

Proposta de um sistema de controle da produção para fabricantes de calçados que operam sob encomenda

Fábio Molina da Silva

Flávio César Faria Fernandes



Resumo

Este artigo apresenta uma proposta de sistema de controle da produção para regular o fluxo de materiais de pequenas e médias empresas fabricantes de calçados que adotam a política de atendimento à demanda RTO (resources-to-order) ou MTO (make-to-order), trabalhando com uma ampla variedade de produtos finais. Para entender a problemática do PCP (planejamento e controle da produção) nesse segmento, foram pesquisadas 7 fábricas de calçados localizadas na cidade de Birigui-SP. A proposta engloba: a) a escolha de um ordering system (sistema de coordenação de ordens (SCO)); b) desenvolvimento de um método para elaboração do programa mestre de produção MPS (master production schedule); e c) procedimentos para seqüenciar as ordens de produção.

Palavras-chave: Controle da produção. Programa mestre de produção. PBC. Manufatura responsiva.

1 Introdução

Com a globalização da economia, as empresas devem adaptar e modernizar gerencial e tecnologicamente seus sistemas produtivos para sobreviverem. Estas adaptações devem visar melhorias contínuas da produtividade, atendimentos aos prazos de entrega, melhorias da qualidade e redução do tempo de lançamento de novos produtos.

No setor calçadista, esta realidade não é diferente. Para Fernandes e Murari (2000), a forte concorrência a que as empresas de calçados estão expostas, vem forçando o ramo calçadista a dedicar maior atenção para a gestão e modernização da produção, dada a necessidade de reduzir custos e prazos de entrega, o tempo de lançamento de novos produtos e aumentar o *mix* de produtos. Estas ações elevam a complexidade do planejamento e controle da produção (PCP), o que exige a implantação de Paradigma Estratégico de Gestão da Manufatura (GODINHO FILHO; FERNANDES, 2005) compatível com essas necessidades.

Neste artigo, é considerado o paradigma denominado de Manufatura Responsiva (GODINHO FILHO; FERNANDES, 2005) adequado para tais empresas. Este paradigma tem como objetivos a flexibilidade, a velocidade e a pontualidade.

No segmento calçadista, empresas que almejam ditar a moda devem ter sistemas produtivos caracterizados pela competição baseada em tempo e em grande variedade de modelos de produtos, totalmente compatível com a proposta da Manufatura Responsiva.

A flexibilidade é necessária para estas empresas porque o sistema de produção deve ser capaz de responder rapidamente a mudanças no *mix* de produtos. Por se tratar de um produto da moda, com ciclo de vida curto, as empresas calçadistas devem atender a requisitos de velocidade e pontualidade. Velocidade para responder às mudanças de volume de produção e realizar entregas rápidas aos lojistas, e pontualidade nas entregas para garantir prazos de entrega e manter a confiança do lojista.

A literatura em Gestão da Produção apresenta quatro ou cinco formas diferentes de um sistema de produção responder à demanda; aqui apresentamos seis formas, a saber: *make to stock* (MTS = produção para estoque com base em previsão demanda); *quick response to stock* (QRTS = produção para estoque com base numa rápida reposição de estoque); *assembly to order* (ATO = montagem sob encomenda); *make to order* (MTO = fabricação sob encomenda (porém existe

estoque dos insumos)); *resources to order* (RTO = recursos insumos sob encomenda); e *engineering to order* (ETO = projeto sob encomenda). A Figura 1 apresenta o esquema desses ambientes de resposta à demanda.

Cada uma dessas formas possui uma posição do estoque isolador de processos; essa posição é chamada de ponto de desacoplamento, ou seja, até o ponto de desacoplamento fabrica-se para estoque e, a partir daí, produz-se sob encomenda. Vale destacar que, no caso RTO, há estoque de apenas projetos e, no ETO, nem isso existe. Já o tempo de resposta (TR), tempo que o cliente vai esperar entre colocar um pedido e recebê-lo, é função dos *lead times*. *Lead time* é o tempo decorrido entre liberar uma ordem (de compra, de produção ou de distribuição) e o momento em que os itens de tal ordem tenham sido disponibilizados (recebidos, produzidos ou entregues).

Assim, temos:

- a) no caso MTS: $TR = LD$ (*lead time* de distribuição);
- b) no caso QRTS: $TR = LD$ (*lead time* de distribuição);
- c) no caso ATO: $TR = LD + LM$ (*lead time* de montagem);
- d) no caso MTO: $TR = LD + LM + LFC$ (*lead time* de fabricação de componentes);
- e) no caso RTO: $TR = LD + LM + LFC + LS$ (*lead time* de suprimento); e
- f) no caso ETO: $TR = LD + LM + LFC + LS + LPr$ (*lead time* de projeto).
- g) LF (*lead time* de fabricação) = $LFC + LM$. Se não há montagem, $LM = 0$ e, portanto, $LF = LFC$.

No caso QRTS, até o ponto de desacoplamento (que pode inclusive não existir), fabrica-se para estoque com base em previsão de demanda. Por outro lado, quando o estoque de produtos finais é abaixado em um contenedor, o contenedor vazio, com a informação impressa no próprio contenedor ou em cartão de qual é o item e seu tamanho de lote, volta para o ponto de desacoplamento e, depois de passar pelas estações de operações subsequentes, chega novamente com o item finalizado no estoque de itens finais; o trajeto desse contenedor tem que ser feito de forma muito rápida para que haja tempo do pequeno estoque final do item ser reabastecido antes que se esgote tal pequeno estoque, o que ocasionaria falta do item e, portanto, diminuição do nível de serviço ($= 1 - \text{probabilidade de ocorrer falta do item}$).

Neste ponto, vale a pena discutir brevemente o que seria o *lead time* de produção (LP). Se entendermos produção como apenas processo de transformação, então, $LP = LF = LFC + LM$. Se entendermos produção como o processo que envolve todo o fluxo de materiais (ou seja, produção = suprimento + fabricação de componentes + montagem + distribuição), então, $LP = LS + LFC + LM + LD$. Se entendermos produção

como o processo até o produto final se concretizar, então, $LP = LS + LFC + LM$.

Neste artigo, o significado de produção não é rígido, mas será fácil para o leitor identificá-lo. Ao considerar que os processos suprimento e acabamento/expedição nunca são gargalos, acabamos focalizando a produção nos processos de corte, pesponto e montagem, porém não há perda de generalidade: facilmente poderíamos tratar sob a lógica do sistema de coordenação de ordens PBC também os processos suprimento e acabamento/expedição.

Vale ainda a pena destacar que os casos ilustrados na Figura 1 não esgotam todos os casos possíveis; é possível definir casos nos quais, por exemplo, até os recursos bens de capital são obtidos após a confirmação do pedido.

A implementação de um sistema de manufatura responsivo sem um PCP informatizado se torna impossível devido à manutenção do volume e da complexidade das informações, principalmente, por levar em consideração a alta variedade de produtos e a busca pela otimização do tempo. Neste sentido, o presente trabalho apresenta uma proposta de três componentes para o PCP de fabricantes de calçados que operam sob encomenda, em particular para os casos RTO e MTO, e disponibilizam uma grande variedade de produtos.

Esses componentes estão ligados às seguintes decisões:

- a) elaborar o programa mestre de produção (MPS);
- b) adotar um sistema de coordenação de ordens de compras e de produção; e
- c) criar procedimentos para programar as operações.

Neste trabalho, os autores consideram mais conveniente chamar o sistema de emissão de ordens de sistema de coordenação de ordens (SCO). As justificativas para adoção deste termo como tradução de *ordering system* estão apresentadas em detalhes no trabalho de Fernandes e Godinho (2007).

Como o componente b), o SCO influencia tanto os componentes a) quanto c), respectivamente, elaboração do MPS e programação de operações. Na seção 2, escolhemos e descrevemos um SCO de produção e compras adequado para o problema; na seção 3, apresentamos uma breve revisão sobre MPS; na seção 4, apresenta-se uma proposta de elaboração do MPS; na seção 5, apresentamos nossa proposta de programação de operações; e a seção 6 encerra o artigo com algumas conclusões.

Além disso, ressaltamos que a proposta da seção 4 tanto serve para o caso RTO, no qual as matérias-primas são obtidas após a confirmação do pedido e também para o caso MTO, no qual já existe a disponibilidade de matérias-primas.

