

**PROBLEMAS DE DIMENSIONAMENTO DE LOTES E
PLANEJAMENTO DE PEDIDOS APLICADOS A UMA INDÚSTRIA
MOVELEIRA¹**

**Walter Ribeiro da Rocha Junior^a, Adriana Cristina Cherri^{b*},
Silvio Alexandre de Araujo^c, Victor Claudio Bento de Camargo^d**

^a Pós-graduação em Engenharia de Produção - Faculdade de Engenharia
Universidade Estadual Paulista - UNESP, Bauru-SP, Brasil

^b Departamento de Matemática - Faculdade de Ciências
Universidade Estadual Paulista - UNESP, Bauru-SP, Brasil

^c Departamento de Matemática Aplicada - Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas
Universidade Estadual Paulista - UNESP, São José do Rio Preto-SP, Brasil

^d Departamento de Engenharia de Produção
Universidade Federal de São Carlos - UFSCar, São Carlos-SP, Brasil

Recebido 26/12/2018, aceito 06/05/2019

RESUMO

Neste trabalho, propomos um modelo matemático para representar um problema real de dimensionamento de lotes e planejamento de pedidos em uma indústria moveleira. O problema é caracterizado como multi-itens, multiestágios e demanda determinística. O modelo matemático tem como objetivo minimizar custos de produção, considerando capacidade finita do sistema produtivo. Implementações foram desenvolvidas e testes foram realizados com dados fornecidos por uma empresa do setor moveleiro. Os resultados obtidos pelo modelo mostraram-se significativamente melhores quando comparado com o planejamento da produção real usado na empresa.

Palavras-chave: Dimensionamento de Lotes, Indústria Moveleira, Modelagem Matemática, Planejamento de Pedidos.

ABSTRACT

In this paper, we propose a mathematical model to represent a real lot sizing and order planning problem in furniture industries. The problem is characterized as multi products, multistage and deterministic demand. The mathematical model has the objective of minimizing the production costs, considering the finite capacity of the production system. Implementations were developed and tests were carried out with data provided by a company of the furniture sector. The results obtained by the model showed significantly better when compared to the actual production planning used in the company.

Keywords: Lot sizing, Furniture industry, Mathematical modeling, Order planning.

* Autor para correspondência. E-mail: adriana.cherri@unesp.br

DOI: 10.4322/PODes.2019.006

¹*Todos os autores assumem a responsabilidade pelo conteúdo do artigo.*

1. Introdução

Nas organizações produtivas, dentro da administração da produção, entre os vários problemas de planejamento, o PCP (Planejamento e Controle da Produção) busca determinar quais produtos devem ser produzidos e em quais quantidades, em cada um dos períodos do horizonte de planejamento (Lustosa et al., 2008). O objetivo principal é atender a demanda no prazo estabelecido, observando a capacidade finita dos recursos no menor custo possível. Desta forma, encontrar o melhor plano produção em tempo hábil pode ser determinante para a boa competitividade das organizações, fortalecendo o potencial de contribuição de pesquisas na área. Na literatura, problemas com essa característica são classificados como Problemas de Dimensionamento de Lotes (PDL) e têm por propósito a definição da estratégia de utilização de determinada estrutura fabril para atendimento da demanda, dentro da melhor relação custo-benefício possível (Pochet e Wolsey, 2006).

A literatura envolvendo PDL é bastante vasta. Revisões bibliográficas de trabalhos que estudam PDL podem ser encontradas desde os trabalhos de Billington et al. (1983), Bahl et al. (1987), até mais recentemente, Karimi et al. (2003), Glock et al. (2014), Holmbom e Segerstedt (2014), Beullens (2014) e Brahim et al. (2017).

Em problemas clássicos de dimensionamento de lotes, uma decisão importante a ser tomada está relacionada ao balanço ideal entre estoques de produtos e preparações da estrutura fabril. Devido a maior competitividade imposta pelo mercado globalizado atual, diversos fatores têm sido incorporados ao problema clássico para melhorar o processo de decisões industriais. As pesquisas em PDL, assim como este trabalho, se alinham nesta tendência de evolução do processo de decisão (Clark et al., 2011) (Jans e Degraeve, 2008).

Além do balanço do uso de recursos entre preparação e estoque, pesquisas que consideram outros fatores foram desenvolvidas, como por exemplo, as pesquisas em PDL integrados, que consistem em incorporar às decisões clássicas de dimensionamento de lotes, outras decisões também importantes ao ambiente industrial, tais como, decisões relativas ao sequenciamento da produção desses lotes (Copil et al., 2017), decisões relativas ao problema de corte de estoque (Melega et al., 2018), decisões relativas à distribuição dos lotes (Adulyasak et al., 2015), entre outras. Entretanto, estudos referentes ao planejamento da produção para melhoria do nível de serviço ao cliente são escassos.

