ESTUDOS DE FLEXIBILIDADE EM PROBLEMAS DE PLANEJAMENTO DA PRODUÇÃO

Gabriel de Souza Amaro, Diego Jacinto Fiorotto, Washington Alves de Oliveira
Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Manufatura - PPGEPM
R. Pedro Zaccaria, 1300, Limeira - SP, 13484-350
gs.amaro@hotmail.com, fiorotto@unicamp.br, waoliv@unicamp.br

RESUMO

Esse trabalho apresenta um estudo da flexibilidade de processo em sistemas produtivos. A flexibilidade de processo é a habilidade que um sistema tem para responder às variações. Com os resultados obtidos, dois artigos foram submetidos para revistas internacionais e um terceiro está em elaboração. No primeiro artigo, estudou-se a flexibilidade no problema integrado de dimensionamento de lotes e seleção de fornecedores. Como resultado, observou-se que uma quantidade reduzida de fornecedores que entregam poucos produtos é suficiente para se obter os mesmos benefícios da flexibilidade total (todos os fornecedores podem entregar todos produtos). O segundo artigo, utilizou os resultados da literatura para analisar a flexibilidade através de um ambiente multicritério. Os resultados indicaram que embora a flexibilidade total seja vantajosa em termos do custo de produção, considerando outros critérios, essa configuração de flexibilidade aparece nas últimas posições do ranking e a cadeia longa em posições intermediárias. Um terceiro trabalho foi realizado com o objetivo de definir a flexibilidade de modo a generalizar configurações para sistemas não balanceados (número de produtos maior do que o número de máquinas). Foi proposto algumas métricas para avaliar os benefícios da flexibilidade, e os principais resultados mostraram que algumas configurações de flexibilidade com uma quantidade de ligações bastante reduzida não utilizaram todas as ligações permitidas.

ABSTRACT

This work presents a study on process flexibility in production systems. Process flexibility is the ability that a production system has to respond to variations on circumstances. With the research results, two papers (under review) were submitted to international papers and a third paper is in progress. In the first work entitled we studied the flexibility on the integrated lot sizing and supplier selection problem. The results showed that a reduced amount of selected suppliers producing/delivering a small number of products is enough to obtain the total flexibility benefits. The second paper entitled used previous results from the literature to analyze the advantages of process flexibility through multicriteria perspectives. The findings showed that although total flexibility is more suitable concerning the total cost, it appeared in the last positions of the alternatives from a based-ranking multicriteria approach and the long-chain configuration ranked in the intermediate positions. A third work was done to define and analyze flexibility configurations to non-balanced systems (when the number of items is different from the number of machines). We proposed some metrics to study the benefits of flexibility, the main findings showed some configurations with a very reduced amount of links did not use all allowed links. Moreover, even the best designation of items to machines, to increase the amount of flexibility allowed increasing the performance of the configuration. Note that the manuscripts appear attached.

PALAVRAS CHAVE. Dimensionamento de lotes, flexibilidade de processo, programação inteira.

https://proceedings.science/p/157510?lang=pt-br

1. Introdução

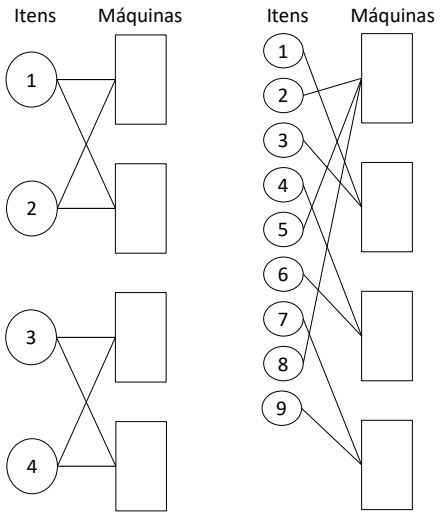
Com a globalização e cada vez mais as fronteiras comerciais entre os países se estreitando, é irremediável o aumento da competitividade no mercado. As organizações sofrem cada dia mais pressão por produtos que sejam de qualidade e que superem as expectativas dos clientes. Inevitavelmente, a busca por produtos que atendam esses requisitos atinge o custo dos produtos. Uma vez que o preço é definido pela dinâmica do mercado, não há outra alternativa além de reduzir custos para que seja possível manter a margem de lucro no patamar almejado e se manter competitivo frente os concorrentes.

Diversos autores [Gupta e Goyal, 1989; Jordan e Graves, 1995; Koste e Malhotra, 1999] definem a flexibilidade como a habilidade do sistema produtivo de lidar com as mudanças nas circunstâncias. Koste e Malhotra [1999] propuseram um *framework* para analisar as diferentes fontes de flexibilidade e seus benefícios. Em um contexto estocástico, a flexibilidade permite uma resposta às variações dos parâmetros (principalmente da demanda), enquanto em um contexto determinístico, o benefício da flexibilidade está presente quando não é possível atender toda a demanda, isso é, através da flexibilidade é possível realocar a produção dos itens de modo a reduzir o custo total (principalmente custos relacionados a atraso e/ou horas extras) em relação a um cenário sem flexibilidade. Sethi e Sethi [1990]; Gupta e Somers [1992] discutem a existência de 9 a 11 diferentes tipos de flexibilidade, entre elas, a flexibilidade de preparação de máquinas, isso é, a preparação pode iniciar no final de um período e terminar no começo do próximo. Outra possibilidade é a flexibilidade de operações, nesse caso, a ordem das etapas que são necessárias para a fabricação de um produto pode ser alterada. Observa-se que dentre os 11 diferentes tipos, a flexibilidade de processo é o tema desse estudo.

