LII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional
João Pessoa - PB, 3 a 5 de novembro de 2020

Problema integrado de dimensionamento de lotes e seleção de fornecedores: um estudo de flexibilidade.

Gabriel de Souza Amaro, Washington Alves de Oliveira, Diego Jacinto Fiorotto
Faculdade de Ciências Aplicadas - UNICAMP
Rua Pedro Zaccaria 1300, Limeira-SP
gabriel.amaro94@gmail.com, waoliv@unicamp.br, fiorotto@unicamp.br

RESUMO

Esse trabalho estudou o problema integrado de dimensionamento de lotes e seleção de fornecedores com atraso. O problema envolve uma rede conectando fornecedores, produtos e clientes para qual o decisor precisa decidir o que comprar em quais quantidades de qual fornecedor em cada período. O trabalho analisa a denominada flexibilidade de aquisição de produtos, sendo que certos produtos podem ser entregues por somente alguns fornecedores. Note que, na prática, não é usual usar recursos que tenham flexibilidade total, isso é, cada recurso pode produzir/entregar todos os produtos. Em termos de custo total, nossos resultados computacionais mostraram que uma quantidade reduzida de flexibilidade obtém praticamente todos os benefícios da flexibilidade total de aquisição de produtos. Assim, uma configuração de flexibilidade onde cada fornecedor selecionado entrega somente uma quantidade reduzida de produtos apresenta praticamente o mesmo desempenho, em termos de custo, da flexibilidade total.

PALAVRAS CHAVE. Problema de dimensionamento de lotes, problema de seleção de fornecedores, análise de flexibilidade.

PM - Programação matemática, POI - PO na indústria

ABSTRACT

This paper addresses the integrated lot sizing and supplier selection problem with backlogging deliveries. The products can be purchased from multiple suppliers to meet the order of a set of shortlisted customers. The problem involves a network connecting suppliers, products, and customers. The decision-maker needs to decide what products to purchase in what quantities from the suppliers in each period. The paper analyzes the named value of product acquirement flexibility, where only certain types of products can be delivered by each one of the suppliers. Note that, in practice, it is unusual to use resources that have total product acquirement flexibility, i.e., each resource can produce all products. In terms of total costs, the computational experiments showed that a reduced amount of flexibility obtains almost all benefits of the total product acquirement. Thus each selected supplier producing only a few products gets similar benefits of producing all products.

KEYWORDS. Lot sizing problem. Supplier selection problem. Flexibility analysis.

PM, POI

Galoá { Este trabalho foi publicado utilizando o **Galoá** proceedings

1. Introdução

A margem de lucro apertada, a expectativa por qualidade e a pressão por entregas mais rápidas fizeram o ambiente altamente competitivo. Cada vez mais, as companhias devem aproveitar as oportunidades para otimizar os processos e a cadeia de suprimentos. Alinhados com esse cenário, os pesquisadores reconhecem que os conceitos de flexibilidade são importantes para construir um ambiente de negócios sustentável com eficácia.

Esse artigo explora o processo de compra, analisando diferentes alternativas de aquisição de produto a partir dos fornecedores para satisfazer a demanda dos clientes. Em muitas indústrias, as decisões de compra são fortemente relacionadas ao dimensionamento de lotes. Nesse contexto, temos o problema integrado de dimensionamento de lotes e seleção de fornecedores que consiste em determinar a quantidade de itens que devem ser comprados de cada fornecedor ao longo do horizonte de planejamento. No problema clássico de seleção de fornecedores, cada fornecedor pode entregar todos os produtos (flexibilidade total de aquisição de produtos). Nesse estudo, um fornecedor pode produzir/entregar somente certos produtos (flexibilidade limitada de aquisição de produtos). O que torna o problema mais similar ao que ocorre na prática. O estudo da flexibilidade de aquisição de produtos aparece como uma alternativa para obter uma configuração reduzida ligando alguns produtos a um número mínimo de fornecedores. Assim, é esperado que essa configuração de flexibilidade possa fornecedor benefícios similares a flexibilidade total de aquisição de produtos.

Desde o artigo seminal de Jordan e Graves [1995], muitos autores tem estudado o benefício da flexibilidade aplicado a diferentes problemas considerando um ambiente de produção estocástico. Recentemente, Fiorotto et al. [2018] mostraram que a flexibilidade de processo pode ter um impacto importante em ambientes determinísticos. Uma extensão do problema apresentado por Fiorotto et al. [2018] é considerar de maneira integrada o problema de seleção de fornecedores. Esse estudo análise o benefício da flexibilidade de aquisição de produtos no problema integrado de dimensionamento de lotes e seleção de fornecedores em um contexto determinístico.

