

PROBLEMA DE DIMENSIONAMENTO DE LOTES MULTIESTÁGIO COM LIMITAÇÃO DE CAPACIDADE EM UMA INDÚSTRIA DE MÓVEIS

Walter Ribeiro da Rocha Junior

Instituto SENAI de Tecnologia Madeira e Mobiliário, Araçatuba, PR.
Pós-graduação em Engenharia de Produção, Faculdade de Engenharia, UNESP, Bauru.
Av. Eng. Luiz Edmundo Carrijo Coube, 14-01, Vargem Limpa, Bauru, SP.
walter.ribeiro82@gmail.com

Adriana Cristina Cherri

Departamento de Matemática, Faculdade de Ciências, UNESP, Bauru.
Av. Eng. Luiz Edmundo Carrijo Coube, 14-01, Vargem Limpa, Bauru, SP.
adriana@fc.unesp.br

Silvio Alexandre de Araujo

Departamento de Matemática Aplicada – DMAP – UNESP, São José do rio Preto, SP.
Rua Cristóvão Colombo, 2265, Jardim Nazareth, São José do Rio Preto, SP.
saraujo@ibilce.unesp.br

RESUMO

Neste trabalho propomos um modelo matemático para resolver um problema real de dimensionamento de lotes de produção em uma indústria de móveis. O problema proposto se caracteriza como multi itens, multiestágio com demanda dinâmica determinística. O modelo preliminar considera o dimensionamento dos lotes a serem fabricados e capacidade finita do sistema produtivo. Testes computacionais foram realizados utilizando um pacote computacional, em que os dados fornecidos pela empresa serviram de entrada para as análises. Os resultados preliminares apontam uma tendência por parte do modelo de antecipar a confecção dos pedidos, bem como, uma relação direta entre a minimização dos custos e a disponibilidade de capacidade.

PALAVRAS CHAVE. Dimensionamento de lotes, Indústria moveleira, Modelagem Matemática, PO na Administração e Gestão da Produção.

Problemas de dimensionamento de lotes e programação da produção em indústrias de papel e móveis

ABSTRACT

In this paper we propose a mathematical model to solve a real production lot sizing problem in a furniture industry. The proposed problem is characterized as multi item, multi stage with deterministic dynamic demand. The preliminary model considers the lot sizing and finite capacity of the production system. Computational tests were performed using a computational package, where data provided by the company were used as input for analysis. The preliminary results indicate a tendency by the model to anticipate orders and a direct relationship between the minimization of costs and the capacity availability .

KEYWORDS. Lot sizing, Furniture industry, Mathematical Modeling, OR in the Administration and Production Management.

1. Introdução

Os sistemas de manufatura são constantemente pressionados por melhores resultados. Esta pressão é colocada pela sociedade que, com cada vez mais opções, se recusa a arcar com os custos de ineficiências operacionais. Este cenário tem motivado inovações que se refletem, principalmente, em reduções de custos e melhorias de qualidade.

Nas organizações produtivas, dentro da administração da produção, o PCP (Planejamento e Controle da Produção) busca determinar quais e quantos produtos finais devem ser produzidos em cada um dos períodos do horizonte de planejamento. Seus objetivos principais são atender à demanda no prazo estabelecido, observando a capacidade finita dos recursos, com o menor custo possível. Este objetivo deve ser trabalhado observando todo o fluxo de materiais de forma sistêmica, desde a entrada da matéria prima até a entrega do produto acabado. Para tanto, três níveis hierárquicos de planejamento são desdobrados: estratégico de longo prazo, tático de médio prazo e operacional de curto prazo (Tubino, 2009). No nível estratégico de longo prazo, um plano de produção é estabelecido e o objetivo consiste em determinar a capacidade necessária para atender a demanda prevista. No nível tático são estabelecidos planos de médio prazo para a produção, obtendo-se PMP (Plano Mestre de Produção), por meio do qual se faz a conexão entre o planejamento estratégico e as atividades operacionais. A programação da produção no nível operacional, baseada no PMP, deverá definir quanto e quando comprar, fabricar ou montar cada item necessário à composição dos produtos acabados propostos pelo plano.

Neste fluxo de planejamento, decisões precisam ser tomadas de forma mais assertiva possível. Uma das escolhas mais significativas envolve a quantidade de produtos acabados que será demandada à fábrica através das ordens de produção num horizonte qualquer. Na literatura este assunto é referenciado como problema de dimensionamento de lotes (PDL), em que determinada demanda deve ser atendida com um número limitado de recursos, com um prazo restrito e ao menor custo possível (Araujo et al. 2014).

Os PDL (ou *Lot-Sizing Problem-LSP*) são amplamente estudados na literatura. Harris (1913) propõe um modelo considerando apenas um produto, sem restrição de capacidade, com demanda estacionária, horizonte infinito e períodos de tempos contínuos. Wagner e Whittin (1958) considera em seu trabalho a demanda dinâmica com horizonte de planejamento finito dividido em vários períodos discretos.

Em Trigeiro et al. (1989) é tratado o problema de dimensionamento de lotes, considerando um sistema monoestágio, com capacidade limitada, múltiplos itens, e com os tempos e custos de preparações. Para resolução, foi utilizado um método heurístico baseado em relaxação lagrangiana. Com o objetivo de lidar com as complexidades características dos problemas de dimensionamento de lotes, Mercé e Fontan (2003) consideram o problema de dimensionamento de lotes monoestágio com múltiplos itens, restrições de capacidade e possibilidade de atraso na entrega de itens, além da inserção de restrição de quantidade mínima de peças, bem como, tempos e custos de preparações não nulos. Jans e Degraeve (2004) abordam o problema de dimensionamento de lote monoestágio com múltiplos itens, restrições de capacidade, tempos e custos de preparações não nulos e estoque inicial não nulo.

