demanda, o modelo clássico de lote tem melhor aplicabilidade. Mesmo assim, é apenas um ponto de partida na definição da quantidade, que deve ser aperfeiçoada com o decorrer dos ciclos produtivos, fazendo-se os ajustes necessários em função das particularidades de cada processo. Considerando-se, no entanto, uma abordagem das modernas tendências de fabricação

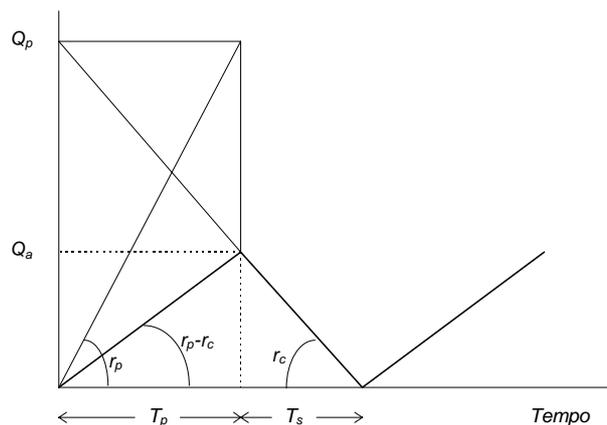
celular, aquelas definições determinadas para os produtos isoladamente são questionáveis, uma vez que a manufatura ocorre para uma família de peças, ou seja, um lote constituído de uma série de produtos distintos.

A definição de quantidades individuais não é mais compatível com a quantidade como uma parcela do grupo, o que significa dizer que as quantidades definidas isoladamente não serão as mesmas quando as peças estiverem reunidas em famílias. Para melhor situar-se no problema, será apresentado primeiro o modelo clássico para definir o tamanho de lote econômico ( $Q_e$ ), abordando-se posteriormente um tratamento dentro da filosofia de tecnologia de grupo.

### Uma Abordagem Clássica

A formulação para definir a quantidade econômica ( $Q_e$ ) para os lotes consiste em efetuar-se uma análise sobre as variações de estoque, considerando-se taxas de produção e de consumo, com a conseqüente do estoque médio.

As principais variáveis consideradas na formulação são definidas através de uma representação gráfica, mostrada na figura 4.38.



**Figura 4.38.** Evolução da produção com o tempo

As variáveis envolvidas são as seguintes:

$r_p$  = taxa de produção  
 $r_c$  = taxa de consumo  
 $r_p - r_c$  = taxa de aumento do estoque  
 $Q_p$  = quantidade de produção total  
 $Q_a$  = quantidade acumulada no ciclo  
 $T_p$  = tempo do ciclo de produção  
 $T_s$  = tempo do ciclo de consumo  
 $T_c$  = tempo do ciclo total ( $T_p + T_s$ )  
 $c_s$  = custo de setup por ciclo  
 $c_e$  = custo de manutenção de estoque por produto, por unidade de tempo

Para obter-se a equação do tamanho de lote ótimo, efetua-se os procedimentos a seguir:

(a) Quantidade produzida num ciclo:

$$Q_p = T_p r_p \quad (4.1)$$

(b) Custo unitário do setup:

$$C_s = c_s / Q_p \quad (4.2)$$

(c) Estoque médio:

$$Q_m = Q_a / 2 \quad (4.3)$$

(d) Custo de manutenção do estoque médio:

$$C_m = \frac{Q_a}{2} c_e \frac{T_c}{Q_p} \quad (4.4)$$

(e) Tempo total do ciclo:

$$T_c = \frac{Q_p}{r_c} \quad (4.5)$$

(f) Quantidade acumulada:

$$Q_a = T_p (r_p - r_c) \quad (4.6)$$

$$\text{para } T_p = Q_p / r_p \quad (4.7)$$

$$Q_a = (r_p - r_c) Q_p / r_p \quad (4.8)$$

$$\text{para } \beta = r_c / r_p \quad (4.9)$$

(g) Custo total:

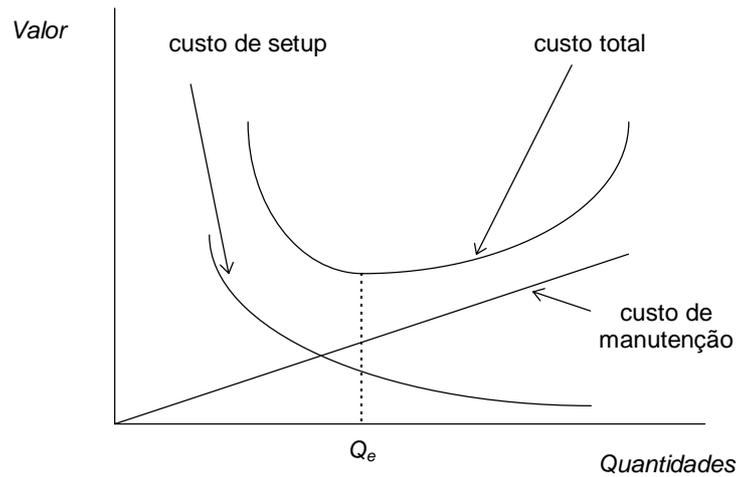
$$CT = \frac{C_s}{Q_p} + c_e (1 - \beta) \frac{Q_p}{2r_c} \quad (4.10)$$

Diferenciando-se CT em relação a Q, busca-se o valor de  $Q_e$  para que o custo total seja mínimo.

Obtém-se então:

$$Q_e = \sqrt{\frac{2 r_c c_s}{(1 - \beta) c_e}} \quad (4.11)$$

Esse valor da quantidade econômica de fabricação  $Q_e$  pode ser representado graficamente, pois indica num gráfico de quantidade versus custo do lote, a quantidade cujo custo total é o mínimo, como mostrado na figura 4.39.



**Figura 4.39.** Custo de fabricação do lote

O tempo ótimo para o ciclo de produção pode ser definido através das equações (4.5) e (4.11).

$$T_c^* = \sqrt{\frac{2 c_s}{(1-\beta) r_c c_s}} \quad (4.12)$$

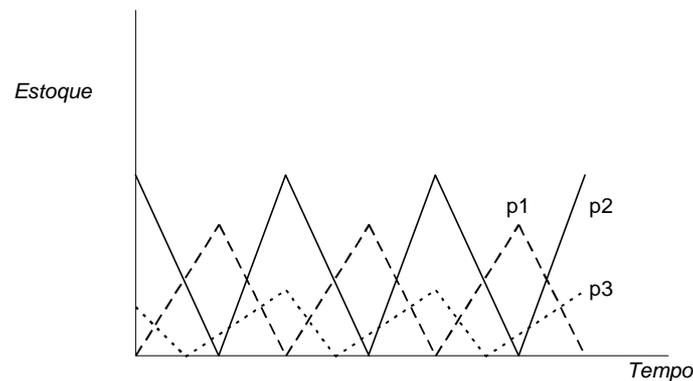
Considerando-se que vários produtos sejam produzidos num mesmo ciclo, nas mesmas máquinas, o problema passa a merecer outra conotação, ou seja, determinar o ciclo de produção para o lote dos  $n$  produtos, ou lote multiproduto. Definindo-se cada produto como um elemento  $j$ , tem-se o tempo do ciclo dado pela equação (4.12) adaptada:

$$T_c^{**} = \sqrt{\frac{2 \sum_{j=1}^n c_{s_j}}{\sum_{j=1}^n (1-\beta) r_{c_j} c_{e_j}}} \quad (4.13)$$

Conseqüentemente, pelas equações 4.5 e 4.13, pode-se determinar o tamanho de lote de cada um dos produtos através da equação 4.14.

$$Q_{e_j} = r_{c_j} T_c^{**} = \sqrt{\frac{2 \sum_{j=1}^n c_{s_j} r_{c_j}^2}{\sum_{j=1}^n (1-\beta) r_{c_j} c_{e_j}}} \quad (4.14)$$

Na figura 4.40 é ilustrado um exemplo de lote de produção cíclico para três produtos distintos (p1, p2 e p3).



