



O PLANEJAMENTO DA MANUFATURA – PRÁTICAS INDUSTRIAIS E MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO

M.F. Carvalho

Fundação Centro Tecnológico Para Informática – CTI
Caixa Postal 6162 – Campinas, São Paulo, Brasil
Departamento de Projeto Mecânico,
Faculdade de Engenharia Mecânica,
Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP

O.S. Silva Filho

C.A.O. Fernandes

Fundação Centro Tecnológico Para Informática – CTI
Caixa Postal 6162 – Campinas, São Paulo, Brasil

Resumo

Este trabalho apresenta uma revisão das metodologias mais utilizadas como ferramentas de apoio ao planejamento da produção de sistemas de manufatura. Dentre elas destacam-se as práticas industriais conhecidas como técnicas avaliativas de soluções e os métodos de otimização conhecidos como técnicas gerativas de solução. Procura-se discutir como estas técnicas trabalham e analisar as vantagens e desvantagens de cada uma delas. Na conclusão a otimização é apresentada como uma ferramenta complementar para superar certas deficiências encontradas durante a aplicação das práticas industriais, tornando-se assim essencial ao planejamento da produção.

Palavras-chave: MRP, JIT, programação matemática, planejamento da produção.

1. Introdução

Um sistema produtivo é formado de recursos (mão-de-obra, máquinas, computadores, etc.) que, a partir de operações de transformação dos insumos básicos (ou seja, as entradas), trabalham em conjunto para o desenvolvimento de produtos. Estes sistemas devem ser adminis-

trados com o objetivo de atender às necessidades de um mercado cada vez mais competitivo, minimizando desperdícios e custos de modo a maximizar o lucro da corporação (JACSON & JONES, 1987).

Até os anos 70, os sistemas de manufatura trabalhavam a plena carga, oferecendo um número limitado de produtos, para uma demanda

normalmente maior que a capacidade de produção. Assim a questão de planejamento era imediata, bastando identificar o gargalo de produção a partir do qual se estabelecia a capacidade máxima do sistema. A partir desta década, devido aos avanços tecnológicos, os sistemas começaram a evoluir para uma situação em que a capacidade de produção tornou-se maior que o mercado e assim passou-se da produção em larga escala de poucos produtos para a produção em pequenos lotes de produtos diversificados. Este fato levou o sistema produtivo a implantar políticas para atender melhor o cliente e ganhar competitividade.

Aos primeiros investimentos, na busca da diversificação de produtos, deu-se ênfase à tecnologia, com o aumento e a sofisticação dos sistemas de produção (máquinas de controle numérico, robôs, computadores, etc.) no sentido de acompanhar a necessidade do mercado por: novos produtos, qualidade, rapidez de entrega, preços competitivos, etc. Contudo o avanço tecnológico não resolveu todos os problemas da produção; na verdade, pode-se dizer que esta evolução é responsável pela maior complexidade do processo de gestão da produção. Quanto mais sofisticados os sistemas, maior atenção deve ser dada às atividades de gestão para que os recursos sejam melhor utilizados, possibilitando, assim, obter o retorno do alto investimento em menor espaço de tempo. Nota-se, ainda, que quanto mais flexíveis os sistemas de manufatura, maior é o número de possibilidades de operação a serem consideradas pelo gerente quando da seleção da melhor solução. Em suma, quanto mais complexos os sistemas mais complexo o processo de gestão. Por exemplo, em um processo de produção serial, a determinação de um esquema adequado de operação é muito mais fácil de ser implementado do que em um processo contendo células flexíveis, pois a alta flexibilidade e versatilidade observada neste último é responsável pela adição de vários graus de liberdade à escolha da melhor forma de operação.

Um outro fator que introduz complexidade é o comportamento da demanda ao longo do tem-

po. Para exemplificar, considere-se a produção mensal planejada para um dado tipo de produto, que é composta de duas parcelas: pedidos conhecidos e previsão de consumo. A primeira parcela é resultado dos pedidos já realizados pelos consumidores enquanto que a segunda é uma previsão de pedidos ainda não colocados, mas prováveis de ocorrerem. A importância destes componentes se inverte à medida em que se afastam do tempo inicial de planejamento, como mostrado na Figura 1. Neste sentido, observe-se que no curto prazo a demanda conhecida ocupa o papel mais relevante no planejamento, enquanto que, no médio e longo prazo, a demanda prevista (ou seja, não determinística) torna-se relevante para decisões sobre o emprego futuro dos recursos de produção. Esta incerteza associada à demanda mostra a importância do "tempo" no processo de tomada de decisão.

Conclui-se dos fatores expostos acima, que o gerenciamento de um sistema moderno é complexo devido: ao número de variáveis envolvidas, ao grau de incerteza associado a cada informação e principalmente ao tipo de decisão a ser tomada. O problema de planejamento, formulado sob uma ótica macro, é impossível de ser resolvido pois é de grande dimensão e altamente estocástico. Por consequência, este problema deve ser organizado dentro de uma hierarquia de planejamento que possibilite soluções locais, contudo integráveis. Em seguida discute-se esta questão hierárquica.

De uma maneira geral, duas atividades principais podem ser destacadas no gerenciamento da produção: o planejamento e o controle da produção. O planejamento tem como objetivo alocar, efetivamente, os recursos disponíveis às necessidades de produção dos vários produtos, ajustando o custo dos recursos, a forma de operar, a quantidade e o valor do produto final, dentre outros parâmetros de produção. Para considerar o grau de certeza da informação, que faz parte do processo de tomada de decisão, e a escala de tempo, o planejamento pode ser dividido em planejamento estratégico, planejamento tático e planejamento operacional.

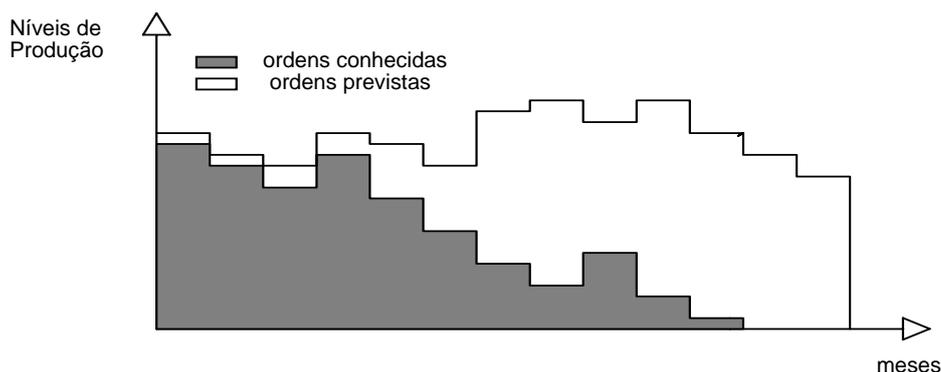


Figura 1 – Níveis de produção baseados em demanda conhecida e prevista

O planejamento estratégico tem como objetivo adquirir e desenvolver os recursos de produção, definir novos produtos, estabelecer políticas de atendimento ao cliente e gerar *planos agregados de produção* baseados nas previsões da demanda de longo prazo. As decisões tomadas neste nível influenciam toda a cadeia de planejamento (ou seja, os níveis tático e operacional) e, para garantir a eficácia de tais decisões, crucial se torna o envolvimento das gerências relacionadas aos diferentes departamentos da firma. O horizonte de planejamento é de um ou mais anos com discretização mensal. Grande parte da informação disponível sobre o processo (isto é, demanda, capacidade de produção, níveis de mão-de-obra e níveis de inventário, etc.) é considerada de forma agregada e o problema é caracterizado pelo alto grau de incerteza da informação em relação ao uso futuro dos recursos da firma.

O planejamento tático tem como finalidade desagregar as metas estabelecidas pelo nível estratégico em termos de tempo, recursos e produtos e o estabelecimento de políticas *ótimas* detalhadas de produção, de utilização de recursos de produção (máquinas, matéria-prima, mão-de-obra, etc.). É importante acrescentar que os métodos de otimização é um dos caminhos para geração de tais políticas. O horizonte de planejamento é de seis meses a um ano com discretização diária ou semanal. As decisões são baseadas em fontes de informação com reduzido grau de incerteza.

O planejamento operacional, algumas vezes, também denominado de programação da produção, tem como meta a *execução ótima* das tarefas estabelecidas pelo planejamento tático. Isto corresponde a uma alocação clara de tarefas aos recursos disponíveis especificando como e quando realizá-las (por exemplo, alocação de máquinas, operários, etc.) além da determinação dos tempos de início e fim de cada tarefa. Esta alocação é baseada em informação de elevado grau de certeza.

O sucesso do enfoque de planejamento hierárquico está relacionado com a integração dos três módulos acima. A Figura 2 ilustra este esquema de integração. Note que o planejamento agregado passa para o planejamento tático metas e objetivos a serem cumpridos. Este último nível decompõe as metas e objetivos em três dimensões de detalhamento, a saber: dimensão de tempo, dimensão de espaço dos recursos e dimensão de espaço de produtos (em famílias), verificando então a possibilidade de atendê-las. No entanto, caso estas metas e objetivos não possam ser cumpridas, novos limites são enviados para o nível estratégico, permitindo-o gerar novas metas. Este procedimento deve garantir a robustez do processo de desagregação e deve ser seguido também entre os outros níveis de decisão.

Devido, principalmente, à dinâmica de operação do sistema e às incertezas do ambiente de produção, a execução efetiva das tarefas, via de regra, difere daquilo que foi planejado. Para a avaliação desta diferença existe a função de

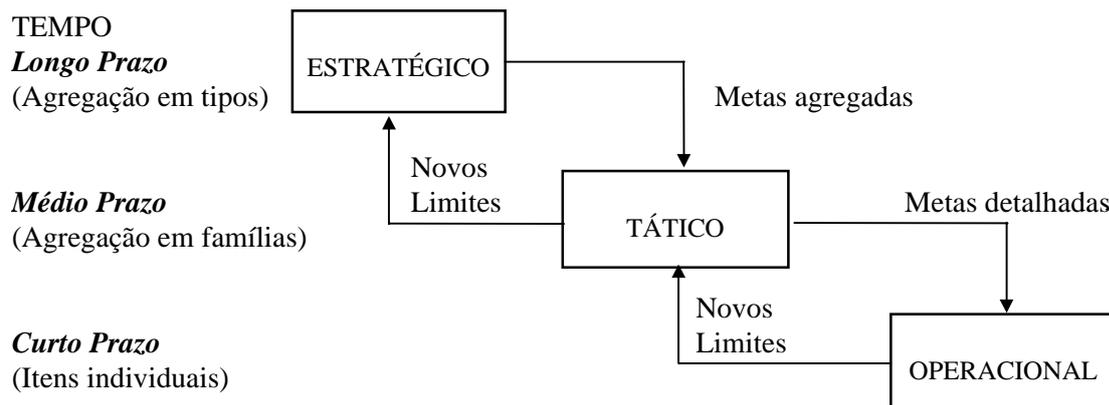


Figura 2 – Hierarquia para Planejamento

controle (ou de monitoramento). Esta função permite estabelecer uma medida de desempenho em relação aos resultados esperados pelo planejamento e o resultado obtido na execução. Como resultado da análise desta função é possível realimentar os níveis hierárquicos superiores com informações que conduzem a uma constante revisão das metas e objetivos (ou seja, fluxo de informação entre as fases de planejamento). Isto permite, ainda, estabelecer, se necessário, decisões de controle operacional que procurem operações mais efetivas e econômicas. Note que as decisões neste nível devem ser imediatas e por isto automatizadas pelo sistema.