Considerando problemas multiestágio, o trabalho de Billington et al. (1983) propõe um procedimento de compressão do problema sem perda de otimalidade, em que máquinas com capacidade ociosa foram desconsideradas na restrição de capacidade do modelo. Clark e Armentano (1995) consideram o problema de dimensionamento de lotes multiestágio, considerando os tempos e custos de preparações não nulos, levando em conta quatro tipos distintos de estruturas de produto e lead-time não nulo para todos os itens. No trabalho de Almeder (2010) foi tratado o problema de dimensionamento de lotes multiestágio com limitação de capacidade, tempos e custos de preparações não nulos e possibilidade de utilização de hora extra

Com o objetivo de um melhor entendimento sobre o problema, Karimi (2003) considera os problemas de dimensionamento de lotes de monoestágio, suas variantes e abordagens de solução, trazendo a luz alguns fatores que afetam a formulação e a complexidade dos problemas. Os fatores citados são: Número de estágios, Número de itens, Capacidade, Demanda, Tempo e

custo de ajuste e Atraso.

Revisões em PDL podem ser encontradas, por exemplo, em Drexl e Kimms (1997), Jans e Degraeve (2008), Robison, et al. (2009) e Buschkühl et al. (2010), entre outros. Aplicações de problemas de dimensionamento de lotes ao setor moveleiro podem ser encontradas em Gramani e França (2006), Gramani et al. (2009), Silva et al. (2007), Gramani et al. (2011), Santos et al. (2011), Alem e Morabito (2012, 2013) e Vanzela et al. (2013).

Este trabalho tem por objetivo propor um modelo matemático para resolver um problema real de dimensionamento de lotes em uma indústria de móveis seriados na busca de melhor relação no *trade-off*: custos de estoque x custos de preparação x nível de serviço. Testes computacionais foram realizados com dados fornecidos pela empresa.

Na Seção 2 é feita uma descrição do problema estudado. O modelo matemático proposto é apresentado na Seção 3. Na Seção 4, testes computacionais são apresentados juntamente com a análise das soluções. A Seção 5 destina-se as conclusões deste trabalho.

2. Descrição do Problema

O problema estudado envolve a dinâmica de planejamento e programação da produção em uma indústria de móveis seriados da região de Araçongas-PR. As necessidades são geradas a partir pedidos firmados por representantes distribuídos em várias regiões do país. O horizonte engloba um período de cinco dias úteis, sendo que a informação é gerada com dois períodos de antecedência e o prazo firmando com o cliente em trinta dias corridos.

Uma vez aprovados os pedidos pelo departamento financeiro, estes são liberados para atendimento. Posteriormente, estes são agrupados em função da localização geográfica do cliente, configurando o que se chama por “carga” no jargão do setor. Esta estratégia reflete uma intenção de sincronizar sua operação com o sistema de distribuição. O agrupamento definirá o prazo de entrega dos produtos correspondentes da produção para o setor de expedição, quando necessário. Paralelamente, um levantamento da disponibilidade em estoque por produto demandado é realizado com o apoio do software ERP (*Enterprise Resource Planning*). Uma vez identificadas as necessidades, são definidos quais produtos e em quais quantidades os mesmos devem ser processados. A decisão envolve o saldo de estoque atual e a demanda associada a um nível de estoque estratégico a ser mantido pela organização para absorção de possíveis variações de demanda. Esta última decisão envolve determinado grau de risco, sendo levado em consideração a vivência do analista e projeções baseados na experiência e percepção. A Figura 1 apresenta um relatório das necessidades de produtos para um planejamento de produção.

Figura 1: Relatório de necessidades para o planejamento ad produção. Fonte: Empresa.