Esse artigo apresenta algumas contribuições. Nós apresentamos um modelo de otimização para obter a configuração de flexibilidade ótima no problema integrado sujeito a uma restrição da quantidade máxima de flexibilidade (arcos entre produtos e fornecedores). Nós analisamos os efeitos dos diferentes níveis de flexibilidade para determinar a quantidade de flexibilidade necessária para obter benefícios similares a flexibilidade total. Nossos resultados indicam que, em termos de custo total, uma pequena quantidade de flexibilidade já é suficiente para obter praticamente todos os benefícios da flexibilidade total. O que significa que os fornecedores selecionados podem produzir/entregar poucos produtos (ao invés de todos). Além disso, não é necessário selecionar todos os fornecedores disponíveis.

A organização do artigo é a seguinte. A seção 2 apresenta uma breve revisão de literatura sobre os problema de dimensionamento de lotes integrado com seleção de fornecedores e flexibilidade de processo nos problemas de dimensionamento de lotes. A seção 3 fornece a descrição formal do modelo matemático. A seção 4 apresenta a análise dos benefícios da flexibilidade de aquisição de produtos. Finalmente, a seção 5 mostra as nossas conclusões e ideias para pesquisas futuras.

2. Revisão de literatura

Nessa seção, iremos rever alguns trabalhos de dimensionamento de lotes e seleção de fornecedores que são relacionados à nossa abordagem e discutiremos as principais contribuições encontradas.

2.1. Problema de dimensionamento de lotes e seleção de fornecedores

Tem sido feito um grande esforço na literatura para estudar os problemas de dimensionamento de lotes e seleção de fornecedores. A decisão de escolha de fornecedores é muito importante

Galoá { Este trabalho foi publicado utilizando o Galoá proceedings

para as companhias uma vez que o custo da matéria prima representa uma parte significativa do custo total dos produtos. Por outro lado, o dimensionamento de lotes leva a um uso eficiente dos recursos.

Diversos autores têm estudado os mais importantes critérios para a seleção de fornecedores. Weber et al. [1991] identificaram que tempo de entrega, qualidade, custo e capacidade dos fornecedores são critérios usuais na literatura. Como algumas vezes eles são conflitantes, por exemplo custo e qualidade, é normal encontrar estudos que usam métodos multicritérios. Além disso, os autores identificaram que, naquela época, existiam apenas dez trabalhos que usavam modelos de programação linear. Outros trabalhos investigaram os efeitos de adquirir os diferentes produtos a partir de alguns fornecedores. Hong e Hayya [1992] usaram métodos matemáticos para concluir que comprar de alguns poucos fornecedores é benéfico no *just-in-time* em oposição a usar um único fornecedor para adquirir todos os produtos.

O problema de dimensionamento de lotes pode ser apresentado como uma extensão do problema de seleção de fornecedores e algumas vezes, ambos os problemas aparecem como um problema integrado. Basnet e Leung [2005] resolveram um problema integrado multi-período não capacitado sem restrições quanto ao número de fornecedores. Os autores desenvolveram um procedimento de enumeração que não é muito rápido para instâncias grandes e propuseram uma heurística de busca local que tem bom desempenho nas instâncias de tamanho real.

O artigo de revisão de Aissaoui et al. [2007] focou nos problemas integrados de dimensionamento de lotes e seleção de fornecedores e destacou a relevância desses modelos para minimizar o custo. Os artigos referenciados mostram benefícios na melhora da qualidade e queda do custo quando uma relação estável e duradoura com os fornecedores é construída.

Alguns estudos analisaram o compromisso entre os diversos critérios a partir de modelos multiobjetivos. Ustun et al. [2008] propuseram um modelo linear multiobjetivo que maximiza o valor comprado, minimiza o custo e a taxa de defeitos. O decisor busca obter a satisfação de comprar certos itens de fornecedores favoritos. Os testes computacionais apontaram que o procedimento *Reservation Level Tchebycheff Procedure (RLTP)* é desejável pois dá flexibilidade ao decisor durante a tomada de decisão.

Algoritmos híbridos também têm sido desenvolvidos para lidar com os modelos integrados de dimensionamento de lotes e seleção de fornecedores. Esses algoritmos compreendem métodos multicritério e de aproximação. Mendoza et al. [2008] introduziram um *framework* em três estágios. Uma comparação do desempenho em cada critério gera uma lista reduzida de fornecedores e o método *Analytic Hierarchy Process (AHP)* a ordena para obter o melhor fornecedor.

Rezaei e Davoodi [2011] observaram que o custo do pedido diminui quando se constrói uma relação estável e duradoura com os fornecedores. Eles apresentaram dois modelos não lineares multi-objetivo inteiros mistos em que o custo do pedido diminui gradativamente de acordo com a quantidade de pedidos para determinado fornecedor. Assim, concluíram que é mais interessante ter poucos fornecedores com vários pedidos do que muitos fornecedores com poucos pedidos.