Uma conclusão do exposto acima é que a natureza multidisciplinar dos problemas de planejamento e controle da produção dos sistemas de manufatura constituem-se em uma rica fonte de pesquisa e desenvolvimento de metodologias nas áreas de ciência do gerenciamento, pesquisa operacional e mais recentemente na área da teoria de controle ótimo (GERSHWIN *et al.*, 1986).

Neste artigo serão examinados os problemas de planejamento em especial aqueles associados ao níveis hierárquicos relacionados com o planejamento detalhado e com a programação da produção. Para este tipo de problema existem alguns enfoques de solução que utilizam a programação matemática, entre eles estão: as técnicas de programação linear, programação inteira, *branch and bound*, programação dinâmica e teoria de redes. Outros procedimentos heurísticos chama-

dos de práticas industriais serão também considerados. Abre-se um espaço para se discutir uma hierarquia que possibilite um grau de representação do problema, coerente com as necessidades dos vários níveis do planejamento e que venha ser factível de implementar, tanto em termos de tempo quanto de capacidade de memória, em uma estrutura computacional.

O artigo está organizado da seguinte maneira. A seção seguinte introduz alguns conceitos e objetivos do planejamento tático e da programação da produção. Em seguida serão estudadas as Práticas Industriais e as políticas de estoque que contornem as incertezas do processo produtivo, da matéria-prima e da demanda. Por outro lado, o problema de planejamento da produção será modelado como um problema de otimização de fluxo em rede com uma avaliação do desempenho desta modelagem. Por fim comentários comparativos entre as técnicas avaliativas e gerativas de solução mostram a complementaridade entre o enfoque por otimização e o enfoque por práticas industriais.

2. Sistema de Produção Discreta: Aspectos Conceituais

Descrição: Um sistema de manufatura é composto por itens a serem processados em centros de produção, cada um podendo possuir uma ou mais unidades processadoras. Estas unidades podem ser máquinas que modificam

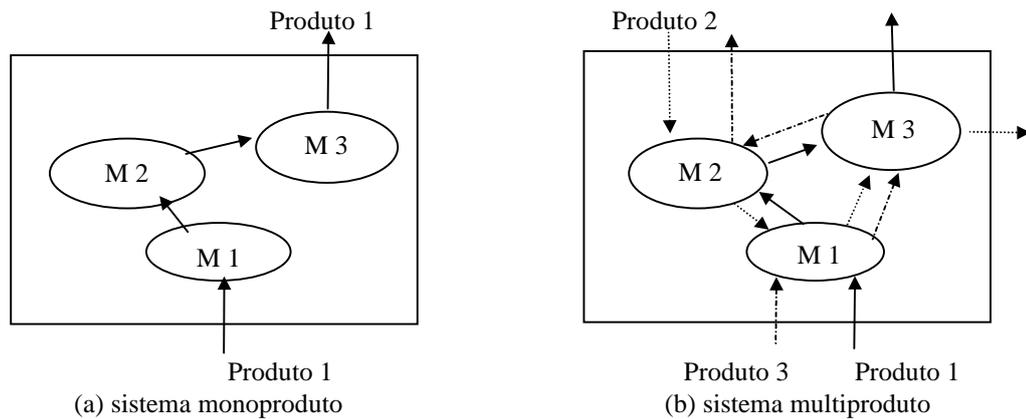


Figura 3 – Sistema de produção discreta

características do produto e/ou transportadoras que modificam a localização do produto. O item flui pelo sistema produtivo sofrendo transformações, sendo transportado segundo uma seqüência tecnológica predeterminada, fazendo parte de montagens até se tornar produto final. A Figura 3.(a) mostra um sistema com três centros de produção e um roteiro de produção. A capacidade máxima de produção deste sistema é igual a menor capacidade entre as capacidades máximas de todos os estágios de produção. Este seria um sistema de fácil gestão caso considerasse um único produto, demanda conhecida e determinística além de disponibilidade infinita de matéria-prima.

A extensão para o processamento de vários produtos por uma célula faz com que um mesmo recurso (por exemplo: máquina, transportador, robô) seja requisitado por mais de um produto, ou seja, os recursos de produção passam a ser compartilhados por mais de um produto, vide Figura 3.(b). Agora a determinação da capacidade de produção vai depender de vários fatores entre eles: o mix (proporcionalidade) entre produtos, seqüência de produção, taxa de compartilhamento de recursos e o perfil temporal da demanda de cada produto. Assim, o problema de planejamento evolui para a gestão temporal de recursos compartilhados. Para que esta gestão venha a ser realizada com eficácia, torna-se necessária a introdução de alguns conceitos apresentados a seguir.

Ponto de Pedido do Consumidor: Em cada manufatura, existe um ponto no processo produtivo em que o produto passa a receber tratamento específico para determinado consumidor. Este ponto é chamado de Ponto de Pedido do Consumidor (PPC). Mais especificamente, define-se PPC como o ponto do processo de manufatura em que o produto é atribuído a determinado consumidor. Por exemplo, em sistemas que trabalhem para estoque o PPC é o ponto de estoque de produtos acabados. Enquanto que nos sistemas de produção sob encomenda o PPC usualmente é o ponto de estoque de matéria-prima. Neste último caso, pode-se ainda deslocar o PPC até aos fornecedores para que tempos com compra e entrega de matéria-prima sejam considerados.

O tempo total de processamento de um produto pode ser composto por duas partes. Em uma delas o produto já está destinado a um determinado consumidor (posição após o PPC). Na outra o processamento dos itens que compõem o produto mantém características comuns, independentes das que foram especificadas pelo consumidor (posição anterior ao PPC), como ilustrado na Figura 4. Este é o ponto no qual se desacopla a manufatura de itens comuns, da manufatura de itens dedicados. Por exemplo, na montagem de carros a estrutura básica pode ser a mesma para todos os modelos de um determinado carro (isto é, Modelos X, Y, Z, etc.). Contudo a partir de um certo ponto da linha de montagem (PPC) cada unidade

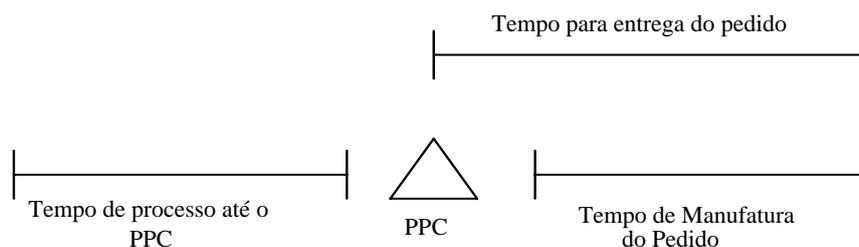


Figura 4 – Ponto de Pedido do Consumidor

produzida adquire características especiais de acordo com as especificações preestabelecidas para cada cliente. Deste ponto até a entrega do produto acabado é gasto um determinado tempo que é específico do produto dedicado. Este é uma parcela do tempo total de produção. Deve-se ainda observar que o tempo de manufatura do pedido pode incluir a manufatura de itens comuns a mais de um consumidor. Contudo, o tempo de processo até o PPC, não deve incluir nenhuma atividade dedicada.

Gargalo de Produção: Um gargalo de produção ocorre quando um centro de produção possui uma capacidade menor que a demanda a ele alocada. Um gargalo estável é aquele que se mantém *gargalo* durante a maior parte da vida do processo produtivo. Aumentar o fluxo em um processo produtivo passa pela ampliação da capacidade de produção do gargalo.

Do exposto acima, conclui-se que para uma linha serial simples pode haver um único gargalo, e assim sendo o tempo gasto para uma peça ir do gargalo ao ponto de entrega ao consumidor é constante. É assumido um “excesso” de capacidade nos estágios de produção situados após e anteriores ao gargalo. O planejamento do sistema passa a ser o planejamento do gargalo. Os dois conceitos acima serão explorados nas seções seguintes quando da análise do problema de planejamento da produção pelas *práticas industriais*.

3. O Problema do Planejamento da Produção

Finalidade: Para que uma empresa torne-se competitiva no mercado atual, fortemente

orientado a satisfação do cliente, quatro componentes devem ser considerados: custo/preço, qualidade, flexibilidade e desempenho nas entregas. *Prioridades e pesos devem ser alocados* a cada um destes componentes.

Segundo GRAVES (1991), o planejamento da produção tem por finalidade a alocação dos recursos disponíveis de produção ao longo do tempo para um conjunto preestabelecido de objetivos. Tipicamente, o problema de alocação da produção envolve um conjunto de produtos, no qual cada produto deve passar por operações que por sua vez requer máquinas e matéria-prima. As operações requerem recursos de máquinas e material e devem ser realizadas segundo uma seqüência tecnológica determinada *a priori*. A alocação de recursos é influenciada por uma série de fatores como: capacidade de máquinas, regra de precedência, requisitos e disponibilidade de recursos, níveis de produção, prioridades, datas e custos. Os critérios de desempenho ou a determinação de prioridades envolvem *compromissos conflitantes* entre níveis de produção, frequências de variações da produção e grau de atendimento às datas de entrega. Assim sendo, o estabelecimento de um plano de produção é essencial para a determinação de uma seqüência de produção (ou rotas do processo), que leve à finalização do produto, estabelecendo as necessidades de recursos (tanto de matéria-prima quanto de fabricação) e determinando o tempo de início e fim de cada operação que atendam aos objetivos gerais do empreendimento. Para ilustrar o problema da alocação, considere o exemplo abaixo (ROGERS, 1987). A Tabela 1 fornece os dados de rota e os tempos de

Tabela 1 – Dados de Produção

| Produtos | Tempos e Rotas | | |
|----------|----------------|------|------|
| | #1 | #2 | #3 |
| 1 | 1/M1 | 8/M2 | 4/M3 |
| 2 | 6/M2 | 5/M1 | 3/M3 |
| 3 | 4/M1 | 7/M3 | 9/M2 |

processamento para três produtos a serem processados por três máquinas. As rotas estão mostradas na Figura 3.(b).

A Figura 5 apresenta o diagrama de Gantt para uma possível alocação da produção para o problema. Sob a suposição que todos os produtos estão disponíveis no início do processo e que as operações não possam ser repartidas, a alocação proposta resulta no mínimo tempo para processamento de todos os produtos. Observe que a seqüência de operação foi preservada. Por outro lado o problema acima é trivial em relação aos problemas reais onde outros fatores como: datas de entrega, aleatoriedade, processamento de multiprodutos com disponibilidade temporal diferenciada, etc., devem ser considerados.

Para ajudar na tomada da melhor decisão do planejamento existem várias técnicas que podem ser classificadas em duas categorias principais (GERSHWIN *et al.*, 1986): técnicas avaliativas e técnicas gerativas. Uma técnica avaliativa é aquela que, a partir de um conjunto de decisões, prevê (ou avalia) qual delas leva o sistema a atingir um melhor nível de desempenho. As técnicas gerativas, por outro lado, são aquelas que partem de certos critérios e restrições para gerar uma única decisão para o sistema, que é entendida como a decisão ótima a ser aplicada ao sistema. Podemos citar entre as técnicas avaliativas a teoria de filas, a simulação e as práticas industriais. As técnicas gerativas são baseadas em métodos matemáticos de otimização e da teoria de controle.

O foco deste trabalho é discutir e apresentar soluções a serem usadas pela gerência como ferramentas de apoio ao planejamento detalhado e à programação de sistemas de manufatura.

Entre as técnicas avaliativas e gerativas de solução, as que mais se destacam são respectivamente aquelas relacionadas com as práticas industriais e as técnicas de programação matemática, que passam a ser discutidas a seguir.