POSICÃO ESTOQUE / PROGRAMAÇÃO PRODUÇÃO PEDIDOS PREVISTOS PRAC		Emissão: 15/04/15 05:47:14		Página: 1			
		PERÍODO DE 01/01/2000 Á 31/12/2099					
Produto	Revestimento	Estoque	Reservado	Cargas	Pedidos	Saldo	Produção
2000092 KIT COZ ESPELHOS 60X220	552 CINZA	0,00	0,00	0,00	55,00	-55,00	0,00
2000100 KIT COZINHA ANA DE PORTAS	695 BP BRANCO / CINZA # N	-45,00	0,00	0,00	103,00	-103,00	600,00
Lote Produção: 016379		07/04/2015		600,00			
2000108 PE PLÁSTICO 70MM BAIXA	552 CINZA	-970,00	0,00	0,00	0,00	-970,00	0,00
2000198 KIT PIS DE UNDO	552 CINZA	-213,00	0,00	0,00	1051,00	-1764,00	0,00
2000202 PANELEIRO DUPLO C/ NICHOS 3 PTS	519 TX TEKA FOSCO / BROWN	121,00	0,00	122,00	121,00	-122,00	0,00
2000203 PANELEIRO DUPLO C/ NICHOS 3 PTS	567 BRANCO / BP LINHEIRO Q	-18,00	0,00	20,00	30,00	46,00	0,00
2000202 PANELEIRO DUPLO C/ NICHOS 3 PTS	587 BRANCO / BP NOGAL TER	1,00	0,00	23,00	44,00	66,00	0,00
2000204 ARMARIO AEREO 1 PT CINCHO 89MM	115 TX NOGAL FOSCO	0,00	0,00	0,00	1,00	-1,00	0,00
2000204 ARMARIO AEREO 1 PT CINCHO 89MM	526 BRANCO	-2,00	0,00	36,00	38,00	-57,00	240,00
Lote Produção: 016475		10/04/2015		240,00			
2000205 ARMARIO REFRIGERADOR 89MM	519 TX TEKA FOSCO / BROWN	-18,00	0,00	122,00	121,00	-259,00	-360,00
Lote Produção: 016478		10/04/2015		360,00			
2000206 ARMARIO AEREO 1 PT CINCHO 1200MM	505 TX TEKA FOSCO	108,00	0,00	135,00	44,00	-71,00	20,00
Lote Produção: 016448		09/04/2015		20,00			
2000206 ARMARIO AEREO 1 PT CINCHO 1200MM	526 BRANCO	-25,00	0,00	56,00	177,00	-268,00	900,00
Lote Produção: 016529		13/04/2015		900,00			
2000208 BALCÃO 2 PTS 2 GAV 69MM	567 BRANCO / BP LINHEIRO Q	0,00	0,00	0,00	15,00	-15,00	0,00
2000210 BALCÃO COM TAMPO	519 TX TEKA FOSCO / BROWN	223,00	0,00	294,00	689,00	-740,00	0,00

O sistema produtivo da empresa possui um layout funcional, onde as máquinas são agrupadas em função de suas características e os componentes fluem entre estes agrupamentos em lotes (Black, 1998). Cada etapa é precedida de um estoque intermediário com a finalidade de absorver problemas de sincronismo. O fluxo segue a sequência:

1. **Corte:** Nesta etapa, painéis de MDF (*Medium-Density Fiberboard* - Chapa de fibra de madeira de média densidade) ou MDP (*Medium Density Particleboard* - Painel de Partículas de Média Densidade) são cortados segundo a estrutura de peças necessárias para cada produto num equipamento chamado Seccionadora. Os cortes são realizados em pacotes de até quatro painéis simultaneamente e em lotes correspondentes. Após esta etapa, os componentes são transportados em pilhas de até 800mm de altura, através de roletes que interligam os processos.
2. **Borda:** Neste processo os componentes passam por um acabamento lateral chamado de borda. Este acabamento pode ser de diversos materiais, tendo em sua superfície a mesma cor ou padrão do que será aplicado na superfície do móvel. O equipamento utilizado nesta fase é a coladeira de borda;
3. **Furação:** Aqui os componentes furados conforme necessidade construtiva definido no projeto do produto. Nesta fase, em função de algumas características dos equipamentos, pode representar significativo tempo de ajuste. O equipamento empregado para esta tarefa é a furadeira múltipla;
4. **Pintura:** Neste processo, os componentes recebem a cobertura que lhes atribui a característica de imitação de madeira percebido pelo cliente final. Todos os componentes passam por esta etapa, sendo comum a estratégia de cores diferentes para a face do componente que fica para o lado externo do produto montado (mais elaborado) da face que fica para o lado interno do produto montado (mais simples). Esta estratégia permite ao sistema ter estrategicamente equipamentos dedicados para cada situação.
5. **Embalagem:** Após pintados, os componentes são armazenados provisoriamente em trilhos transportadores, onde aguardam a complementação dos outros componentes para o processo de embalagem. Após todos os componentes estarem concluídos, estes são levados para uma esteira transportadora, onde em um arranjo linear, os componentes são agregados em sequência previamente definida, de forma a compor um produto desmontado. É comum um móvel ser constituído de vários volumes.

Após esta condição, os volumes são conduzidos para o estoque ou para a expedição, segundo a necessidade do momento.

Para resolver este problema, um modelo matemático foi proposto. Com este modelo tentamos envolver toda a problemática apresentada pela empresa e descrita nesta seção.

3. Modelo proposto

O PDL estudado envolve a programação de pedidos (Furtado et al. 2011 e Furtado 2012) em um sistema multi itens, multiestágio, de demanda determinística, com horizonte finito, capacitado, com custo de preparo simples, com penalizações de atrasos nos pedidos e custo de estoques.

Índices:

$t = 1, 2, \dots, T$: períodos de tempo;

$p = 1, 2, \dots, P$: pedidos (composto por um conjunto de produto);

$i = 1, 2, \dots, m$: produtos (exemplo: armário, balcão, paineleiro, etc.);

$l = 1, 2, \dots, L$: peças (itens que compõem um produto, exemplo: porta, prateleira, etc.).

