

**INTEGRAÇÃO ENTRE ERP E PROGRAMAÇÃO  
MATEMÁTICA UM ESTUDO DE CASO NA INDÚSTRIA DE  
AUTOPEÇAS**

**Rosana Beatriz Baptista Haddad**

**Marcus Fabius Henriques de Carvalho**

**Rafael Barros Rocha**

rosana.haddad@cenpra.gov.br,marcius.carvalho@cenpra.gov.br

CenPRA – Centro de Pesquisas Renato Archer

Campinas- S. P. Brasil

**INTEGRAÇÃO ENTRE ERP E PROGRAMAÇÃO  
MATEMÁTICA**

**UM ESTUDO DE CASO NA INDÚSTRIA DE AUTOPEÇAS**

**Rosana Beatriz Baptista Haddad**

**Marcus Fabius Henriques de Carvalho**

**Rafael Barros Rocha**

rosana.haddad@cenpra.gov.br,marcius.carvalho@cenpra.gov.br

CenPRA – Centro de Pesquisas Renato Archer

Campinas- S. P. Brasil

**Resumo**

Este trabalho apresenta um estudo de caso para problemas de seqüenciamento de lotes numa indústria de autopeças. Nele é proposta a adição de um módulo de Capacitação a um *software* de ERP de forma que o Módulo de MRP deste passe a respeitar os limites de capacidade de recursos considerados críticos. Para isso, o problema de seqüenciamento de produção nos recursos críticos é modelado como problema de fluxos em redes com restrições adicionais. A grande vantagem do método está na “visão temporal” do sistema, que permite antecipações ou atrasos de lotes de fabricação – desde que exista capacidade disponível - sempre que houver sobrecarga. O método permite ainda a análise de diferentes objetivos. Ao final é apresentado um estudo de caso realizado com dados reais da empresa.

**Abstract**

This work presents a case study of a scheduling problem in an auto parts industry. It proposes the integration of a capacity module to an ERP off the shelf. The objective of this integration is to improve the MRP module of the ERP in such way it recognizes capacity limits of critical resources. Critical Resources at shop floor are modeled as network flow problem with additional constraints. The main contribution of this method is the “temporal view” of the scheduling problem which allows overcoming overload situations. This method allow also the analysis of several goals. The results presented in the paper were done with real data.

**Palavras-chave:** ERP, seqüenciamento, Programação Matemática

**Key words:** ERP, scheduling, Mathematical Programming

## 1. INTRODUÇÃO

O Planejamento e a Programação da Manufatura são atividades das mais complexas para a grande maioria das empresas, abrindo espaço para o desenvolvimento de ferramentas que auxiliem na busca de soluções satisfatórias para estes problemas. Neste sentido existem no mercado ferramentas destinadas a facilitar o trabalho do gerente, sendo que os pacotes de ERP (*Enterprise Resource Planning* ou Planejamento dos Recursos da Empresa) são os mais utilizados. Estes sistemas, suportados por uma base de dados, têm como principais módulos a Contabilidade Financeira, as gerências de Material, Investimentos, Qualidade, Pessoal e Recursos Humanos, Manutenção, Previsão de Vendas, Vendas e Planejamento Operacional, e o Módulo de Manufatura, composto pelo Planejamento Mestre de Produção, Planejamento dos Requisitos Materiais, Planejamento dos Requisitos de Capacidade e Acompanhamento do Chão de Fábrica .

O Módulo de Manufatura, ou MRP, é o foco deste trabalho. Este módulo estabelece quantidades e datas dos itens a serem manufaturados ou montados. Sua filosofia é a de produzir na data “mais tarde” possível, mas de forma que as demandas sejam atendidas nos prazos combinados. Contudo, existe limitação na maneira como são equacionadas as questões da produção. O MRP não considera os limites reais da capacidade instalada, gera ordens de fabricação para serem executadas no chão de fábrica tomando como base as datas de entrega dos pedidos e assumindo que a capacidade do sistema é suficiente para atender estes requisitos de produção. Em problemas reais a suposição de “capacidade infinita” pode levar à sobrecarga de equipamentos e ao gerente a necessidade de decidir, baseando-se na sua experiência, quais pedidos serão atendidos no prazo, quais serão atrasados ou adiantados, quando possível, e quais deixarão de ser atendidos. A quantidade de parâmetros envolvidos torna impossível ao planejador solucionar esta questão de forma adequada.

Considerando que os pacotes de ERP são as práticas industriais mais empregadas no planejamento da produção, e portanto uma realidade na maioria das empresas, este artigo propõe a adição de um módulo de capacitação como elemento

complementar a um ERP existente no mercado, o LOGIX da LOGOCENTER. O módulo de capacitação faz uso de algoritmo de Programação Linear e seu objetivo é atender às demandas seqüenciando os lotes para fabricação considerando os limites da capacidade instalada e custos. Este módulo tem a visão temporal do problema e define necessidades de armazenagem interestágios, antecipando ou atrasando no tempo a produção para o atendimento a uma demanda preestabelecida, considerando na disponibilidade temporal de recursos e custos.

O artigo está assim organizado: a sessão 2) apresenta alguns aspectos conceituais dos sistemas de produção discreta; a sessão 3) descreve brevemente sobre os Sistemas de Administração da Produção; a sessão 4) aborda os métodos de otimização; na sessão 5) é abordada a integração das práticas industriais com os métodos de otimização; na sessão 6) é apresentado um estudo caso baseado numa situação real e na sessão 7) são apresentadas conclusões sobre o estudo.

## 2. SISTEMA DE PRODUÇÃO DISCRETA: ASPECTOS CONCEITUAIS

Um sistema de manufatura é composto por itens a serem processados em centros de produção, com uma ou mais unidades processadoras. O item flui pelo sistema produtivo sofrendo transformações, segundo uma seqüência tecnológica pré-determinada, até se tornar produto final. A Figura 1(a) mostra um sistema com três centros produtivos e um roteiro de produção. A capacidade máxima de produção deste sistema é igual a menor capacidade entre as capacidades máximas de todos os estágios de produção. Este seria um sistema de fácil gestão caso considerasse um único produto, demanda conhecida e determinística, além de disponibilidade infinita de matéria prima.