**Figura 4.40.** Um lote cíclico multiproduto

### BALANCEAMENTO DE LINHA

Nos diferentes tipos de produção, seja flow shop, ou FMS, existem muitas operações distintas de processamento a serem executadas sobre o produto. Invariavelmente, a seqüência dos passos é restrita, pelo menos até um certo ponto, em termos da ordem na qual as operações podem ser executadas. Por exemplo, para executar-se um furo roscado, deve-se fazer o furo primeiro (p.ex. com uma broca helicoidal), e depois a rosca (p.ex. com um macho). Na fixação mecânica, a arruela deve ser colocada sob a cabeça do parafuso antes que a porca possa ser girada e apertada. Essas restrições são chamadas *restrições de precedência*. Isto normalmente acontece no caso em que o produto deve ser fabricado numa dada taxa de produção de modo a satisfazer a demanda. É desejável que no projeto de uma linha de montagem ou um FMS todas as especificações sejam satisfeitas o mais eficientemente possível.

O problema de *balanceamento de linha* consiste em combinar as tarefas individuais de processamento e montagem para que o tempo total exigido em cada estação de trabalho seja aproximadamente o mesmo. Se os elementos de trabalho podem ser agrupados de modo a que todos os tempos em cada estação sejam exatamente iguais, ter-se-á o caso de um balanço perfeito da linha, e conseqüentemente a produção será suave. Entretanto, na maioria das situações práticas é muito difícil alcançar um balanço perfeito. Quando os tempos das estações de trabalho são diferentes, a estação mais lenta determina a taxa de produção global da linha.

Como exemplo desse problema, tem-se um aparelho elétrico novo, que deve ser montado numa linha dedicada. A tarefa total de montagem do produto deve ser dividida em elementos mínimos de trabalho. O departamento de engenharia industrial desenvolveu tempos padrões baseados em tarefas anteriores (ver tabela 4.3). Na coluna da direita estão os predecessores imediatos de cada elemento. A demanda da produção é de 120.000 unidades/hora. Em 50 semanas/ano e 40 horas/semana, isto resulta numa produção (saída) da linha de 60 unidades/hora ou 1 unidade/minuto.

**Tabela 4.3.** Elementos de trabalho para a manufatura de um novo aparelho elétrico

Nº	Descrição do elemento	$T_{ej}$ (min)	Precedido por
1	Colocar a base no fixador e fixar	0,2	-
2	Montar o plugue no fio de força	0,4	-
3	Montar as braçadeiras na base	0,7	1
4	Enrolar o fio no motor	0,1	1,2
5	Conectar o fio ao relé	0,3	2
6	Montar a placa na braçadeira	0,11	3
7	Montar a lâmina na braçadeira	0,32	3
8	Montar o motor nas braçadeiras	0,6	3,4
9	Alinhar braçadeira e conectá-la ao motor	0,27	6,7,8
10	Montar o relé na braçadeira do motor	0,38	5,8
11	Montar a cobertura, inspecionar e testar	0,5	9,10
12	Colocar na caixa para empacotamento	0,12	11

### Terminologia

• **Mínimo elemento de trabalho:** Para distribuir a tarefa entre as estações, a tarefa deve ser subdividida em seus componentes. Os elementos mínimos são as menores tarefas nas quais a tarefa pode ser dividida (i.e. tarefas indivisíveis). Por exemplo, a execução de um furo com uma broca não pode ser subdividida, e portanto este pode ser considerado um elemento de trabalho mínimo. Na montagem manual, quando dois componentes são montados com um parafuso e uma porca, é razoável que essas atividades sejam feitas simultaneamente. Portanto, essa tarefa é um elemento de trabalho mínimo. Pode-se simbolizar o tempo requerido para efetuar esse elemento de trabalho mínimo de  $T_{ej}$ , onde  $j$  é usado para identificar um elemento dentre os  $n_e$  elementos que constituem a tarefa total. Por exemplo, o elemento tempo,  $T_{ej}$ , para o elemento 1 na tabela 4.3 é 0,2 min.

O tempo de duração de um elemento de trabalho é considerado constante em vez de variável. Um cabeçote automático pode corresponder a esta hipótese, apesar de que o tempo de processamento seja alterado ao fazer-se ajustes na estação. Por outro lado, numa operação manual, o tempo requerido para executar um elemento de trabalho variará, de fato, de ciclo para ciclo.