Parâmetros:

sc_{it} : custo de preparação da fábrica para a produção do produto i no período t ;

vc_{it} : custo de fabricação do produto i no período t ;

hc_{it} : custo unitário de estoque do produto i no período t ;

hl_t : custo unitário de estoque da peça l no período t ;

HP_{pt} : custo por atrasar o pedido p no período t ;

DP_{pt} : assume o valor 1 se o pedido p deve ser entregue no período t , 0 caso contrário;

a_{ip} : quantidade necessária do produto i para compor o pedido p ;

g_{li} : quantidade necessária da peça l para compor uma unidade do produto i ;

CP_t : quantidade máxima de produtos a serem produzidos no período t ;

SI_i : quantidade de produtos i em estoque no período 0;

Variáveis:

XP_{pt} : variável binária assume valor 1 se o pedido p é concluído no período t e 0 caso contrário;

SP_{pt}^+ : variável binária assume valor 1 se o pedido p é estocado do período t para o período $t + 1$ e 0 caso contrário;

SP_{pt}^- : variável binária assume o valor 1 se o pedido p é atrasado no período t e 0 caso contrário;

X_{it} : indica a quantidade do produto i produzida no período t ;

S_{it} : unidades do produto i estocadas no período t ;

Y_{it} : variável binária assume valor 1 se há produção do produto i no período t e 0, caso contrário;

XL_{it} : unidades produzidas da peça l no período t ;

SL_{it} : unidades estocadas da peça l no período t ;

Modelo de dimensionamento de lotes multiestágio com restrição de capacidade:

$$\text{Min } f = \sum_{i=1}^m \sum_{t=1}^T sc_{it} Y_{it} + \sum_{i=1}^m \sum_{t=1}^T hc_{it} S_{it} + \sum_{i=1}^m \sum_{t=1}^T vc_{it} X_{it} + \sum_{l=1}^L \sum_{t=1}^T hl_t SL_{lt} + \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T HP_{pt} SP_{pt}^- \quad (1)$$

Sujeito a:

$$SP_{pt}^+ - SP_{pt-1}^- + XP_{pt} = DP_{pt} + SP_{pt}^+ - SP_{pt}^- \quad p = 1, 2, \dots, P; t = 1, 2, \dots, T \quad (2)$$

$$S_{it-1} + X_{it} = \sum_{p=1}^P a_{ip} XP_{pt} + S_{it} \quad i = 1, 2, \dots, m; t = 1, 2, \dots, T \quad (3)$$

$$SL_{lt-1} + XL_{lt} = \sum_{i=1}^m g_{li} X_{it} + SL_{lt} \quad l = 1, 2, \dots, L; t = 1, 2, \dots, T \quad (4)$$

$$X_{it} - Y_{it} M \leq 0 \quad i=1,2,\dots, m; t=1,2,\dots,T \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^m X_{it} \leq CP_t \quad i = 1, 2, \dots, m; t = 1, 2, \dots, T \quad (6)$$

$$X_{it}, S_{it}, XL_{lt}, SL_{lt} \in \mathbf{R}_+, (S_{i0} = SI_i, SL_{l0} = 0) \quad i = 1, 2, \dots, m; t = 1, 2, \dots, T; l = 1, 2, \dots, L \quad (7)$$

$$Y_{it}, XP_{pt}, SP_{pt}^+, SP_{pt}^- \in \{0,1\}, (SP_{p0}^+ = 0, SP_{p0}^- = 0) \quad i = 1, 2, \dots, m; p = 1, 2, \dots, P; t = 1, 2, \dots, T \quad (8)$$

No modelo (1)-(8), a função objetivo (1) minimiza os custos da operação, considerando a produção e preparação nas máquinas, estocagem de produtos e peças e penalidades por atrasos nos pedidos. As restrições (2), fazem o balanço dos pedidos considerando a possibilidade de atrasos. As restrições (3) fazem o balanço de produção dos produtos e considera a demanda necessária para compor os pedidos, considerando a possibilidade de estoque residual de planejamentos em períodos anteriores. As restrições (4) fazem o balanço de produção das peças que irão compor os produtos. As restrições (5) asseguram que os custos de preparação são considerados quando existe produção de determinado produto. O parâmetro M assume um valor muito grande e garante a qualidade da restrição. As restrições (6) limitam a ocupação da capacidade da fábrica em unidades produzidas por período. Por fim, as restrições (7) e (8) referem-se aos domínios das variáveis.

Para verificar o desempenho do modelo proposto, alguns testes computacionais foram realizados com problemas reais fornecidos pela empresa. Os testes são apresentados na Seção 5.

4. Testes Computacionais Iniciais

O modelo proposto foi implementado utilizando a linguagem de programação AMPL (*A Mathematical Programming Language*) e resolvido com o solver CPLEX 12.5.0. Os testes foram realizados em um equipamento com processador Intel I5 com 4 GB de memória RAM.

Testes computacionais foram realizados com 2 exemplos cujas demandas reais foram cedidas pela empresa. Os pedidos correspondem à décima primeira semana de trabalho de 2015. Para o exemplo 1, selecionamos do mix da empresa, apenas três produtos dos cento e vinte quatro comercializados atualmente. Esta estratégia reduziu o número de pedidos contemplados a onze ocorrências. Também não foram considerados estoques iniciais.

Na

Tabela 21 pode-se observar a relação binária para cada um dos onze pedidos com relação aos seus prazos entre cada um dos cinco períodos, ou seja, sempre que no cruzamento das linhas com as colunas encontramos o valor zero, não há incidência de que este pedido tenha como prazo este período. Caso o valor um ocorra neste cruzamento, indica que este pedido deve ser atendido neste período.

Tabela 1: Relação entre pedidos e períodos de entregas

		Períodos				
		1	2	3	4	5
Pedidos	1	1	0	0	0	0
	2	0	0	0	1	0
	3	0	0	0	0	1
	4	0	0	0	1	0
	5	0	1	0	0	0
	6	0	0	0	1	0
	7	0	0	0	1	0
	8	0	0	1	0	0
	9	0	1	0	0	0
	10	1	0	0	0	0
	11	0	0	1	0	0

Na tabela 2 são expostas as relações entre os pedidos versus as quantidades de produtos para cada um dos três produtos contemplados na análise.