Kilic [2013] aplicou um *framework* de dois passos em uma indústria de filtros de ar. Um modelo multicritério Fuzzy-TOPSIS foi usado para obter uma pontuação para cada um dos fornecedores disponíveis. A pontuação é um dos parâmetros de modelo linear inteiro. A solução busca encontrar a melhor combinação de itens e fornecedores para atender a demanda. As restrições do modelo envolvem a capacidade de cada fornecedor e uma limitação quanto a quantidade de fornecedores. Além disso, por motivos tecnológicos, nem todos os fornecedores podem produzir todos os itens.

Gonçalo e Alencar [2014] introduziram um método em dois estágios para resolver um pro-

blema prático de seleção de fornecedores em um centro de distribuição. O método PROMETHEE II foi usado para determinar os produtos e serviços mais importantes. A solução do método estabeleceu quais fornecedores fornecem quais itens.

Ghaniabadi e Mazinani [2017] estudaram um modelo de item único com vários fornecedores, possibilidade de atraso da demanda e considerando desconto de acordo com a quantidade comprada. Não há restrições quanto ao número de fornecedores escolhidos. Um algoritmo de programação dinâmica refinou a solução obtida a partir de um software comercial.

Entrevistas com os gestores realizadas por Alegoz e Yapicioglu [2019] confirmou o uso de vários critérios é essencial para selecionar fornecedores e alocar a quantidade comprada de cada um deles. Alegoz e Yapicioglu [2019] propuseram um *framework* híbrido usando o método fuzzy-TOPSIS e programação por metas. As metas do modelo são a capacidade, qualidade e desconto total.

Já se sabe que para reduzir custos, melhorar a qualidade e compartilhar os ganhos ao longo da cadeia de suprimentos é necessário manter uma relação estável e duradoura com os fornecedores. Em contrapartida, há poucos estudos que examinam a quantidade de fornecedores necessária, e em particular, as conexões entre fornecedores e produtos.

2.2. Flexibilidade de máquina em sistemas de produção

Na abordagem clássica do problema de dimensionamento de lotes, considera-se que cada máquina pode fabricar todos os produtos (flexibilidade total), no entanto, pode ser extremamente custoso a flexibilidade total e muitas vezes inviável na prática. Dessa maneira, os estudos buscaram mostrar que com uma quantidade limitada de flexibilidade, ou seja, máquinas que fabricam poucos produtos, já é suficiente para se obter um comportamento similar (em termos da função objetivo) a flexibilidade total.

Jordan e Graves [1995] apresentaram um dos trabalhos mais relevantes no estudo da flexibilidade. O estudo foi inspirado no caso real da indústria automobilística. Os autores propuseram que a flexibilidade seja distribuída de modo a formar uma única cadeia, dessa maneira, nenhum produto é produzido por uma planta fora da cadeia e nenhuma planta produz um produto fora da cadeia. Quando isso acontece, os efeitos das variações da demanda podem ser amenizados pela redistribuição do uso da capacidade de modo a minimizar o atraso. Por fim, Jordan e Graves [1995] sugerem que os seguintes passos devem ser considerados quando pretende-se determinar configurações de flexibilidade: (i) balancear a capacidade de cada planta (medida em unidades) que cada produto usa, (ii) balancear a quantidade de unidades de cada produto designada para cada planta e (iii) criar uma cadeia que engloba o maior número de produtos e plantas possíveis.

Garavelli [2003] estudou a flexibilidade na cadeia de suprimentos considerando dois estágios de suprimentos. Os montadores compram a matéria prima dos fornecedores, e esses montadores distribuem os produtos para os mercados consumidores. No trabalho, 9 diferentes tipos de configurações foram testadas. Partindo do caso em que cada fornecedor é dedicado a um montador que entrega a todos os mercados até a situação em que a cadeia é 100% flexível. De todas as configurações, aquela que obteve o melhor resultado em *lead-time* foi 2-flexibilidade no primeiro e no segundo estágio da cadeia, ou seja, cada empresa compra matéria-prima de dois diferentes fornecedores e cada montador entrega para dois diferentes mercados. Graves e Tomlin [2003] também continuam o trabalho de Jordan e Graves [1995] desenvolvendo métricas para identificar ineficiências na cadeia de suprimentos multiestágios. O modelo proposto busca minimizar a demanda não atendida.

Aprile et al. [2005] desenvolveram um modelo linear para maximizar a quantidade produzida. As mesmas configurações propostas por Garavelli [2003] foram testadas. Os autores con-

cluíram a favor dos benefícios da flexibilidade limitada e observaram que uma variações importantes na demanda podem gerar um efeito chicote que ocorre quando a demanda é alterada, e essa alteração é amplificada como um chicote ao longo de toda a cadeia. Foi apontado no trabalho que uma área de pesquisa a ser desenvolvida é compreender a flexibilidade em sistemas não balanceados, outro ponto é aprofundar os estudos da flexibilidade e o efeito chicote.