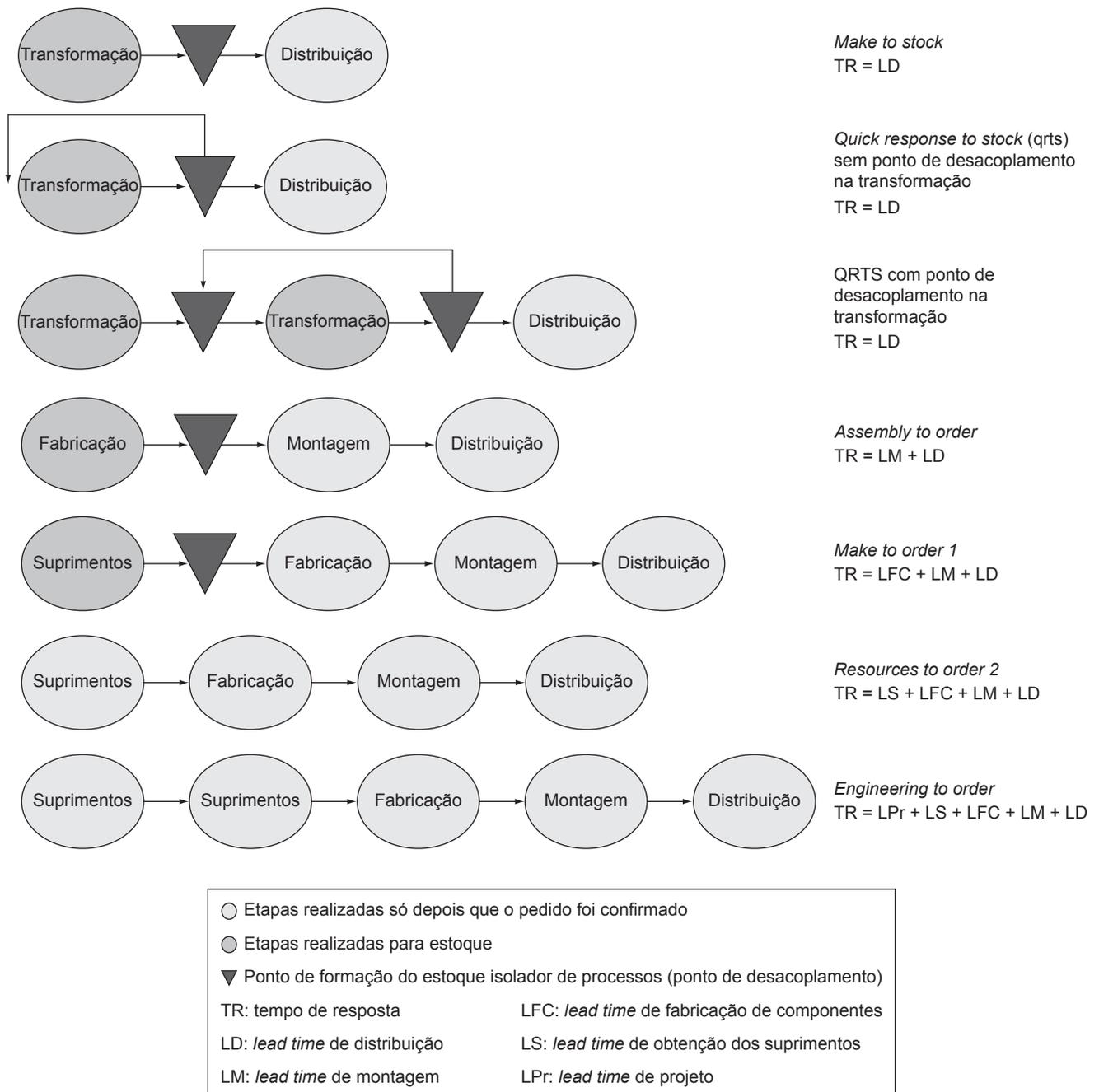


Figura 1. As formas de resposta à demanda dos sistemas de produção.

2 Escolha e descrição do sistema de coordenação de ordens de produção

O SCO foi escolhido a partir de aplicações de questionários, entrevistas e observações no chão de fábrica em sete empresas fabricantes de calçados. O questionário foi baseado na proposta de MacCarthy e Fernandes (2000) para classificar sistemas de produção e determinar o melhor sistema de controle da produção.

As sete fábricas de calçados escolhidas para realizar a classificação e análise dos sistemas de produção são

todas pertencentes a um *industrial cluster* denominado de APEMEBI (Associação dos Pequenos e Médios Exportadores de Birigüi), atualmente denominado de BRAZON (Associação dos Exportadores de Birigüi).

Neste caso de empresas pertencentes a um *industrial cluster*, a necessidade de um PCP efetivo, com procedimentos formalizados, torna-se mais evidente para possibilitar uma coordenação eficiente dos recursos produtivos do *cluster*.

Outro fator que merece destaque, por tratar de empresas que trabalham com moda, o mercado exige uma ampla variedade de produtos com ciclos de vida relativamente curtos. Esta exigência aumenta a complexidade de coordenação entre as empresas do *cluster* e, portanto, tornam as atividades do PCP mais difíceis.

Um sistema de controle da produção é composto por subsistemas, sendo que o principal é o SCO. Nesta proposta, o SCO é o “coração” do PCP porque ele afeta diretamente vários fatores no chão de fábrica tais como: o fluxo de material, níveis de estoques, cumprimento dos prazos de entrega, produtividade do sistema, além de afetar a elaboração do programa mestre de produção (MPS) e a programação de operações.

Muitos autores como Burbidge (1996), Steele et al. (1995), Steele e Malthotra (1997), Huang e Wang (1998), Herer e Shalon (2000), Maccarthy e Fernandes (2000), entre outros, chamam os SCOs, como o MRP (*Material Requirements Planning*), Kanban, PBC (*Period Batch Control*), ConWIP (*Constant Work in Process*), etc., de sistemas de controle da produção.

Aplicando a classificação multidimensional de MacCarthy e Fernandes (2000), notou-se que as empresas do *industrial cluster* possuem muitas características homogêneas como o tamanho da empresa, nível de automação, número de produtos, estrutura do produto, tipo de fluxo, organização do trabalho. Entretanto, em relação a uma característica muito importante, se não a mais importante, o nível de repetibilidade das empresas ficou entre os sistemas repetitivos e semi-repetitivos.

Confrontada a classificação com a estrutura global de sistemas de controle da produção proposta em MacCarthy e Fernandes (2000), o sistema mais adequado para estas empresas é o PBC. Além do PBC apresentado em Burbidge (1996), outras opções cogitadas são: ConWIP de Spearman et al. (1990) e o OPT (*Optimized Production Technology*). Este último foi logo descartado devido ao elevado custo para sua implantação e levando-se em conta a capacidade de investimento limitada das fábricas.

Como as empresas pesquisadas que já possuem um sistema de PCP formalizado adotam algo próximo ao PBC, podemos fazer um casamento conveniente entre o referencial teórico (MACCARTHY; FERNANDES, 2000) e a prática.

Resumindo, os principais motivos para a escolha do PBC foram: a facilidade dos funcionários entenderem seu funcionamento; esse sistema não exigir grande investimento; e o PBC facilitar e viabilizar a implantação de regras de programação de operações.

Além disso, todas as fábricas atendem aos quesitos necessários para a implantação com sucesso do sistema PBC: a) o tempo de processamento de todos os produtos deve ser menor que um período; b) o tempo de *setup* não

prejudica a capacidade da fábrica; e c) os *lead times* de compras são menores que um período.

Todos os itens produzidos nas fábricas atendem aos critérios acima e devem ser controlados pelo PBC. Entretanto, para os itens comprados que, por algum motivo, tenham o *lead time* de suprimentos maior que a duração do período de suprimento do sistema PBC ou tenham baixa confiabilidade nos cumprimentos dos prazos de entrega ou exista um grande desconto no preço em função do tamanho do lote, a utilização de um sistema controlado pelo nível de estoque (por exemplo, o sistema de revisão contínua) seria uma alternativa mais adequada.

A Figura 2 apresenta a lógica de funcionamento do sistema PBC na indústria de calçados.

Observe que no período 6 (dia 6, pois neste trabalho adotou-se um dia como tamanho da duração do período) estaremos: expedindo os produtos dos pedidos do MPS do ciclo 1; montando os produtos dos pedidos alocados ao MPS do ciclo 2; despontando os produtos dos pedidos alocados ao MPS do ciclo 3; cortando os materiais dos produtos de pedidos alocados ao MPS do ciclo 4; adquirindo os materiais do MPS do ciclo 5; e acumulando pedidos que serão alocados ao MPS do ciclo 6 ou de algum ciclo posterior.

O PBC é um sistema bastante conhecido na Europa. Este fato pode ser constatado pelos trabalhos de Zelenovic e Tesic (1988), Burbidge e Halsall (1994) e Towill (1997). Vale destacar ainda que Benders e Riezebous (2002) consideram que o PBC é um clássico e não um sistema desatualizado.

Zelenovic e Tesic (1988) apresentam um trabalho em que 32 indústrias na Iugoslávia tiveram sucesso com a implantação do PBC e relatam a ocorrência de redução nos tempos de *setup* de 3 a 10 vezes, reduzindo o nível de estoque em processo de 2 a 4 vezes e o tempo de processamento de 2 a 5 vezes. Towill (1997) descreve como um dos princípios de uma boa prática do controle de fluxo de material entre cadeias de suprimentos o uso do sistema PBC. Burbidge e Halsall (1994) apresentam entre os benefícios obtidos pela aplicação do PBC numa fábrica de produtos tubular automotivo a redução de 86% do tempo de processamento, redução de 75% do tempo de *setup*, redução de 58% dos estoques.