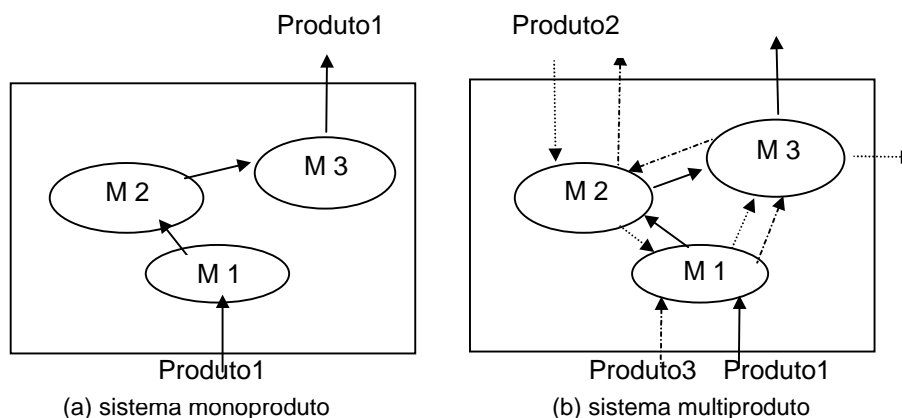


Figura 1 – Sistema de Produção Discreta

A extensão para o processamento de vários produtos faz com que um mesmo recurso seja requisitado por mais de um produto como mostra a Figura 1(b). Agora a determinação da capacidade de produção vai depender de vários fatores entre eles: o mix (proporcionalidade) entre produtos, seqüência de produção, taxa de compartilhamento de recursos e o perfil temporal da demanda de cada produto, e o problema de planejamento evolui para a gestão temporal de recursos compartilhados (Carvalho et al., 1999). Nestas circunstâncias, o grande desafio que se apresenta é planejar adequadamente a produção de forma competitiva, num mercado fortemente orientado à satisfação do cliente, sem perder de vista que o objetivo primeiro da empresa é o lucro. Nesta equação quatro componentes devem ser considerados de forma ponderada: custo/preço, qualidade, flexibilidade e desempenho nas entregas.

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

Para ilustrar o problema da alocação, considere o exemplo abaixo (Rogers, 1987). A Tabela 1 fornece os dados de rota e os tempos de processamento para três produtos a serem processados por três máquinas. As rotas estão mostradas na Figura 1(b). A Figura 2 apresenta o diagrama de Gantt para uma possível alocação da produção. Sob a suposição que todos os itens estão disponíveis no início do processo e que as operações não possam ser repartidas, a alocação proposta resulta no mínimo tempo para processamento de todos os produtos. Observe que a seqüência de operação foi preservada. Contudo, 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.

Considerando os fatores acima expostos, o foco deste trabalho é discutir e apresentar soluções a serem usadas pela gerência como elementos de apoio ao planejamento detalhado e à programação de sistemas de manufatura.

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 |

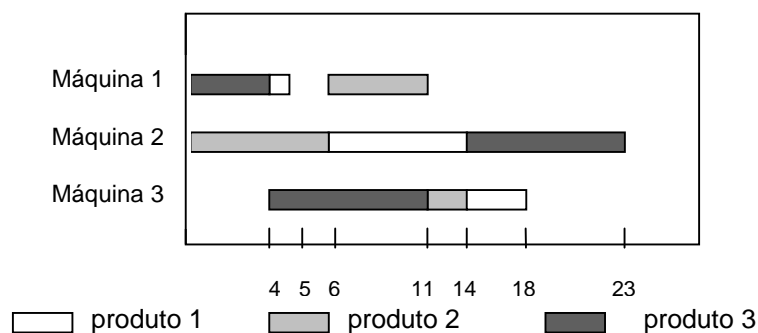


Figura 2 - Diagrama de Gantt

### 3. SISTEMAS DE ADMINISTRAÇÃO DA PRODUÇÃO

O ERP é um Sistema de Administração da Produção que tem sido largamente implantado em empresas ao redor do mundo. É composto por vários módulos que acessam uma única base de dados, de modo a “normalizar” todas as áreas da empresa. O Módulo de Manufatura destes sistemas é o responsável pelo planejamento e gerenciamento da produção e procura produzir o mais tarde possível, sem que isto implique em violações das datas de entrega. Este, em geral, é um ponto crucial para as empresas, já que entregas no prazo resultam em “satisfação de cliente” e conseqüente ganho de competitividade (Haddad et al., 2002).

Além da data mais tarde, Monks (1987) e Benton e Shin (1998), lembram que o Módulo de Manufatura estabelece também o que, e quanto produzir, buscando a

eficiência da programação e permitindo rápidas reações às mudanças de mercado. Embora este módulo seja considerado um “organizador”, pois especifica cada operação da produção a ser realizada, não considera os limites de capacidade dos recursos de produção. Por exemplo, um ERP pode sugerir uma solução onde determinada semana apresenta ociosidade no chão de fábrica, e na semana seguinte sobrecarga, como mostra a Figura 3, extraída de Haddad et al.(2002).

Talvez a melhor política para a empresa, nesta situação, fosse adiantar parte da produção para a semana ociosa, a fim de não pagar horas extras, terceirizações, multas por atraso na entrega ou ainda deixar de atender parte da demanda. Isto implica numa visão temporal do problema e torna-se mais complexo quando da existência de máquinas em paralelo.

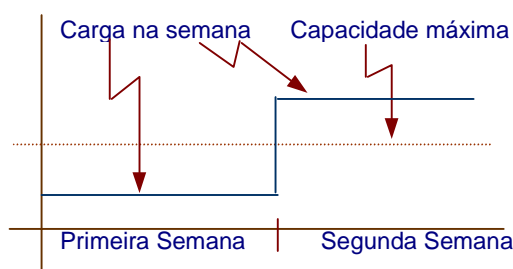


Figura 3 - Exemplos de Carga de Trabalho em Duas Semanas

#### 4. MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO

Um caminho para auxiliar a tomada de decisão gerencial de processos de planejamento da manufatura é a utilização dos métodos de otimização. Entre estes, um enfoque muito atrativo é a modelagem do sistema produtivo como um problema de fluxo em rede com restrições adicionais (Carvalho et al., 1999). Esta modelagem aproveita as características de fluxo de item da rede de produção, do sistema de manufatura, para realizar a modelagem através de recursos gráficos. O grande apelo deste enfoque é que ele olha pelo o ponto de vista da empresa (retorno esperado), além de procurar resolver o problema com uma visão temporal considerando assim as informações disponíveis para todo o horizonte de planejamento. Este fato permite o trabalho no sentido de eliminar gargalos, pelo deslocamento da produção no tempo, em alguns casos adiantando e em outros atrasando (mesmo para linhas que processem multiitens). Permite também analisar objetivos conflitantes e incluir demanda probabilística, sob o ponto de vista do

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

#### 4.1. MODELAGEM DE UM ITEM PARA OTIMIZAÇÃO

Seja o problema de planejamento, constituído em uma linha serial multiestágio, multiperíodo de um processo discreto de manufatura, como ilustrado na Figura 4, composto de três estágios de produção onde cada estágio pode ter associado uma máquina ou um grupo de máquinas que realizam transformações ou transportes com capacidades definidas *a priori*. O objetivo do planejamento é, a partir de metas estabelecidas por um nível hierárquico superior (por exemplo, decisões mensais geradas pelo programa mestre da produção (Fox, 1984), ou por um sistema hierárquico de decisão (Carvalho et al., 1996)), desmembrá-las em produções, por exemplo semanais, de forma a otimizar os custos, atendendo ao mesmo tempo às restrições de capacidade das máquinas, de armazenagem e de suprimento de matéria-prima.