O problema abordado neste trabalho se caracteriza como um PDL multiestágio, multi-itens, capacitado e com demanda determinística e possibilidade de atrasos. Tais características já foram abordadas em vários trabalhos na literatura, conforme pode ser constatado nas revisões de literatura citadas anteriormente, bem como no livro Pochet e Wolsey (2006). Entretanto, neste trabalho, foram incorporadas decisões de planejamento de pedidos junto às decisões dos tamanhos dos lotes e, para este caso, encontramos apenas um trabalho na literatura. Furtado et al. (2019) abordaram o planejamento da produção de pedidos em fundições de pequeno porte. Neste setor, a carteira é composta por pedidos de clientes que podem conter diferentes itens. Para alguns casos reais, entregar parte de um pedido gera custos adicionais de expedição; além disso, um pedido pode conter itens que compõem um mesmo produto final, logo não devem ser entregues separadamente. Os autores propõem um modelo matemático para representar o problema de planejamento da produção de pedidos em fundições, cujo objetivo é minimizar custos de atraso e estoque dos pedidos. Testes computacionais utilizando o software de otimização CPLEX mostraram que a proposta é adequada para o problema.

Neste contexto, este trabalho contribui com a literatura por propor um modelo matemático para a programação de pedidos e dimensionamento de lotes da produção em uma indústria de móveis seriados. Implementações foram desenvolvidas e testes realizados com dados reais de uma empresa sediada no APL (Arranjo Produtivo Local) de Araçatuba-PR, Brasil, mostrando um bom desempenho da abordagem proposta, que apresentou planos de produção com custos menores que os praticados pela indústria.

O restante do trabalho está dividido da seguinte maneira. As características do setor e do

processo produtivo da empresa estudada são apresentadas na Seção 2. O modelo matemático proposto para representar o problema está descrito na Seção 3. Os resultados dos testes realizados com dados reais da empresa estudada são apresentados na Seção 4, juntamente com a discussão dos mesmos. Por fim, as considerações finais são descritas na Seção 5.

2. Características do Processo Produtivo

O setor moveleiro é marcado por grande heterogeneidade, sendo composto por empresas de pequeno porte com elevado nível de atividades artesanais, até empresas de grande porte que produzem móveis retilíneos e com elevado nível de automação e mecanização (Galinari et al., 2013).

Neste cenário, o planejamento da produção em indústrias de móveis seriados e, em especial neste estudo, envolve o dimensionamento de lotes. O problema foi observado em uma empresa da região de Arapongas, na região norte do estado do Paraná. Atualmente, o pólo moveleiro de Arapongas-PR é considerado o segundo maior do Brasil, sendo o maior consumidor de painéis aglomerados do país.

As informações referentes à indústria foram obtidas a partir de observações e entrevistas abertas com as equipes envolvidas na rotina dessa organização. De acordo com as informações, os pedidos por produtos são encaminhados semanalmente. O planejamento da produção dos pedidos para formação dos lotes é realizado considerando um horizonte de uma semana e o prazo de entrega firmado com o cliente em trinta dias corridos. Os pedidos são agrupados de acordo com algum critério gerencial (por exemplo, em função da localização geográfica do cliente), configurando o que se chama por “carga” no jargão do setor. O agrupamento dos pedidos define o prazo de entrega dos produtos correspondentes da produção para o setor de expedição. Paralelamente, um levantamento da disponibilidade do estoque dos produtos demandados é realizado com o apoio de um software ERP (*Enterprise Resource Planning*).

Identificadas as necessidades de produção, são elaborados os planos de produção para definir os produtos e as quantidades necessárias para atender as demandas. A decisão envolve o saldo de estoque atual, a demanda no horizonte de planejamento e um nível de estoque estratégico a ser mantido pela organização para absorção de possíveis variações de demanda. Essa última decisão possui determinado grau de risco, sendo levado em consideração a vivência do analista e as projeções com base na experiência e percepção. Segundo estimativas da própria empresa, a quantidade de estoque estratégico existente no momento desta pesquisa era em torno de quatro meses de demanda. De acordo com a direção da empresa, este cenário revela um elevado represamento de capital em produto acabado, o que compromete o fluxo de caixa, prejudicando significativamente sua competitividade.

Outro grande desafio compartilhado pela direção da empresa envolve o tempo de estoque de produtos. As tendências de *design* impõe demanda por novos produtos, logo, o volume do material acabado e armazenado deve ser gerenciado para que não ocorra falta ou excesso de produtos. De acordo com a direção da empresa, essas condições demonstram uma forte necessidade de revisão de suas estratégias de planejamento da produção, reforçando a importância desta pesquisa para a realidade do setor moveleiro. A variedade de demanda por tipo de produto, cor, quantidade e prazo de entrega associado ao grande número de clientes, tornam este processo decisório desafiador. Esta condição é colocada ao analista que tenta tomar a melhor decisão em termos de tamanho de lote e data para conclusão.

O ambiente de produção também se caracteriza por um elevado nível de dinamicidade. Alterações na programação são frequentes em função de mudanças na disponibilidade dos recursos ou de alterações nas prioridades da área comercial. Por essa razão, a sistematização do auxílio à tomada de decisões é desejável.

Com base nestas informações, nota-se o desafio que permeia a tomada de decisão na prática do PCP das empresas de móveis. Desta forma, na Seção 3, um modelo matemático que representa

o PDL da indústria moveleira é proposto. É esperado que esse estudo possa apoiar os tomadores de decisão na programação de pedidos e na elaboração dos planos de produção com o menor custo possível, atendendo as restrições operacionais do sistema de produção.