Analisando estas bibliografias, nota-se que todos os benefícios relatados pela implementação do PBC estão de acordo com os objetivos da Manufatura Responsiva.

3 Elaboração do programa mestre de produção: uma breve revisão

O programa mestre de produção (MPS) é um programa de produção em nível de produtos acabados que indica quais produtos deverão ser produzidos, em quais quantidades numa série de períodos futuros. A Tabela 1 ilustra

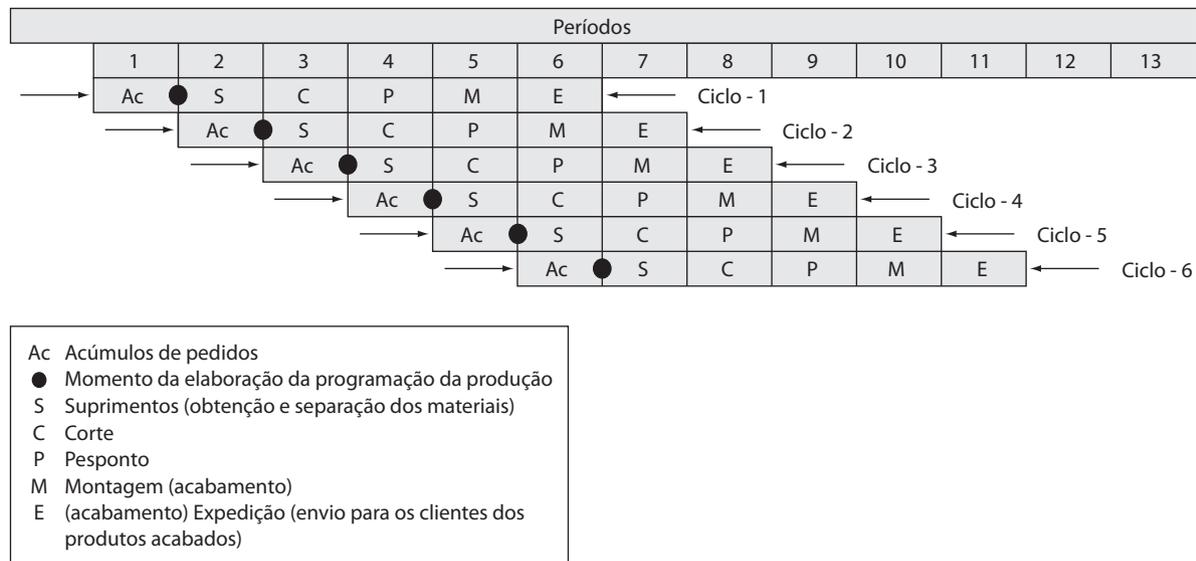


Figura 2. Estrutura lógica do funcionamento do PBC na indústria de calçados.

Tabela 1. Programa mestre de produção.

Produto	Períodos				
	1	2	3	4	5
352-1	200	200	200	200	200
352-2	50	50	50	50	50
356-1	30	30	30	30	30

um MPS com horizonte de programação igual a 5 períodos.

Para Wall et al. (1992), MPSs mais eficientes podem ser alcançados por meio da colaboração entre as seguintes funções: produção, vendas, compras e marketing. Assim, um bom MPS representa uma autorização para a produção que compatibilize as vendas, a capacidade de produção e suprimento de materiais.

O problema da elaboração do MPS é um problema bastante complexo e vem sendo estudado por inúmeros pesquisadores, tais como Lewis et al. (1992), Wall et al. (1992), Campbell (1992), Chu (1995), Sipper e Bulfin (1997), Gundogar (1999), Metters e Vargas (1999) e Hill et al. (2000). Aachamos conveniente, porém, destacar somente algumas técnicas e avaliações que mais se aproximam do objetivo deste trabalho, devido ao grande número de referências bibliográficas encontradas.

Lewis et al. (1992) destacam que o aumento da complexidade em elaborar o MPS para um ambiente de produção que monta contra pedido está relacionado com a restrição dos recursos e com a dinâmica da demanda dos clientes. Para resolver este problema de programação, os autores propõem uma técnica de elaboração do MPS para manufatura de componentes, combinando um modelo de dimensionamento de lote multiobjetivo capacitado para multiitens/multiestágios com um procedimento iterativo de otimização da solução com objetivos múltiplos.

Ronen e Rozen (1992) apresentam um modelo para elaboração do MPS que incorpora princípios da teoria das restrições (GOLDRATT, 1988), programação linear, teoria da utilidade e processo hierárquico analítico. Os autores defendem e apresentam versões especiais deste modelo para ambientes de produção *make to order* e *make to stock*.

Karacapilidis e Pappis (1997) apresentam um sistema baseado num modelo interativo para a administração de um sistema de produção têxtil focando principalmente o problema de elaboração do MPS. A escolha da fábrica têxtil ocorreu por causa das características especiais deste tipo de indústria que são:

- processos multifases, com vários produtos por fase;
- diferentes horizontes de programação; e
- diferentes necessidades de produção para cada fase.

O módulo de elaboração do MPS é apresentado por meio de um algoritmo em pseudocódigo e um diagrama de estrutura de dados.

Como brevemente apresentado, o tema MPS, devido à sua relevância na programação da produção, tem despertado interesse na comunidade científica. Contudo, não foi encontrado um modelo que supra as necessidades encontradas neste trabalho.

4 Proposta de um sistema para elaboração do programa mestre de produção

O horizonte de programação do programa mestre de produção (MPS) é de curto prazo e compreende:

- o programa “congelado”, ou firme ou de montagem; e
- o programa flexível.

O programa “congelado” é o que dará início à produção no próximo período. Ele é responsável pela alocação dos recursos produtivos, tanto de máquinas e mão-de-obra como de matéria-prima. O programa flexível tem um horizonte de programação maior e está sujeito a alterações. Seu principal objetivo é proporcionar informações para dar suporte à tomada de decisões relacionadas aos diversos departamentos; por exemplo, informar o cliente do andamento de seus pedidos e liberar ordens de compra de itens com *lead times* de suprimentos mais longos que um período, o que é raro na indústria calçadista situada em aglomerados industriais já que ali existem grandes distribuidores de insumos que garantem uma entrega rápida de pedidos de compra.

O MPS nesta proposta é elaborado para dois ciclos. Conforme visto na Figura 2, um ciclo de programação compreende 5 períodos (já que estão sendo controlados 5 estágios de produção (suprimento; corte; pesponto; montagem; acabamento/expedição)). Cada período tem duração de um dia. O ciclo 1 começa com o suprimento (obtenção dos materiais comprados) no dia 2 e termina com o acabamento/expedição no dia 6; o ciclo 2 começa no dia 3 e termina no dia 7. O MPS que será expedido no período 7 poderá ser novamente reelaborado junto com o programa a ser expedido no período 8. Esta reelaboração é realizada mediante interações entre o usuário e o sistema, quando necessário. Sendo assim, todo programa que pode ser reelaborado será considerado como um programa flexível, e todo programa que deve ser cumprido, programa congelado.

Nas próximas subseções, apresentam-se três modelos de programação matemática e uma heurística a fim de realizar atribuições dos pedidos aos ciclos do MPS. Estes modelos consideram as restrições de disponibilidade de material e de capacidade.

Os critérios de otimização considerados neste trabalho foram identificados durante entrevistas com os programadores da produção das empresas pertencentes ao *cluster*. Os critérios de otimização adotados foram: data de entrega, balanceamento da capacidade dos estágios produtivos e prioridade de clientes especiais.

A principal diferença entre os modelos está na forma de buscar o balanceamento da carga, entre os estágios produtivos. O modelo de alocação por prioridade garante um mínimo de utilização da capacidade entre os estágios; o segundo procura diretamente o balanceamento da carga entre os estágios produtivos, e o terceiro procura maximizar o uso dos estágios.

4.1 Modelos de programação inteira para elaboração do programa mestre de produção

Neste trabalho, entendem-se, como estágios produtivos, todas as etapas que envolvem a produção de calçados (almoxarife, corte, pesponto, montagem e expedição) e

estágios produtivos que transformam o material, como setores transformadores (corte, pesponto e montagem). O código w é o índice dos setores produtivos (1) corte, (2) pesponto e (3) montagem, respeitando a ordem lógica de produção do calçado, ou seja: corte, $w = 1$; pesponto, $w = 2$; montagem $w = 3$.

Para definir prioridades aos pedidos, foi criado um índice (K_i) que será utilizado em todos os métodos de elaboração do MPS. Este índice é calculado de modo que pedidos mais urgentes tenham prioridades maiores. Quanto maior a prioridade do pedido, mais cedo o pedido será alocado.