Uma outra hipótese implícita no uso de valores de  $T_e$  é que eles são aditivos, isto é, o tempo para executar dois elementos de trabalho é a soma dos tempos dos elementos individuais. Na prática, isto pode não ser verdade. Pode ser que alguma economia de movimento seja obtida combinando-se dois elementos de trabalho numa estação, portanto violando a hipótese de adição.

• **Tempo Total de Trabalho:** Este é a soma dos tempos de todos os elementos de trabalho a serem efetuados. Chamando-o de  $T_{wc}$  o tempo total de trabalho, tem-se:

$$T_{wc} = \sum_{j=1}^{n_e} T_{ej} \quad (4.15)$$

Para o exemplo dado,  $T_{wc} = 4,00$  minutos.

• **Tempo de Processamento na Estação de Trabalho:** Uma estação de trabalho é um local na produção onde executam-se tarefas, ou manualmente ou por um equipamento automático. O trabalho efetuado na estação consiste de um ou mais elementos de trabalho individuais, e o tempo necessário é

igual à soma dos tempos dos elementos de trabalho efetuados na estação. Será usado  $T_{si}$  para indicar o tempo de processamento na estação  $i$  numa linha de  $n$  estações. Deve estar claro que a soma dos tempos de processamento na estação deve ser igual à soma dos tempos dos elementos de trabalho naquela estação:

$$\sum_{i=1}^n T_{s_i} = \sum_{j=1}^{n_c} T_{e_j} \quad (4.16)$$

• **Tempo do Ciclo:** Este é o tempo do ciclo ideal ou teórico da linha, que corresponde ao intervalo de tempo entre as peças saindo da linha. O valor de projeto de  $T_c$  deve ser especificado de acordo com a taxa de produção requerida. Admitindo-se a ocorrência de paradas na produção, o valor de  $T_c$  deve satisfazer a seguinte exigência:

$$T_c \leq \frac{E}{R_p} \quad (4.17)$$

onde  $E$  é a eficiência da linha, e  $R_p$  é a taxa de produção requerida. Para uma linha manual, onde problemas de funcionamento são menos prováveis, a eficiência será próxima de 100%.

O valor mínimo possível de  $T_c$  é estabelecido pela estação gargalo, que é aquela que possui o maior valor de  $T_{s_i}$ . Isto é,

$$T_c \leq \max T_{s_i} \quad (4.18)$$

Se  $T_c = \max T_{s_i}$ , haverá tempo improdutivo em todas as estações cujos valores  $T_{s_i}$  sejam menores que  $T_c$ .

Finalmente, como os tempos das estações são compostos dos tempos dos elementos de trabalho,

$$T_c \geq T_{e_j} \quad (\text{para todos os } j = 1, 2, \dots, n_c) \quad (4.19)$$

Esta equação declara o óbvio: o tempo do ciclo deve ser maior ou igual a quaisquer dos tempos dos elementos de trabalho.

Nas equações acima o tempo de transferência (manuseio) foi considerado como sendo desprezível. Se isto não for verdade, uma correção deve ser feita no valor de  $T_c$ .

• **Restrições de Precedência:** A ordem na qual os elementos de trabalho podem ser efetuados é limitada, pelo menos até certo ponto, e isto pôde ser visto na tabela 4.3. Em quase todas as tarefas de processamento e montagem, existem restrições de precedência, que restringem a seqüência para a execução da tarefa.