Hopp et al. [2010] estudaram os benefícios da flexibilidade de logística e de processo em um caso de integração vertical multiestágio. Os autores se basearam no trabalho realizado por Aprile et al. [2005] e demonstram que a alocação da flexibilidade deve levar em conta a variabilidade dos fornecedores, demanda e processos intermediários da cadeia. A conclusão geral dos autores é que a flexibilidade deve ser posicionada na fonte de variabilidade. Além disso, observa-se que a flexibilidade de logística é mais importante próxima a fonte de variabilidade, enquanto que a flexibilidade de processo perde seu valor se não é posicionada no estágio da variabilidade.

Fiorotto et al. [2018] a partir de um problema mono-estágio analisaram os benefícios da flexibilidade no curto prazo (considerando um cenário determinístico). Em diferentes análises, os autores compararam diversas configurações de flexibilidade. Os resultados indicaram que a regra da cadeia obtém um desempenho próximo da flexibilidade total e o pior desempenho é a configuração em cluster. Foram desenvolvidos ainda dois novos modelos, ambos lineares e determinísticos. O primeiro com o intuito de obter a melhor a atribuição de produtos à máquinas em uma cadeia longa e o segundo a melhor configuração sujeito a um orçamento limitado. Novamente, os benefícios da flexibilidade total foram alcançados. Em especial, com uma quantidade $(n + \frac{n}{2})$ de arcos menor do que a necessária para uma única cadeia longa $(2n)$, já se obtém praticamente o mesmo desempenho, em termos de custo total, que a flexibilidade total (n^2).

3. Formulação do problema

Essa seção apresenta a formulação matemática do problema de dimensionamento de lotes integrado com seleção de fornecedores. O horizonte de planejamento é finito e divido em macro-períodos. Cada fornecedor tem uma capacidade pré-determinada e uma quantidade limitada de flexibilidade. Além disso, os clientes têm sua própria demanda que pode ser atendida em atraso. A realização de um pedido a um fornecedor implica em um custo de pedido a ser pago. O objetivo do problema é encontrar um plano de produção que atende a todas as restrições e maximiza o lucro total.

A Figura 1 ilustra o problema estudado com 6 fornecedores, 6 produtos, $|K|$ clientes e três diferentes configurações de flexibilidade. O primeiro caso (a) apresenta a configuração dedicada em que cada fornecedor produz somente um produto. Observe que nessa configuração, o número total de arcos (quantidade de flexibilidade) é igual ao número de produtos e fornecedor. O caso (b) mostra a configuração bem conhecida “long-chain” (cadeia longa). Nessa configuração, cada fornecedor entrega 2 produtos e o total de arcos é igual a 12. Finalmente, o caso (c) apresenta a configuração de flexibilidade total com 36 arcos.

É importante observar que ao adicionar flexibilidade, o número de fornecedores escolhidos pode ser reduzido através da recombinação do uso da capacidade dos fornecedores, o que pode melhorar o custo total. O objetivo do estudo é determinar a configuração de flexibilidade de aquisição de produto que usa um número reduzido de fornecedores e ainda equilibra o atraso em cada período. Note que, ao usar uma quantidade reduzida de fornecedores, é possível obter economias através da simplificação da gestão dos fornecedores.

A seguir, a formulação matemática do problema é apresentada. Consideramos os seguintes parâmetros e conjuntos:
I: conjunto dos produtos (índice i);

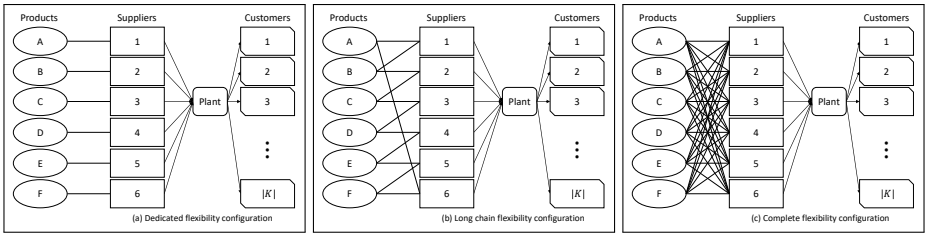


Figura 1: Diferentes configurações de flexibilidade de aquisição de produto

J: conjunto dos fornecedores (índice j);

K: conjunto dos clientes (índice k);

T: conjunto dos períodos (índice t);

p_{ikt}: preço de venda do produto tipo i para o cliente k no período t;

ac_{ijt}: custo de aquisição do produto tipo i do fornecedor j no período t;

oc_j: custo do pedido do fornecedor j;

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

w_{ikt}: custo de atraso do produto i para o cliente k no período t;

d_{ikt}: demanda pelo produto i do cliente k no período t;

Cap_{jt}: capacidade disponível do fornecedor j no período t;

F_{max}: quantidade máxima de flexibilidade de aquisição do produto;

M: um número suficientemente grande.