Os critérios data de entrega e prioridade do cliente foram incorporados ao modelo por meio do cálculo do K_i , porém outros critérios poderiam ser utilizados, tais como prazo para pagamento, disponibilidade de material, entre outros. A função de K_i é dada pela Equação 1:

$$K_i = (PPRC_i + PC_i + SA_i) \quad (1)$$

Sendo:

$PPRC_i$: peso do pedido i relacionado à sua razão crítica; PC_i : importância do cliente do pedido i ; SA_i : sinalizador de atraso.

A razão crítica (RC_i) é uma variável de apoio usada para determinar prioridade aos pedidos em relação à data devida. A razão crítica relaciona a data de entrega dos pedidos e o *lead time* de suprimentos, de produção e de distribuição. Matematicamente, pode ser expressa na Equação 2:

$$RC_i = (\text{data prometida} - \text{data atual}) / (\text{lead time} \text{ suprimento} + \text{lead time} \text{ de produção} + \text{lead time} \text{ de distribuição}) \quad (2)$$

Para calcular o $PPRC_i$, deve-se calcular o RC_i para todo o pedido i que esteja em situação pendente e organizá-los em uma lista em ordem decrescente de RC_i . Depois, aloca-se o peso conforme a posição que ele ocupa na lista. Este peso inicia-se em 100 e para cada valor diferente de RC , somam-se cem ao peso. A Tabela 2 ilustra o cálculo de prioridade para 5 pedidos.

A importância do cliente (PC_i) é um peso adicional para dar prioridade ao pedido, conforme critério de importância dos clientes. Neste modelo, os clientes foram classificados nos seguintes tipos e importâncias: cliente tipo Especial (peso igual a 20); cliente tipo Normal (peso igual a 10); e cliente pouco Importante (peso igual a 0).

O sinal de atraso do pedido (SA_i) é incremento para facilitar a identificação da situação do pedido por meio do K_i . Especificamente, verificar se o pedido está atrasado. Os pedidos que tiverem RC menores ou iguais a um receberão SA igual a um e para os demais SA será igual a zero.

Tabela 2. Cálculo da prioridade relativa ao RC_i .

Pedido	RC_i	Posição	$PPRC_i$
1	1,5	1	100
3	0,5	2	200
2	0,3	3	300
5	0,3	4	300
4	-1,5	5	400

Os valores para as variáveis que compõe o K_i foram escolhidos por meio de várias interações com o modelo. Por exemplo: o valor 20 para o cliente especial e 10 para o cliente normal, garante que um pedido de cliente especial só será prejudicado se beneficiar três ou mais pedidos de cliente normal.

Quanto maior o K_i , maior a prioridade do pedido i ser alocado ao período mais cedo. Para exemplificar o cálculo do K_i , suponha que o pedido 4 do exemplo mostrado na Tabela 1 seja de um cliente especial. Logo o valor do K_i será:

$$K_4 = 400 + 20 + 1 = 421$$

Em outro caso, suponha que o mesmo pedido, pedido 4, seja de um cliente normal. Assim:

$$K_4 = 400 + 10 + 1 = 411$$

Em outro caso, ainda, suponha que o pedido 1 seja de um cliente normal. Assim, o valor de K_i seria:

$$K_1 = 100 + 10 + 0 = 110$$

Os três modelos matemáticos, apresentados a seguir, trazem em comum as restrições de capacidade, tempo de início mais cedo de produção e garantia de que todo pedido seja programado para um e somente um ciclo, e a disponibilidade do material que não seja controlado pelo PBC.

4.1.1 Modelo de alocação por prioridade

Neste primeiro modelo matemático, temos uma restrição de utilização mínima da capacidade entre os estágios produtivos. Esta restrição vai ao encontro do balanceamento da carga entre os estágios produtivos.

Neste modelo, utilizamos a seguinte notação:

c : número efetivo de ciclos da programação (não inclui o ciclo denominado de *buffer* de capacidade infinita); P : número de pedidos; N : número de estágios produtivos ($N = 5$); HP : tamanho do horizonte de programação em períodos; $HP = N + c$; j : índice dos períodos de programação; $j = 1, 2, 3, \dots, HP$; i : índice dos pedidos; $i = 1, 2, \dots, P$; m : índice dos materiais de consumo que

não terão suas ordens emitidas pelo PBC; w : índice dos setores transformadores; $w = 1, 2, 3$; C_{wj} : capacidade remanescente de produção no setor transformador w no período j ; CO_{mi} : consumo do material m para o pedido i ; $Disp_m$: disponibilidade do material m ; IC_w : parâmetro de utilização mínima da capacidade de produção do setor transformador w ; K_i : índice de prioridade do pedido i ; TP_{iw} : tempo de processamento do pedido i no setor transformador w .

A variável de decisão do modelo é dada pela Equação 3:

$$x_{i,j} = \begin{cases} 1 & \text{se pedido } i \text{ for alocado ao MPS} \\ & \text{expedido no período } j \\ 0 & \text{se pedido } i \text{ não for alocado ao MPS} \\ & \text{expedido no período } j \end{cases} \quad (3)$$

O parâmetro HP corresponde ao número de períodos necessários para produzir todos os ciclos efetivos desejados pelo programador da produção mais um ciclo com capacidade infinita de produção. Este número é calculado pela soma do número de ciclos efetivos c mais o número estágios de produtivos ($N = 5$).

O último ciclo que tem capacidade infinita é um *buffer* necessário para alocar os pedidos que continuaram em carteira, ou seja, os pedidos que não serão programados. Quando um pedido for alocado para ser expedido no último período do modelo, o *buffer*, ele não irá consumir tempo de processamento e nem material.

A função objetivo do modelo de programação inteira tem como finalidade alocar os pedidos com prioridades mais altas, em períodos de produção mais cedo. Esta função é dada pela Equação 4:

$$\min x_0 = \sum_{i=1}^P \sum_{j=N}^{HP} (K_i) j x_{ij} \quad (4)$$

Para garantir que a capacidade de produção de cada setor transformador, em cada período, não seja ultrapassada pela soma dos tempos de processamento dos pedidos alocados na seção naquele período, temos a Equação 5:

$$\sum_{i=1}^P TP_{iw} x_{ij} \leq C_{w(j-(N-w-1))} \left\{ \begin{array}{l} \text{para todo } w \\ \text{e para } j \text{ de } N \text{ até } HP - 1 \end{array} \right\} \quad (5)$$

O termo $C_{w(j-(N-w-1))}$ indica a capacidade de produção dos setores transformadores w ($w = 1 \rightarrow$ corte; $w = 2 \rightarrow$ pesponto; $w = 3 \rightarrow$ montagem) em cada período. Exemplificando:

Supondo a programação de dois ciclos, cada ciclo com 5 estágios de produção ($N = 5$) e com permanência em cada estágio de um período, a data de término de cada ciclo será, respectivamente, os períodos 5 e 6. A

Tabela 3 mostra a relação da capacidade com os parâmetros mencionados acima.

A disponibilidade do material necessário para produção é uma restrição para a elaboração do MPS para a maioria das empresas. Para resolver este problema, o modelo matemático utiliza a Equação 6:

$$\sum_{i=1}^P \sum_{j=N}^{HP-1} CO_{mi} x_{ij} \leq Disp_m, \text{ para todo } m; \quad (6)$$

Os materiais que entrarão nesta fase são aqueles que possuem o *lead time* de suprimentos maior que o período destinado para a sua obtenção. Os demais materiais seguem a lógica do PBC, ou seja, serão adquiridos em um período antes do primeiro setor transformador, e os produtos acabados serão expedidos no último estágio de produção.

A data de término mais cedo de um pedido deve ser igual ou maior que a duração de seu ciclo de produção, ou seja, igual ou maior que o número de estágios produtivos. Esta restrição é representada pela Equação 7:

$$\sum_{j=N}^{HP} jx_{ij} \geq N, \text{ para todo } i; \quad (7)$$

Todo pedido deverá ser programado somente a um período j , representado pela Equação 8:

$$\sum_{j=1}^{HP} x_{ij} = 1, \text{ para todo } i; \quad (8)$$

Essas duas últimas restrições podem ser sintetizadas em uma única, uma vez que todo pedido deve ser alocado a um único período j , em que $N \leq j \leq HP$, ou seja (Equação 9):

$$\sum_{j=N}^{HP} x_{i,j} = 1, \text{ para todo } i; \quad (9)$$

Observe que a função objetivo penaliza uma segunda alocação em períodos $j < N$.

A restrição, que vai ao encontro do balanceamento da capacidade entre os setores transformadores, garante um

mínimo de utilização da capacidade de produção para todo setor transformador (Equação 10):

$$\sum_{i=1}^P TP_{iw} x_{ij} \geq IC_w \cdot C_{w(j-(N-w-1))} \left\{ \begin{array}{l} \text{para todo } w \\ \text{e } j \text{ de } N \text{ até } HP - 1 \end{array} \right\} \quad (10)$$

O valor do índice IC_w (valor entre 0 e 1) é informado pelo tomador de decisão que será baseado em sua experiência. Este valor garantirá um mínimo de utilização da capacidade dos estágios produtivos. Porém, esta restrição pode ocasionar várias interações com o usuário, devido à possibilidade de soluções inviáveis.