Tabela 2: Relação entre pedidos e produtos.

		Produtos		
		1	2	3
Pedidos	1	100	80	120
	2	30	100	0
	3	50	0	70
	4	0	190	30
	5	20	0	0
	6	0	30	90
	7	0	130	0
	8	50	0	60
	9	0	0	60
	10	40	20	0
	11	120	0	0

Para todos os testes, o custo de fabricação dos produtos foi definido como padrão no valor de R\$ 553,42. Este valor é resultado de uma média dos valores fornecidos pela empresa. Para os custos de estoque dos produtos foram considerados os custos médios de manutenção de estoque por peça armazenada (R\$ 3,90) adicionado ao custo de oportunidade, em que foi adotado a remuneração da poupança como valor de referência (0,518%), totalizando o valor de R\$ 4,00 como custo de estoque dos produtos. O custo de estoque das peças foi estimado em R\$ 15,00. Este valor foi estimado para forçar o modelo a evitar esta condição em função de ser uma alternativa não desejada pela empresa no momento.

O custo por atraso foi definido arbitrariamente em 1.000.000,00, sendo seu dimensionamento correto em função da importância estratégica de cada pedido, uma oportunidade para continuidade desta pesquisa. O custo de preparação é definido por cálculos apresentados na

Tabela 3. Na primeira coluna estão listados todos os equipamentos presentes na linha de produção. Na coluna seguinte a quantidade de equipamentos envolvidos na linha. O tempo médio ocupado com ajustes é sinalizado, em que a quantidade de ajustes necessária para a fabricação de cada produto gera na coluna seguinte o tempo médio necessário para cada ajuste. Este tempo total é também multiplicado por um valor fixo por minuto de toda estrutura fabril disponível pela empresa, gerando o custo por ajuste considerado no modelo. O valor por minuto de toda estrutura fabril disponível pela empresa foi definido por uma relação simples entre o custo fixo da empresa.

Tabela 3: Estratégia para formação do custo de preparação.

Equipamentos	Máquinas na linha	Tempo médio por ajuste (min.)	Quantidade média de ajustes (peças) por produto	Tempo total gasto pela linha (min.)	Custo médio da estrutura produtiva por minuto	Custo de ajuste (R\$)
Seccionadora	1	2,1	1	2,1	36,07	
Furadeira Múltipla	4	2,5	16	160		
Coladeira de borda	4	3,2	9	115,2		
Linha de pintura	2	14	1	28		
Linha de embalagem	1	12	1	12		
Total	12	33,8	28	317,3		

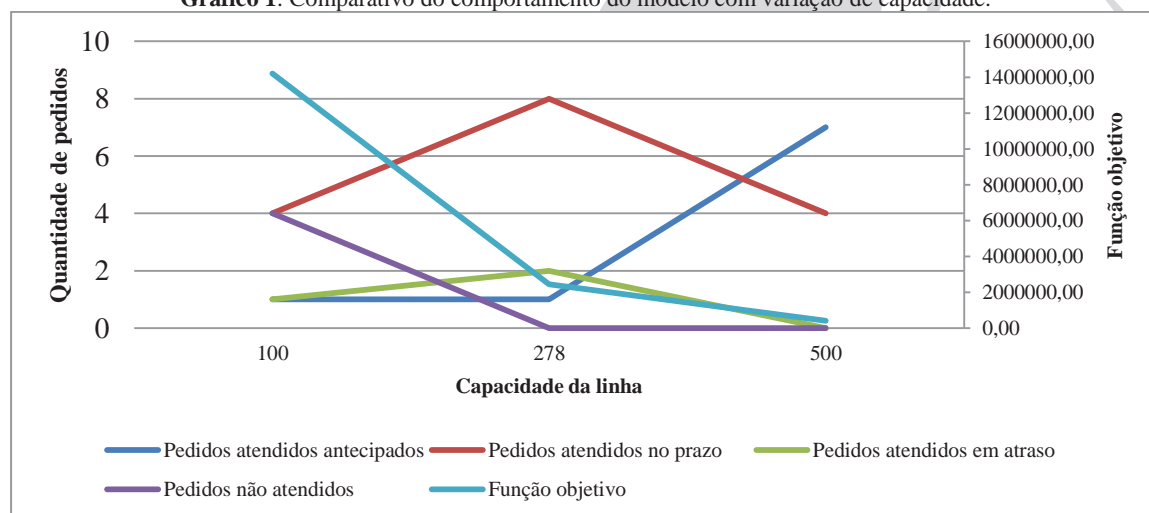
Para fins de comparação do comportamento do modelo, foram utilizadas três instancias com variação da capacidade produtiva (Tabela 4). O valor para capacidade foi definido (foi definido ou é um dado da empresa, se é da empresa, tem q deixar claro q é) em 278 peças por período, sendo esta a média da quantidade de peças nos pedidos contemplados na análise. Os valores de capacidade 100 e 500 foram arbitrários e definido pelos autores para efeito de comparação.