4. Princípio de Operação das Práticas Industriais

Para auxiliar na tomada de decisão gerencial quanto à determinação da escala de produção foram desenvolvidos sistemas de base de dados para administração da compra e estoque de matéria-prima, estoque em processo e capacidade de produção, dentre outras atividades rotineiras de um processo de produção (RODAMMER *et al.*, 1988). Estas ferramentas melhoram a qualidade e a consistência da solução para o planejamento da manufatura e algumas delas incorporam, em maior ou menor grau, recursos que procuram automatizar atividades de programação da produção. Os princípios operativos ou métodos para esta automatização são do tipo *empurra* ou *puxa* e estão relacionados com o conceito de Ponto de Pedido do Consumidor (PPC). Outro enfoque adota um princípio *misto* (*puxa-empurra*) e está relacionado aos conceitos PPC e gargalo da produção. Para entender a operação e aplicação destas práticas é conveniente discutir as características de operação de cada um destes sistemas.

4.1 Princípio Operativo EMPURRA

Os métodos tradicionais de administração da Produção são do tipo EMPURRA. Por estes métodos as ordens de produção são colocadas no

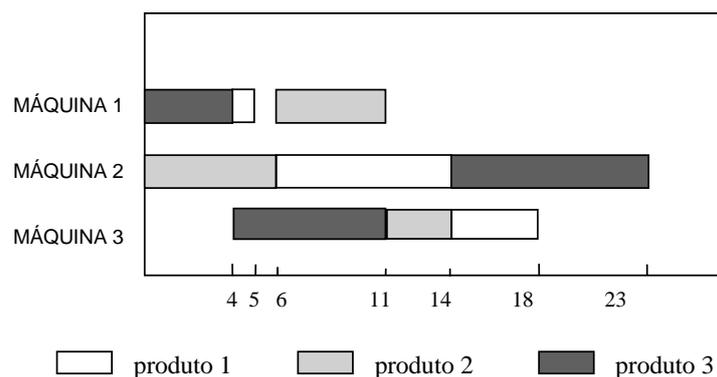


Figura 5 – Diagrama de Gantt

primeiro estágio de produção (PPC) e “empurradas” pelo sistema produtivo até que venham atender o pedido do consumidor. A Figura 6 ilustra este tipo de operação. Questões imediatas a serem analisadas por este princípio são: data em que a matéria-prima deve estar disponível para que seja respeitada a data de entrega do pedido; capacidade total de produção do sistema, capacidades especificadas para os recursos individuais; requisitos de mão-de-obra para determinada política de operação e nível de estoque em processo. O programa de produção conhecido por “Manufacturing Resource Planning” (MRP-II) (FOX, 1984) é uma técnica avaliativa do tipo empurra e como tal avalia o comportamento do sistema para um *cenário predeterminado*. Este cenário basicamente especifica: a demanda a ser atendida, os recursos de produção necessários, as datas de compra e de entrega, às disponibilidades de matéria-prima e outros detalhes vitais à realização das atividades de planejamento. Outros cenários podem ser gerados a partir de mudanças no cenário base e, iterativamente, pode-se chegar a uma solução adequada para o planejamento.

Estes sistemas determinam, para cada produto final e horizonte preestabelecido:

1. a quantidade a ser produzida;
2. os tempos nos quais os itens devem ser comprados, fabricados ou montados de forma a atender as datas de entrega dos pedidos; e
3. os requisitos de capacidade, tamanho de lotes e seqüência de operações.

Com relação às incertezas quanto a demanda é conveniente considerar o seguinte caso: quando uma expectativa de demanda, incorporada ao planejamento, é interrompida ou não se realiza, um replanejamento deve ocorrer. É justamente aí que ocorre uma das principais vantagens do sistema EMPURRA, ou seja, neste tipo de sistema é muito mais simples tratar as variações devidas a demanda; refazendo-se cálculos e colocando novas expectativas de produção imediatamente disponíveis a todos os estágios. Note que isto é possível devido ao fato de que qualquer variação (para mais ou para menos) da demanda observada em relação à demanda planejada poder ser imediatamente comunicada à entrada do processo.

Com relação aos pontos acima, o MRP é bastante preciso mas apresenta algumas dificuldades em considerar, por exemplo: as perdas por defeito de fabricação; os limites de capacidade no processamento de multiprodutos; as incertezas tanto da demanda quanto do processo produtivo. Além disso, ele não considera explicitamente a questão de custo e possui dificuldade em gerar uma solução que tenha uma visão temporal do problema com relação a evolução da demanda no horizonte de planejamento. Resumindo, pode-se dizer que o MRP é simplesmente um viabilizador de cenários de produção definidos a partir dos pedidos de produção.

É importante acrescentar que os problemas relacionados às incertezas, tanto de demanda quanto do processo (por exemplo, quebra de uma

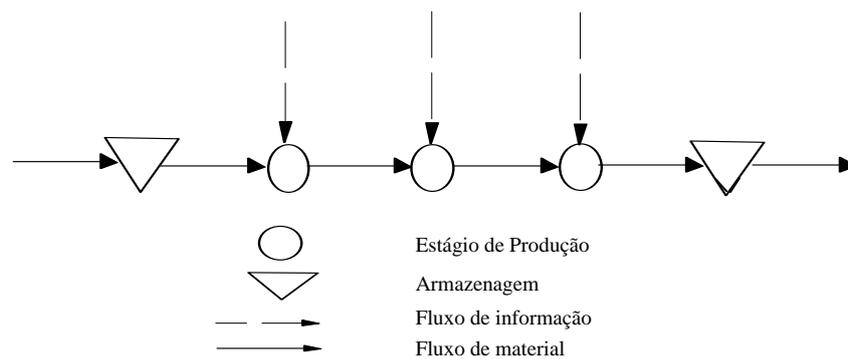


Figura 6 – Princípio tipo EMPURRA

máquina), podem ser contornados estabelecendo-se estoques e tempos de segurança. Os procedimentos para quantificação destes estoques e tempos serão estabelecidos na próxima seção.

4.2 Princípio Operativo PUXA

Neste tipo de sistema, as informações acerca dos pedidos dos consumidores e suas previsões são processadas pelo último estágio de produção (PPC) ou pelo estoque de produtos finais. Se a demanda não puder ser atendida diretamente pelo estoque disponível, quando da colocação do pedido, este estágio irá emitir um pedido para o estágio imediatamente precedente, e assim sucessivamente até o primeiro estágio. Tem-se aqui um sistema de ordens sucessivas de produção e de ordens de transporte, para repor as partes retiradas das áreas de armazenagem. Este procedimento pode ser estendido a todos os fornecedores da fábrica. A Figura 7 ilustra este tipo de sistema, para um processo de produção serial com três estágios, onde os pontos de armazenagens de itens são observados para cada estágio. Note-se que o fluxo de informação (ou as ordens de produção) podem ser baseadas em um sistema manual conhecido por KANBAN (GOLHAR *et al.*, 1991). No sistema Kanban a direção do fluxo de informação é sempre contrária a direção do fluxo de produto. Estes são sistemas seriais de múltiplas ordens de produção que podem ser estendidas aos fornecedores de matéria-prima e que têm os pedidos

colocados no último estágio de produção. Eles necessitam de pontos de armazenagem em cada estágio de produção, embora devam trabalhar com lotes tão pequenos quanto possível de modo a garantir que o número de peças dentro do sistema não venha a crescer.

Este princípio apresenta uma desvantagem quanto à velocidade de transmissão da informação. Considere uma súbita mudança de requisito no estágio e3. Esta mudança é inicialmente transmitida para o estágio e2 e daí ao estágio e1, e assim sucessivamente, até se necessário, ao fornecedor de matéria-prima. Se esta mudança fosse no sentido de aumentar a produção, o procedimento acima iria levar a atraso na data de atendimento a demanda, dado que o WIP (i.e., inventário em processo) deve ser essencialmente mínimo. Este fato exige uma sinergia, entre fornecedores, força de trabalho e manutenção, no sentido de cumprir a meta de satisfazer os pedidos dos clientes nas datas combinadas.

Devido a esta característica, o sistema PUXA é adequado somente quando a taxa de produção é constante, mas torna-se desastroso quando ocorrem mudanças bruscas na demanda. Portanto, pode-se dizer que este sistema tem dificuldades para adaptar-se rapidamente às variações impostas pelo mercado. As práticas industriais relacionadas com a implementação do conceito PUXA, juntamente com os outros objetivos da produção, recebem o nome de JUST-IN-TIME (JIT) (GOLHAR *et al.*, 1991 e SCHONBERGER, 1984).

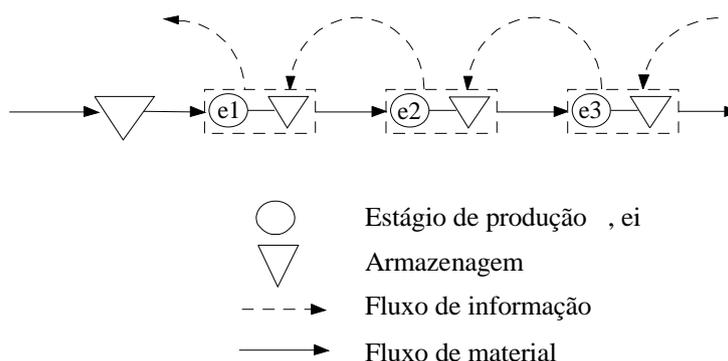


Figura 7 – Princípio tipo PUXA

No JIT a informação acerca do pedido do cliente é colocada no estoque de produtos finais ou no último estágio de produção. Para se obter o menor tempo de resposta ao pedido de um cliente é necessário manter-se pontos de estoque em cada estágio. Se a variabilidade da demanda é pequena o JIT tem grande possibilidade de sucesso.

Algumas desvantagens ou observações acerca do princípio JIT são as mesmas do sistema puxa e podem ser resumidas no grande tempo de transmissão das mudanças, já que atua com realimentação discreta da informação, e na dificuldade de se estabelecer o tamanho ideal dos lotes interestágios, fato a ser estudado a seguir. Torna-se inadequado para os sistemas sujeitos a mudanças constantes, uma vez que, é conservador quando o nível de demanda fica abaixo do planejado e inviável quando o nível de demanda fica muito acima do planejado. Isto pode ser explicado no fato deste princípio não ter mecanismos para visualizar as necessidades futuras de produção, conseqüentemente não se preparando para situações emergenciais. Assim sendo, pode-se de antemão descartar sua aplicação a processos de fabricação do tipo *não repetitivos*. Para tentar melhorar seu desempenho algumas atividades devem ser estabelecidas, como por exemplo:

Aumento da comunicação entre o processo e o cliente.

Maior freqüência de entrega.

Eliminação de toda incerteza quanto à demanda.

Tornar o fornecedor parceiro, de modo a obter credibilidade, estabilidade, redução de estoque e oportunidades de redução de custos.

Estas atividades aumentam a entrega na data certa e quando envolvem os fornecedores de matéria-prima dão origem ao conceito de JIT estendido (LEE *et al.*, 1995).

4.3 Princípio Operativo MISTO

Nestes sistemas as ordens de produção são puxadas ou empurradas pelo sistema produtivo dependendo do estágio de produção em relação ao gargalo do sistema, veja isto ilustrado pela Figura 8. Para que a peça esteja disponível o mais cedo possível no ponto de consumo, a melhor forma de operar os estágios pós-gargalo do sistema é pelo princípio EMPURRA. Já o objetivo nos estágios pré-gargalo é suprir o gargalo com partes (itens) mantendo-o ocupado o maior tempo possível. Nesta situação é importante manter sempre um nível de estoque de segurança no ponto de gargalo e o princípio PUXA é o mais adequado.