3. Definição do Problema e Modelo Matemático

O problema estudado envolve o dimensionamento de lotes em indústrias de móveis seriados. Nessa proposta, o objetivo consiste em determinar o que produzir, quando e em quais quantidades, para o atendimento da demanda com custo mínimo. Estes custos envolvem os recursos consumidos com a produção, preparação da instalação fabril, estoques e atrasos de entrega de pedidos.

O atendimento dos pedidos de clientes pode ser realizado com atraso entre os períodos, que podem variar em um horizonte de programação que contempla cinco dias de produção, para flexibilizar o atendimento. Entretanto, uma penalização de custo por atraso força a mínima aderência desta opção. Uma estratégia das empresas é considerar estoques de segurança, para absorção de possíveis variações da demanda. A indisponibilidade do estoque de segurança impõe um custo adicional no plano de produção. Quando há produção de um produto, um lote mínimo deve ser estabelecido.

O modelo proposto é baseado no trabalho de Furtado et al. (2019), sendo caracterizado como multi-ítems, multi-estágios, com demanda determinística, horizonte finito, capacitado, custo de ajustes de produção e de estoques e penalizações de atrasos dos pedidos. O objetivo consiste em definir um plano factível de produção com custo mínimo de execução.

Os índices, parâmetros e variáveis utilizados no modelo são definidos a seguir.

Índices:

- $t = 1, \dots, T$: períodos de tempo;
- $p = 1, \dots, P$: pedidos;
- $i = 1, \dots, m$: produtos;

Parâmetros:

- sc_{it} : custo de preparação 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 ;
- hp_{pt} : custo por atrasar o pedido p no período t ;
- pc_{it} : custo unitário por não atingir o estoque de segurança do produto i no período t ;
- e_{it} : nível de estoque de segurança do produto i no período t ;
- dp_{pt} : recebe 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 ;
- st_i : tempo de preparação para fabricação do produto i ;
- β_i : tamanho do lote mínimo de produção para o produto i ;
- sl_{i0} : quantidade do produto i em estoque no período 0;
- b_i : tempo necessário para processamento do produto i no setor referência (corte);
- cp_t : limite de capacidade de produção em minutos no período t ;

Variáveis:

- XP_{pt} : assume valor 1 se o pedido p é concluído no período t e 0 caso contrário;
- SP_{pt}^- : assume o valor 1 se o pedido p é atrasado no período t e 0, caso contrário;
- Y_{it} : assume valor 1 se há produção do produto i no período t e 0, caso contrário;
- X_{it} : quantidade do produto i produzida no período t ;
- S_{it} : quantidade do produto i em estoque ao final do período t ;
- ES_{it} : quantidade do produto i em estoque de segurança no período t ;
- ET_{it} : estoque total do produto i no período t .

$$Min : \sum_{i=1}^m \sum_{t=1}^T (vc_{it}X_{it} + sc_{it}Y_{it} + hc_{it}ET_{it} + pc_{it}(e_{it} - ES_{it})) + \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T (hp_{pt}SP_{pt}^-) \quad (1)$$

Sujeito a:

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

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

$$ET_{it} = ES_{it} + S_{it}, \quad i = 1, \dots, m; t = 1, \dots, T \quad (4)$$

$$ES_{it} \leq e_{it}, \quad i = 1, \dots, m; t = 1, \dots, T \quad (5)$$

$$X_{it} \leq \left(\sum_{p=1}^P a_{ip} + \sum_{j=t}^T e_{ij} \right) Y_{it}, \quad i = 1, \dots, m; t = 1, \dots, T \quad (6)$$

$$X_{it} \geq \beta_i \sum_{p=1}^P (a_{ip}dp_{pt}) Y_{it}, \quad i = 1, \dots, m; t = 1, \dots, T \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^m (b_i X_{it} + st_i Y_{it}) \leq cp_t, \quad t = 1, \dots, T \quad (8)$$

$$X_{it}, S_{it}, ES_{it}, ET_{it} \in R_+, (S_{i0} = sl_i), \quad i = 1, \dots, m; t = 1, \dots, T \quad (9)$$

$$Y_{it}, XP_{pt}, SP_{pt}^- \in \{0, 1\}, (SP_{p0}^- = 0), \quad i = 1, \dots, m; t = 1, \dots, T; p = 1, \dots, P \quad (10)$$

No modelo (1)-(10), a função objetivo (1) minimiza os custos operacionais, que envolvem respectivamente, os custos com a fabricação dos produtos, custos de preparação para a produção dos produtos e custos de estoque. Além disso, como o mercado atendido pelas indústrias moveleiras se mostra fortemente dinâmico, com grande variedade de tipos de produtos em cada pedido firmado, considerou-se a manutenção do estoque de segurança em um nível ideal de estoque a ser mantido. O custo desse estoque ocorre com a inserção do termo $pc_{it}(e_{it} - ES_{it})$, em que pc_{it} é definido a partir de uma margem de contribuição média para cada tipo de item, de acordo com informações fornecidas pela empresa. Com relação ao último termo na função objetivo, o mesmo refere-se a penalidade por atraso na entrega dos pedidos.