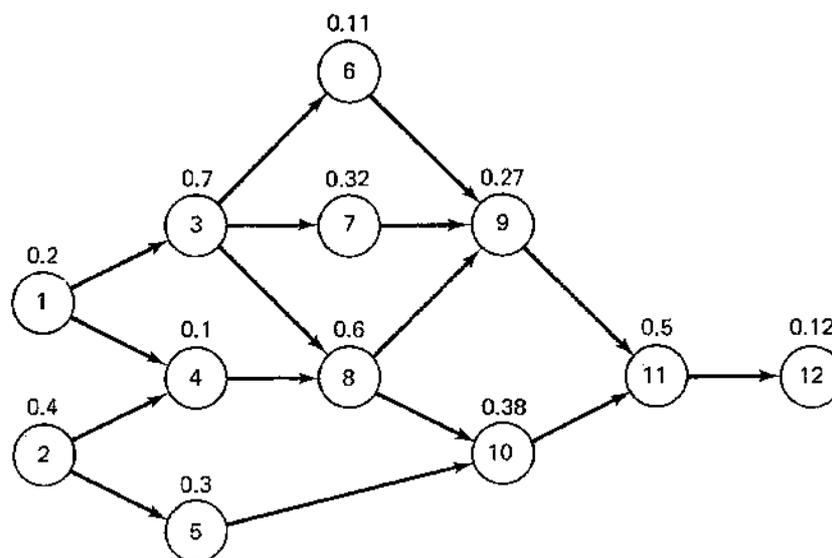
Além das restrições de precedência, existem outros tipos de restrições à solução do problema de balanceamento. Estas referem-se às restrições no arranjo das estações em vez da seqüência dos elementos de trabalho. O primeiro tipo de restrição no arranjo das estações chama-se *restrição de área*, que pode ser *positiva* ou *negativa*. Uma restrição de área positiva significa que certos elementos de trabalho devem ser localizados próximos uns dos outros, preferivelmente na mesma estação. Por

exemplo, todos os elementos de pintura devem ser efetuados juntos, pois uma estação especial semi-fechada deve ser utilizada. Uma restrição de área negativa indica que certos elementos de trabalho poderão interferir uns com os outros, e deverão portanto ser localizados afastados. Por exemplo, um elemento de trabalho que requer ajuste fino ou manuseio delicado não deve ser localizado próximo a uma estação que gera ruídos e vibrações elevados.

Uma outra restrição no arranjo das estações é a *restrição de posição*. Esta é encontrada na montagem de produtos grandes tais como automóveis. O produto é bem grande para um operador executar o trabalho em ambos os lados. Portanto, para acelerar e facilitar o trabalho, operadores são localizados em ambos os lados da linha.

Os métodos de balanceamento de linha que serão apresentados não estão equipados para lidar com essas restrições convenientemente. Entretanto, em situações reais, tais restrições devem ser consideradas no projeto do sistema de manufatura.

•**Diagrama de Precedência:** Esta é uma representação gráfica da seqüência dos elementos de trabalho, considerando-se as restrições de precedência. É comum usar-se nós para simbolizar os elementos de trabalho, com setas ligando os nós para indicar a ordem na qual os elementos devem ser executados. Elementos que devem ser efetuados inicialmente aparecem como nós à esquerda do diagrama, e a seqüência de processamento e/ou montagem progride para a direita. O diagrama de precedência referente aos dados da tabela 4.3 é ilustrado na figura 4.41. Os tempos estão indicados acima de cada nó.



**Figura 4.41.** Diagrama de precedência para a tabela 4.3.

•**Atraso de Balanceamento:** Esta é uma medida da ineficiência da linha que resulta em tempo improdutivo devido à alocação imperfeita de trabalho para as estações. É simbolizado como  $d$  e é calculado como se segue:

$$d = \frac{nT_c - T_{wc}}{nT_c} \quad (4.20)$$

O atraso de balanceamento não deve ser confundido com a proporção de tempo de parada de uma linha automatizada, que é a medida da ineficiência que resulta em paradas na linha.

Considerando-se os dados da tabela 4.3,  $T_{wc} = 4,00$  minutos. Assumindo-se  $T_c = 1,0$  minuto, para um balanceamento perfeito, dever-se-ia ter  $n = T_{wc} / T_c = 4$  estações.