Este estoque tem como objetivo a prevenção contra o corte de atendimento à demanda por falhas de produção nos estágios pré-gargalo. Este tipo de operação permite desacoplar as duas redes, a pré-gargalo e a pós-gargalo. Esta distinção entre operações PUXA-EMPURRA torna-se fácil para linhas de produção simples com gargalo estável. Contudo para gargalos múltiplos ou móveis o problema de identificação

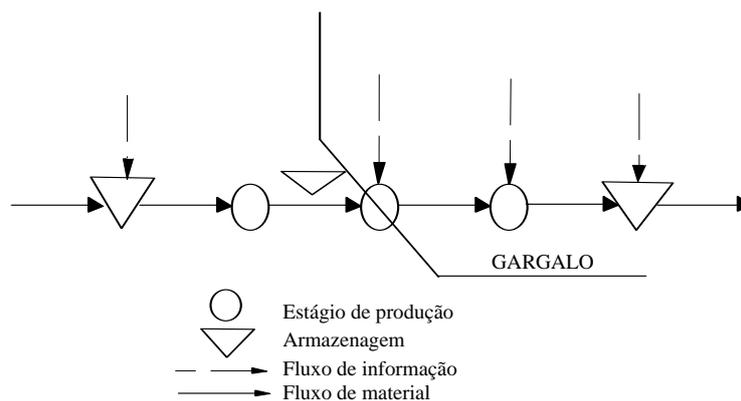


Figura 8 – Princípio tipo MISTO

do ponto de acoplamento entre as duas redes torna-se mais complexo. O *software* que utiliza este procedimento é o “Optimised Production Technology” (OPT) (JACOBS, 1984).

O OPT é uma tecnologia de gestão da produção suportada por um *software* complexo que faz a programação e o seqüenciamento da produção. Este software é visto como uma caixa preta, pois a metodologia que o suporta não está divulgada na literatura. Entretanto, sabe-se que ele está baseado em um conjunto de nove regras, cujo objetivo é a programação de máquinas e mão-de-obra para suprir os gargalos de produção de forma sincronizada, de modo a reduzir inventário e aumentar as taxas de produção. Sob a ótica OPT, o objetivo maior da empresa é fazer dinheiro. Partindo então desta premissa são estabelecidos os princípios heurísticos e medidas de desempenho que determinam a forma de programação, seqüenciamento da produção. Um dos problemas para aplicação do OPT é a determinação do gargalo. Muitas vezes a dinâmica do processo de produção torna o gargalo móvel, dificultando enormemente a aplicação deste enfoque. Para processos com gargalos móveis a aplicação do princípio operativo misto é um pouco diferente e passa a ser apresentada a seguir. Se a estrutura do produto é complexa, pode-se utilizar a combinação dos princípios puxa-empurra para melhorar o desempenho do sistema. Usualmente, neste caso um caminho da estrutura do produto pode

ser considerado crítico (por exemplo, o tempo de processamento) e assim sendo deve ser operado de forma diferenciada. A Figura 9 ilustra um processo com caminho crítico.

Observe-se que pelo princípio misto, este caminho é visto como possuindo uma demanda maior que sua capacidade de produção, sendo mais atrativo operá-lo na forma empurra, procurando assim maximizar sua utilização e agilizar o processo de produção. Os outros caminhos podem trabalhar com base no princípio puxa. Nos pontos de encontro entre o caminho crítico e os demais caminhos devem haver pontos de estoque.

4.4 Comentários sobre as Práticas Industriais

Os conceitos apresentados acima foram formados por experiência e intuição adquiridas pelos gerentes e operadores ao longo dos anos e são conhecidos como práticas industriais. Estas práticas vêem os sistemas produtivos do ponto de vista do cliente (demanda) e trabalham no sentido de maximizar o nível de satisfação deste, tanto pela entrega dos produtos nas datas combinadas quanto pela qualidade dos mesmos. Assim sendo, ao receber uma previsão de data de entrega de produtos aos clientes, a gerência deve imediatamente atentar para a disponibilidade de recursos e capacidade de produção para só então questionar esta data. Para ter eficiência neste questionamento, a gerência deve dispor de

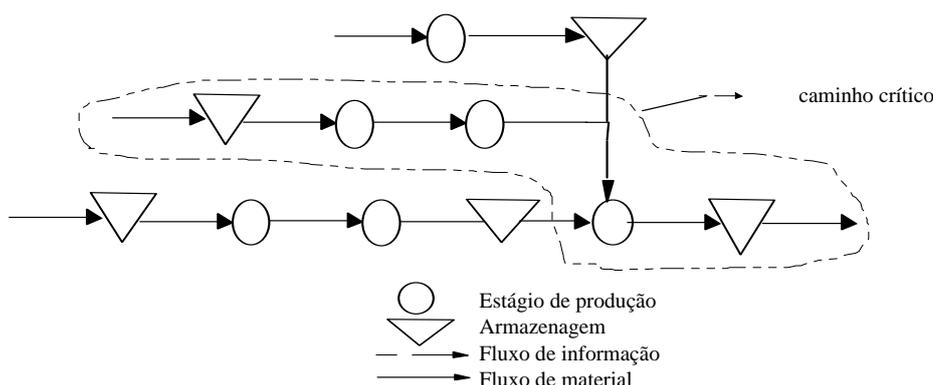


Figura 9 – Processo com caminho crítico

“mecanismos” para negociar novos prazos, em termos do objetivo principal da empresa que é o lucro. Neste contexto, algumas dificuldades dos princípios operativos, discutidos anteriormente, complicam este processo de negociação com o cliente. Por exemplo, quando é adotado o princípio PUXA (que caminha da demanda para matéria-prima) a disponibilidade de matéria-prima, via de regra, não é avaliada. Por outro lado, quando é adotado o princípio EMPURRA (que caminha da matéria-prima para a demanda) a data de entrega, via de regra, não é garantida. Outras dificuldades gerenciais envolvendo estas práticas industriais são: a impossibilidade de compatibilizar os recursos de capacidade em sistemas tipo multiprodutos e o fato de considerar as incertezas sobre a demanda e o processo de produção de maneira extremamente rígida.

Pode-se assim concluir que estas práticas têm o plano de produção dirigido pelo cliente. Isto é, a empresa recebe um pedido com uma data para entrega do produto estabelecida pelo cliente que não *olha* a capacidade ou as dificuldades do sistema produtivo. Isto coloca a questão *negócio* em segundo plano. Tanto o MRP quanto o JIT pressupõem a disponibilidade de recursos de produção e matéria-prima e não questionam a data de entrega do pedido, típica característica do processo EMPURRA. Assim sendo, questões do tipo como compatibilizar o interesse da empresa (ponto de vista da empresa) com o interesse do mercado consumidor (ponto de vista do mercado) ficam totalmente em aberto.

Além da satisfação total do cliente, atendimento ao prazo de entrega, qualidade e custo, que significa produção dirigida por pedido, os sistemas de manufatura devem buscar outros objetivos tais como a satisfação da empresa (definida em termos de retorno) e satisfação dos empregados (definida em termos da participação nos lucros). Alguns destes objetivos podem ser “quantificados” e tratados pela otimização, como discutido na seção 6 deste trabalho.

5. Políticas de Estoque

As práticas industriais utilizam a redução do nível de estoque como estratégia para reduzir custos. Entretanto ao fazer isto, a abordagem fica vulnerável às incertezas e variabilidade do processo produtivo. Para contornar este problema é necessário considerar uma política de estoque que venha amenizar as flutuações causadas pelas incertezas como: as do sistema de produção (quebra de equipamento, falta de pessoal, etc.), da demanda e da oferta de matéria-prima. Para estabelecer esta política é necessário notar que um sistema de produção multiestágio pode ser descrito como uma rede composta de estágios de produção separados por pontos de estoque.

Na operação de um sistema real é importante estabelecer a diferença entre uma fila e um ponto de estoque. A fila, ou estoque intraestágio, acumula material que está esperando ou competindo por recurso e o processamento começa assim que o recurso esteja disponível. No ponto de estoque,

ou estoque interestágio, o material em estoque não é imediatamente liberado para o chão de fábrica. Aqui a decisão de liberação é extremamente importante; o processamento imediato não é permitido mesmo que o recurso esteja disponível. Note-se que eles existem para reduzir incertezas e flutuações da produção.

As práticas industriais trabalham para diminuir o estoque intraestágio pela coordenação e balanceamento da produção. Contudo incertezas associadas à demanda, ao tempo de produção e até mesmo a entrega das ordens de compra criam dificuldades de gerenciamento que só podem ser contornadas pelos “estoques reguladores” disponíveis estrategicamente nos pontos de estoque. De acordo com o tipo da incerteza pode-se adotar uma política diferente para a definição do tamanho de estoque. Exemplos são as incertezas associadas à previsão de demanda e com o processo produtivo, exigindo da gerência a implantação de pontos de estoque reguladores. Um outro tipo de incerteza está associado ao tempo de produção, que gera como política de prevenção, a adoção do tempo de segurança, ou seja, estabelece-se que o tempo de produção é um pouco maior que o tempo esperado de produção. Note-se que a idéia básica é evitar inesperadas atividades de replanejamento da produção e para tanto, adota-se a política de manter uma certa quantidade de estoque nos diferentes pontos de estoque. A eficácia destes estoques de segurança, no sentido de absorver as incertezas e as flutuações existentes no contexto do processo produtivo, depende do tamanho do período de revisão do plano de produção. A seguir serão apresentados procedimentos para estabelecer a quantidade de estoque necessária para os dois casos acima, estoque de segurança e tempo de segurança.

5.1 Estoque Interestágio em Sistemas de Produção

Esta seção considera os sistemas de produção multiestágio e a possibilidade das incertezas serem absorvidas por estoques entre estágios. A taxa de produção é assumida como conhecida.

Inicia pelo caso mais simples, o caso estágio único.

Caso 1 Estágio Único: Suponha que as ordens sejam lote por lote. No esquema MRP II mostrado na Tabela 2 podemos ver como a previsão de demanda influencia na determinação das ordens de produção no caso de não se ter estoque de segurança.

Seja $D(t,t+k)$ a demanda para o período $t+k$ como previsto no início do período t e $C(t)$ a soma do estoque e do WIP no início do período t . Assim, por exemplo, da Tabela 2, segue que $C(1) = 30 + 80 + 60 + 70$. A relação, para o período t , entre a ordem planejada $P(t)$, o estoque $C(t)$ e a previsão de demanda $D(t,t+k)$ é dada por:

$$P(t) = \sum_{i=0}^{\ell} D(t,t+i) - C(t)$$

Para não resultar em ordem planejada negativa é assumido que:

$$C(t) \leq \sum_{i=0}^{\ell} D(t,t+i)$$

A presença de incertezas e a tentativa de se evitar reprogramação da produção leva à criação de estoque regulador. Isto pode ser efetuado por três caminhos, a saber:

1. Utilização de estoque fixo de segurança, para o tempo de atraso “ ℓ ”

$$P(t) = \sum_{i=0}^{\ell} D(t,t+i) + S - C(t)$$

onde S denota o nível de inventário de segurança fixado pela gerência.

2. Utilização de norma para o tempo “ e ” de segurança.

$$P(t) = \sum_{i=0}^{\ell+e} D(t,t+i) - C(t)$$

3. Superestimar requisitos futuros

$$P(t) = \sum_{i=0}^{\ell} D'(t,t+i) - C(t)$$

Tabela 2 – Esquema MRP para tempo de atraso de 3 unidades de tempo e estoque de segurança de 0 unidades.

| semana | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|---------------------|----|-----|-----|----|-----|------|------|------|
| demanda prevista | | 100 | 50 | 80 | 40 | 130 | 50 | 100 |
| produção especific. | | 80 | 60 | 70 | | | | |
| disponibilidade | 30 | 10 | 20 | 10 | -30 | -160 | -210 | -310 |
| requisito líquido | | | | | 30 | 130 | 50 | 100 |
| ordem planejada | | 30 | 130 | 50 | 100 | | | |

A quantidade extra a ser produzida em cada caso é, respectivamente, dada pelas seguintes componentes: S , $\sum_{i=\ell+1}^{\ell+e} D(t, t+i)$ e $\sum_{i=0}^{\ell} [D'(t, t+i) - D(t, t+i)]$. Sendo D' a demanda superestimada.