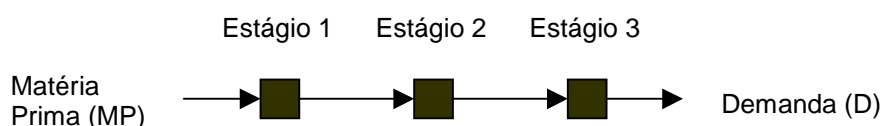


Figura 4 - Linha de produção serial

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



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

- horizonte de planejamento é discretizado em períodos (hora, turno, dia, semana);
- cada estágio de produção pode conter um ou mais grupos de máquinas;
- são conhecidas as capacidades de produção e de armazenagem de matéria prima para atendimento à demanda, dentro do horizonte de planejamento; e
- a capacidade de cada grupo pode ser diferente ao longo do período de planejamento.

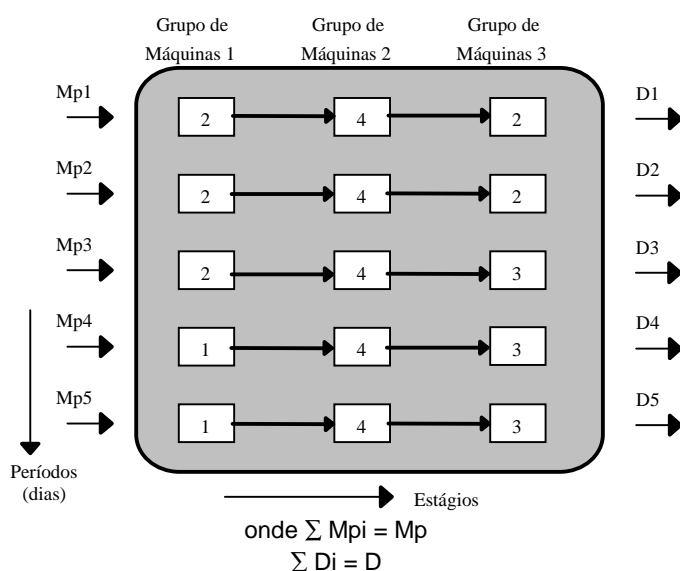


Figura 5 - Linha de produção com três estágios e cinco períodos.

Segundo os custos unitários de matéria prima, de operação, de estocagem e de atrasos na entrega dos itens 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 5, pode ser visualizada como um conjunto de partes fluindo através das máquinas e das unidades de armazenamento, sofrendo trabalho (fabricação ou transporte) em cada período de tempo, até se 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 onde para cada estágio pode ser escrita a seguinte equação de balanço:

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

onde  $x_{i,t}$  representa a quantidade processada no estágio  $i$ , no tempo  $t$  e  $y_{i,t}$  representa a quantidade armazenada para posterior processamento no estágio  $i$  e tempo  $t$ . A representação da linha de montagem serial ilustrada na Figura 5, através de uma estrutura de grafo, está apresentada na Figura 6.

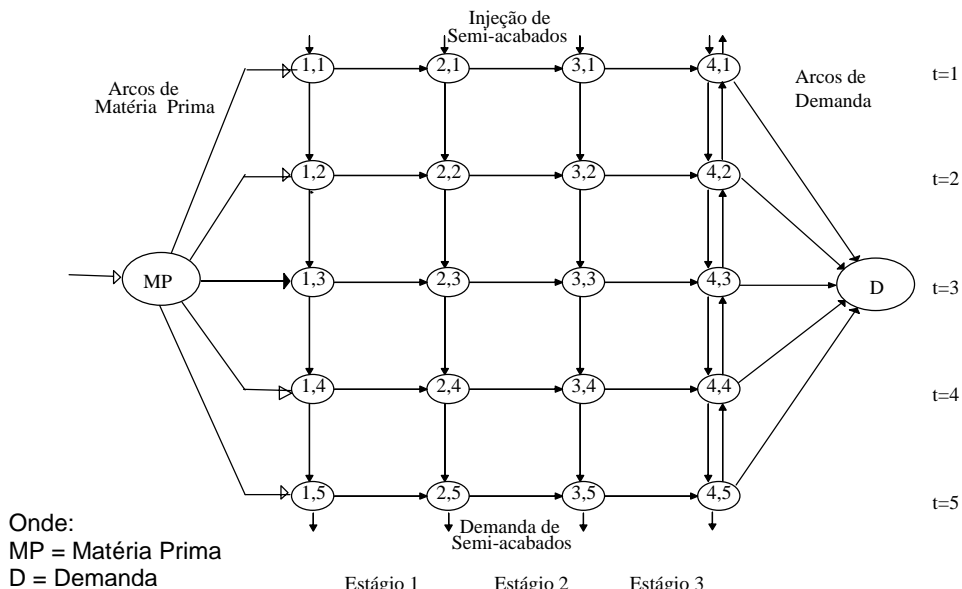


Figura 6 - Representação por grafo do sistema produtivo

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 item, o nível de produção das máquinas, o nível de armazenagem dos itens entre os períodos  $t$  e  $t+1$ , e o nível de demanda em atraso de itens entre os períodos  $t$  e  $t-1$

(Carvalho et al., 1999). Por outro lado, os nós (i,j) do grafo representam os pontos de decisão, onde são definidos o quanto produzir no período t e o quanto armazenar para o período t+1. Neste modelo o objetivo é a 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, onde com exceção dos nós relativos ao suprimento de matéria prima e de balanço de demanda, cada nó, corresponde a um estágio de produção. Possui pelo menos dois arcos divergentes, um para representar a capacidade de processamento e outro para representar a capacidade de armazenagem do sistema. De um modo geral, pode-se formular o problema em questão, na forma matricial, como segue:

$$\begin{aligned} & \text{Min } f(x) \\ & \text{s.a } Ax = b \\ & \quad x \leq X \end{aligned} \tag{2}$$

onde f(.) 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.

## 4.2. OTIMIZAÇÃO EM SISTEMAS MULTITENS

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

Este compartilhamento leva a um menor custo de instalação, a um maior coeficiente de produtividade para as máquinas, e portanto a melhor utilização do sistema produtivo. A seguir a modelagem anterior é estendida para processamento de K itens, com árvore de itens idênticas ou não (Carvalho et al., 1999). A equação de balanço para o caso multiitem passa a ser:

$$x(i-1,t,k) + y(i,t-1,k) = x(i,t,k) + y(i,t,k) \tag{3}$$

onde  $x(i,t,k)$  é a produção no estágio  $i$  do período  $t$  do item  $k$ ;  $y(i,t,k)$  é a quantidade armazenada no estágio  $i$  do período  $t$  do item  $k$ .