Os resultados dos testes computacionais para o primeiro exemplo são apresentados na Tabela 4 e indicam uma forte relação entre a capacidade de produção e a solução apresentada pelo modelo. Na situação de menor capacidade (100), apenas um pedido é antecipado, enquanto quatro pedidos são atendidos no prazo, um pedido atendido com atraso e cinco pedidos não são atendidos. Considerando capacidade 278 peças por período, um pedido é antecipado, oito pedidos são atendidos no prazo, dois pedidos atendidos com atraso, sendo que nenhum pedido deixa de ser atendido. Estabelecido 500 peças por período como capacidade, sete dos pedidos são antecipados, sendo que o pedido cinco, que havia sido antecipado nas duas situações anteriores, não permaneceu nesta condição neste grupo. Quatro pedidos são atendidos no prazo e nenhum pedido se apresenta nos grupos em atraso e não atendidos. Com relação ao custo total de produção, observamos uma redução na medida em que a capacidade é dilatada (Gráfico 1). Esta condição está relacionada com a penalização por atraso, na medida em que uma capacidade maior permite maiores possibilidade de combinações para o modelo reduzir esta condição.

Tabela 4: Resultados da carteira de pedidos em função da capacidade disponível – exemplo 1.

Capacidade	Pedidos atendidos antecipados	Pedidos atendidos no prazo	Pedidos atendidos em atraso	Pedidos não atendidos	Função objetivo
100	5	2; 8; 9; 10	11	1; 3; 4; 6; 7	14206425,07
278	5	2; 3; 6; 7; 8; 9; 10 ;11	1; 4	0	2454638,89
500	2; 3; 4; 6; 7; 8 ;11	1; 5; 9; 10	0	0	418383,86

Gráfico 1: Comparativo do comportamento do modelo com variação de capacidade.



Como resultado das análises, podemos perceber tendência por parte do modelo de antecipar a confecção dos pedidos, sendo esta uma possível fragilidade a ser estudada na continuidade dos estudos do problema. É possível também perceber uma relação direta entre o resultado da função objetivo (minimizar custo) e a disponibilidade de capacidade, em que a flexibilidade de possibilidades permite ao modelo um melhor arranjo para atendimento dos pedidos.

O exemplo 2 considera um mix maior de produto (72 possibilidades) e um estoque inicial de produtos. O número de pedidos também foi incrementado de onze para 23 pedidos, sendo esta toda a demanda real para a linha de roupeiros da empresa foco do estudo. Na Tabela 5 também há a relação binária para cada um dos pedidos com relação aos seus prazos entre cada um dos cinco períodos.

Tabela 5: Relação de pedidos e períodos de entrega.

		Períodos							Períodos				
		1	2	3	4	5			1	2	3	4	5
Pedidos	1	1	0	0	0	0	Pedidos	13	0	0	0	1	0
	2	0	1	0	0	0		14	0	0	1	0	0
	3	0	0	0	1	0		15	0	0	0	0	1
	4	0	0	0	1	0		16	0	0	1	0	0
	5	0	1	0	0	0		17	0	0	1	0	0
	6	1	0	0	0	0		18	0	0	0	0	1
	7	0	0	0	1	0		19	0	0	0	1	0
	8	0	0	0	1	0		20	0	0	0	0	1
	9	0	0	1	0	0		21	0	0	1	0	0
	10	0	1	0	0	0		22	0	1	0	0	0
	11	0	0	0	0	1		23	0	0	0	1	0
	12	0	0	0	0	1							

Neste exemplo as relações entre os pedidos versus as quantidades de produtos foram omitidas devido à dimensão da tabela. Os parâmetros de custos de ajustes, custos de produção e custos de atraso foram os mesmos definidos para o exemplo 1.

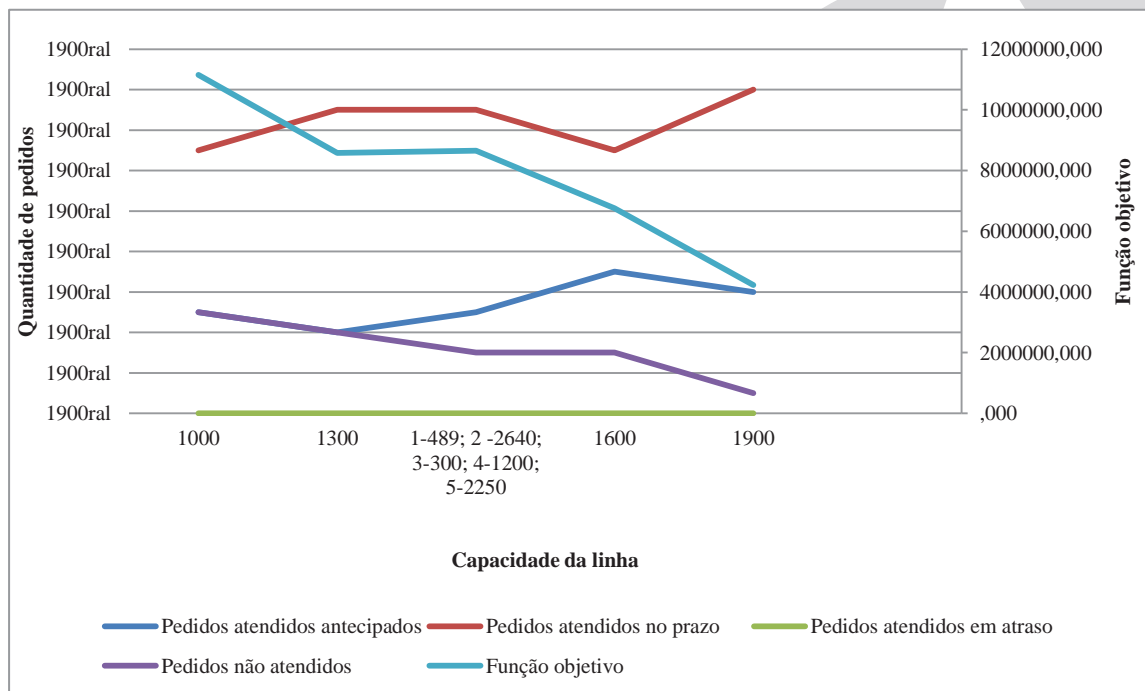
Na Tabela 6 são apresentados os resultados obtidos para o exemplo 2. Na coluna capacidade, consideramos a capacidade em peças dentro da programação realizada pela empresa em função da demanda utilizada na análise. Na linha 3 desta tabela, a representação da capacidade 1-489, por exemplo, corresponde ao primeiro período e a quantidade de peças que a empresa dimensionou para atendimento da demanda. Os valores 1000, 1300, 1600 e 1900 foram arbitrariamente definidos para observação do comportamento do modelo quando a capacidade é reduzida ou incrementada. Quando a capacidade de 1000 unidades é considerada, cinco pedidos são executados com adiantamento, treze pedidos são realizados no prazo e cinco pedidos não são atendidos.