O conjunto de restrições (2) considera o balanço dos pedidos assim como a possibilidade de atrasos. O conjunto de restrições (3) refere-se ao balanço de produção dos produtos e envolve o estoque total dos produtos, quantidades produzidas e demanda necessária para compor os pedidos. Em (4) o estoque total é contabilizado, considerando o estoque de segurança e o estoque regular. Observe que, esta restrição, assim como a variável ET_{it} , poderiam ser eliminadas do modelo, entretanto, ambas foram mantidas para facilitar seu entendimento. As restrições (5), asseguram que o estoque de segurança não seja superior ao nível de estoque de segurança permitido. O conjunto de restrições (6) força uma preparação sempre quando houver produção. A parcela entre parênteses representa a quantidade de produtos necessária para compor todos os pedidos em todo o horizonte de planejamento, assim como o estoque de segurança. Em (7) é imposta a produção de lotes mínimos, ou seja, sempre que houver preparação para a produção de um item, essa produção deverá ser de no mínimo β_i . O conjunto de restrições (8) limita a ocupação da capacidade da fábrica em unidades produzidas por período. Por fim, os conjuntos de restrições (9) e (10) referem-se aos domínios das variáveis de decisão.

4. Resultados Computacionais

A implementação do modelo (1)-(10) foi desenvolvida na linguagem de programação AMPL (*A Mathematical Programming Language*) e resolvida pelo software de otimização CPLEX 12.6.

Os testes foram realizados em um computador com processador Intel I5 com 4 GB de memória RAM.

Para avaliar o desempenho do modelo proposto, testes computacionais foram realizados utilizando informações e dados reais fornecidos por uma empresa do setor moveleiro da cidade de Arapongas, Paraná - Brasil. Informações sobre os parâmetros utilizados no modelo (1)-(10) são apresentados na Seção 4.1.

4.1. Definição dos Parâmetros

Para a obtenção e cálculo dos parâmetros utilizados no modelo (1)-(10), tabelas com os dados da produção foram fornecidas pela empresa e contemplam os 140 tipos de produtos fabricados. Desta forma, devido a dimensão, as mesmas não foram expostas neste trabalho, mas podem ser consultadas em Rocha Junior (2016).

- Demanda de pedidos e produtos (dp_{pt} e a_{ip}): o histórico de demanda utilizado nos testes envolvem 12 semanas de trabalho. A Tabela 1 traz informações adicionais.
- Custo de estoque (hc_{it}): o custo de estoque foi calculado a partir do custo de capital dos produtos e o valor diário médio da taxa Selic sobre o valor de venda de cada produto. Os valores apresentados em Rocha Junior (2016) referem-se aos valores de armazenamento por unidade de produto por dia.
- Estoque de segurança (e_{it}): o estoque de segurança, presente na prática de planejamento da empresa, conforme já discutido na Seção 2, foi estruturado segundo a percepção do que faria sentido para a empresa dentro de sua estratégia de atuação comercial e logística.
- Custo de atraso (hp_{pt}): o custo por atraso nos pedidos envolve a tradução de fatores subjetivos em valores quantitativos. Estes fatores incluem inadimplência, representatividade, condições de pagamento, histórico de atrasos nas entregas, distância, perfil do cliente, tempo de relacionamento da empresa com o cliente, potencial para novos negócios e negociação. A estes fatores notas de 0 a 5 são atribuídas. Estas notas são ponderadas e utilizadas para estabelecer uma relação com a penalidade por atraso.
- Custo de preparação (sc_{it}) e Custo de fabricação dos produtos (vc_{it}): os custos de preparação dos equipamentos e de produção foram apresentados pela empresa a partir de uma forma de cálculo própria, não permitindo o detalhamento neste texto. Os valores utilizados nos testes estão apresentadas em Rocha Junior (2016).
- Tempo de preparação (st_i): para o tempo de preparação foi adotado o valor padrão de 30 minutos já utilizado pela empresa em sua prática de planejamento, independente da sequência das preparações.
- Coeficiente de lote mínimo (β_i): o coeficiente de lote mínimo foi definido com base em estimativas apresentadas pela empresa.
- Penalização por não atingimento do estoque de segurança (pc_{it}): o conceito norteador dessa penalização é o risco de oportunidade de negócio caso o item demandado não esteja disponível para comercialização em caso de demanda. Para sua definição, foi atribuída uma margem de contribuição média para cada item, que reflete o quanto cada unidade vendida contribui para a cobertura dos custos e despesas fixas da organização.
- Tempo necessário para o processamento dos produtos (b_i): foi utilizado o tempo padrão para processamento do produto no setor referência (corte) fornecido pela empresa.
- Capacidade máxima de produção em minutos (cp_t): a capacidade adotada foi fornecida pela empresa, de acordo com a disponibilidade dos equipamentos, durante uma jornada diária que é de 480 minutos.
- Estoque existente sl_{i0} : Os valores de estoque inicial em cada semana foram fornecidos pela empresa.

Na Tabela 1, são apresentados alguns dados referentes as 12 semanas de trabalho. Esses dados compreendem as semanas do ano (Sem), o número de pedidos existentes (NPed), o número de diferentes tipos de produtos a serem produzidos (NProd) e a demanda total de produtos em cada semana (Dem).

Tabela 1: Dados das instâncias.