4.1.2 Modelo de alocação por prioridade e balanceamento da carga

Esse modelo e o próximo utilizam uma função objetivo composta por dois critérios. O primeiro critério refere-se à prioridade do pedido e o segundo critério, ao balanceamento da carga de produção.

Este modelo visa balancear a utilização da capacidade entre os setores transformadores: corte, pesponto e montagem (setores $w = 1$, $w = 2$ e $w = 3$, respectivamente). Para isso utiliza as restrições (5), (6) e (9) do modelo matemático de alocação por 1 com uma nova função objetivo.

A nova função objetivo contempla 2 objetivos ponderados pelos pesos α e β ; o primeiro (4), trata da prioridade dos pedidos (pedidos com maior prioridade devem ser alocados a períodos anteriores, em relação a pedidos de menor prioridade) e o segundo (5), trata do balanceamento da utilização da capacidade. Os pesos α e β representam uma correção de escala e o grau de importância relativa entre os objetivos (4) e (5) (Equação 11).

$$\min x_0 = \alpha \left[\sum_{i=1}^P \sum_{j=N}^{HP} (K_i) jx_{ij} \right] +$$

$$\beta \left[\sum_{r=1}^c \left(\sum_{w=1}^{N-3} \left| UC_{w,w+r} - UC_{w+1,w+r+1} \right| \right) \right] \quad (11)$$

Tabela 3. Exemplo do parâmetro utilizado no índice da expressão matemática ($C_{w,(j-(N-w-1))}$).

Setores transformadores (w)	MPS do período j =	Número de estágios (N)	Termo ($C_{w,(j-(N-w-1))}$)	Capacidade dos estágios produtivos no período j (C_{wj})
1 (Corte)	5	5	($C_{1,(5-(5-1-1))}$)	$C_{1,2}$
2 (Pesponto)	5	5	($C_{2,(5-(5-2-1))}$)	$C_{2,3}$
3 (Montagem)	5	5	($C_{3,(5-(5-3-1))}$)	$C_{3,4}$
1	6	5	($C_{1,(6-(5-1-1))}$)	$C_{1,3}$
2	6	5	($C_{2,(6-(5-2-1))}$)	$C_{2,4}$
3	6	5	($C_{3,(6-(5-3-1))}$)	$C_{3,5}$

Para linearizar esta função objetivo (Equação 12):

$$\min x_0 = \alpha \left(\sum_{i=1}^P \sum_{j=N}^{HP} (K_i) j x_{ij} \right) + \beta \left[\sum_{r=1}^c \left(\sum_{w=1}^{N-3} D_{r,w} \right) \right] \quad (12)$$

Sujeito a (Equação 13):

$$UC_{w,w+r} - UC_{w+1,w+r+1} \leq D_{r,w} \quad (13)$$

para r de 1 até c e w de 1 até N - 3 (Equação 14)

$$UC_{w+1,w+r+1} - UC_{w,w+r} \leq D_{r,w} \quad (14)$$

para r de 1 até c e w de 1 até N - 3 (Equação 15)

$$UC_{w,j-(N-w-1)} = \left(\sum_{i=1}^P TP_{i,w} x_{i,j} \right) / (C_{w,j-(N-w-1)}) \quad (15)$$

para todo w de 1 até N - 2; e todo j de N a HP - 1, sendo: c: número de ciclos efetivos de programação (sugerimos c = 2); $UC_{w,j}$: percentual da utilização da capacidade do setor w ao processar o MPS a ser expedido no período j; $D_{r,w}$: diferença em módulo da carga do setor w e do setor w + 1 para cada ciclo efetivo de produção.

4.1.3 Modelo de alocação por prioridade e maximização do uso da capacidade

Neste modelo buscamos maximizar a utilização da capacidade de todos os estágios produtivos. Vale destacar que se a demanda for alta em relação à capacidade, minimizar a capacidade ociosa corresponderá indiretamente a “balancear” a carga entre os estágios produtivos. Por outro lado, minimizar a capacidade ociosa sempre corresponde a maximizar a utilização da capacidade. No modelo, a capacidade ociosa é definida como uma variável de folga.

O modelo compõe-se da Equação 16, da Equação 17 e mais as restrições (5), (6) e (7) do modelo de alocação por prioridade apresentado na seção 4.1.1.

$$\min x_0 = \alpha \left(\sum_{i=1}^P \sum_{j=N}^{HP} (K_i) j x_{ij} \right) + \beta \left(\sum_{w=1}^{N-2} \sum_{j=N}^{HP-1} (CapOciosa_{w,j} / C_{w(j-(N-w-1))}) \right) \quad (16)$$

Sujeito a:

$$\sum_{i=1}^P TP_{i,w} x_{ij} + CapOciosa_{w(j-(N-w-1))} = C_{w(j-(N-w-1))} \quad (17)$$

para todo w; e para j de N até HP - 1, em que: $CapOciosa_{w,j}$: corresponde à capacidade ociosa do setor w no período j.

4.2 Heurística para elaborar o programa mestre de produção

4.2.1 Definição da heurística

Pelas simulações computacionais, realizadas com o modelo matemático por prioridade e maximização do uso da capacidade, notou-se uma deficiência em relação ao tempo de processamento, cujo tempo de espera para uma carteira de 80 pedidos levou mais de meia hora de processamento usando-se o GAMS/Cplex 7.0 em um microcomputador com processador AMD Athlon™ de 1.2 Gigahertz e 256 Mb de memória RAM.

Uma carteira de pedidos, de uma empresa média do *cluster*, chega a ter por volta de 100 pedidos. Assim, por segurança, tendo em vista posterior aplicação prática, foi considerado conveniente criar uma heurística para elaborar o MPS.

Esta heurística busca elaborar o MPS considerando como critério principal atender aos prazos de entrega e como critério secundário balancear a capacidade de produção utilizada entre os setores transformadores. Esta heurística respeita a disponibilidade dos materiais que possuem *lead time* maior que o período de suprimento e que não são controlados pelo PBC.

A idéia da heurística é alocar os pedidos com os maiores valores do índice K_i para períodos mais cedo. A seguir, apresenta-se uma descrição dos passos da heurística:

- Criar uma lista dos pedidos em ordem decrescente pelo valor do índice K_i ;
- Para cada pedido, calcular a sua necessidade de processamento em cada setor produtivo;
- Os pedidos com o mesmo K_i devem ser divididos em 4 grupos conforme a necessidade de utilização da capacidade. O grupo 0 é formado por pedidos que usam o mesmo percentual de utilização da capacidade em todos os setores transformadores. O grupo 1 é composto pelos pedidos que utilizam de mais capacidade de produção no setor transformador 1 do que nos demais setores. O grupo 2 é formado por pedidos que utilizam mais capacidade no setor transformador 2, e assim por diante, até o grupo N - 2;
- Fazer uma lista para cada ciclo com a disponibilidade de capacidade de cada setor produtivo;
- Alocar ao MPS mais recente o pedido do grupo correspondente ao setor transformador que contém a maior taxa de disponibilidade. Por exemplo, se tivermos mais disponibilidade no setor transformador 3 (montagem) aloca-se um pedido do grupo 3, sempre respeitando a disponibilidade de material e de capacidade (a disponibilidade da capacidade não pode ficar negativa);

- f) Antes de alocar qualquer pedido ao ciclo vigente, deve-se verificar se o pedido cabe em um ciclo mais cedo. Caso caiba, este deverá ser programado;
- g) Quando o grupo de pedidos, com maior disponibilidade da capacidade, estiver vazio, passará para o segundo grupo com maior disponibilidade, e assim por diante;
- h) Se um pedido não puder ser alocado no período vigente, devido à falta de material, este será retirado da lista e entrará em um relatório de falhas do sistema de controle de estoques;
- i) Quando um pedido, não puder ser alocado ao ciclo vigente, devido à falta de capacidade, este deverá ser alocado ao novo MPS; e
- j) Caso o novo período seja maior que o horizonte de programação determinado o programa deve parar.

4.2.2 Ilustração da heurística

Para facilitar o entendimento da heurística, a seguir, será ilustrada a aplicação desta lógica heurística por meio de um pequeno exemplo, programando dois ciclos de produção para um ambiente com 5 estágios produtivos e horizonte de programação igual a 6 períodos para a carteira de pedidos apresentada na Tabela 4, ou seja, será elaborado o MPS para os períodos 5 (ciclo 1) e 6 (ciclo 2) da carteira de pedidos abaixo.

Os pedidos com valor de K_i igual a 310 são os pedidos com o maior valor de K_i e, por isso, farão parte da lista dos pedidos que serão programados primeiro. O próximo passo será classificar os pedidos em 4 grupos, baseado na taxa de utilização da capacidade. Por exemplo, o pedido 5 utiliza 30,00% da capacidade do corte, 15,00% da capacidade do pesponto e 25,00% da montagem. Com isto, concluímos que este pedido requer mais tempo de processamento do setor de corte e, portanto, este pedido fará parte do grupo 1 (corte).