Esta seção se restringiu ao estudo do nível de estoque de segurança para amenizar os efeitos das incertezas. O tamanho deste estoque depende do nível de variabilidade da incerteza. Podemos distinguir três tipos de incertezas: incertezas com respeito ao processo, à demanda e ao tempo de processamento.

Supondo conhecidas as medidas estatísticas relacionadas com os três tipos de incertezas listados acima pode-se, usando o segundo momento estatístico (ou seja, a variância) relacionado a cada tipo de incerteza, obter uma expressão analítica para calcular o estoque de segurança S . Assim sendo, seja $\sigma^2(i)$ a variância do erro de previsão de demanda para i períodos a frente; σ_e^2 a variância do tempo de atraso; e σ_ℓ^2 a variância com respeito ao processo produtivo. Por conveniência será assumido que estas variâncias são independentes do período. O estoque de segurança S , que deve cobrir todas as incertezas até o período $\ell+1$, é igual a:

$$S = k \sqrt{\sum_{i=0}^{\ell} \sigma^2(i) + \sigma_e^2 + \sigma_\ell^2 \mu^2}$$

onde μ é a demanda média. O fator k pode ser visto como um parâmetro ponderador que suaviza ou incrementa S , segundo critérios de risco estabelecidos pela gerência.

Caso 2 Multiestágios e Outros: Para sistemas dois estágios, tipos convergentes, divergentes e outros, expressões especiais podem ser derivadas. Detalhes destas expressões podem ser encontrados em WIJNGAARD & WORTMANN (1985). Contudo, para sistemas com maior grau de complexidade, isto já não é possível. Abre-se espaço então para o emprego de outras técnicas ou heurísticas que venham complementar as lacunas deixadas pelas práticas industriais. Entre estas técnicas podem ser destacadas a Teoria de Filas (PAPADOPOULOS *et al.*, 1993) e a Teoria de Controle Ótimo Estocástico (SILVA FILHO *et al.*, 1995).

Incerteza com Relação ao Tempo

Acima foram discutidos procedimentos para o estabelecimento do nível “adequado” de estoque de segurança para cada item. Estes procedimentos resultam em manter uma certa quantidade de estoque de segurança em cada ponto de estoque. Um outro caminho para se estabelecer um estoque de segurança é a utilização de um “tempo de segurança”. Este procedimento consiste em se adiantar a data de entrega de um pedido. A diferença de tempo entre a *need-date* e a *due-date* é chamada de tempo de segurança. A implementação deste procedimento leva à distinção das duas datas: a *need-date* e a *due-date* como mostrado na Figura 10. O pedido ao fornecedor de matéria-prima deve ser colocado tomando-se em consideração a *due-date* a partir da qual são aplicadas as tradicionais práticas industriais.

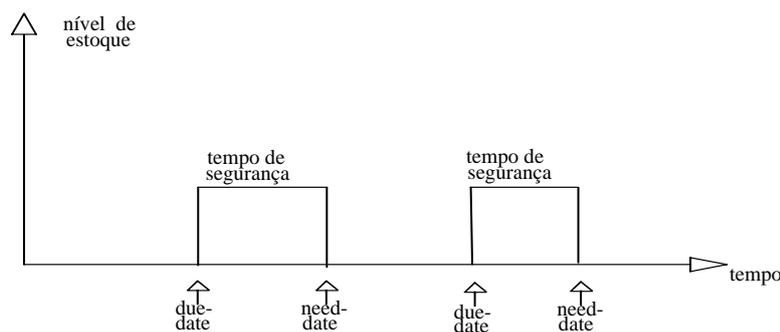


Figura 10 – Padrão de estoque de segurança gerado pelo tempo de segurança

Uma vantagem de se empregar um tempo de segurança em relação a um estoque de segurança é que este procedimento não gera qualquer estoque, a menos que haja uma demanda real em um futuro próximo. Enquanto que o emprego de estoque de segurança resulta em um aumento não planejado dos níveis de inventário intermediário (WIP). A incerteza quanto ao tempo advém do padrão do suprimento e do padrão da demanda, ou seja, a demanda irá ocorrer, mas quando? A chegada do pedido de matéria-prima irá ocorrer, mas quando?

Como conclusão, as incertezas associadas ao tempo deveriam ser contornadas via tempo de segurança, enquanto que incertezas relacionadas a quantidades deveriam ser contornadas por quantidade de segurança. Contudo outro aspecto que deve ser considerado pelas ações de planejamento é a sincronização temporal da produção em linhas concorrentes ou divergentes, sendo os pontos de concorrência ou divergência sempre um problema a mais para o planejador. Esta ação permite eliminar estoque desnecessário e evitar parada do sistema de produção por falta de produto. Como sincronizar a produção em termos de tempo, quantidade e capacidade nestes pontos passa a ser discutido a seguir.

6. Métodos de Otimização

Um outro caminho para auxiliar no apoio à tomada de decisão gerencial de processos de planejamento da manufatura é a utilização dos métodos de otimização. Entre eles, um

enfoque muito atrativo é a modelagem do sistema produtivo como um problema de fluxo em rede com restrições adicionais (CARVALHO *et al.*, 1994). Esta modelagem aproveita as características de fluxo de produto da rede de produção, do sistema de manufatura, para realizar a modelagem por meio de recursos gráficos. O grande apelo deste enfoque é que ele olha para o ponto de vista da empresa (retorno esperado), além de procurar resolver o problema com uma visão temporal considerando assim as informações disponíveis para todo o horizonte de planejamento. Este fato permite que se trabalhe no sentido de eliminar gargalos, por meio de deslocamento da produção no tempo, em alguns casos adiantando e em outros atrasando (mesmo para linhas que processem multiprodutos). Permite também analisar objetivos conflitantes e incluir demanda probabilística, sob o ponto de vista do negócio, traduzidos em um único objetivo, ou seja, *o lucro*. A seguir são discutidos aspectos de modelagem e da técnica de solução de problemas de manufatura via otimização.

6.1 Modelagem para Otimização

Tendo como objetivo fornecer as principais características da formulação do problema de planejamento da produção a ser estudado, esta seção considera o caso mais simples que se constitui em uma linha serial multiestágio, multiperíodo de um processo discreto de manufatura. A Figura 11 ilustra esta linha com

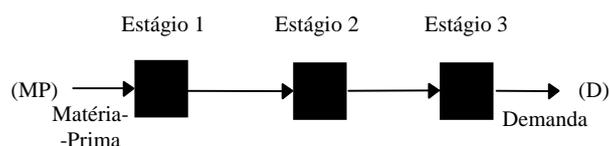


Figura 11 – Linha de produção serial

três estágios de produção na qual cada estágio pode ter associado uma máquina ou um grupo de máquinas que realizam transformações ou transportes com capacidades definidas *a priori*. O objetivo do planejamento é, a partir de metas semanais estabelecidas por um nível hierárquico superior (por exemplo, decisões geradas pelo programa mestre da produção (FOX, 1984), ou por um sistema hierárquico de decisão (CARVALHO *et al.*, 1996)), desmembrá-las em produções diárias, de forma a otimizar os custos, atendendo ao mesmo tempo às restrições de capacidade das máquinas, de armazenagem e de suprimento de matéria-prima.

As decisões a serem tomadas para cada dia podem envolver: a quantidade produzida, a utilização de matéria-prima, o carregamento de cada máquina ou grupo de máquinas, entre outras. A expansão da Figura 11 para considerar um período de planejamento de cinco dias é mostrada na Figura 12. Nesta expansão a disponibilidade de cada grupo de máquinas pode ser diferente ao longo do período de planejamento. Assim o grupo de máquinas 1 sofre decréscimo de capacidade nos intervalos de tempo 4 e 5 enquanto o grupo de máquinas 3 recebe uma nova máquina a partir do período 3. Variações semelhantes podem ocorrer com suprimento de matéria-prima e com a demanda. De uma maneira geral, este problema apresenta as seguintes características:

- o horizonte de planejamento é discretizado em períodos (hora, turno, dia);
- cada estágio de produção pode conter um ou mais grupos de máquinas;
- são conhecidas as capacidades de produção e de armazenagem de matéria-prima para atendimento à demanda, dentro do horizonte de planejamento; e

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

Segundo os custos unitários de matéria-prima, de operação, de estocagem e de atrasos na entrega dos produtos e com o retorno por unidade de demanda atendida, o planejamento deve gerar um conjunto de decisões que determina:

- o quanto cada máquina deve produzir e em que período;
- o quanto armazenar por estágio e em que período;
- a escala de utilização de matéria-prima por período;
- a escala de atendimento à demanda por período;
- a quantidade de demanda atendida com atraso; e
- o retorno dentro do período de planejamento.

Um caminho para modelar e resolver este tipo de problema, passa pela observação de que a linha de produção, para o sistema ilustrado pela Figura 12, pode ser visualizada como um conjunto de partes fluindo pelas máquinas e unidades de armazenagem, sofrendo trabalho (fabricação ou transporte) em cada período de tempo, até se tornarem um produto final. Se um item deixa um estágio i , ele pode ir imediatamente ao estágio $i+1$ ou ser armazenado para processamento em períodos subsequentes. Esta decisão passa pelas capacidades e custos de produção e de estocagem. Esta característica sugere a aplicação de técnicas de grafos para modelagem do problema de planejamento da produção, podendo ser escrita para cada estágio a seguinte equação de balanço:

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

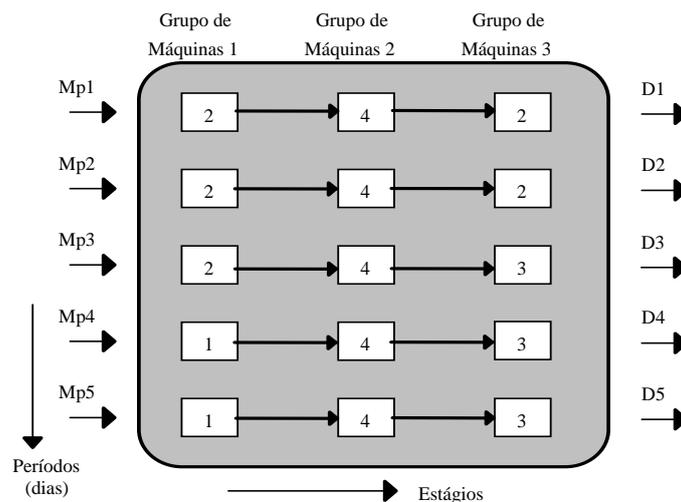


Figura 12 – Linha de produção com três estágios e cinco períodos.

onde $x_{i,t}$ representa a quantidade processada no estágio i , no tempo t e $y_{i,t}$ representa a quantidade armazenada para posterior processamento no estágio i e tempo t . A representação da linha de montagem serial ilustrada na Figura 12, por uma estrutura de grafo, está apresentada na Figura 13.