$$d = \frac{4(1,0) - 4,0}{4(1,0)} = 0$$

Se a linha pudesse ser balanceada com pelo menos 5 estações, o atraso no balanceamento seria:

$$d = \frac{5(1,0) - 4,0}{5(1,0)} = 0,20 \text{ ou } 20\%$$

Ambas as soluções fornecem a mesma taxa de produção teórica. Entretanto, a segunda solução é menos eficiente porque uma estação adicional (e por conseguinte um operador adicional) é necessária. Uma maneira possível de melhorar a eficiência da linha com 5 estações seria diminuir o tempo do ciclo  $T_c$ . Para ilustrar, suponha que o tempo do ciclo seja  $= 0,80\text{min}$ . A medida de ineficiência correspondente seria:

$$d = \frac{5(0,80) - 4,0}{5(0,80)} = 0$$

Esta solução, se fosse possível, resultaria num balanceamento perfeito. Apesar de que cinco estações são necessárias, a taxa de produção teórica seria  $R_c = 1,25$  unidades/hora, num aumento na capacidade da taxa de produção em comparação com a linha com quatro estações. Percebe-se que existem muitas combinações que resultam num balanceamento teoricamente perfeito. Cada combinação resulta numa taxa de produção diferente. Como já mostrado acima, em geral o atraso de balanceamento será zero para quaisquer valores  $n$  e  $T_c$  que satisfazem a relação

$$nT_c = T_{wc} \quad (4.21)$$

Infelizmente, devido às restrições de precedência e aos valores particulares de  $T_{ej}$ , um balanceamento perfeito pode não ser atingido para cada combinação  $nT_c$  que iguala o tempo total do conteúdo de trabalho. A equação acima é uma condição necessária para um balanceamento perfeito, mas não suficiente.

Como indicado na equação (4.17), o valor máximo desejado de  $T_c$  é especificado pela taxa de produção da linha. Portanto, a equação 4.21 pode ser reescrita para determinar o número mínimo teórico de estações necessárias para otimizar o atraso de balanceamento para um dado  $T_c$ . Como  $n$  é um número inteiro, pode-se escrever:

$$n \geq \text{menor inteiro } \frac{T_{wc}}{T_c} \quad (4.22)$$

### Métodos de Balanceamento de Linha

Nesta seção serão considerados alguns métodos de balanceamento de linha, que serão aplicados ao exemplo da tabela 4.3. Estes métodos são heurístico, que significa que eles baseiam-se na lógica e bom senso em vez de numa prova matemática. Nenhum desses métodos garante uma solução ótima, mas eles provavelmente levarão a boas soluções que aproximam-se do verdadeiro ótimo.

#### Método do Maior Candidato

Nesse método, os elementos de trabalho são selecionados e atribuídos às estações baseado nos valores de  $T_e$ . Primeiramente, os elementos de trabalho são rearranjados de acordo com os seus valores de  $T_e$  (tabela 4.4). Depois então atribui-se os elementos de trabalho às estações, obviamente levando em consideração as restrições de precedência (tabela 4.5).

**Tabela 4.4.** Elementos de trabalho rearranjados de acordo com os valores de  $T_e$  (método do maior candidato)

<i>Elemento de trabalho</i>	<i><math>T_e</math> (min)</i>	<i>Predecessores</i>
3	0,7	1
8	0,6	3,4
11	0,5	9,10
2	0,4	-
10	0,38	5,8
7	0,32	3
5	0,3	2
9	0,27	6,7,8
1	0,2	-
12	0,12	11
6	0,11	3
4	0,1	1,2

**Tabela 4.5.** Elementos de trabalho atribuídos às estações de acordo com o método do maior candidato

<i>Estação</i>	<i>Elemento</i>	<i><math>T_e</math> (min)</i>	<i><math>\Sigma T_e</math> na estação</i>
1	2	0,4	1,00
	5	0,3	
	1	0,2	
	4	0,1	
2	3	0,7	0,81
	6	0,11	
3	8	0,6	0,98
	10	0,38	
4	7	0,32	0,59
	9	0,27	
5	11	0,5	0,62
	12	0,11	