As variáveis de decisão são definidas como segue.

x_{ijt}: quantidade comprada do produto i a partir do fornecedor j no período t;

y_{ikt}: quantidade entregue do produto i ao cliente k no período t;

z_{ikt}: quantidade atrasada do produto i para o cliente k no período t;

h_{it}: quantidade estocada do produto i no período t;

u_{ij}: variável binária indicando se o fornecedor j tem flexibilidade para produzir/entregar o produto i;

s_j: variável binária indicando se o fornecedor j é escolhido.

$$\text{Max} \quad \sum_{i\in I}\sum_{t\in T}\left(\sum_{k\in K}(p_{ikt}y_{ikt} - w_{ikt}z_{ikt}) - \sum_{j\in J} ac_{ijt}x_{ijt}\right) - \sum_{i\in I}\sum_{t\in T} hc_{it}h_{it} - \sum_{j\in J} oc_j s_j \quad (1)$$

s.t.
$$\sum_{j\in J} x_{ijt} + h_{i(t-1)} = \sum_{k\in K} y_{ikt} + h_{it} \quad \forall i \in I, \quad \forall t \in T; \quad (2)$$
$$y_{ikt} + z_{ikt} = d_{ikt} + z_{ik(t-1)}, \quad \forall i \in I, \quad \forall k \in K, \quad \forall t \in T; \quad (3)$$
$$\sum_{i\in I}\sum_{t\in T} x_{ijt} \leq M s_j, \quad \forall j \in J; \quad (4)$$
$$\sum_{t\in T} x_{ijt} \leq M u_{ij}, \quad \forall i \in I, \quad \forall j \in J; \quad (5)$$
$$\sum_{i\in I} x_{ijt} \leq Cap_{jt}, \quad \forall j \in J, \quad \forall t \in T; \quad (6)$$
$$\sum_{i\in I}\sum_{j\in J} u_{ij} \leq F_{max}; \quad (7)$$
$$u_{ij} \leq s_j, \quad \forall i \in I, \quad \forall j \in J; \quad (8)$$
$$z_{ik0},\ h_{i0} = 0, \quad \forall i \in I, \quad \forall k \in K; \quad (9)$$
$$x_{ijt},\ y_{ikt},\ z_{ikt},\ h_{it} \geq 0, \quad \forall i \in I, \quad \forall j \in J, \quad \forall k \in K, \quad \forall t \in T; \quad (10)$$
$$u_{ij},\ s_j \in \{0,1\}, \quad \forall i \in I, \quad \forall j \in J. \quad (11)$$

A função objetivo (1) maximiza o lucro total, que consiste na receita total menos os custos de compra, estoque, pedido e atraso. Restrições (2) e (3) garantem o balanceamento de estoque em cada período. Demanda não satisfeita no período, pode ser atrasada. Restrição (4) garante que se o produto é comprado do fornecedor j, ele deve estar ativo. Em seguida, (5) assegura que o fornecedor pode entregar um produto específico somente se ele tem a flexibilidade para esse produto. A restrição (6) limita a compra a máxima capacidade de cada fornecedor. O total de flexibilidade disponível é limitada por (7). Restrição (8) inclui a relação entre a flexibilidade de aquisição de produto e os fornecedores. Restrição (9) fixa o estoque inicial e o atraso no primeiro período. Finalmente, o conjunto de restrições (10) e (11) definem o domínio das variáveis.

4. Experimentos computacionais

Para os testes computacionais, adaptamos o conjunto de dados proposto por Trigeiro et al. [1989]. Usamos 5 instâncias (F01-F05) com 6 itens, 5 instâncias (G51-G55) com 12 produtos e 5 instâncias (G56-G60) com 24 produtos. Todas com 15 períodos. Os fornecedores são idênticos, isso é, todos tem a mesma capacidade, mesmo custo de aquisição e pedido. Observe que diferente do conjunto de dados de Trigeiro et al. [1989], o trabalho considera a existência de clientes. O número de fornecedores é igual ao número de produtos e a demanda de cada cliente é igual.

A escolha da capacidade dos fornecedores foi baseada em testes preliminares e varia de 500 a 4500 para obter um amplo espectro de problemas. Ao variar a capacidade, obtemos 6 diferentes problemas para cada conjunto de teste. Ao total, 90 diferentes problemas foram criados. Além disso, o preço de venda de cada produto (p_{ikt}) foi fixado em 300 para todos os clientes e o custo de aquisição em 45 por produto. O custo de atraso (w_{ikt}) foi definido em $2000/|I|$. Finalmente, os níveis de flexibilidade (F_{max}) estudados foram $|I| + |I|/2$ e $2|I|$ para a Flexibilidade 1 e Flexibilidade 2, respectivamente. É importante lembrar que na flexibilidade total existem $|I|^2$ arcos.