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

Para garantir que a soma de alocações de produção de itens individuais não ultrapassa a capacidade de um recurso, são escritas as equações a seguir (Kennington, 1990).

$$\sum_{i \in I(j)} x(i, t, k) \leq X(j, t) \quad (4)$$

$$\sum_{i \in I(j)} y(i, t, k) \leq Y(j, t) \quad (5)$$

onde  $X(j,t)$  é a capacidade máxima do recurso  $j$  no tempo  $t$ , e  $x(i,t,k)$  é quantidade a ser produzida do item  $k$  pelo recurso  $j$  no tempo  $t$ ;  $y(j,t,k)$  é a quantidade a ser armazenada, com capacidade máxima  $Y(j,t)$ , que antecede o recurso  $j$  e no tempo  $t$ . O conjunto  $I(j)$  contém os tipos de itens que a serem processadas pela máquina  $j$ .

## 5) INTEGRAÇÃO: PRÁTICAS INDUSTRIAIS E OTIMIZAÇÃO

Embora os ERP's sejam as práticas industriais mais utilizadas para o planejamento da produção dos sistemas de manufatura, eles são insuficientes para resolver o problema completo da programação da produção e cresce a cada dia a necessidade de supri-los 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 de capacidade e econômicos.

Uma possível abordagem para este problema é a adição de um módulo de capacitação ao MRP. Este módulo, que chamaremos de MRP Capacitado, é executado após o MPS – Programa Mestre de Produção – e fornece como dado de entrada ao MRP uma seqüência factível de tarefas.

A integração pode ocorrer nas formas mostradas na Figura 7. Na estrutura da esquerda, o módulo de Capacitação é executado antes do módulo de MRP. Na estrutura da direita este módulo será executado somente quando existir violação de capacidade.

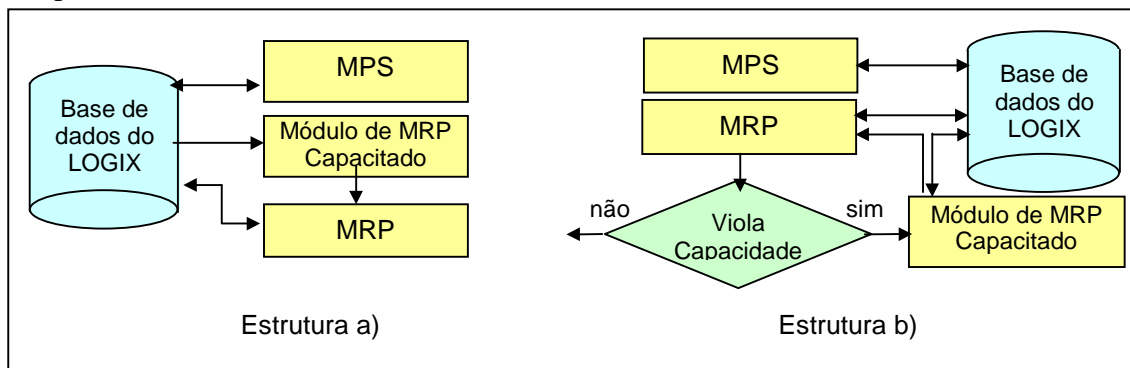


Figura 7 – Duas Formas de Estrutura para Capacitação do MRP

Em ambas as estruturas de integração, o objetivo é coordenar a produção no tempo, considerando as restrições de capacidade, estoque interperíodo e disponibilidade de matéria-prima.

A Figura 8 esquematiza, de forma mais detalhada, esta integração proposta na figura 7(a). A função “Monta Famílias” é um algoritmo desenvolvido com a finalidade de separar em famílias os itens com demanda prevista para o horizonte em estudo. Esta rotina deve ser específica para cada aplicação e voltará a ser tema de estudo na próxima seção. A função “Gera Grafos de Entrada” tem por objetivo gerar, com base nas famílias estabelecidas pelo módulo “Monta Famílias”, os parâmetros de entrada para o Módulo de Capacitação.

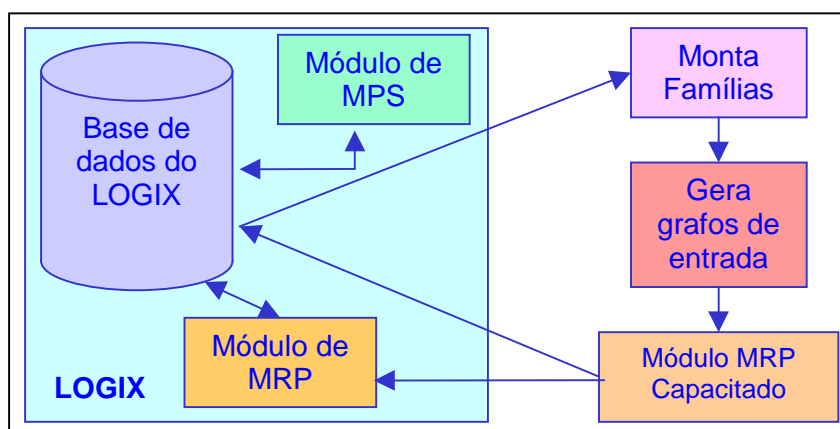


Figura 8 – Esquema de integração entre os softwares

A partir dos dados do Módulo de MRP Capacitado, o MRP toma as metas estabelecidas pelo módulo de capacitação e as detalha considerando *setup*, desagregando as famílias e os processos e gerando as ordens de produção e de compra. A grande vantagem desta integração é que a solução fornecida pelo Módulo de Capacitação é factível ou está muito perto de uma solução factível para o MRP. Assim o plano a ser avaliado pelo MRP estará muito próximo da solução ótima do sistema.

## **6) ESTUDO DE CASO**

A integração do Módulo de Capacidade ao ERP envolve três instituições: o CenPRA – Centro de Pesquisas Renato Archer, a LOGOCENTER e uma Empresa usuária do LOGIX. O CenPRA é um órgão do governo federal sendo a Divisão de Gestão Empresarial voltada para o estudo e solução de problemas relativos à Gestão de Empresas. A LOGOCENTER é uma das maiores *software houses* brasileiras, está há 13 anos no mercado e produz o pacote de ERP LOGIX. Uma versão deste pacote foi instalada no CenPRA como parte de uma cooperação entre as duas instituições. Uma das maiores empresas no setor de autopeças no país, usuária do LOGIX, cedeu sua base de dados ao CenPRA, para que fosse tomada como plataforma de testes.

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

Diferentemente do MRP, que tem como premissa programar ordens de produção para cada produto para a data o mais tarde possível, o módulo de MRP Capacitado tem uma visão temporal e espacial do problema, ou seja, ele “enxerga” a necessidade de produção dentro de um horizonte de planejamento para todos os produtos e, havendo sobrecarga num período e ociosidade em outro, procura adiantar ou atrasar ordens de forma otimizada, tendo como objetivo primeiro garantir o retorno esperado.