Sem	NPed	NProd	Dem
5	67	192	473
7	27	89	215
9	63	198	479
12	20	50	133
24	10	27	45
29	29	100	456
32	45	146	1222
36	45	163	359
38	11	55	742
39	55	172	553
42	17	41	107
50	15	44	949

Fonte: Elaborada pelos autores.

Utilizando os dados apresentados nesta seção, testes computacionais foram realizados com o modelo (1)-(10) e são apresentados na Seção 4.2.

4.2. Resultados Obtidos com o Modelo Matemático

A partir dos dados fornecidos pela empresa, na Tabela 2, é possível observar os valores obtidos com o modelo (1)-(10) para função objetivo (F.O.) e o tempo (em segundos) utilizado pelo AMPL para apresentar a solução com o modelo matemático para as semanas do ano (Sem).

Embora o limite de tempo estabelecido para a resolução dos problemas tenha sido de 180 segundos, as soluções foram obtidas em tempo computacional bastante inferior.

Tabela 2: Resultados obtidos com o modelo matemático.

Sem	F.O.	Tempo
5	1.199.415	5,3
7	1.336.924	11,9
9	1.485.822	7,6
12	1.376.874	12,4
24	988.234	40,7
29	1.263.961	18,5
32	1.121.808	3,7
36	1.023.410	8,0
38	1.038.748	10,6
39	986.997	20,0
42	987.223	53,7
50	1.263.546	5,7

Fonte: Elaborada pelos autores.

A Tabela 3 apresenta, respectivamente, a porcentagem do uso da capacidade (Cap) necessária para atendimento dos pedidos, o total de ajustes, a quantidade de pedidos produzidos no prazo e a

porcentagem que essa produção representa, a incidência de atrasos ($\sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T SP_{pt}^-$) e o número de pedidos não atendidos para os planos propostos para cada período analisado.

Tabela 3: Utilização da capacidade e atendimento da demanda.

Sem.	Cap (%)	Total de ajustes	Pedidos no prazo (quant./porc.)	Incidência de Atrasos	Pedidos não atendidos
5	99,6	26	64 / 96%	4	0
7	99,8	25	23 / 85%	14	4
9	99,9	27	54 / 86%	21	5
12	100,0	25	17 / 85%	6	2
24	99,6	23	6 / 60%	10	1
29	100,0	26	23 / 79%	27	5
32	99,8	24	33 / 73%	34	6
36	100,0	23	42 / 93%	4	3
38	100,0	23	11 / 100%	0	0
39	99,7	22	53 / 96%	3	1
42	99,3	23	14 / 82%	9	2
50	100,0	24	14 / 93%	3	1

Fonte: Elaborada pelos autores.

Pode-se observar pela Tabela 3 que apenas a semana 38 teve a totalidade de pedidos concluídos dentro do prazo. As demais semanas atenderam a maioria dos pedidos no prazo (média geral de 86% de pedidos atendidos), sendo esse um indicador importante de qualidade da solução gerada pelo modelo (1)-(10). O resultado mais baixo é apresentado pela semana 24, em que o número de pedidos finalizados no prazo foi 6 de um total de 10 pedidos na semana (60% dos pedidos atendidos). A semana 32 contempla a maior concentração de incidência de atrasos (34 pedidos atrasados) assim como de pedidos não atendidos, com 6 ocorrências.

Esses resultados sinalizam a intenção do modelo de ocupar o máximo possível da capacidade disponível, geralmente, em função do atendimento dos pedidos no prazo estabelecido, bem como, o atendimento ao estoque de segurança. Essa característica no comportamento do modelo está alinhada com as práticas de planejamento observadas nas fábricas moveleiras. Observa-se também uma elevada incidência de ajustes nos planos propostos.

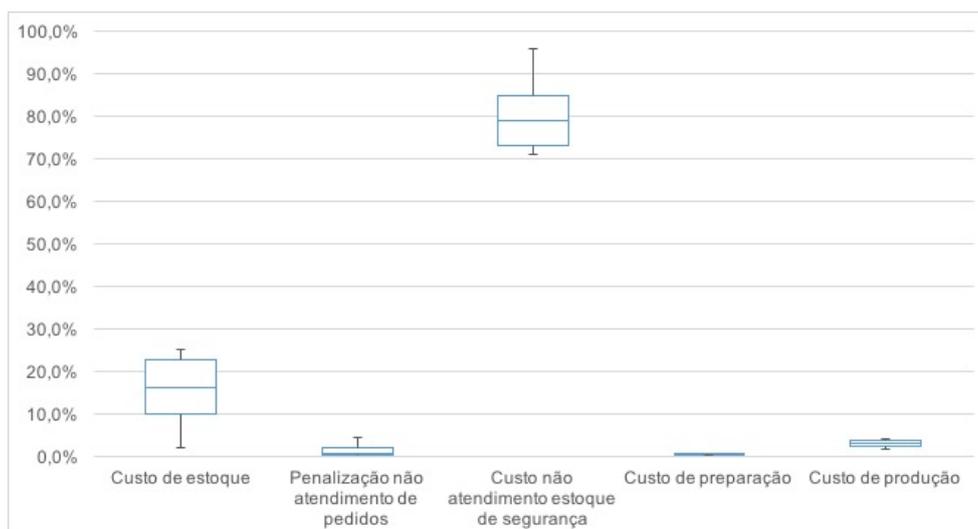
A Figura 1 representa a análise geral dos custos no valor da função objetivo das semanas analisadas. Observe que o custo de preparação tem a menor representação quando comparado com os outros custos, bem como uma baixa variação entre os resultados das semanas. O custo por não atendimento do estoque de segurança, apesar de grande concentração, apresenta também grande variação de uma semana para outra.