Esses grupos devem ser ordenados pela ordem decrescente da taxa de utilização da capacidade corresponde ao seu grupo. Exemplo: o grupo 1 contém os pedidos com

maior taxa de utilização da capacidade no setor produtivo 1 e, por isso, este grupo deve ter seus pedidos ordenados de forma decrescente pela taxa de utilização deste setor.

Seguindo o exemplo, temos três pedidos com o valor de K_i igual a 310, os quais serão programados primeiro. Estes pedidos formam somente dois grupos, grupo 1 e grupo 2, respectivamente, o grupo de pedidos que utiliza maior capacidade do corte e o que ocupa maior capacidade do pesponto. (Tabela 6)

Após a classificação dos grupos, inicia-se o processo de alocação dos pedidos aos ciclos. O processo de alocação tem início verificando qual setor transformador tem mais capacidade disponível. Caso haja empate, a escolha deverá ser arbitrária.

Iniciando o processo de alocação, todos os setores transformadores têm 100% de capacidade disponível, a não ser que exista trabalho atrasado de outro programa mestre anterior, pois este trabalho atrasado terá maior prioridade e, portanto, será alocado primeiro restringindo a capacidade disponível para elaborar o MPS. Neste exemplo, não existe trabalho atrasado, logo, tem-se 100% de capacidade disponível para todos os setores transformadores e para todos os períodos.

No processo de alocação, não podemos nos esquecer de verificar a disponibilidade de material não controlado pelo PBC. Caso ocorra a falta de material para produção do pedido escolhido, ele deve ser retirado da lista e deve-se registrar uma ocorrência de falta de material para o pedido. Desta forma, o gerente efetuará as ações necessárias para sua produção, no próximo programa.

Tabela 5. Classificação dos pedidos nos grupos conforme utilização.

Grupo 1	
Pedido	Capacidade requerida (%)
5	30,00
4	25,00
Grupo 2	
Pedido	Capacidade requerida (%)
6	30,00

Tabela 4. Lista de pedidos ordenada pelo K_i .

Pedido	K_i	Utilização da capacidade no setor 1 - Corte (%)	Utilização da capacidade no setor 2 - Pesponto (%)	Utilização da capacidade no setor 3 - Montagem (%)
5	310	30,00	15,00	25,00
4	310	25,00	15,00	15,00
6	310	15,00	30,00	25,00
1	210	30,00	20,00	20,00
3	210	25,00	25,00	25,00
2	210	20,00	30,00	25,00
10	210	15,00	15,00	20,00
7	110	25,00	30,00	15,00
9	110	10,00	10,00	10,00
8	110	5,00	10,00	20,00

O primeiro pedido a ser alocado (será o pedido de número 5) ao ciclo 1. Isto significa que este pedido deverá ser expedido no período 5. Depois, deverá descontar a capacidade requerida de produção deste pedido dos setores transformadores no período 5, veja o exemplo na Tabela 6.

O próximo pedido escolhido está no grupo 2, pois o setor de pesponto disponibiliza maior capacidade e ao grupo 2 pertencem os pedidos com as maiores taxas de processamento no pesponto. O pedido 6 será o próximo. As operações de alocação são as mesmas que foram utilizadas para o pedido 5. Assim, têm-se as seguintes disponibilidades de capacidade apresentadas na Tabela 7.

O próximo pedido a ser alocado poderia pertencer ao grupo do pesponto ou corte, porém não existem pedidos no grupo de pesponto, conseqüentemente será escolhido o pedido pertencente ao setor de corte, pedido 4, veja a Tabela 8.

Após alocar o pedido 4, todos os grupos estarão vazios; então, devem-se retirar os pedidos já alocados da lista de pedidos e reiniciar o processo com a nova seleção de pedido que tenham o maior valor de K_i .

O setor com maior capacidade disponível é o setor de pesponto, grupo 2, logo, será alocado o pedido 2, gerando a disponibilidade de recursos apresentado na Tabela 9.

Como as taxas de utilização de todos os pedidos ficaram iguais, escolheu-se aleatoriamente o setor de corte. Como a taxa de utilização do pedido 1 ultrapassa a capacidade disponível em todos os setores do MPS a ser expedido no período 5 (MPS do ciclo 1), então será iniciada a programação do próximo MPS, o do período 6, com o pedido 1 como apresentado na Tabela 10.

O próximo pedido será escolhido baseado na disponibilidade da capacidade do MPS do ciclo 2, mas antes de introduzir o pedido ao MPS do ciclo 2, deve-se verificar se ele poderia ser encaixado em algum MPS anterior. Esta lógica deverá ser seguida até que não haja mais capacidade de produção para o último período. Aplicando esta heurística até o fim para o exemplo dado, chegaríamos aos MPS apresentados na Tabela 11. Os pedidos 2, 4, 5, 6, e 9 foram alocados ao MPS do ciclo 1 (expede no período 5, monta no período 4, pesponta no período 3, corta no período 2 e adquire as matérias-primas no período 1) e os demais pedidos (1, 3, 7, 8 e 10) foram colocados ao MPS do ciclo 2 (expede no período 6, monta no período 5, pesponta no período 4, corta no período 3 e adquire as maté-

Tabela 6. Capacidade remanescente após a programação do pedido 5.

Capacidade disponível	MPS do período 5 (ciclo 1)			MPS do período 6 (ciclo 2)		
	Corte (%)	Pesponto (%)	Montagem (%)	Corte (%)	Pesponto (%)	Montagem (%)
Pedidos	100	100	100	100	100	100
5	30,00	15,00	25,00	0	0	0
Total	70,00	85,00	75,00	100	100	100

Tabela 7. Capacidade remanescente após a programação do pedido 6.

Capacidade disponível	MPS do período 5 (ciclo 1)			MPS do período 6 (ciclo 2)		
	Corte (%)	Pesponto (%)	Montagem (%)	Corte (%)	Pesponto (%)	Montagem (%)
Pedidos	100	100	100	100	100	100
5	30,00	15,00	25,00	0	0	0
6	15,00	30,00	25,00	0	0	0
Total	55,00	55,00	50,00	100	100	100

Tabela 8. Capacidade remanescente após a programação do pedido 4.

Capacidade disponível	MPS do período 5 (ciclo 1)			MPS do período 6 (ciclo 2)		
	Corte (%)	Pesponto (%)	Montagem (%)	Corte (%)	Pesponto (%)	Montagem (%)
Pedidos	100	100	100	100	100	100
5	30,00	15,00	25,00	0	0	0
6	15,00	30,00	25,00	0	0	0
4	25,00	15,00	15,00	0	0	0
Total	30,00	40,00	35,00	100	100	100

rias-primas no período 2). A capacidade dos setores produtivos foi utilizada em 100%: na montagem nos períodos 4 e 5, no pesponto, nos períodos 3 e 4 e no corte, nos períodos 2 e 3.

4.3 Simulações dos modelos e heurística

4.3.1 Definindo as simulações

Os três modelos matemáticos trazem algumas vantagens e desvantagens. Optou-se por implementar computacionalmente somente um desses modelos. O

modelo escolhido foi o de alocação por prioridade e maximização da utilização da capacidade, tendo em vista as seguintes considerações:

- a) O modelo matemático de alocação por prioridade, apresentado na seção 4.1.1, apesar de ser favorável, não busca diretamente o balanceamento da utilização da capacidade produtiva entre os estágios produtivos. A grande desvantagem deste é que podem ocorrer casos em que não se obtém uma solução viável e, portanto será necessária a realização de

Tabela 9. Capacidade remanescente após a programação do pedido 2.

Capacidade disponível	MPS do período 5 (ciclo 1)			MPS do período 6 (ciclo 2)		
	Corte (%)	Pesponto (%)	Montagem (%)	Corte (%)	Pesponto (%)	Montagem (%)
Pedidos	100	100	100	100	100	100
5	30,00	15,00	25,00	0	0	0
6	15,00	30,00	25,00	0	0	0
4	25,00	15,00	15,00	0	0	0
2	20,00	30,00	25,00	0	0	0
Total	10,00	10,00	10,00	100	100	100

Tabela 10. Capacidade remanescente após a programação do pedido 1.

Capacidade disponível	MPS do período 5 (ciclo 1)			MPS do período 6 (ciclo 2)		
	Corte (%)	Pesponto (%)	Montagem (%)	Corte (%)	Pesponto (%)	Montagem (%)
Pedidos	100	100	100	100	100	100
5	30,00	15,00	25,00	0	0	0
6	15,00	30,00	25,00	0	0	0
4	25,00	15,00	15,00	0	0	0
2	20,00	30,00	25,00	0	0	0
1	0	0	0	30,00	20,00	20,00
Total	10,00	10,00	10,00	70,00	80,00	80,00

Tabela 11. Exemplo de programa mestre gerado pela heurística.