Considerando 1300 unidades de capacidade, a quantidade de pedidos antecipados é reduzida para quatro, os pedidos atendidos no prazo aumentam para quinze e os pedidos não atendidos caem para quatro. Considerando a capacidade definida na programação utilizada pela empresa, cinco pedidos são adiantados, quinze pedidos são atendidos no prazo e apenas três pedidos não são atendidos. Utilizando uma capacidade de 1600 unidades por dia, os pedidos antecipados alcançam a quantidade de sete pedidos, os pedidos no prazo somam treze e apenas três pedidos não atendidos. Por fim, definindo a capacidade em 1900 peças por dia, seis pedidos são executados antecipadamente, dezesseis pedidos são executados no prazo e apenas um pedido não é atendido.

Considerar estoques iniciais alterou o desempenho do modelo, permitindo que alguns pedidos fossem atendidos sem o acionamento do sistema produtivo em alguns casos. Entretanto, o ponto mais significativo é a representação da realidade nas práticas adotadas pelo departamento de PCP (Planejamento e Controle da Produção) das empresas do setor.

Tabela 6: Resultados da carteira de pedidos em função da capacidade disponível – exemplo 2.

Capacidade	Pedidos antecipados	Pedidos atendidos no prazo	Pedidos atendidos em atraso	Pedidos não atendidos	Função objetivo
1000	8; 9; 10; 16; 22	1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 12; 14; 15; 19; 20; 21	-	11; 13; 17; 18; 23	11155825,79
1300	2; 9; 19; 21	1; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 10; 12; 14; 15; 16; 17; 20; 22	-	11; 13; 18; 23	8583155,58
1-489; 2-2640; 3-300; 4-1200; 5-2250	3; 4; 16; 19; 21	1; 2; 5; 6; 7; 8; 9; 10; 12; 13; 14; 15; 18; 20; 22	-	11; 17; 23	8654031,68
1600	9; 3; 14; 16; 19; 21; 22	1; 2; 4; 5; 6; 7; 8; 10; 12; 13; 15; 17; 20	-	11; 18; 23	6760957,48
1900	2; 7; 9; 16; 21; 22	1; 3; 4; 5; 6; 8; 10; 12; 13; 14; 15; 17; 18; 19; 20; 23	-	11	4228686,65

Gráfico 2: Comportamento do atendimento dos pedidos segundo proposição do modelo.


Com Gráfico 2 podemos comparar o comportamento do modelo em função das variações da situação real do período de planejamento analisado. O número de pedidos antecipados sofre oscilações em função das variações na capacidade. Os pedidos atendidos no prazo se comportam de forma quase que inversa quando comparados aos pedidos antecipados, sugerindo uma forte relação entre as duas situações, ou seja, os pedidos estão sendo transferidos entre as duas situações dependendo das alternativas de distribuição as quais o modelo tem acesso em função da ausência ou excesso de capacidade. Com relação aos pedidos não atendidos, o valor da função

objetivo sinaliza uma tendência de queda em função do aumento da capacidade, com exceção da parte central do intervalo de capacidade. Este resultado está atrelado a maior leque de alternativa por parte do modelo para acomodação dos pedidos, permitindo lotes maiores e a consequente redução das penalidades por atraso.

5. Conclusão e proposta futuras

Neste trabalho propomos um modelo matemático para resolver um problema real de planejamento e programação da produção em uma indústria de móveis seriados da região de Arapongas, Paraná. O objetivo consiste em encontrar a melhor relação no *trade-off*: custos de estoque x custos de preparação x nível de serviço.

O modelo proposto foi implementado utilizando a linguagem de programação AMPL (*A Mathematical Programming Language*) e resolvido com o solver CPLEX. Alguns testes computacionais foram realizados com dados fornecidos pela empresa.

Os testes preliminares apresentados são promissores. Alguns resultados preliminares apontam uma tendência por parte do modelo em antecipar a confecção dos pedidos, bem como relação direta entre o resultado da função objetivo (minimizar custo) e a disponibilidade de capacidade da empresa. Considerar estoques iniciais aumentou a capacidade do modelo de representar a realidade da programação das empresas do setor. Apesar da utilização de dados reais fornecidos pela empresa foco do estudo, os testes apresentados ainda contemplam fase de análise e teste do modelo proposto. Vários testes ainda serão realizados e ajustes no modelo ainda poderão ser propostos de modo a envolver toda a problemática apresentada das empresas de móveis, como por exemplo, a capacidade finita dos processos e projeções de estoques para atendimento de sazonalidades características do setor. Os resultados obtidos a partir do modelo proposto também serão comparados com os valores apresentados pela empresa.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio da FAPESP (Processo nº 2014/01203-5), CNPq (Processo nº 477481/2013-2) e SENAI Paraná.