4.3. Resultado da Simulação com Dados da Empresa

Para verificar a aderência dos planos de produção propostos pelo modelo na situação estudada, comparamos os resultados dos testes apresentados na Tabela 3 com resultados obtidos a partir da simulação com os dados da programação real da empresa. Para essa simulação, a variável X_{it} (quantidade do produto i produzida no período t) do modelo (1)-(10) passou a assumir condição de parâmetro, recebendo dados de valores da programação praticada pela empresa para as semanas analisadas.

Os resultados obtidos a partir do plano gerado pela prática da empresa são apresentados na Tabela 4 e referem-se, respectivamente, a porcentagem do uso da capacidade (Cap) necessária para atendimento dos pedidos, o total de ajustes, a quantidade de pedidos produzidos no prazo e

Figura 1: Distribuição da incidência dos tipos de custos considerando todos os testes.



Fonte: Elaborada pelos autores.

a porcentagem que essa produção representa, a incidência de atrasos e o número de pedidos não atendidos para os planos propostos para cada período analisado.

Tabela 4: Utilização da capacidade e atendimento da demanda nas simulações com dados da empresa.

Sem.	Cap (%)	Total de ajustes	Pedidos no prazo (quant./porc.)	Incidência de Atrasos	Pedidos não atendidos
5	89,9	23	54 / 81%	32	3
7	78,7	17	22 / 81%	12	3
9	94,0	25	55 / 87%	14	5
12	80,3	16	17 / 85%	4	0
24	90,1	18	5 / 50%	12	0
29	94,4	24	22 / 76%	19	1
32	87,3	22	32 / 71%	23	2
36	79,2	16	43 / 96%	4	2
38	75,1	14	11 / 100%	0	0
39	85,3	19	53 / 96%	2	0
42	48,3	11	16 / 94%	1	1
50	40,1	11	11 / 73%	7	1

Fonte: Elaborada pelos autores.

Com os valores obtidos para as médias da capacidade utilizada, percebe-se que as semanas 29, 24 e 9 apresentam, respectivamente, os maiores valores. As semanas 9, 29 e 5 apresentam as maiores incidências de ajustes, respectivamente. Os ajustes se concentram geralmente nos períodos iniciais, associados a maior incidência de prazos de entrega e reposições no estoque de segurança. Essa condição ocorre devido a uma maior variedade de tipos de produtos demandados.

Assim como nos resultados gerados pelo modelo, a semana 38 é a única a apresentar a totalidade de pedidos produzidos dentro do prazo estabelecido, seguida das semanas 36 e 39 com 96%. A semana 32 apresenta o menor número de pedidos produzido, com 71% de atendimento. A incidência de atrasos ficou mais concentrada nas semanas 5 (32 pedidos), 32 (23 pedidos) e 29

(19 pedidos). As semanas 9, 5 e 7 apresentam as maiores quantidades de pedidos não atendidos no horizonte de planejamento, respectivamente.

Comparando com as soluções apresentadas na Tabela 3, pode-se observar um melhor uso da capacidade da empresa para o atendimento dos pedidos por parte do modelo (1)-(10). Consequentemente, há uma maior porcentagem de pedidos atendidos no prazo.

Na próxima seção, comparações, mais detalhadas, entre os resultados dos planos gerados pelo modelo proposto e os resultados gerados pela simulação da programação real da empresa são analisadas.

4.4. Comparação entre os Planos de Produção do Modelo Proposto e da Simulação da Empresa

A comparação entre os planos de produção é pertinente para mostrar o potencial da aplicação prática do modelo na medida em que utiliza-se os mesmos parâmetros. A comparação entre os valores das funções objetivo dos planos de produção obtidos pelo modelo e com a simulação da empresa são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5: Comparação entre os custos dos planos gerados pelo modelo e a prática.

Semana	F.O. (Modelo)	F.O. (Programação Real)	Diferença	% Diferença
5	1.199.415	1.220.260	20.845	2%
7	1.336.924	1.980.165	643.241	32%
9	1.485.822	1.888.405	402.583	21%
12	1.376.874	1.886.616	509.742	27%
24	988.234	1.387.032	398.798	29%
29	1.263.961	1.523.391	259.430	17%
32	1.121.808	1.971.003	849.195	43%
36	1.023.410	1.455.305	431.895	30%
38	1.038.748	1.622.750	584.002	36%
39	986.997	1.454.408	467.411	32%
42	987.223	1.434.692	447.469	31%
50	1.263.546	1.802.998	539.452	30%

Fonte: Elaborada pelos autores.

Como é possível observar na Tabela 5, o modelo é significativamente mais eficaz em termos de resultado para função objetivo em todas as semanas analisadas, com uma diferença média de 28%. A semana 32 é a que apresenta diferença mais expressiva, com 43%, seguida das semanas 38 (36%) e 7 (32%). Juntas, essas semanas representam 23% do total de produtos demandados nas 12 semanas analisadas. A semana 5 apresentou a menor diferença entre as duas abordagens (2%). Os dados obtidos revelam uma importante vantagem do modelo proposto sobre a produção real da empresa dentro das mesmas condições, quando comparados os custos obtidos nos planos de produção.