O sistema de produção da empresa estudada é complexo, envolvendo várias operações. Este estudo de caso extrai parte dos dados para discutir a importância da inclusão de um módulo de capacitação. Foram escolhidos para estudo uma prensa

de 5000 toneladas e duas de 3000 toneladas, que trabalham em paralelo e se constituem o gargalo da produção. Cada item possui um roteiro de fabricação contendo especificação da prensa onde poderá ser processado. A Figura 9 exemplifica o processamento de seis itens nas três prensas. Nota-se que os itens P1, P3 e P4 devem ser processados somente na prensa de cinco toneladas, enquanto que P2 e P5 podem ser processados em qualquer umas das prensas de três toneladas.

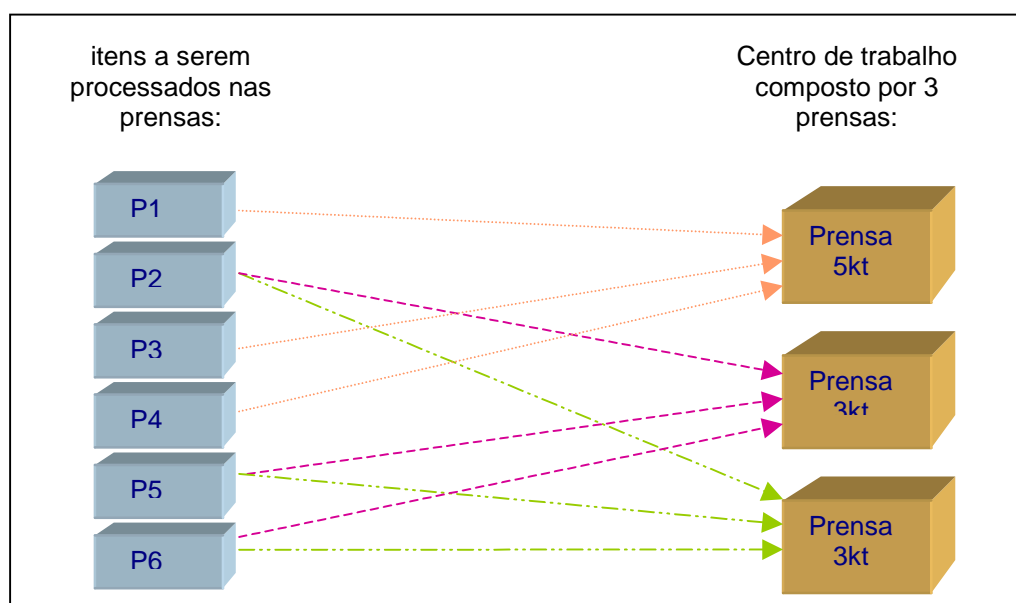


Figura 9 – Exemplo de possibilidades de processamento de seis itens nas três prensas do centro de trabalho gargalo

Os itens que passam por estas prensas podem sofrer até duas operações (OP1, OP2) nos equipamentos. A troca de operação demanda um tempo de *setup* de pelo menos 2:00h. Como pode ser observado no gráfico da Figura 10, o tempo de *setup* nas prensas, tem um grande peso quando comparado com o tempo de produção. Enquanto o tempo médio de produção por item está em torno de 0,01 hora, o tempo de *setup* padrão é de duas horas. Desta forma, uma vez que o equipamento é preparado para uma operação é interessante que realize o maior número possível de itens.

Para contornar o problema dos tempos elevados de *setup*, a abordagem adotada pela empresa é de reunir os itens em famílias. Esta agregação evita o processamento maciço de dados e as complexidades computacionais. Para cada

família existe uma seqüência de processamento de itens considerada ótima. Esta seqüência foi obtida empiricamente na empresa e fornecida na forma de tabelas.

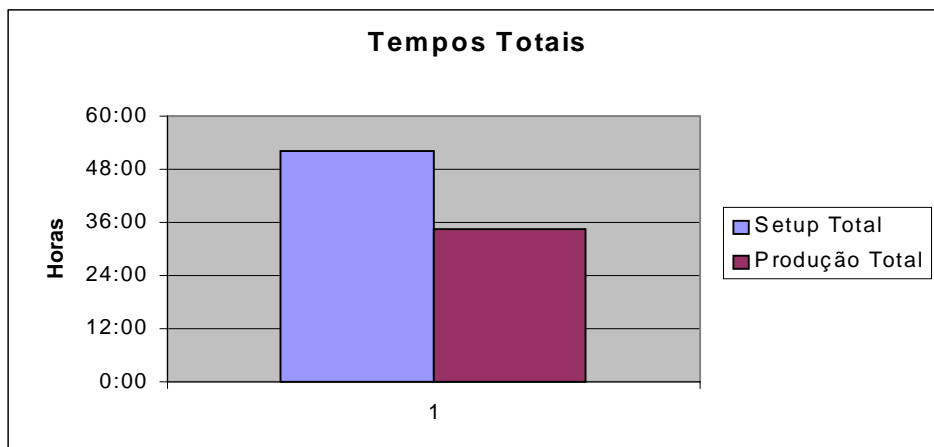


Figura 10 - Tempos de produção (34:40h) e *setup* (52:00h) num período qualquer

A Figura 11 apresenta, para cada item, os tempos de *setup* e processamento, quando a melhor seqüência de produção é respeitada, nela identificam-se as famílias de itens pelo tempo de *setup* de alguns elementos.

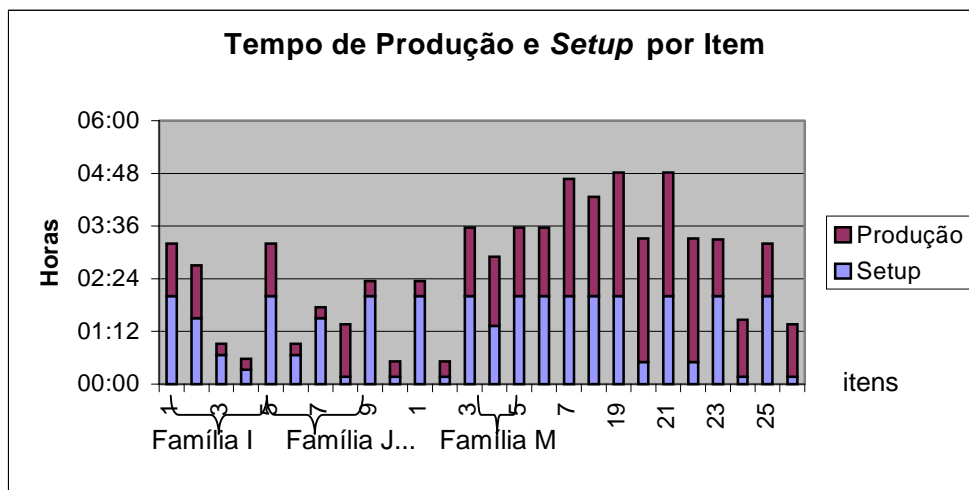


Figura 11 -.Mesmo período da Fig. 10, considerando a melhor seq. de produção

Sabendo-se que o *setup* da família é de 2:00h e que os *setups* dentro da família são menores, pede-se determinar o primeiro elemento de cada família. A primeira barra refere-se a processamento de item com *setup* de família, as três seguintes a processamento de itens com *setups* menores. Desta forma a primeira família processada é representada pelas quatro primeiras barras. A quinta barra representa



o início de uma nova família composta por três itens Ou seja, a segunda família é representada pela quinta, sexta sétima e oitava barras. Os itens 15, 16, 17, 18 e 19 representam processamento de famílias com itens únicos.