A *flexibilidade de máquinas*, ou *flexibilidade de processo* (que é estudada nesse trabalho) pode ser definida como a facilidade com a qual uma máquina pode ser adaptada para fabricar diferentes itens, de forma que quanto mais itens diferentes essa máquina puder fabricar, mais flexível ela é [Sethi e Sethi, 1990]. Ao longo desse texto, é discutida a flexibilidade pela ótica do contexto industrial, principalmente sobre máquinas e itens, mas é possível analisar o benefício da flexibilidade de processo no caso de trabalhadores multifuncionais e até mesmo fora do contexto industrial, por exemplo, em uma aplicação em que uma enfermeira que é treinada para atuar no departamento de oncologia é menos flexível do que uma enfermeira treinada para a pediatria e cirurgia geral. Assim, é possível perceber que a flexibilidade de processo relaciona máquinas e itens, mas também, colaboradores e funções. Daqui em diante, a flexibilidade ocorre sobre as máquinas (plantas), salvo em contexto especificado. A relação entre as máquinas e os itens é marcada por uma *configuração de flexibilidade* e pode ser representada por um grafo bipartido em que os vértices de uma partição representam as máquinas e os vértices da outra partição, os itens [Jordan e Graves, 1995]. As arestas conectam os vértices entre as partições.

Dois exemplos de configurações de flexibilidade podem ser observados na Figura 1. Na Figura 1(a), cada item pode ser produzido em duas máquinas e cada máquina, produz dois itens. Observe que, os itens produzidos nas primeiras máquinas não são produzidos nas últimas e vice-versa. Quanto a Figura 1(b), não existe um padrão aparente de configuração. Nesse caso, cada máquina produz dois itens, como na Figura 1(a), porém, cada item é produzido em somente uma máquina. É possível analisar a quantidade de flexibilidade nesse sistema, isso é, a quantidade de ligações que existem entre os dois conjuntos (itens e máquinas), para a primeira configuração tem-se 8 ligações e para a segunda 9 ligações. Quando o número de itens é igual ao número de máquinas, dizemos que o sistema é balanceado (ver Figura 1(a)). No entanto, em geral, na prática a quantidade de itens é maior do que a quantidade de máquinas ou plantas, logo, um sistema não

balanceado, como pode ser observado na Figura 1(b).



(a) Exemplo de um sistema balanceado.

(b) Exemplo de um sistema não balanceado.

Figura 1: Exemplo de sistemas balanceados e não balanceados.

A flexibilidade de máquinas está pode ser relacionada ao problema de dimensionamento de lotes. Na formulação clássica do problema, cada máquina pode fabricar todos os produtos [Fiorotto et al., 2015], o que define a configuração de *flexibilidade total*. Essa situação é raramente encontrada na prática, já que seria extremamente custoso e muitas vezes inviável uma máquina que possa fabricar todos os produtos. Uma situação mais realista é a configuração de *flexibilidade limitada*, em que cada máquina pode produzir um conjunto reduzido de itens.

Esse trabalho estudou a flexibilidade de máquinas no problema de dimensionamento de lotes com máquinas paralelas, diversos itens, com possibilidade de atraso no atendimento da demanda, em contexto determinístico. Inicialmente, o estudo contemplou o problema integrado de dimensionamento de lotes e seleção de fornecedores, em que a planta decide quais produtos comprar de cada fornecedor, sendo que diversas configurações são possíveis, isso é, é possível encontrar um fornecedor que entregue um único produto, um fornecedor que entregue uma quantidade reduzida de produtos, e até um fornecedor que entregue todos os produtos. O desempenho de cada uma dessas configurações de flexibilidade foi analisado afim de se obter resultados à respeito do benefício de cada uma delas. Em se tratando do benefício das configurações de flexibilidade, diversos trabalhos na literatura consideram exclusivamente a função objetivo do problema. O passo seguinte desse trabalho foi analisar o desempenho das configurações de flexibilidade à luz de uma abordagem multicritério, que fornece um ordenamento (ranking) das configurações estudadas. Esse tipo de análise permite considerar aspectos não explorados anteriormente na literatura (como, por exemplo, a utilização de capacidade das máquinas) e que têm importância na tomada de decisão à respeito de qual e como a flexibilidade deve ser implementada. Da mesma maneira, a flexibilidade de máquinas no problema de dimensionamento de lotes não balanceado não foi amplamente

estudada, mesmo sendo um caso encontrado recorrentemente na prática. Isso acontece porque as configurações de flexibilidade para o caso não balanceado são mais difíceis de serem caracterizadas. O passo seguinte foi propor uma abordagem que permitiu a construção das configurações nos sistemas não balanceados, e ainda, conseguir representar as configurações dos sistemas balanceados como um caso particular do não balanceado.