A Tabela 6 apresenta a comparação entre as penalizações por não atendimento do estoque de segurança para cada semana analisada. Os dados das comparações referem-se ao custo por não atingir o estoque de segurança por produto (pc) considerando o modelo proposto e a simulação com a produção utilizada pela empresa.

Os valores apresentados na Tabela 6 mostram que o modelo tem um melhor desempenho em todas as semanas, com uma diferença média de, aproximadamente, 32%. Observa-se que as semanas 38, 39 e 42 possuem as maiores diferenças nos custos pelo não atendimento do estoque de segurança, respectivamente.

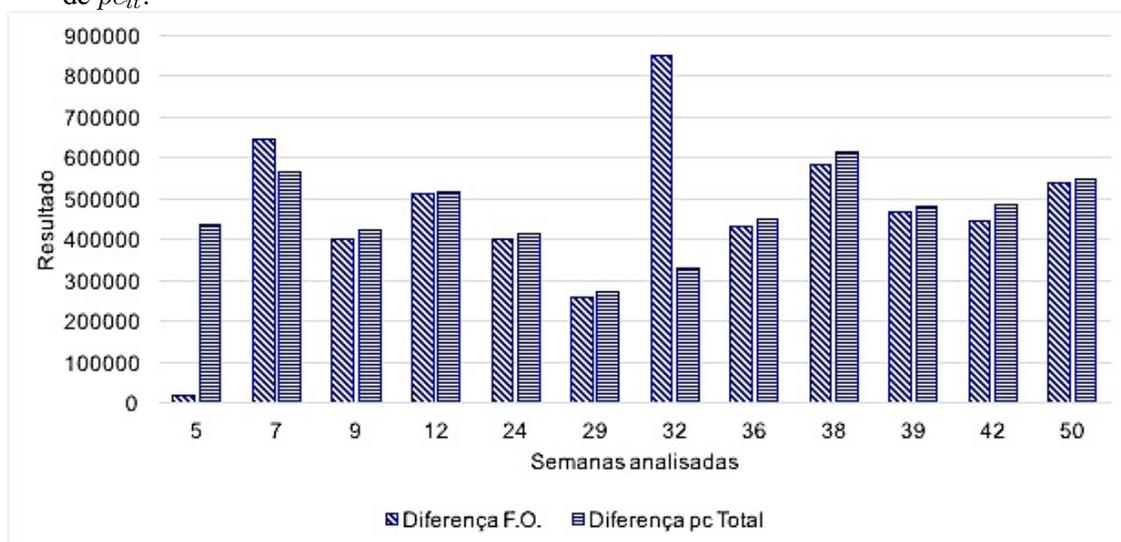
Tabela 6: Custos de não atendimento do estoque de segurança dos planos gerados pelo modelo e a prática.

Semana	pc Total (Modelo)	pc Total (Empresa)	Diferença pc Total	% Diferença pc Total
5	982.825	1.419.521	436.695	31%
7	1.121.096	1.688.317	567.221	34%
9	1.231.163	1.652.999	421.836	26%
12	1.191.600	1.708.933	517.333	30%
24	753.946	1.170.318	416.372	36%
29	982.087	1.255.645	273.558	22%
32	839.899	1.170.532	330.633	28%
36	749.145	1.198.324	449.179	37%
38	754.127	1.366.737	612.610	45%
39	702.793	1.181.650	478.857	41%
42	705.928	1.193.249	487.321	41%
50	1.027.299	1.573.707	546.408	35%

Fonte: Elaborada pelos autores.

A Figura 2 apresenta uma comparação direta desses resultados com as diferenças nos valores obtidos na função objetivo.

Figura 2: Comparação da diferença entre os resultados obtidos para F.O. e a diferença de pc_{it} .



Fonte: Elaborada pelos autores.

Com exceção das semanas 5 e 32, é possível observar grande similaridade entre nos valores obtidos para a maioria das semanas. Os resultados sinalizam uma hipótese considerável de que grande parte do ganho obtido pelo modelo está relacionada ao atendimento mais adequado das quantidades definidas para o estoque de segurança.

Considerando que a presente comparação utilizou dados reais fornecidos por uma empresa importante do segmento, os testes obtidos pelo modelo proposto apresentam soluções sensivelmente mais interessantes em termos de custo, que o plano atual da empresa analisada.

Essa condição reforça a pertinência do uso de modelos matemáticos para representar o problema de dimensionamento de lotes e apoiar a tomada de decisão em indústrias moveleiras na busca pela competitividade.

5. Conclusão

Este trabalho aborda o processo produtivo em uma empresa de móveis seriados. O estudo envolve o problema de dimensionamento de lotes e programação de pedidos. Um modelo matemático para representar o problema foi proposto. Para tanto, foram estudados quais aspectos conceituais definem boas práticas relacionadas ao tema. O problema de dimensionamento de lotes estudado foi caracterizado como um sistema multi-itens, multi-estágios, de demanda determinística, com horizonte de planejamento finito, capacitado, com custo de preparo simples, com penalizações de atrasos nos pedidos e custo de estoques.