Nesta rede, os fluxos nos arcos do grafo representam para cada período de tempo: a quantidade de fornecimento de matéria-prima, a quantidade de demanda por produto acabado, o nível de produção das máquinas, o nível de armazenagem das peças entre os períodos t e $t+1$, e o nível de demanda em atraso de produtos acabados entre os períodos t e $t-1$ (CARVALHO *et al.*, 1992). Por outro lado, os nós do grafo representam os pontos de decisão, onde são definidos o quanto produzir no período t e o quanto armazenar para o período $t+1$. Neste modelo o objetivo é a maximização do retorno líquido, que é definido como a diferença entre o retorno obtido com o atendimento à demanda e os custos de produção (compra de matéria-prima, armazenagem, processamento, penalidade por demanda em atraso).

Este grafo possui uma estrutura muito especial. Cada nó, com exceção dos nós relativos ao suprimento de matéria-prima e de balanço de demanda, correspondente a um estágio de produção. Possui pelo menos dois arcos divergentes,

um para representar a capacidade de processamento e outro para representar a capacidade de armazenagem do sistema. De um modo geral, pode-se formular o problema em questão, na forma matricial, como segue:

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

onde $f(\cdot)$ é a função retorno líquido, A é a matriz de incidência nó-arco para o horizonte de planejamento, x o conjunto de variáveis que representam os fluxos nos arcos do gráfico e b o conjunto de disponibilidades de matérias a serem processadas ou demandas a serem atendidas. A modelagem acima, aplica-se à processos produtivos seriais simples e portanto deve ser estendida para atender a problemas reais da indústria de manufatura moderna, como é o caso do problema de linhas de montagem tratado a seguir.

6.2 Linha de Montagem

Uma linha de montagem é definida pela árvore do produto, ou seja, pela seqüência de operações que o produto e seus itens devem percorrer até se tornarem o produto final. O problema de uma linha de montagem composta

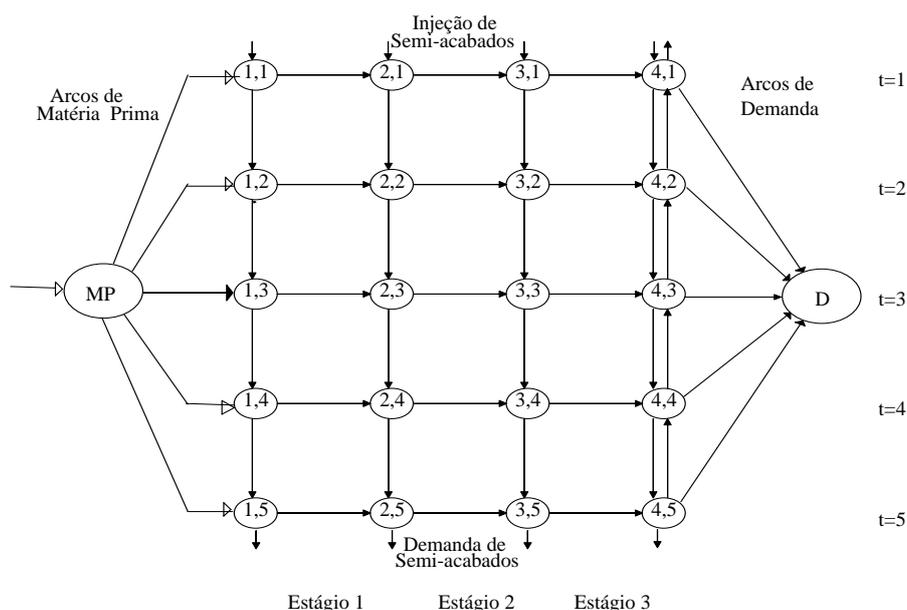


Figura 13 – Representação por grafo do sistema produtivo

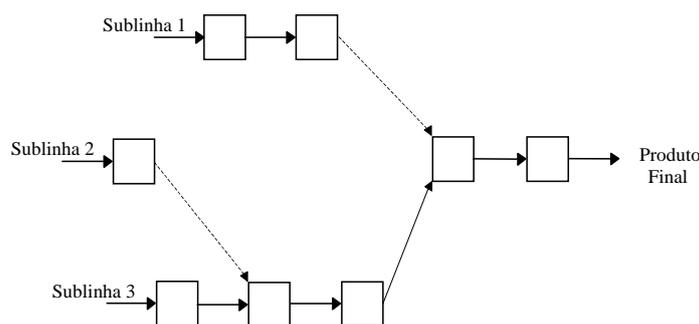


Figura 14 – Representação de uma linha de montagem.

de três sublinhas é ilustrado na Figura 14. Através das sublinhas fluem os itens e os componentes necessários à montagem do produto final, que são acoplados em pontos determinados da linha. Nesta figura, as linhas pontilhadas indicam os acoplamentos entre as sublinhas nos seus respectivos pontos de montagem.

É necessário definir o número de componentes a serem montados a cada item do produto principal (quatro pneus por carro, por exemplo). Desta forma, uma das funções mais importantes do planejamento da produção é coordenar o fluxo entre as sublinhas concorrentes visando

eficiência na montagem dos produtos finais. Esta coordenação ou sincronização é necessária para prevenir a criação de estoques supérfluos entre estágios ou que a produção pare devido a um fluxo não balanceado entre produtos e componentes. A Figura 15 expande a linha da Figura 14 para um horizonte de três períodos de planejamento.

A representação por grafo da Figura 15 é apresentada na Figura 16. Nesta figura, os arcos em linha cheia representam as produções, os arcos em tracejado as armazenagens e os arcos em pontilhado indicam os pontos de acoplamento.

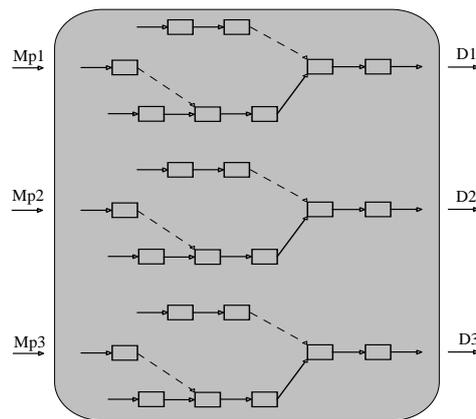


Figura 15 – Linha de produção para três períodos.

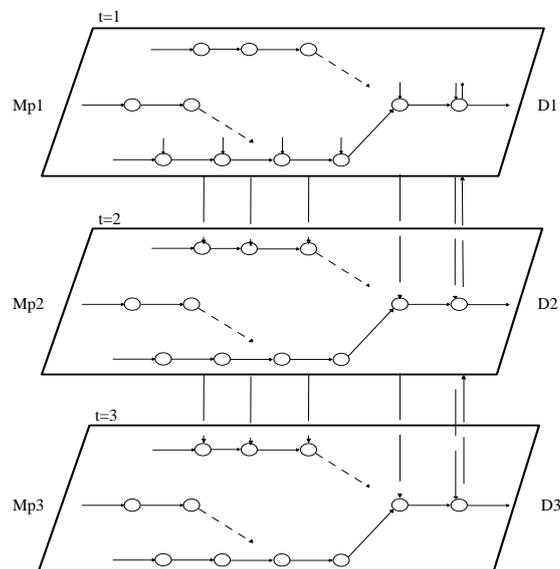


Figura 16 – Representação por grafo do sistema produtivo.

Para se garantir o balanço de fluxo no ponto terminal ℓ de uma sublinha, deve-se considerar a seguinte equação de acoplamento:

$$q(\ell)x(i, t) - x(\ell, t) = 0, \quad t = 1, 2, \dots, T$$

onde ℓ é o conjunto dos pontos terminais e $x(\ell, t)$ representa a quantidade de peças do ponto ℓ no tempo t , a serem acopladas às $x(i, t)$ peças no ponto de montagem ou acoplamento i no tempo t , a uma dada relação de acoplamento $q(\ell)$. Esta equação garante que o fluxo do ponto terminal ℓ de cada sublinha é suficiente para

fornecer o fluxo necessário no ponto de montagem i . O número de restrições adicionais será igual ao número de pontos de acoplamento multiplicado pelo número de períodos de tempo.

6.3 Linha de Montagem Multiproduto

Um ponto importante a considerar é o processamento de vários produtos pelo mesmo processo, vide Figura 17. Estes produtos podem ter árvores de produto idênticas ou diferentes, no entanto utilizam o mesmo conjunto de máquinas,

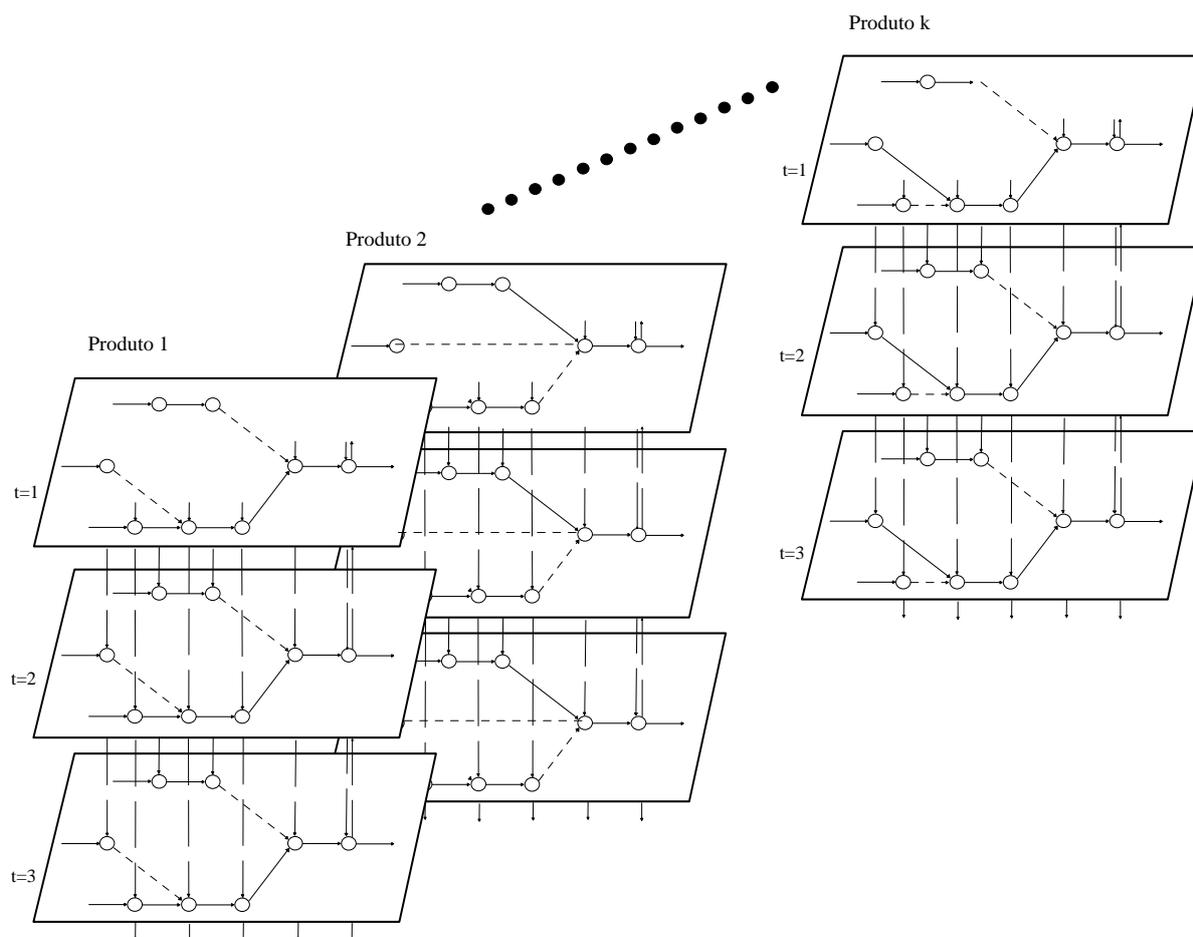


Figura 17 – Sistema multiproduto multiestágio

durante a operação do sistema. Assim sendo é importante garantir que, dentro do horizonte de planejamento, o processamento de peças diferentes em uma mesma máquina não leve à violação de sua capacidade de produção. Para assegurar o atendimento a esta restrição deve-se estender o problema de grafo para um problema multifluxo, para isto adiciona-se mais uma restrição ao problema:

$$\sum_{i \in I(j)} x(i, t) \leq X(j, t)$$

onde $X(j, t)$ é a capacidade máxima de produção da máquina j e $x(i, t)$ é a quantidade processada da peça i no tempo t . O conjunto $I(j)$ contém os tipos de peças que serão processadas pela máquina j .