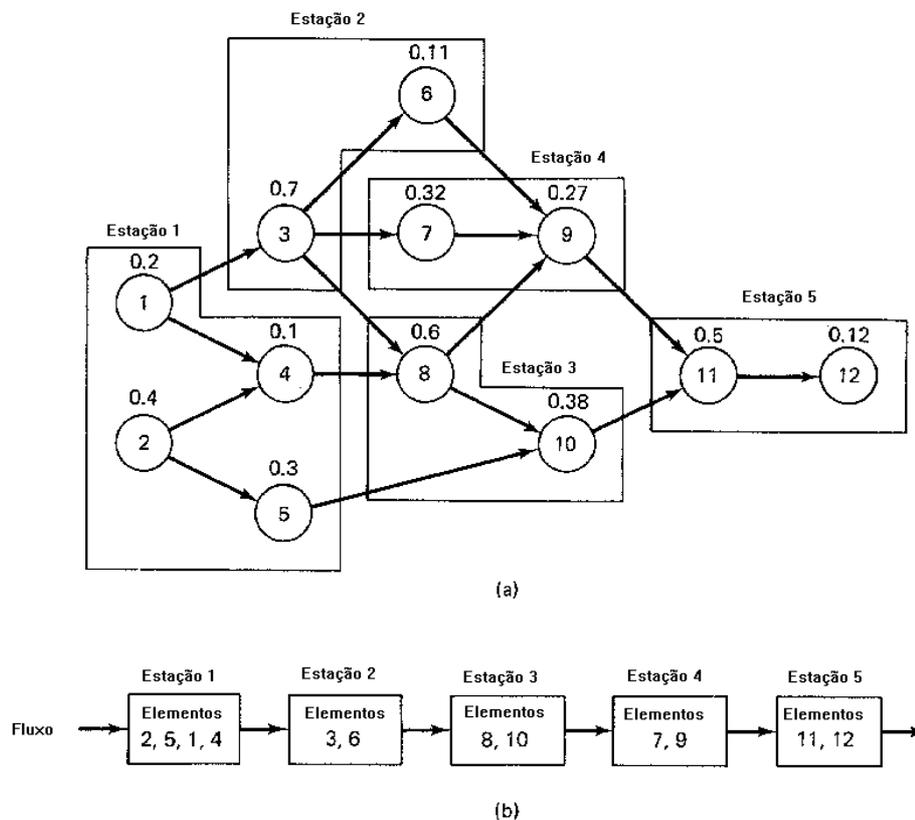
O atraso de balanceamento para esta solução é dado por:

$$d = \frac{5(1,0) - 4,0}{5(1,0)} = 0,20 \text{ ou } 20\%$$

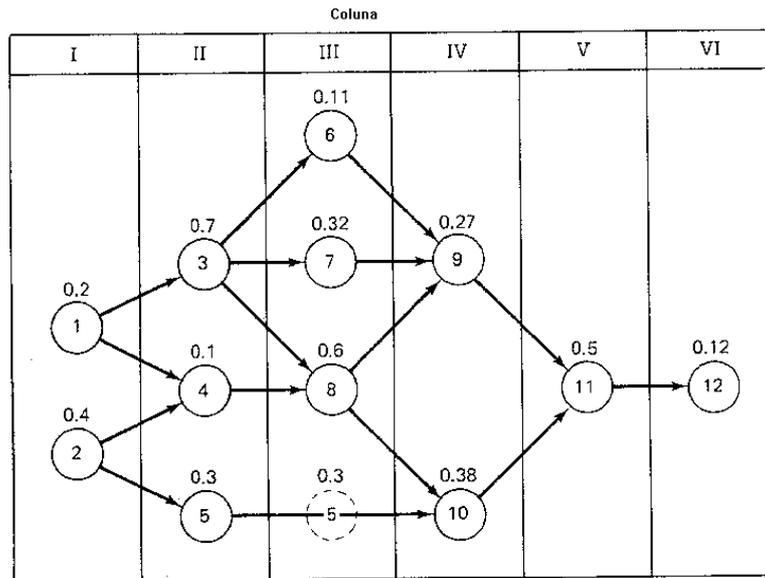
A solução é ilustrada na figura 4.42.