Testes computacionais foram realizados com dados fornecidos por uma empresa do setor moveleiro da cidade de Arapongas, Paraná - Brasil. Os resultados apresentados pelo modelo proposto foram bastante promissores quando comparados os custos com as soluções da empresa. Foi verificado também que grande parte da vantagem no resultado consiste no melhor uso da estrutura fabril pelo modelo matemático proposto em planejar a produção da demanda e os requisitos dos estoques de segurança.

Com a conclusão de que o modelo é pertinente para programar a fabricação de produtos que compõe pedidos e manter os níveis de estoque de segurança definidos pela empresa, acredita-se que a implementação do modelo matemático possa auxiliar os tomadores de decisão no planejamento adequado da produção.

Uma continuidade desse trabalho pode incluir projeções de estoques para atendimento de sazonalidades características do setor. Além disso, grande parte do mercado consumidor das empresas da região de Arapongas, PR, está localizada nas regiões norte e nordeste do país, o que eleva os custos de transporte a uma condição de elevado impacto na competitividade de seus produtos. Ademais, os sistemas produtivos moveleiros são vulneráveis quanto ao sequenciamento das ordens de produção e suas consequências no balanceamento da carga de trabalho nas fases de fabricação. Considerar na modelagem atual decisões de corte, empacotamento, distribuição e roteirização pode incrementar as possibilidades de ganhos sistêmicos nas decisões de médio, curto e curtíssimo prazo nos sistemas de produção de móveis.

Agradecimentos. Os autores agradecem o apoio da FAPESP (Processo 2014/01203-5, CEPID 2013/07375-0), CNPq (Processo 477481/2013-2 e 447421/2014-0) e SENAI Paraná, Brasil.

Referências

- Adulyasak, Y., Cordeau, J.-F. e Jans, R. The production routing problem: A review of formulations and solution algorithms. *Computers & Operations Research*, v. 55, p. 141–152, 2015.
- Bahl, H. C., Ritzman, L. P. e Gupta, J. N. Or practice—determining lot sizes and resource requirements: A review. *Operations Research*, v. 35, n. 3, p. 329–345, 1987.
- Beullens, P. Revisiting foundations in lot sizing - Connections between Harris, Crowther, Monahan, and Clark. *International Journal of Production Economics*, v. 155, p. 68–81, 2014.
- Billington, P. J., McClain, J. O. e Thomas, L. J. Mathematical programming approaches to capacity-constrained MRP systems: Review, formulation and problem reduction. *Management Science*, v. 29, n. 10, p. 1126–1141, 1983.
- Brahimi, N., Absi, N., Dauzère-Pérès, S. e Nordli, A. Single-item dynamic lot-sizing problems: An updated survey. *European Journal of Operational Research*, v. 263, n. 3, p. 838–863, 2017.
- Clark, A., Almada-Lobo, B. e Almeder, C. Lot sizing and scheduling: industrial extensions and research opportunities. *International Journal of Production Research*, v. 49, p. 2457–2461, 2011.

- Copil, K., Wörbelauer, M., Meyr, H. e Tempelmeier, H. Simultaneous lotsizing and scheduling problems: a classification and review of models. *OR spectrum*, v. 39, n. 1, p. 1–64, 2017.
- Furtado, M. G. S., Camargo, V. C. B. e Toledo, F. M. B. The production planning problem of orders in small foundries. *RAIRO - Operations Research*, v. 53, n. 5, p. 1551–1561, 2019.
- Galinari, R., Teixeira Júnior, J. R. Rodrigues, J. e Morgado, R. R. A competitividade da indústria de móveis do brasil: situação atual e perspectivas. *BNDES Setorial*, n. 37, p. 227–272, 2013.
- Glock, C. H., Grosse, E. H. e Ries, J. M. The lot sizing problem: A tertiary study. *International Journal of Production Economics*, v. 155, p. 39–51, 2014.
- Holmbom, M. e Segerstedt, A. Economic order quantities in production: From Harris to economic lot scheduling problems. *International Journal of Production Economics*, v. 155, p. 82–90, 2014.
- Jans, R. e Degraeve, Z. Modeling industrial lot sizing problems: a review. *International Journal of Production Research*, v. 46, n. 6, p. 1619–1643, 2008.
- Karimi, B., Fatemi Ghomi, S. M. T. e Wilson, J. M. The capacitated lot sizing problem: a review of models and algorithms. *Omega*, v. 31, n. 5, p. 365–378, 2003.
- Lustosa, L. J., Mesquita, M. A. e Oliveira, R. J. *Planejamento e controle da produção*. Elsevier Brasil, 2008.
- Melega, G. M., de Araujo, S. A. e Jans, R. Classification and literature review of integrated lot-sizing and cutting stock problems. *European Journal of Operational Research*, v. 271, n.1, p. 1–19, 2018.
- Pochet, Y. e Wolsey, L. A. *Production planning by mixed integer programming*. Springer Science & Business Media, 2006.
- Rocha Junior, W. R. *Programação de pedidos e dimensionamento de lotes em uma indústria de móveis*. 84 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Estadual Paulista, Bauru-SP, 2016.