A representação matricial para a Figura 17, considerando o caso multiproduto, pode ser escrita como:

$$\begin{array}{c}
 A_1 \\
 A_2 \quad 0 \\
 \vdots \quad \quad 0 \\
 0 \quad \quad \quad \vdots \\
 \hline
 A \quad Q_1 \quad \quad \quad A_k \\
 \quad Q_2 \quad \quad 0 \\
 \quad \quad \quad \vdots \quad \quad \quad 0 \\
 \quad 0 \quad \quad \quad \quad \quad \quad \vdots \\
 \hline
 E_1 \quad E_2 \quad \dots \quad E_k \quad I
 \end{array}$$

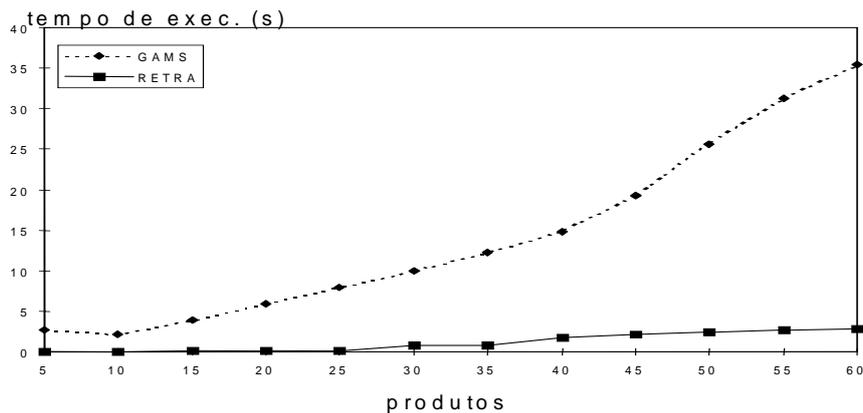


Figura 18 – Desempenho do GAMS x RETRA

onde A_1 é a matriz incidência nó-arco do produto 1, A_2 é a matriz incidência nó-arco do produto 2, A_k é a matriz incidência nó-arco do produto k e Q_k são as matrizes que definem as relações de acoplamento entre as linhas concorrentes de cada produto. As submatrizes E_k representam as restrições de capacidade mútua de processamento. O número de restrições adicionais é igual ao número de pontos de acoplamento multiplicado pelo número de intervalos de tempo adicionada ao número de máquinas que processem mais de uma peça no mesmo intervalo de tempo. Como pode-se ver acima, a matriz resultante para o caso do planejamento da produção de uma linha multiproduto, multiestágio e multiperíodo possui uma estrutura muito particular que deve ser aproveitada pela técnica de solução. Para tanto deve ser paricionada como sugerido em FERNANDES *et al.* (1995).

6.4 Técnica de Solução

Em geral, os problemas de planejamento da produção são de grande porte, devido principalmente à natureza temporal e à quantidade de produtos que compartilham os mesmos recursos de produção. Logo, requisitos como armazenagem de variáveis e tempo de execução computacional são fatores essenciais na escolha de um método de solução. Para tanto, um meio de satisfazer estes requisitos é aproveitar a estrutura

especial do problema. Um método que pode tirar proveito deste tipo de estrutura é o GUB (“Generalized Upper Bounding”) especializado para estruturas de rede. Este método é também conhecido como algoritmo primal para fluxo em redes com restrições adicionais. O algoritmo empregado é o NETSIDE, código em Fortran para resolver problemas de fluxo em redes com restrições adicionais, desenvolvido por KENNINGTON (1990) e que possui bom desempenho quando o número de restrições adicionais é menor que o número de nós do grafo, caso específico do problema de planejamento da produção aqui formulado.

Outro enfoque é trabalhar as restrições adicionais de forma a converter a estrutura acima em um problema de fluxo em redes simples em que algoritmos específicos muito eficientes estão disponíveis. Para obter uma estrutura de fluxo em redes com função objetivo linear, dois passos devem ser seguidos: tratamento das restrições adicionais por técnica de penalidade quadrática suavizada e resolução do problema resultante por decomposição simples e implementada no *software* RETRA (CARVALHO *et al.*, 1998). A Figura 18 mostra o desempenho desta técnica em relação ao GAMS (BROOKE *et al.*, 1992), *software* de programação linear de propósito geral. Nesta figura é variado o número de produtos e medido o tempo de execução. O GAMS mostra um crescimento próximo ao exponencial

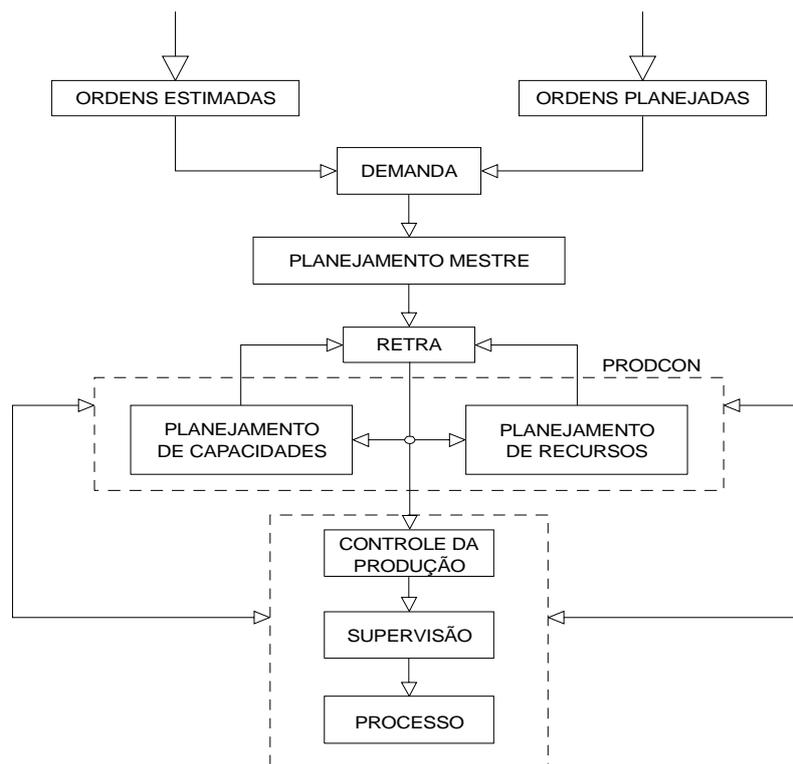


Figura 19 – Hierarquia sugerida

como esperado, enquanto o RETRA apresenta uma vantagem crescente com o aumento do tamanho do problema. Esta característica é muito importante na resolução de problemas reais.

6.5 Recursos Visuais para Modelagem do Problema

A utilização de modelos de otimização do tipo fluxo em redes possibilita que a descrição de um problema real, em linguagem de computador, seja feita por ícones para definição da rota de cada produto. Ou seja, o decisor monta a árvore de produto utilizando recursos gráficos e ícones como na Figura 14. Para cada produto, define as taxas de processamento por máquinas, custos, capacidades e diz o número de períodos que quer estudar. O sistema de interface expande esta rota ao longo do horizonte de planejamento. A modelagem gráfica torna transparente aos usuários as *equações matemáticas* que descreveriam o sistema físico, fator sempre relevante.

7. Integração Práticas Industriais e Otimização

As práticas industriais são largamente empregadas no planejamento da produção dos sistemas de manufatura. Contudo, a cada dia cresce a necessidade de melhorá-las e supri-las de mecanismos que considerem a questão da capacidade com uma visão temporal do problema para a definição das necessidades de armazenagem interestágios. Ou seja, que procure fazer uma alocação em um sistema capacitado, antecipando ou retardando no tempo o atendimento a uma demanda preestabelecida, baseando-se para tanto em fatores econômicos. O caminho é então a integração entre as práticas industriais e os modelos de otimização como sugerido na Figura 19.

Este artigo sugere uma estrutura de coordenação que interage por propagação de restrições e por mecanismo de realimentação que assegura o processo global de convergência. Em um

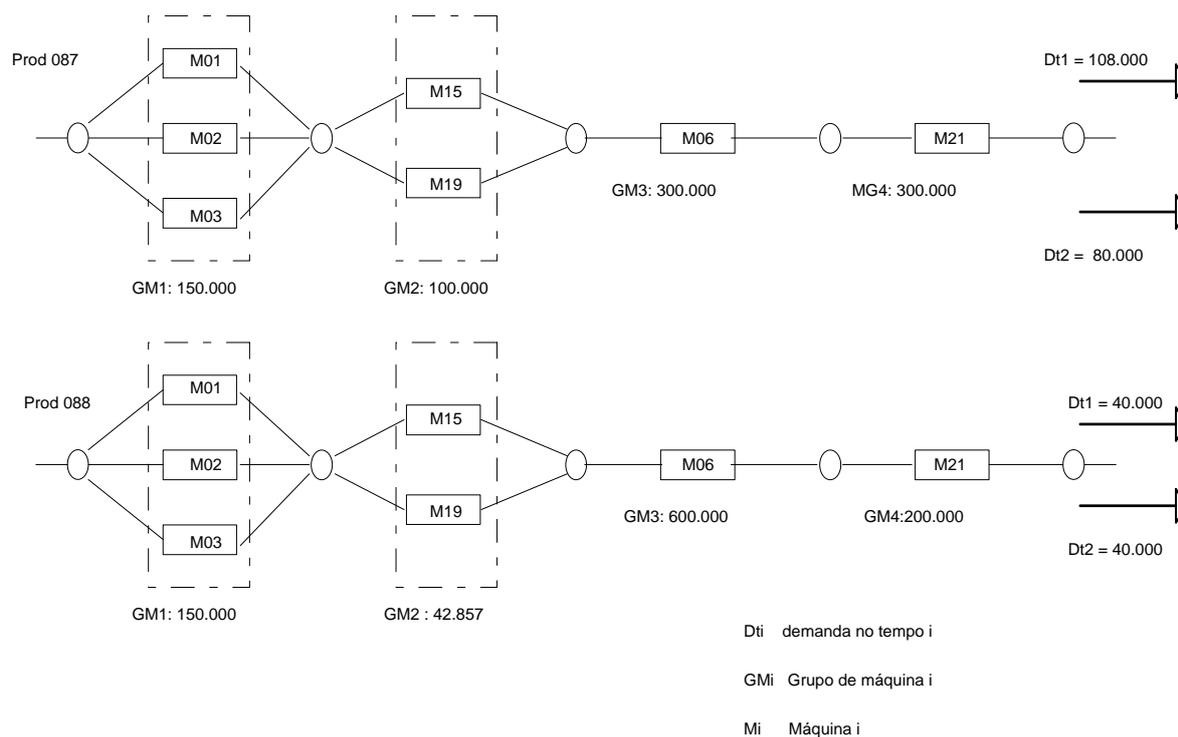


Figura 20 – Sistema de Produção

primeiro nível é utilizada a programação linear (RETRA) para o problema de alocação agregada. Esta agregação evita a manipulação maciça de dados com as conseqüentes complexidades computacionais e tem como objetivo captar os *trade-offs* e restrições do problema. Os itens que dividem o mesmo tempo de preparação de máquinas são agrupados em famílias e somente os equipamentos importantes de cada linha são representados, além dos pontos de montagens.