A formulação foi modelada em Python 3.6 usando CPLEX 12.9 para a resolução dos problemas. Os testes foram feitos em um computador com 2 processadores Intel(R) Xeon(R) X5675, 3.07 GHz com 96 GB de RAM e sistema operacional Linux. Limitamos o tempo de busca de solução de cada instância a uma hora (3600 segundos).

4.1. Análise da flexibilidade de aquisição de produto

Nós analisamos o conceito de flexibilidade de aquisição de produto nos problemas integrados de dimensionamento de lotes e seleção de fornecedores. O caso base de comparação é o dedicado, em que cada fornecedor pode entregar exatamente um produto. No contexto determinístico, o benefício da flexibilidade aparece, se no caso base a demanda não pode ser totalmente satisfeita no período ou se a capacidade do fornecedor é alta e seria possível encontrar soluções com menos fornecedores do que no caso dedicado. Nesses casos, adicionar flexibilidade (isso é, alguns fornecedores podem entregar alguns certos tipos de produto ao invés de um único) pode diminuir o custo total. O objetivo dos experimentos computacionais apresentados nessa seção é analisar os benefícios das diferentes flexibilidades.

Na Tabela 1, nós consideramos diferentes níveis de capacidade (Cap) e apresentamos a média do custo total relativo (CTR), o número total de fornecedores selecionados (NF) e o total atrasado (coluna Atraso), os *gaps* de otimalidade em valores percentuais (coluna Gap) e o tempo de processamento em segundos (coluna T(s)) das diferentes instâncias e níveis de flexibilidade. Além disso, consideramos o custo total da configuração dedicada ao valor de referência (igual a 100%) e calculamos o CTR dos outros níveis de flexibilidade em relação ao 100% do caso dedicado.

Tabela 1 mostra que como esperado e relatado por Jordan e Graves [1995], o benefício da flexibilidade depende do nível de capacidade. Observe que, o custo total relativo diminui comparado com o dedicado (daí o benefício da flexibilidade). Para todos os níveis de flexibilidade , veja que o benefício da flexibilidade é maior quando a capacidade é apertada (onde existe uma quantidade importante de atraso). É interessante observar que para os níveis médios de capacidade, o benefício da flexibilidade diminui e volta a aumentar para os níveis mais altos de capacidade. Isso acontece porque nessas capacidades é possível reduzir o número de fornecedores selecionados. A Figura 2 apresenta graficamente o benefício da flexibilidade para as instâncias de com 12 produtos e fornecedores para as diferentes configurações de flexibilidade.