### Método de Kilbridge e Wester

Essa técnica foi aplicada a várias situações complicadas de balanceamento, com algum sucesso. Nesse procedimento, seleciona-se os elementos de trabalho para atribuição às estações de acordo com a sua posição no diagrama de precedência. Os elementos na frente do diagrama são selecionados primeiro para a solução. Isto supera algumas dificuldades com o método do maior candidato, com as quais os elementos no fim do diagrama de precedência podem ser os primeiros candidatos a serem considerados, simplesmente porque seus valores  $T_e$  são elevados. Um exemplo da aplicação desse método para os dados da tabela 4.3 é apresentado na figura 4.43 e na tabela 4.6. A solução para o problema em questão, de acordo com o método de Kilbridge e Wester, é mostrada na tabela 4.7.



**Figura 4.42.** Solução para o problema da tabela 4.3, de acordo com o método do maior candidato.



**Figura 4.43.** Diagrama de precedência para os dados da tabela 4.3.

**Tabela 4.6.** Elementos de trabalho arranjados de acordo com as colunas na figura 4.43 - Método de Kilbridge e Wester

Elemento de trabalho	Coluna	$T_e$ (min)	Soma da coluna $T_e$ s
1	I	0,2	
2	I	0,4	0,6
3	II	0,7	
4	II	0,1	
5	II,III	0,3	1,1
6	III	0,11	
7	III	0,32	
8	III	0,6	1,03
9	IV	0,27	
10	IV	0,38	0,65
11	V	0,5	0,5
12	VI	0,12	0,12

**Tabela 4.7.** Elementos de trabalho atribuídos às estações de acordo com o método de Kilbridge e Wester

Estação	Elemento	$T_e$ (min)	$\Sigma T_e$ na estação
1	1	0,2	
	2	0,4	
	4	0,1	
	5	0,3	1,00
2	3	0,7	
	6	0,11	0,81
3	7	0,32	
	8	0,6	0,92
4	9	0,27	
	10	0,38	0,65
5	11	0,5	
	12	0,12	0,62

O atraso de balanceamento neste caso é de 20%, que foi o mesmo encontrado para o método do maior candidato. Em geral, o método de Kilbridge e Wester fornece um resultado melhor do que o método do maior candidato. Entretanto, isto não é sempre verdadeiro, como foi mostrado pelo problema acima.

#### **Método do Pesos Posicionais (RPW)**

Nesse procedimento, o valor de peso posicional (RPW) é calculado para cada elemento. O RPW leva em consideração tanto o valor de  $T_e$  de cada elemento, como a sua posição no diagrama de precedência (tabela 4.8). Então, os elementos são atribuídos às estações na ordem decrescente dos valores de RPW (tabela 4.9).

**Tabela 4.8.** Elementos de trabalho arranjados de acordo com os valores de RPW no método dos pesos posicionais (RPW)

<b>Elemento</b>	<b>RPW</b>	<b><math>T_e</math> (min)</b>	<b>Predecessores</b>
1	3,30	0,2	-
3	3,00	0,7	1
2	2,67	0,4	-
4	1,97	0,1	1,2
8	1,87	0,6	3,4
5	1,30	0,3	2
7	1,21	0,32	3
6	1,00	0,11	3
10	1,00	0,38	5,8
9	0,89	0,27	6,7,8
11	0,62	0,5	9,10
12	0,12	0,12	11

**Tabela 4.9.** Elementos de trabalho atribuídos às estações de acordo com o método dos pesos posicionais (RPW)

<b>Estação</b>	<b>Elemento</b>	<b><math>T_e</math> (min)</b>	<b><math>\Sigma T_e</math> na estação</b>
1	1	0,2	0,9
	3	0,7	
2	2	0,4	0,91
	4	0,1	
	5	0,3	
	6	0,11	
3	8	0,6	0,92
	7	0,32	
4	10	0,38	0,65
	9	0,27	
5	11	0,5	0,62
	12	0,12	

Nesse caso, o atraso de balanceamento é dado por:

$$d = \frac{5(0,92) - 4,0}{5(0,92)} = 0,13 = 13\%$$

A solução resultante do método RPW representa uma atribuição mais eficiente dos elementos de trabalho às estações, comparado com os outros dois métodos. Entretanto, deve-se notar que foi aceito um tempo do ciclo diferente daquele originalmente especificado para o problema considerasse  $T_c = 0,92$  minutos, aplicando-se os dois primeiros métodos, poderia ser atingida a mesma eficiência do método RPW.