O objetivo é permitir uma interação eficiente entre produtos, capacidade de produção, estoque interperíodo e disponibilidade de matéria-prima. Em um segundo estágio, o PRODCON (PASSOS *et al.*, 1996) detalha o plano estabelecido acima e gera as ordens de produção. A grande vantagem da integração de duas técnicas diferentes para solução do problema de planejamento da produção, é que a solução fornecida pelo RETRA é factível ou está muito perto de uma solução factível do PRODCON. Assim o plano a ser avaliado pelo PRODCON estará muito próximo da solução ótima do sistema.

8. Aplicação

Na Figura 20 é apresentado um sistema de produção com quatro estágios, uma ou mais máquinas por estágio com capacidades (GMi) distintas por produto. As demandas para dois produtos são conhecidas, não há restrição de matéria-prima e o objetivo é gerar soluções pelo PRODCON um *software* do tipo MRP. O PRODCON gera como primeira solução uma programação, Figura 21, como se os produtos fossem processamentos individualmente.

Quando é realizada a superposição das soluções, verifica-se neste caso que a capacidade de produção é violada. Este é o caso do grupo de máquinas GM2 no qual somente a produção de prod087 viola a capacidade de produção. Algumas atitudes corretivas devem ser tomadas. As propostas podem ser: atender a um terço de cada pedido; atender totalmente o pedido do produto Prod087 e o que for possível do produto Prod088; atender totalmente o produto Prod088 e o que for possível do Prod087.

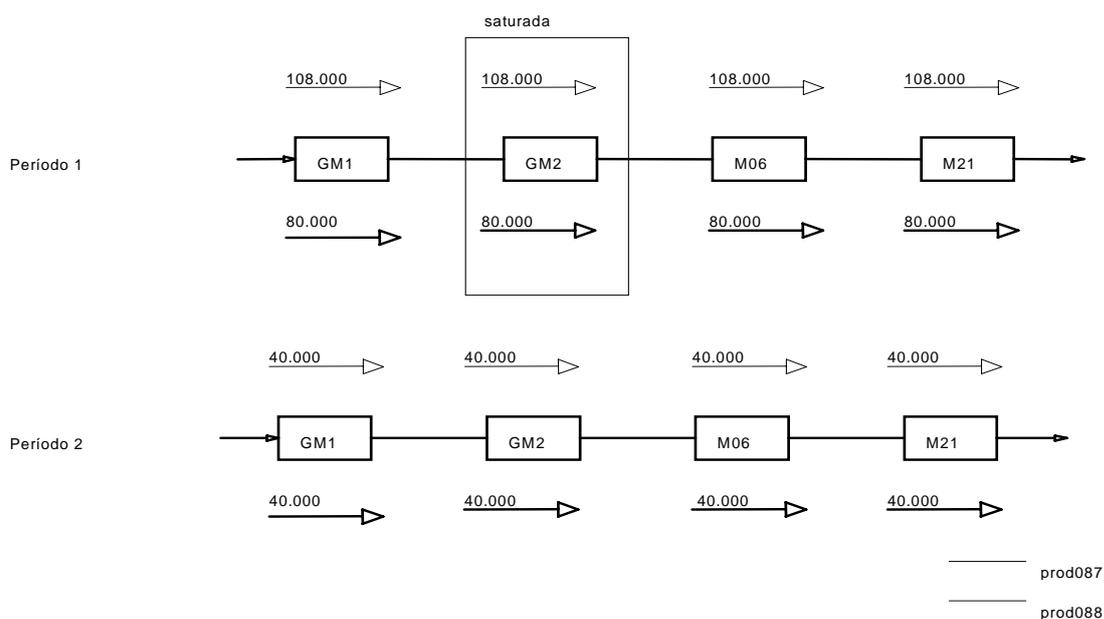


Figura 21 – Solução PRODCON

Tabela 3 – Nível de atendimento às demandas para as propostas

| Período | Produto | Demanda Original | Proposta 1 Dem. Atendida | Proposta 2 Dem. Atendida | Proposta 3 Dem. Atendida |
|---------|---------|------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 1 | prod087 | 108.000 | 36.000 | 108.000 | 0 |
| | prod088 | 80.000 | 26.667 | 0 | 45.714 |
| 2 | prod087 | 40.000 | 13.000 | 40.000 | 0 |
| | prod088 | 40.000 | 13.000 | 22.286 | 40.000 |

Tabela 4 – Solução Otimizada (RETRA)

| Período | Produto | Demanda Original | Demanda Atendida |
|---------|---------|------------------|------------------|
| 1 | prod087 | 108.000 | 108.000 |
| | prod088 | 80.000 | 03 |
| 2 | prod087 | 40.000 | 40.000 |
| | prod088 | 40.000 | 22.289 |

9. Conclusão

Este artigo discutiu as necessidades de um sistema de apoio à gestão da produção de sistemas reais de manufatura que contemple questões de custo e dependência temporal das

decisões, além da simples alocação de recursos. Sugeriu que decisões *ótimas* sejam tomadas por técnicas gerativas de solução, por exemplo, utilizando-se de modelos de otimização do tipo fluxo em redes. Em um segundo nível, as decisões *ótimas* devem ser avaliadas e detalhadas pelo

PRODCON que gera as ordens de compra e de produção. Discuti também a integração das duas técnicas, gerativa e avaliativa de solução, necessária devido a complementaridade. Ou seja, enquanto a otimização, para fugir do problema de dimensionalidade, trabalha com os produtos agregados em família, otimiza custos e considera restrições rígidas de capacidade e incerteza na

demanda, o PRODCON (que possui a estrutura de um MRP II) procura factibilizar de forma detalhada uma solução que atenda aos interesses dos clientes. O grande apelo da integração destas metodologias é olhar o sistema de produção sob o ponto de vista da empresa (retorno esperado dentro do horizonte de planejamento) e do cliente, privilegiado pelas técnicas avaliativas.

Referências Bibliográficas

- BROOKE, A.; KENDRICK, D. & MEERAUS, A.:** “GAMS – A User’s Guide”, Release 2.25, Boyd & Fraser Publishing Company, Massachusetts, 1992.
- CARVALHO, M.F.H.; FERNANDES, C.A.O. & SILVA FILHO, O.S.:** “Manufacturing Planning by Network Flow Model With Side Constraint”, *IFAC Workshop on CIM in Process and Manufacturing Industries*, Helsinki, Finlândia, 1992.
- CARVALHO, M.F.H.; FERNANDES, C.A.O.; SILVA FILHO, O.S. & VARGA JUNIOR, E.J.:** “OPERA – Optimal Production Environment for Resource Allocation”, *IFIP/94*, Gramado, Brasil, pp.297-304, 1994.
- CARVALHO, M.F. & SILVA FILHO, O.S.:** “Two-Stage Strategic Manufacturing Planning System: a Practical View”, *Twelfth Interaction conference on CAD/CAM Robotics and Factories of the Future*, pp.574-580, 1996.
- CARVALHO, M.F.H.; FERNANDES, C.A.O.; FERREIRA, P.A.V. & TAKAHASHI, M.T.:** “Assembly Production Planning By Network Flow Approach” To be presented at *IFAC INCOM’98 Symposium on Information Control in Manufacturing*, 1998.
- FERNANDES, C.A.O.; CARVALHO, M.F.H.; FERREIRA, P.A.V. & FILHO, O.S.S.:** “Multicommodity Manufacturing Flow Problems by a Penalty Function Approach”, *IFAC Large Scale Systems*, London, UK, 1995.
- FERREIRA, A.B.H.:** “Novo dicionário da Língua Portuguesa”, 1a. Edição, Editora Nova Fronteira, 1975.
- FOX, K.A.:** “MRP-II Providing a Natural Hub for Computer Integrated Manufacturing System”, *Ind. Eng.*, Oct, pp.44-50, 1984.
- GERSHWIN, S.B. & HILDEBRANT, R.S.:** “A Control Perspectives on Systems”, *IEEE Control System Magazine*, vol.6, n.2, pp.3-15, 1986.
- GOLHAR, D.Y. & STAMM, C.L.:** “The just-in-time philosophy: A literature review”, *Int. J. Prod. Res.*, vol.29, n.4, pp.657-676, 1991.
- GRAVES S.C.:** “A Review of Production Scheduling”, *Operations Research*, vol.29, n.4, pp.646/675, 1991.
- JACSON, R.H.F & JONES A.W.T.:** “An Architecture for Decision Making in the Factory of the Future”, *INTERFACES 17*, n.6, pp.15-28, 1987.
- JACOBS, F.R.:** “OPT Uncovered Many Production Planning and Scheduling Concepts can be Applied with or without the Software”, *Ind. Eng.*, p.32-41, 1984.
- KENNINGTON, J.L. & WHISMAN, A.:** “Netside User’s Guide”, Department of Computer Science and Engineering, Southern Methodist University, Dallas, 1990.
- LEE, L.M. & PAEK, J.H.:** “An enlarged JIT programme: its impact on JIT implementation and performance of the production System”, *Production Planning & Control*, vol.6, n.2, p.185-191, 1995.
- PAPADOPOULOS, H.T.; HEAVEY C. & BROWNE, J.:** “Queueing Theory in Manufacturing Systems Analysis and Design”, Chapman and Hall, UK, Capítulo 7, 1993.
- PASSOS, C.S.; TEIXEIRA, E.; RODRIGUES, M.; HADDAD, R.; BOTTINI, K.; CAVALCANTE, E. & CAVALCANTE, C.:** SIGEP: Um Sistema de Planejamento e Controle da Produção da Nova Geração. *I Simpósio de Automática Aplicada*, pp.73-78, SBA, Brasil, 1996.

- RODAMMER, F.A. & WRITE, K.P.:** "A Recent Survey of Production Scheduling", *IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics*, vol.18, n.6, pp.841-851, 1988.
- ROGERS R.V.:** "Generalizations of the machine scheduling problem", Ph.D. dissertation, Univ. Virginia, Dpto. Syst. Engineering, Charlottesville, VA, 1987.
- SCHONBERGER, R.J.:** "Just in Time Production System. Replacing Complexity With Simplicity in Manufacturing Management", *Ind. Eng. Oct.*, pp.52-63, 1984.
- SILVA FILHO, O.S.; CARVALHO, M.F.; HENRIQUE, M.M. & FERNANDES, C.A.:** "Planejamento Agregado da Produção Ótimo com Limites Mínimos de Estoques Influenciados pelas Incertezas de Demanda", *Revista Gestão & Produção*, vol.2, n.1, pp.8-24, 1995.
- WIJNGAARD, J. & WORTMANN, J.C.:** "MRP and Inventories – Invited Review", *European Journal of Operational Research*, 20, p.281-293, 1985.

MANUFACTURING PLANNING – INDUSTRIAL PRACTICES AND OPTIMIZATION METHODS

Abstract

This paper presents a review of the most common methodologies used as tools for supporting the production planning process of manufacturing systems. The industrial practices, known as evaluative techniques, and the optimization methods, known as generative techniques are highlighted. The way these techniques work is discussed, and their advantages and drawbacks are analyzed. It is concluded that optimization is a complementary tool for overcoming certain deficiencies found during the application of industrial practices and is essential for production planning.

Key words: *MRP, JIT, mathematical programming, production planning.*