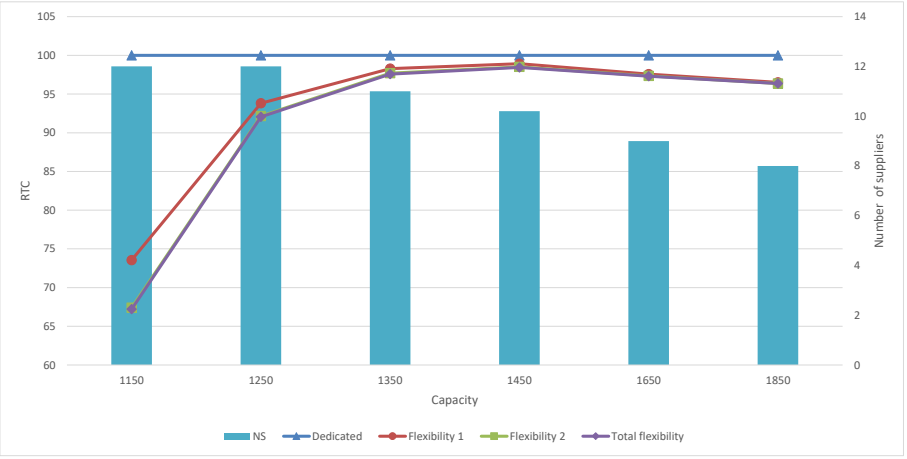


Figura 2: Resultados para 12 produtos e fornecedores

Tabela 1: Resultados para as diferentes flexibilidades

Produtos	Cap	Dedicado			Flexibilidade 1			Flexibilidade 2			Flexibilidade total		
		CTR	NS	Atraso	CTR	NS	Atraso	CTR	NF	Atraso	CTR	NF	Atraso
6	500	100	6	96259	100	6	96259	100	6	96259	100	6	96259
	600	100	6	29675	89,73	6	26123	88,90	6	25883	88,90	6	25883
	700	100	6	2081	97,41	6	1811	97,28	6	1802	97,25	6	1800
	1000	100	6	-	98,19	5	-	98,19	5	-	98,19	5	-
	1100	100	6	-	96,37	4	-	96,37	4	-	96,37	4	-
	1450	100	6	-	94,56	3	-	94,56	3	-	94,56	3	-
Média		100	6	21336	96,04	5	20699	95,88	5	20657	95,88	5	20657
12	1150	100	12	30610	73,55	12	2802	67,40	12	322	67,21	12	317
	1250	100	12	2892	93,82	12	179	92,16	12	-	92,06	12	-
	1350	100	12	406	98,29	11,4	32	97,69	11	24	97,57	11	-
	1450	100	12	39	98,92	11	-	98,51	10,2	6	98,44	10,2	-
	1650	100	12	-	97,58	9,2	-	97,34	9	-	97,30	9	-
	1850	100	12	-	96,51	8,2	14	96,37	8	-	96,36	8	-
Média		100	12	5658	93,11	10,6	505	91,58	10,4	59	91,49	10,4	53
24	2000	100	24	613568	82,65	24	462614	77,43	24	422578	76,99	24	417864
	2400	100	24	66504	89,23	24	20621	83,03	24	883	82,95	24	840
	2850	100	24	1586	98,68	22	464	98,19	21	319	98,05	21	1
	3500	100	24	-	97,24	18,2	-	96,64	17	71	96,62	17	71
	4000	100	24	-	95,84	15,2	8	95,64	15	27	95,60	15	-
	4500	100	24	-	95,00	13,4	202	94,94	13,4	139	94,91	13,4	149
Média		100	24	113610	93,11	19,5	80652	90,98	19,1	70670	90,85	19,1	69821

Produtos	Cap	Dedicado		Flexibilidade 1		Flexibilidade 2		Flexibilidade total	
		Gap	T(s)	Gap	T(s)	Gap	T(s)	Gap	T(s)
6	500	0	0,02	0	0,2	0	0,2	0	0,07
	600	0	0,01	0	26	0	0,8	0	0,4
	700	0	0,02	0	21	0	0,2	0	0,3
	1000	0	0,02	0	0,5	0	0,3	0	0,3
	1100	0	0,02	0	0,3	0	0,4	0	0,3
	1450	0	0,02	0	0,2	0	0,3	0	0,1
Média		0	0,02	0	8	0	0,4	0	0,3
12	1150	0	0,04	0,7	3600	0,02	2179	0	0,1
	1250	0	0,04	0,1	3600	0,01	69	0	0,3
	1350	0	0,04	0,04	3600	0,01	19	0	0,3
	1450	0	0,04	0,03	2881	0	15	0	0,6
	1650	0	0,04	0,02	2908	0	11	0	0,5
	1850	0	0,04	0,01	968	0	4	0	0,5
Média		0	0,04	0,1	2926	0,01	383	0	0,4
24	2000	0	0,1	1	3600	0,1	3600	0	0,4
	2400	0	0,1	0,7	3600	0	3511	0	0,7
	2850	0	0,1	0,04	3600	0	49	0	2
	3500	0	0,1	0,04	3600	0	20	0	3
	4000	0	0,1	0	2721	0	73	0	3
	4500	0	0,1	0	485	0	40	0	3
Média		0	0,1	0,3	2934	0,02	1216	0	2

Galoá { Este trabalho foi publicado utilizando o **Galoá** proceedings

Nossos resultados mostram que o benefício de uma quantidade bastante limitada de flexibilidade (Flexibilidade 1) é muito próximo ao obtido pela Flexibilidade Total (em média, a maior diferença foi de 2,26%). Considerando a Flexibilidade 2, a diferença em comparação a Flexibilidade Total é praticamente 0 para todas as instâncias. Além disso, observamos que a flexibilidade permite diminuir o número total de fornecedores selecionados de maneira significativa. Observe que a redução é, em média, 16,7%, 13,3% e 20,4% para 6, 12 e 24 produtos e fornecedores, respectivamente. Note que, o total de fornecedores selecionados considerando a Flexibilidade 1 e 2 é muito próximo a Flexibilidade Total. Além disso, é importante notar a diferença da Flexibilidade Total para a Flexibilidade 1 e 2 em que os fornecedores selecionados entregam somente alguns produtos. Na prática, isso permite uma redução significativa do custo de gestão de fornecedores. Quanto ao total atrasado, observe que a Flexibilidade 1, 2 e Total tem a níveis similares para a maior parte das instâncias. Observe que para capacidade mais altas, algumas instâncias não apresentam atraso (por exemplo para 24 produtos e capacidade igual a 4500). Isso ocorre, porque uma quantidade pequena de atraso é preferível a selecionar um novo fornecedor. Na prática, isso pode acontecer quando os fornecedores entregam produtos customizados, em que contratar um novo fornecedor é custoso e difícil. Em relação ao *gap* de otimalidade, observamos que eles são zero ou muito próximo a zero (0,7% no pior caso) para todas as configurações. Em termos de tempo computacional, o problema dedicado é muito mais rápido para ser resolvido do que as demais configurações.