Capacidade disponível	MPS do período 5 (ciclo 1)			MPS do período 6 (ciclo 2)		
	Corte (%)	Pesponto (%)	Montagem (%)	Corte (%)	Pesponto (%)	Montagem (%)
Pedidos	100	100	100	100	100	100
5	30,00	15,00	25,00	0	0	0
6	15,00	30,00	25,00	0	0	0
4	25,00	15,00	15,00	0	0	0
2	20,00	30,00	25,00	0	0	0
1	0	0	0	30,00	20,00	20,00
10	0	0	0	15,00	15,00	20,00
3	0	0	0	25,00	25,00	25,00
7	0	0	0	25,00	30,00	15,00
8	0	0	0	5,00	10,00	20,00
9	10	10	10	-	-	-
Total	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

várias interações, até que uma solução factível seja apresentada.

- b) O segundo modelo matemático, alocação por prioridade e balanceamento da carga, busca diretamente o balanceamento da produção, entretanto é um modelo muito mais complexo e de difícil compreensão para um gerente; e baseado na experiência dos autores, se um gerente não entende a lógica de um modelo, ele não usará um sistema baseado em tal modelo;
- c) O terceiro modelo, alocação por prioridade e maximização da utilização dos estágios produtivos, vai ao encontro do balanceamento da utilização da capacidade de produção e é um modelo muito mais simples que o segundo (b).

Para avaliar os métodos de elaboração do MPS, foram realizadas várias simulações, comparando-se os resultados obtidos por meio do modelo matemático com os do método heurístico. As comparações foram feitas sob dois pontos de vista. No primeiro momento, realizou-se uma avaliação entre os modelos sob o ponto de vista prático. Em um segundo momento, compararam-se os modelos sob o ponto de vista matemático, confrontando-se o valor de x_0 (função objetivo do modelo matemático) com o valor de x_0 calculado para a solução da heurística.

Muitas outras simulações foram feitas durante a elaboração dos modelos matemáticos e método heurístico. Durante as simulações verificou-se que quanto mais discrepantes são os valores de K_p , menor é o tempo de processamento da CPU.

Os valores, alfa e beta, utilizados no modelo matemático foram fixados em 1, assim, manteve-se a prioridade natural deste modelo. Entretanto, durante a aplicação deste modelo em um ambiente real, o gerente de produção poderá alterar esses valores conforme conveniência, podendo gerar vários resultados para o mesmo problema.

As simulações foram feitas com dados baseados em situações reais. Nas simulações, variou-se o número de pedidos entre 20 e 200, a saber: 20, 50, 80, 100, 150 e 200. Os pedidos foram divididos em 3 linhas de produtos; cada linha contendo 4 produtos cadastrados, dando um total de 12 produtos diferentes. A quantidade de pares de cada produto foi de 48, distribuídos entre a grade de forma aleatória. Esta quantidade de 48 foi estipulada sobre a média de pares, por pedido, informada pelas empresas de calçados.

Para todas as amostras citadas acima, respeitamos sempre a seguinte proporção:

- a) 10% de pedidos atrasados e de cliente especial;
- b) 20% de pedidos atrasados e de cliente normal;
- c) 30% de pedidos não atrasados e de cliente especial;
- e
- d) 40% de pedidos não atrasados e de cliente normal.

A menor produção diária entre as fábricas da APEMEBI é de 500 pares e a maior produção é de 1500 pares, e a média de produção entre todas as fábricas é de 1025 pares. Nesta avaliação, simulou-se o problema para uma fábrica de médio porte.

O horizonte de programação foi fixado em dois ciclos conforme explicação anterior. Será chamado de primeiro programa mestre, o programa que será expedido no quinto período após sua elaboração; e de segundo programa mestre aquele que será expedido no sexto período.

O modelo matemático é montado automaticamente pelo sistema PRODCAL e executado pelo *software* GAMS. Os resultados gerados pelos *software* GAMS realimentará o PRODCAL que apresenta uma interface mais amigável. O *software* GAMS é especialista em resolver problemas de programação matemática e o *solver* utilizado foi o CPLEX.

4.3.2 Resultados das simulações

Na primeira simulação com uma carteira de 20 pedidos, que corresponde quase à produção de dois dias de uma fábrica de médio porte, os MPSs gerados pelo modelo matemático e pelo método heurístico foram os mesmos. O tempo de processamento do modelo matemático foi de 1 segundo e do método heurístico, menos que 1 segundo. Portanto, considerou-se que a diferença entre os tempos de processamento é desprezível para um problema deste porte.

Na segunda simulação, 50 pedidos, o balanceamento da capacidade torna-se mais importante, pois agora existe excesso de demanda e, portanto, falta de capacidade de produção. Neste caso, o balanceamento é feito entre o corte, pesponto e montagem de um mesmo MPS, ou seja, corte, pesponto e montagem de itens que são expedidos juntos. Para o problema deste porte, o tempo de processamento também foi considerado desprezível para avaliação, pois ficou entre 1 e 4 segundos.

Para o primeiro MPS gerado, o resultado foi idêntico para o modelo matemático e para o método heurístico. Este MPS apresentou o maior desbalanceamento (aproximadamente 10%) entre o setor produtivo de pesponto e o setor de montagem. Com relação ao segundo MPS, o modelo matemático apresentou uma solução mais balanceada do que a solução apresentada pelo método heurístico. Notou-se que o método heurístico prioriza o atendimento dos clientes mais importantes do que o balanceamento da capacidade. O segundo MPS elaborado pelo modelo matemático deixou um desbalanceamento de aproximadamente 8% entre a capacidade do pesponto e da montagem. Já no programa gerado pelo método heurístico, a diferença foi de aproximadamente 29% entre o pesponto e a montagem. Outra diferença encontrada entre os dois segundos programas é o número de pedidos atendidos, o programa gerado pelo modelo

matemático atende a mais pedidos que o gerado pelo método heurístico.

Neste caso, uma pergunta deve ser respondida pelo gerente de produção na hora de assumir um programa ou outro, uma vez que ele deve decidir se deseja atender a somente um pedido de um cliente importante ou atender a vários pedidos de clientes menos importantes.

A terceira simulação foi realizada com uma carteira de 80 pedidos. Esta carteira corresponde à produção de 5 ciclos, que também corresponde ao tamanho da carteira de pedidos da maioria das empresas pertencentes à APEMEBI.

Neste problema, o modelo matemático apresentou deficiência com relação ao tempo de processamento. O modelo matemático demorou 2445 segundos, o que corresponde a 40 minutos e 45 segundos, enquanto que o método heurístico demorou 1 segundo.

O primeiro MPS gerado pelo modelo matemático e o gerado pelo método heurístico não foram idênticos, mas apresentaram qualidades semelhantes. Ambos os programas tiveram o mesmo desempenho com relação aos critérios: prazo de entrega, otimização da capacidade e prioridade conforme importância do cliente.

Já para o segundo MPS, o método heurístico obteve superioridade sobre o resultado do modelo matemático gerando uma solução melhor. Isto ocorreu porque o *software* GAMS foi utilizado para resolver a programação matemática com uma tolerância (*gap*) de 0,1% em relação à solução ótima. Comprovou-se este fato quando fixada a tolerância em 0%, com isto, o tempo de processamento subiu de 2445 para 8770 segundos, gerando um programa mestre exatamente igual ao elaborado pelo método heurístico. Este aumento no tempo de processamento do modelo matemático dificulta sua implementação em um caso real.

A quarta simulação foi realizada com uma carteira de 100 pedidos. Os resultados foram muito próximos ao da terceira simulação, exceto pelo fato do modelo matemático ter demorado aproximadamente 5 minutos e meio.

Não foram obtidos os resultados da quinta simulação (150 pedidos) e da sexta simulação (200 pedidos) pelo modelo matemático, porque os respectivos tempos de processamento foram superiores a 48 horas, e então

foram abortadas as execuções. Para estes casos, o método heurístico elaborou os dois programas com a mesma qualidade dos demais programas relatados anteriormente.

Observou-se que, se a heurística não fosse tão boa, poder-se-ia usar o modelo matemático, quebrando-se o problema em problemas menores, por exemplo, só o rodando para os primeiros 100 pedidos com maiores K_i .

Para avaliar os resultados sob o ponto de vista matemático, os resultados obtidos pelo método heurístico foram colocados no modelo matemático e processamos no *software* GAMS para calcular o mesmo x_0 . A Tabela 12 apresenta o valor da função objetivo (x_0) de cada simulação, tanto para o modelo matemático quanto para o modelo heurístico. Também, está apresentada na tabela a diferença entre esses valores e a porcentagem em que o resultado da função objetivo matemática é melhor que a do método heurístico.

Avaliando-se os resultados apresentados na Tabela 12, conclui-se que o método heurístico apresenta resultados muito próximos às soluções obtidas pelo modelo de alocação por pedido e maximização da capacidade produtiva.

5 Procedimentos para programação de operações

A proposta de programação de operações (terceiro componente do sistema de controle da produção) tem como objetivo principal contribuir para a melhoria da produtividade mantendo a simplicidade do sistema de coordenação de ordens PBC. Esta proposta não visa programar as ordens de produção de forma sistêmica, e sim, programar as ordens de produção de acordo com o setor produtivo a que ela pertence.