Referências

- Alem Junior, D. J.; Morabito, R.** (2012), Production planning in furniture settings via robust optimization. *Computers and Operations Research* 39 (2): 139-150.
- Alem Junior, D. J.; Morabito, R.** (2013), Risk-averse two-stage stochastic programs in furniture plants. *OR Spectrum* 35: 773-806.
- Almeder, C.** (2010), A hybrid optimization approach for multi-level capacitated lot-sizing problems. *European Journal of Operational Research*,. 200, 590-606.
- Araujo, S. A.; Rangel, S.** (2014), Matemática Aplicada ao Planejamento da Produção e Logística. São Carlos: [s.n.],. p. 75. ISBN 2236-5915.
- Black, J.T.** (1998), O Projeto da Fábrica do Futuro. Porto Alegre: Boockman.
- Billington, P. J.; McClain, J. O.; Thomas, I. J.** (1983), Mathematical programming approaches to capacity-constrained mrp systems: Review, formulation and problem reduction. *Management Science*, v. 29, n. 10, p. 1126-1141.
- Buschkühl, L., Sahling, F., Helber, S. e Tempelmeier, H.** (2010), Dynamic capacitated lot sizing problems: a classification and review of solution approaches, *OR Spectrum*, 32, 231–261.
- Clark, A. R.; Armentano, v. A.** (1995), The application of valid inequalities to the multi-stage lot-sizing problem. *Computers & Operations Research*, v. 22, n. 7, p. 669-680.
- Drexel, A.; Kimms, A.** (1997), Lot sizing and scheduling - survey and extensions. *European Journal of Operational Research*, v. 99, p. 221-235.

- Furtado, M.G.S.; Camargo, V.; Toledo, F.** (2011), Um modelo para o problema de planejamento da produção de pedidos em fundições de pequeno porte. *Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*. Ubatuba. p. 1255-1262.
- Furtado, M.G.S.** (2012), Problema de planejamento da produção de pedidos em fundições de pequeno porte. *Dissertação de mestrado*. São Carlos.
- Gramani, M. C. N.; França, P. M.** (2006), The combined cutting stock and lot sizing problem in industrial process. *European Journal of Operational Research* 74 (1): 509-521.
- Gramani, M. C. N.; França, P. M.; Arenales, M.N.** (2009), A Lagrangian relaxation approach to a coupled lot-sizing and cutting stock problem. *International Journal Production Economics* 119: 219-227.
- Gramani, M. C. N.; França, P. M.; Arenales, M. N.** (2011), A linear optimization approach to the combined production planning model. *Journal of the Franklin Institute* 348: 1523-1536.
- Jans, R.; Degraeve, Z.** (2004), Improved lower bounds for the capacitated lot sizing problem with setup times. *Operations Research Letters*, v. 32, n. 11, p. 185-195.
- Jans, R.; Degraeve, Z.** (2008), Modelling industrial lot sizing problems: a review. *International Journal of Production Research*, v. 46, p. 1619-1643.
- Karimi, B.; Fatemi, G.; S. F. & Wilson, J. M.** (2003), The capacitated lot sizing problem: a review of models and algorithms. *Omega*, v. 31, p. 365-378.
- Krause, T. R.** (1995), Employee-driven systems for safe behavior: integrating behavioral and statistical methodologies. Van Nostrand Reinhold. New York.
- Mercé, C.; Fontan, C.** (2003), MIP-based heuristics for capacitated lotsizing problems. *International Journal of Production Economics*, v. 85, n. 1, p. 97-111.
- Robinson, P.; Narayananb, A.; Sahinc, F.** (2009), Coordinated deterministic dynamic demand lot-sizing problem: a review of models and algorithms. *Omega*, v. 37, p. 3-15.
- Santos, S. M. P. G.; Araujo, S. A.; Rangel, S.** (2011), Integrated cutting machine programming and lot sizing in furniture industry. *Pesquisa Operacional para o desenvolvimento*, p. 1-17.
- Silva, C. T. L.; Alem Junior, D. J.; Arenales, M. N.** (2007), A combined cutting stock and lot-sizing problem in the small furniture industry. *International Conference on Operational Research for Development-ICORD VI*.
- Trigeiro, W. W.; Thomas, I. J.; McClain, J.** (1989), Capacitated lot sizing with setup times. *Management Science*, v. 35, n. 3, p. 353-366.
- Tubino, D. F.** (2009), Planejamento e controle da produção: teoria e prática. 2. ed. São Paulo: Atlas.
- Vanzela, M.; Rangel, S.; Araujo, S. A.** (2013), The Integrated Lot Sizing and Cutting Stock Problem in a Furniture Factory. In: *11th IFAC Workshop on Intelligent Manufacturing Systems*, São Paulo. Intelligent Manufacturing Systems, 2013. v. 11. p. 390-395.
- Wagner, H. M.; Whittin, T. M.** (1958), Dynamic version of the economic lot size model. *Management Science*, v.5, n.1, p.89 - 96.