5. Conclusão

Nesse artigo, estudamos o problema de dimensionamento de lotes capacitado multi-período com atraso integrado com seleção de fornecedores em um contexto determinístico. Diferente do problema clássico, o estudo considera uma quantidade limitada de flexibilidade, isso é, cada fornecedor pode produzir/entregar somente alguns tipos de produtos. Para analisar os benefícios da flexibilidade, nós propomos um modelo matemático. Nossos resultados indicam que, em termos de custo total, uma pequena quantidade de flexibilidade já é suficiente para obter praticamente todos os benefícios da flexibilidade total. Isso significa que os fornecedores selecionados podem produzir/entregar alguns produtos (ao invés de todos). Além disso, não é necessário selecionar todos os fornecedores disponíveis. Para pesquisas futuras, sugerimos analisar a sensibilidade dos resultados em relação aos parâmetros do modelo. Além disso, é interessante expandir o estudo para o caso não balanceado, onde o número de produtos é diferente do número de fornecedores. Finalmente, também pode ser interessante o desenvolvimento de heurísticas para se adicionar flexibilidade (conexões entre os produtos e os fornecedores).

Agradecimentos

Esta pesquisa recebeu apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), processo 2019/01145-9 e 2018/18754-5.

Referências

Aissaoui, N., Haouari, M., e Hassini, E. (2007). Supplier selection and order lot sizing modeling: A review. *Computers & Operations research*, 34(12):3516–3540.

Alegoz, M. e Yapicioglu, H. (2019). Supplier selection and order allocation decisions under quantity discount and fast service options. *Sustainable Production and Consumption*, 18:179–189.

Aprile, D., Garavelli, A. C., e Giannoccaro, I. (2005). Operations planning and flexibility in a supply chain. *Production Planning & Control*, 16(1):21–31.

Basnet, C. e Leung, J. M. Y. (2005). Inventory lot-sizing with supplier selection. *Computers & Operations Research*, 32(1):1–14.

Fiorotto, D. J., Jans, R., e de Araujo, S. A. (2018). Process flexibility and the chaining principle in lot sizing problems. *International Journal of Production Economics*, 204:244–263.

Garavelli, A. C. (2003). Flexibility configurations for the supply chain management. *International Journal of Production Economics*, 85(2):141–153.

Ghaniabadi, M. e Mazinani, A. (2017). Dynamic lot sizing with multiple suppliers, backlogging and quantity discounts. *Computers & Industrial Engineering*, 110:67–74.

Gonçalo, T. E. E. e Alencar, L. H. (2014). A supplier selection model based on classifying its strategic impact for a company's business results. *Pesquisa Operacional*, 34(2):347–369.

Graves, S. C. e Tomlin, B. T. (2003). Process flexibility in supply chains. *Management Science*, 49 (7):907–919.

Hong, J. e Hayya, J. C. (1992). Just-in-time purchasing: single or multiple sourcing? *International Journal of Production Economics*, 27(2):175–181.

Hopp, W. J., Iravani, S. M., e Xu, W. L. (2010). Vertical flexibility in supply chains. *Management Science*, 56(3):495–502.

Jordan, W. C. e Graves, S. C. (1995). Principles on the benefits of manufacturing process flexibility. *Management Science*, 41(4):577–594.

Kilic, H. S. (2013). An integrated approach for supplier selection in multi-item/multi-supplier environment. *Applied Mathematical Modelling*, 37(14-15):7752–7763.

Mendoza, A., Santiago, E., e Ravindran, A. R. (2008). A three-phase multicriteria method to the supplier selection problem. *International Journal of Industrial Engineering*, 15(2):195–210.

Rezaei, J. e Davoodi, M. (2011). Multi-objective models for lot-sizing with supplier selection. *International Journal of Production Economics*, 130(1):77–86.

Trigeiro, W. W., Thomas, L. J., e McClain, J. O. (1989). Capacitated lot sizing with setup times. *Management science*, 35(3):353–366.

Ustun, O., Demı, E. A., et al. (2008). An integrated multi-objective decision-making process for multi-period lot-sizing with supplier selection. *Omega*, 36(4):509–521.

Weber, C. A., Current, J. R., e Benton, W. (1991). Vendor selection criteria and methods. *European Journal of Operational Research*, 50(1):2–18.

Galoá { Este trabalho foi publicado utilizando o **Galoá** proceedings