Na montagem, o encadeamento das ordens de produção deve ser feito de modo que minimize o tempo médio de espera dos pedidos utilizando a regra SPT do inglês *Shortest Processing Time* (quanto menor o tempo de montagem do pedido, mais no início da seqüência ficará o pedido). Com esta regra de seqüenciamento, a montagem utiliza uma quantidade menor de fôrmas o que reduz o investimento e aumenta o desempenho do setor de expedição.

Tabela 12. Comparativo de x_0 gerado pelo modelo matemático e método heurístico.

Problema	Valores de x_0		Δx_0	%
	Matemático	Heurístico		
20 (<i>gap</i> = 0,1%)	10.410,5177	10.410,5177	0	0
50 (<i>gap</i> = 0,1%)	30.515,2451	30.725,6720	210,4269	0,69
80 (<i>gap</i> = 0,1%)	53.130,2785	53.130,2451	-0,0334	-0,000001
80 (<i>gap</i> = 0%)	53.130,2451	53.130,2451	0	0
100 (<i>gap</i> = 0,1%)	67.240,2785	67.230,2451	10,0334	0,00015

Para o corte e o pesponto, a proposta consiste em seqüenciar as ordens de produção conforme o modelo de calçado: quanto mais difícil e suscetível a erros que comprometem a qualidade, mais no início do dia as ordens do modelo devem ser seqüenciadas já que no início do dia os operários estão mais descansados, dispostos e atentos.

6 Conclusões

Durante o desenvolvimento do trabalho, constatou-se a necessidade de uma hierarquia no processo de concepção do sistema de controle da produção iniciando-se pela escolha ou projeto de um sistema de coordenação de ordens de produção e compras, depois, pela definição ou criação do sistema de elaboração do MPS e, por último, pela definição de uma sistemática simples de seqüenciamento.

O sistema de elaboração do MPS, aplicado junto com o sistema PBC, adiciona uma grande melhora ao sistema

de PCP das empresas focalizadas, principalmente, em questões como o prazo de entrega e produtividade. O balanceamento da utilização da capacidade produtiva no MPS é interessante quando há excesso de demanda e, portanto, falta de capacidade produtiva.

Vale também destacar que o sistema desenvolvido (ou pelo menos parte de suas idéias) pode ser útil no desenvolvimento de sistemas para regular o fluxo de materiais em outros ramos de atividades com certas características similares, por exemplo, o ramo têxtil.

Embora o sistema tenha sido concebido para resolver um problema existente num aglomerado industrial formado por pequenas empresas calçadistas, o sistema foi implantado, por meio de uma pesquisa-ação, numa grande empresa de calçados que almeja a responsividade e os resultados foram extremamente auspiciosos. Em vista da riqueza de detalhes envolvidos no estudo, tal aplicação será relatada em outro artigo.

Proposal of a production control system for shoemakers operating in a resources-to-order or make-to-order product market environment

Abstract

This paper presents a proposal for controlling the production in shoe industries. It aims at regulating the material flow in small and medium enterprises operating in a Resources-to-Order (RTO) or Make-to-Order (MTO) product market environment with large variety of final products. For a better understanding of Production Planning and Control (PPC) problems in this context. Seven shoemakers in the city of Birigui-SP, Brasil were investigated. The proposal includes: (a) choosing an ordering system; (b) developing a method for elaborating the master production schedule (MPS); and (c) establishing procedures for sequencing the production orders.

Keywords: Production control. Master production schedule. PBC. Responsive manufacturing.

Referências bibliográficas

- BENDERS, J.; RIEZEBOUS, J. Period Batch Control: Classic, not outdated. **Production Planning and Control**, v. 13, n. 6, p. 497-506, 2002.
- BURBIDGE, J. L. **Period Batch Control**. Oxford: Clarendon Press, 1996.
- BURBIDGE, J. L.; HALSALL, J. Group technology and growth at Shalibane. **Production Planning & Control**, v. 5, n. 2, p. 213-218, 1994.
- CAMPBELL, G. M. Master production scheduling under rolling planning-horizons with fixed order intervals. **Decisions Sciences**, v. 23, n. 2, p. 312-331, 1992.
- CHU, S. C. K. A mathematical-programming approach towards optimized master production scheduling. **International Journal of Production Economics**, v. 38, n. 2-3, p. 269-279, 1995.
- FERNANDES, F. C. F.; GODINHO FILHO, M. Sistemas de Coordenação de Ordens: revisão, classificação, funcionamento e aplicação. **Gestão & Produção**, v. 14, n. 2, p. 337-352, 2007.
- FERNANDES, F. C. F.; MURARI, L. S. Diagnóstico dos Principais Problemas na Indústria de Calçados Femininos. **Revista Técnico**, v. 20, n. 3, seção artigos técnicos, maio de 2000.
- GODINHO FILHO, M.; FERNANDES, F. C. F. Paradigmas Estratégicos de Gestão da Manufatura (PEGEMs): elementos chave e modelo conceitual. **Gestão & Produção**, v. 12, n. 3, p. 333-346, 2005.
- GOLDRATT, E. M. Computerized Shop Floor Scheduling. **International Journal of Production Research**, v. 26, n. 3, p. 443-455, 1988.

- GUNDOGAR, E. A rule-based master production scheduling system for an electro-mechanical manufacturing company. **Production Planning & Control**, v. 10, n. 5, p. 486-492, 1999.
- HERER, Y. T.; SHALON, L. The Kanban assignment problem – A non-integral approach. **European Journal of Operational Research**, v. 120, n.2, p. 260-276, 2000.
- HILL, J. A.; BERRY, W. L.; LEONG, G. K.; SCHILLING, D. A. Master production scheduling in capacitated sequence-dependent process industrie. **International Journal of Production Research**, v. 38, n. 18, p. 4743-4761, 2000.
- HUANG, M.; WANG, D. Simulation study of conwip for a cold rolling plant. **International Journal Economics**, v. 54, n. 3, p. 257-266, 1998.
- KARACAPILIDIS, N. I.; PAPPIS, C. P. Production planning and control in textile industry: A case study. **Computers in Industry**, v. 30, n. 2, p. 127-144, 1997.
- LEWIS, H. S.; SWEUGART, J. R.; MARKLAND, R. E. Master scheduling in assenble-to-order enviroments – A capacitated multiobjctive lot-sizing model. **Decision Sciences**, v. 23, n. 1, p. 21-43, 1992.
- MACCARTHY, B. L.; FERNANDES, F. C. F. A multi-dimensional classification of production systems for the design and selection of production planning and control systems. **Production Planning & Control**, v. 11, n. 5, p. 481-496, 2000.
- METTERS, R.; VARGAS, V. A comparison of production scheduling policies on costs, service level, and schedule changes. **Production and Operations Management**, v. 8, n. 1, p. 76-91, 1999.
- RONEN, B.; ROZEN, E. The missing link between manufacturing strategy and production planning. **Intenational Journal of Production Research**, v. 30, n. 11, p. 2659-2681, 1992.
- SIPPER, D.; BULFIN, R. L. **Production planning, control and integration**. [S.I.]: McGraw-Hill, 1997. (series in industrial engineering and management science).
- SPEARMAN, M. L.; WOODRUFF, D. L.; HOPP, W. J. CONWIP: a pull alternative to kanban. **International Journal of Production Research**, v. 28, n. 5, p. 879-894, 1990.
- STEELE, D. C.; BERRY, W. L.; CHAPMAN, S. N. Planning and control in multi-cell manufacturing. **Decision Sciences**, v. 26, n. 1, p. 1-34, 1995.
- STEELE, D. C.; MALHOTRA, M. K. Fators affecting performance of period batch control systems in cellular manufacturing. **International Journal of Production Research**, v. 35, n. 2, p. 421-446, 1997.
- TOWILL, D. R. FORRIDGE – Principles of good practice in material flow. **Production Planning & Control**, v. 8, n. 7, p. 622-632, 1997.
- WALL, B.; HIGGINS, P.; BROWNE, J. A prototype system for short-term supply planning. **Computers in Industry**, v. 19, n. 1, p. 1-19, 1992.
- ZELENOVIC, D. M.; TESIC, Z. M. Period batch control and group technology. **International Journal of Production Research**, v. 26, n.3, p. 539-552, 1988.

Sobre os autores

Fábio Molina da Silva

Flávio César Faria Fernandes

Departamento de Engenharia de Produção – DEP,
 Universidade Federal de São Carlos - UFSCar,
 Rod. Washington Luís, Km 235, CEP 13565-905, São Carlos, SP, Brasil,
 e-mails: fabio@dep.ufscar.br; dfcf@power.ufscar.br

Agradecimentos: Os autores agradecem à FAPESP pelo suporte financeiro e às empresas do *cluster* estudado.

Recebido em 07/7/2006
 Aceito em 27/10/2008