Uma comparação dos gráficos das Figuras 10 e 12 mostra o quanto o tempo de *setup* influencia o tempo total disponível e de como este tempo pode ser melhorado quando se respeita uma seqüência de produção. Neste exemplo, o tempo de *setup*, quando os itens são seqüenciados de forma aleatória, soma 52:00h no período. Por outro lado, quando se respeita a melhor seqüência, a soma dos *setups* é de 33:50h, ou seja há uma redução de aproximadamente 35% em relação ao tempo de *setup* demandado originalmente.

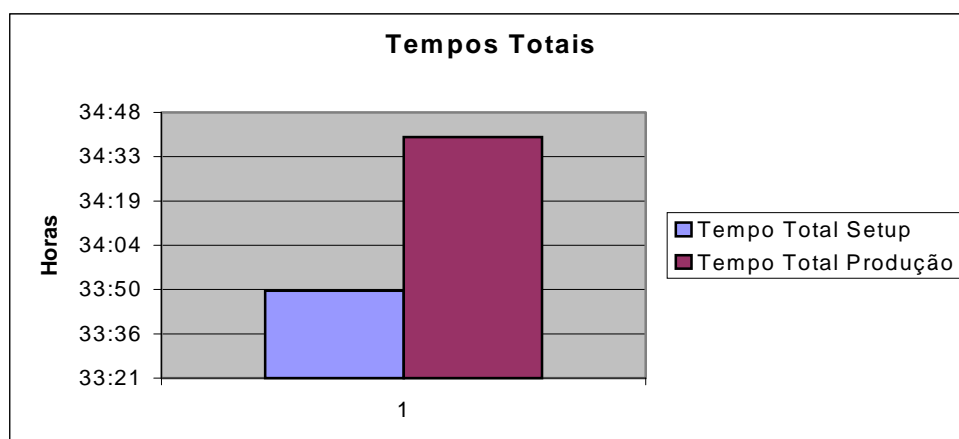


Figura 12 – Tempos de *setup* e produção, por item, para a situação da figura 11

A Tabela 2 mostra um exemplo de melhor seqüência de processamento de itens para duas famílias em cada uma das operações na prensa, assim como os possíveis equipamentos onde estas operações podem ser realizadas. A seqüência de processamento deve ser respeitada, mesmo que nem todos os itens estejam programados para produção. Se por exemplo o item P1110401 da Família F1 estiver programado para produção, deverá ser processado antes de todos os demais da mesma família, tanto na operação OP1, quanto na operação OP2. Já o item P1110501 ocupa sexta posição na seqüência de processamento da operação OP1 e a terceira posição na operação OP2.

A Tabela 3 estabelece os tempos de *setup* entre itens, dentro de uma mesma operação. Somente estão cadastrados itens da mesma família. Quando existe a mudança de família ou operação o tempo de *setup* considerado é de duas horas.

Tabela 2 - Melhor seqüência de processamento da família

| Item     | Família | Seq. na Família | Op. | Standard | Prensa    |
|----------|---------|-----------------|-----|----------|-----------|
| P1110401 | F1      | 1               | OP1 | 100      | PR00/PR20 |
| P1110402 | F1      | 4               | OP1 | 100      | PR00/PR20 |
| P1110702 | F1      | 5               | OP1 | 100      | PR00/PR20 |
| P1110501 | F1      | 6               | OP1 | 100      | PR00/PR20 |
| P1110401 | F1      | 1               | OP2 | 150      | PR00/PR20 |
| P1110501 | F1      | 3               | OP2 | 150      | PR00/PR20 |
| P1110702 | F1      | 4               | OP2 | 150      | PR00/PR20 |
| P1110402 | F1      | 5               | OP2 | 150      | PR00/PR20 |
| P2117001 | F2      | 1               | OP1 | 90       | PR00/PR20 |
| P2117002 | F2      | 2               | OP1 | 90       | PR00/PR20 |
| P2117001 | F2      | 1               | OP2 | 90       | PR00/PR20 |
| P2117002 | F2      | 18              | OP2 | 90       | PR00/PR20 |

Tabela 3 - Tempos de troca entre itens.

|    | Família | Op. | den_item_de | den_item_para | tempo_troca |
|----|---------|-----|-------------|---------------|-------------|
| 1  | F1      | OP1 | P1110401    | P1110501      | 00:10       |
| 2  | F1      | OP1 | P1110401    | P1110702      | 01:30       |
| 3  | F1      | OP1 | P1110401    | P1110402      | 01:30       |
| 4  | F1      | OP1 | P1110402    | P1110401      | 01:30       |
| 5  | F1      | OP1 | P1110402    | P1110702      | 00:40       |
| 6  | F1      | OP1 | P1110402    | P1110501      | 01:00       |
| 7  | F1      | OP1 | P1110501    | P1110401      | 00:40       |
| :  | :       | :   | :           | :             | :           |
| PR | F1      | OP2 | P1110401    | P1110501      | 00:40       |
| 24 | F1      | OP2 | P1110402    | P1110401      | 00:20       |
| 1  | F2      | OP1 | P2117001    | P2117002      | 00:01       |
| 2  | F2      | OP2 | P2117001    | P2117002      | 01:00       |

Onde:

den\_item\_de - Item cuja configuração está na prensa.

den\_item\_para - Próxima configuração da prensa.

tempo\_troca - Tempo gasto para trocar a configuração do item da prensa para o próximo item, tempo da mudança de den-item-de -> den\_item\_para

Para o processamento na prensa, dos elementos de uma mesma família, é montada uma ferramenta composta por vários blocos, como mostra a Figura 13.

O procedimento adotado é então montar a ferramenta para o item com o maior número de blocos. Quando o processamento deste item é finalizado, retiram-se ou substituem-se alguns dos blocos. Os restantes são empurrados uns de encontro aos outros. Ao final desta operação novas retiradas ou substituições são realizadas. E assim sucessivamente, até que toda a família tenha sido processada.

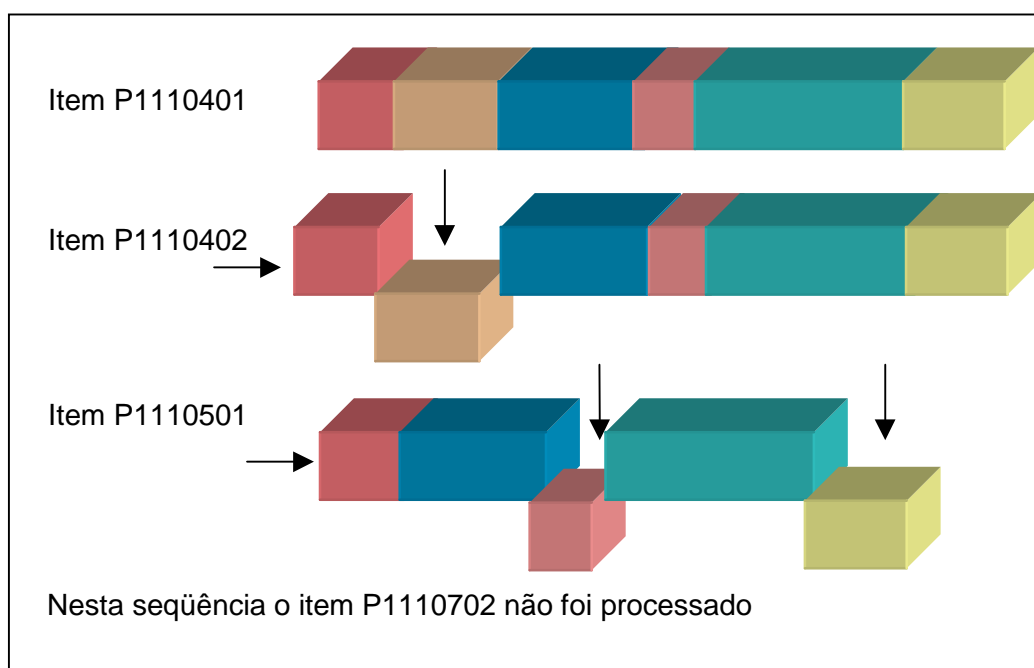


Fig. 13 – Arranjo da Ferramenta para processamento da família F1

A Tabela 4 contém a demanda dos itens a serem produzidos em quatro períodos de uma semana com as respectivas quantidades.

Para o problema da Empresa em questão, foi desenvolvido o módulo Monta Famílias (Figura 8), tomando como base as três tabelas fornecidas pela empresa (Tabelas 2, 3 e 4). O módulo calcula os tempos de produção e *setup* para cada família com demanda no período e cria novas famílias com demanda unitária. Estas novas famílias são portanto subconjuntos das famílias originais. O tempo de processamento da família resultante é a soma dos tempos de processamento de cada item com demanda em cada uma das duas operações que acontecem na prensa (OP1 e OP2) acrescidos dos tempos de *setup*. A família é então tratada pelo MRP Capacitado como um único item. Isto garante que todos os itens da família sejam processados juntos e que a melhor seqüência de processamento dentro de uma família seja respeitada.

Tabela 4 - Demanda de itens por período.

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

Onde:

02-06/09  
09-13/09  
16-20/09  
23-27/09

} Períodos a serem analisados

Exemplificando:

Sejam  $T1(i)$  e  $S1(i)$  respectivamente os tempos de processamento e *setup* de um item  $i$  na operação OP1 da prensa. Sejam  $T2(i)$  e  $S2(i)$  respectivamente os tempos de processamento e *setup* para a operação OP2. Então, o tempo consumido na prensa para a fabricação de  $M$  itens de  $i$  será:

$$T(i) = S1(i) + S2(i) + M*(T1(i) + T2(i)), \quad (6)$$

Logo, o tempo de processamento da família será:

$$\Sigma T(i), \quad (7)$$

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

A tabela 5 mostra este procedimento para duas famílias sendo que a primeira – F1- tem 3 produtos com demanda num determinado período (P1110401, P1110402, P1110702). A segunda família – F2 - tem, para este período, dois produtos com demanda (P2117001, P2117002).

A primeira coluna da tabela é destinada às famílias cadastradas na Empresa. A segunda coluna refere-se aos itens de cada família que têm demanda no período em questão. A terceira coluna explicita os tempos de *setup*. Os tempos de *setup* entre famílias são de 2:00 horas. O tempo de *setup* do primeiro para o segundo item da família F1 é de 1:30h e do segundo para o terceiro item é de 0:40h. Da mesma

forma o tempo de *setup* do primeiro para o segundo item da família F2 é de 0:01h. Na quarta coluna estão as demandas de cada item. A quinta coluna apresenta a totalização do tempo necessário ao processamento da demanda no período – são necessários 0:30h para o processamento de 50 itens P1110401. A sexta coluna tem as novas famílias criadas pelo módulo Monta Famílias. A sétima coluna apresenta a demanda destas novas famílias – sempre unitária – e a oitava coluna mostra o tempo de processamento desta nova família como a soma dos tempos de *setup* e processamento de cada um dos itens (para F1A o tempo de processamento será  $2:00 + 1:30 + 0:40 + 0:30 + 0:40 + 0:45 = 6:05h$ )

Tabela 5 – Exemplo do procedimento de criação de famílias no módulo “Monta Famílias”

| Família | Produto  | Setup | Demanda | T.proc | Nova Família | Dem | T.proc+Setup |
|---------|----------|-------|---------|--------|--------------|-----|--------------|
| F1      | P1110401 | 2:00  | 50      | 0:30   | F1A          | 1   | 6:05         |
|         | P1110402 | 1:30  | 80      | 0:40   |              |     |              |
|         | P1110702 | 0:40  | 80      | 0:45   |              |     |              |
| F2      | P2117001 | 2:00  | 70      | 0:50   | F2A          | 1   | 3:51         |
|         | P2117002 | 0:01  | 85      | 1:00   |              |     |              |

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

## 6.1. APLICAÇÃO DO MÓDULO DE CAPACITAÇÃO

Utilizando-se a Base de Dados da Empresa que é composta por aproximadamente 900 itens, subdivididos em 92 famílias, foram gerados alguns cenários com a finalidade de analisar a integração entre o ERP LOGIX e o *Software* de Programação Matemática, denominado MRP Capacitado. O MRP Capacitado procura realizar a coordenação dos recursos (matéria prima e máquinas) com as necessidades no tempo. Os dados da Empresa constituíam-se em produções passadas e portanto factíveis, quando analisadas pelo software de Programação Matemática. Para criar a necessidade de coordenação temporal da produção, a demanda foi aumentada. Um extrato dos resultados obtidos numa simulação é apresentado nas tabelas 6, 7 e 8. O extrato considera somente 27 famílias, com

produção prevista para três períodos. Cada família apresentada nestas tabelas tem demanda igual a 1 e tempo de processamento como exemplificado na tabela 5. A operação gargalo analisada é a da prensa, onde existem 3 equipamentos (PR00, PR10 e PR20), sendo que cada família possui especificação de quais equipamentos podem ser usados para processamento.

Tabela 6- Cenário estudado – porcentagens das famílias processadas em cada período

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

A coluna 2 da tabela 6 apresenta a alocação sugerida pelo MPS para a produção de três períodos distintos. As seis primeiras linhas referem-se às famílias programadas para produção no primeiro período. As onze seguintes às famílias programadas para produção no segundo período. As dez últimas às famílias com programação para o terceiro período. As colunas “Prensa” apresentam a alocação das famílias às prensas. Assim a família F3A deve ser processada na Prensa PR00 tanto no

período 1 quanto no período 3. Esta escolha segue padrão de prioridade indicado pelo planejador. As colunas 3, 5 e 7 indicam a porcentagem de demanda de cada família a ser processada nos períodos. Assim a demanda da família F6, previamente alocada pelo MPS para processamento no segundo período, terá 32% da produção adiantada para o primeiro período. A coluna 9 é reservada para não atendimento à demanda nos períodos considerados. Os itens F20 e F12 também tiveram uma antecipação de parte da produção para o primeiro período.

A tabela 7 apresenta os mesmos resultados da tabela 6, explicitando porém nas colunas 3, 5 e 7 os tempos necessários ao processamento de cada família, por período, em cada uma das possíveis prensas. No caso da família F6A, os 32% da produção adiantada para o primeiro período, equivalem a 18,55 horas de processamento na prensa PR00. Para as famílias F20A e F12A, os adiantamentos equivalem a 30,55 horas na prensa PR20 e 44,217 horas na prensa PR00.

Tabela 7 tempo necessário ao processamento de cada família, por período

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

No caso de não haver capacidade suficiente para o processamento de uma família num único equipamento, são usadas regras heurísticas que invertem a prioridade de processamento nas prensas. Podem ocorrer casos onde não exista capacidade suficiente para a produção de uma família em nenhum dos equipamentos. No caso do item F6A, programado para o segundo período, o equipamento prioritário é a prensa PR00. No entanto neste período esta prensa não tem capacidade para produzir todo o lote. A segunda prensa prioritária é a PR20, que no segundo período tem disponível capacidade para somente 68% do lote. O *software* sugere então a antecipação da produção dos 32% restantes do lote para o primeiro período, utilizando-se a prensa prioritária PR00.

A tabela 8 apresenta a totalização de horas gastas em cada uma das prensas nos 3 períodos considerados.

Analisando a carga das prensas, o planejador pode decidir pela fabricação de todo o lote de F6 no primeiro período, na prensa PR20, já que este equipamento está sobrecarregado no segundo período, mas conta com ociosidade no primeiro.

Tabela 8 – Cenário estudado- Totalização de horas alocadas, por prensa

| Prensa | $\Sigma$ Tempos período 1 | $\Sigma$ Tempos período 2 | $\Sigma$ Tempos período 3 |
|--------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| PR00   | 114,999                   | 115                       | 93,217                    |
| PR10   | 16,267                    | 88,1                      | 16,133                    |
| PR20   | 30,55                     | 115                       | 11,133                    |

O exemplo apresentado foi rodado para 40 famílias, distribuídas ao longo de 4 períodos. O equipamento usado foi um Pentium II com 64 MB RAM em plataforma Microsoft Windows 98. O tempo de execução de todo o módulo de capacitação (Monta Famílias + Gera Grafos de Entrada + MRP Capacitado, como está explicitado na Figura 8) foi de aproximadamente 20 segundos

## 7) CONCLUSÕES

Os problemas da produção são complexos, necessitando diferentes enfoques para auxiliar o planejador na busca diária de soluções que atendam às disponibilidades de recursos, aos interesses da empresa e às necessidades dos clientes. Este trabalho, reconhecendo a complexidade de um problema real, procurou associar uma prática corrente numa empresa (ERP), com a programação matemática (PL), e



experiências do planejador expressas em heurísticas no sentido da geração de soluções satisfatórias de programação da produção. A aplicação deste conjunto de enfoques, agregados em um único ambiente de produção, mostrou-se adequada para o balanceamento da utilização dos recursos em um sistema real, ao longo do tempo, deslocando a produção dos períodos sobrecarregados para períodos com disponibilidade, buscando a otimização da produção e evitando o uso de horas extras e terceirizações de pedidos. O ambiente permite ainda a geração de diferentes cenários, possibilitando ao Gerente de PCP um planejamento com relação à manutenções preventivas e aquisição de equipamentos. Prioridades de processamento de lotes podem ser também consideradas.

Embora no presente trabalho a integração da programação matemática tenha sido realizada com o ERP LOGIX da LOGOCENTER, nada impede que o mesmo procedimento seja executado com qualquer outro ERP existente no mercado.

O resultado oferecido pela Programação Matemática será um valor próximo do ótimo, já que os cálculos baseiam-se em valores de setup estimados e portanto sujeitos a desvios quando implementados.

Nota-se portanto que a integração de diferentes enfoques é bastante vantajosa, pois auxilia o planejador nas tomadas de decisão sem causar os transtornos que mudanças radicais de procedimentos em geral ocasionam nas empresas.

## **8) AGRADECIMENTOS**

Agradecemos à LOGOCENTER pela instalação e suporte ao software LOGIX, à Empresa usuária, pela cessão da base de dados e à FAPESP pelo suporte com bolsa de estágio.

## **9) BIBLIOGRAFIA**

- (1) Benton W. C. e Shin H. (1998) Manufacturing Planning and Control: The Evolution of MRP and JIT Integration. European Journal of Operational Research, 110, 411-440
- (2) Carvalho, M.F.H.; Fernandes, C.A.O; Ferreira, P.A.V.(1999), "Multiproduct Multistage Production Scheduling (MMPS) for Manufacturing Systems", Production Planning & Control, vol. 10 No 7, 671-681

- (3) Carvalho, M.F. and O.S. Silva Filho (1996). "Two-Stage Strategic Manufacturing Planning System: a Practical View", Twelfth Interaction conference on CAD/CAM Robotics and Factories of the Future, 574-580.
- (4) Fox, K.A. (1984) "MRP-II Providing a Natural Hub for Computer Integrated Manufacturing System" Ind.Eng, 44-50.
- (5) Graves S.C.(1991) "A Review of Production Scheduling" Operations Research Vol 29, N.4, 646-675.
- (6) Haddad, R. B. B.; Cravalho, M. F. H. "Complementaridade entre Programação Matemática e ERP", Congresso Brasileiro de Automática, Natal, (2002), 245-250
- (7) Kennington, J L. e Whisman.,A., "Netside User's Guide", Department of Computer Science and Engineering, Southern Methodist University, Dallas, 1990.
- (8) Monks, J. G. (1987) A Administração da Produção. Schaum McGraw-Hill
- (9) Rogers R.V. (1987) "Generalizations of the machine scheduling problem" Ph.D. dissertation, Univ. Virginia, Dpto. Syst. Engineering. Charlottesville,VA,.