Assim, esse trabalho apresenta uma síntese dos resultados obtidos com a dissertação de mestrado intitulada "Estudos de flexibilidade em problemas de planejamento da produção". Com os resultados obtidos desse estudo, dois artigos (em revisão) foram submetidos para revistas internacionais e um terceiro está em elaboração.

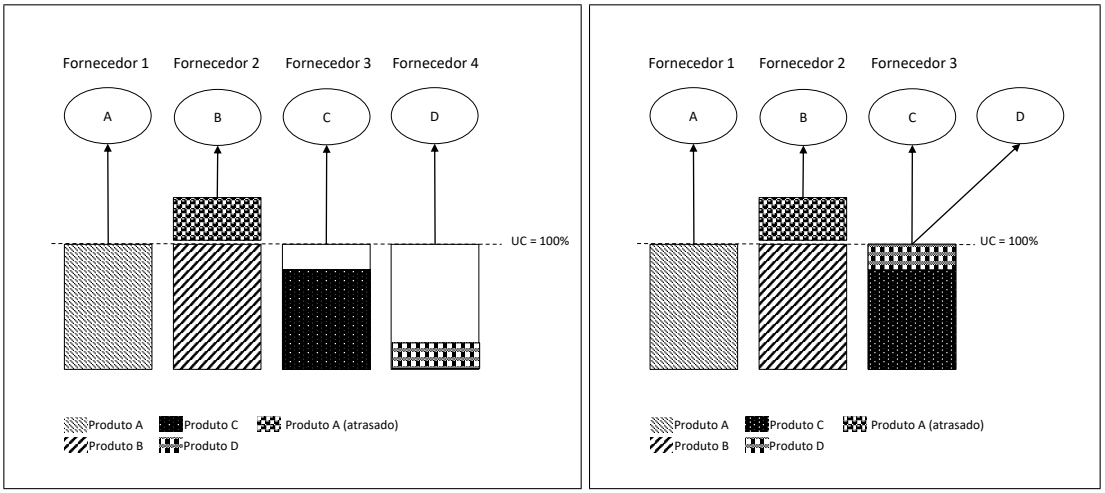
2. Principais resultados

Esta seção descreve os principais resultados obtidos durante o desenvolvimento do projeto de mestrado. Tais resultados foram divulgados em eventos científicos: III Encontro da pós-graduação da Faculdade de Ciências Aplicadas, XXI Oficina Nacional de Problemas de Corte, Empacotamento, Planejamento e Programação da Produção e Correlatos, 51° Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional e IV Encontro da pós-graduação da Faculdade de Ciências Aplicadas. Além disso, as contribuições dos estudos foram discutidas em três artigos científicos, sendo que recentemente um desses artigos foi aceito no periódico TOP, um segundo artigo foi submetido para o periódico RAIRO e está na segunda fase de revisões e o terceiro artigo encontra-se em fase de preparação final e será submetido em breve.

O primeiro artigo foi intitulado "*Impact analysis of flexibility on the integrated lot sizing and supplier selection problem*" e foi recentemente aceito para publicação na revista internacional TOP. O trabalhou contribuiu com o estudo dos conceitos de flexibilidade no problema integrado de dimensionamento de lotes e seleção de fornecedores. Já é conhecido na literatura que o problema de dimensionamento de lotes pode ser integrado com o problema de seleção de fornecedores. O custo de matéria prima é parte significativa do custo total do produto, assim, é extremamente importante lidar com fornecedores confiáveis e buscar uma relação estável e duradoura. Embora, o problema integrado de dimensionamento de lotes e seleção de fornecedores seja conhecido, até o momento, não houve uma investigação a respeito da flexibilidade nesse problema. Nesse estudo, denominou-se a flexibilidade de aquisição de produtos, ou seja, certos produtos só podem ser entregues por certos fornecedores.

Um dos benefícios da flexibilidade de aquisição de produtos consiste no uso eficiente da capacidade disponibilizada de cada fornecedor e a possibilidade de redução da quantidade de fornecedores selecionados. Observe que ao reduzir a quantidade de fornecedores ocorre uma diminuição de custos da gestão dos fornecedores, além de permitir o desenvolvimento de uma relação estável e duradoura com os fornecedores selecionados. A Figura 2 apresenta como é possível reduzir a quantidade de fornecedores selecionados ao adicionar flexibilidade. Observe na Figura 2(a) o cenário em que cada fornecedor pode entregar somente um produto. Os fornecedores 1 e 2 já entregaram para a planta tudo o que era possível, porém, a demanda do produto B ainda não foi totalmente atendida. Já os fornecedores 3 e 4 ainda podem entregar mais produtos C e D. Ao encontrar um fornecedor que possa entregar ambos os produtos C e D, é possível encerrar um contrato e diminuir a quantidade de fornecedores selecionados, simplificando o processo de gestão, como é mostrado na Figura 2(b).

Como uma das principais contribuições do trabalho, uma nova formulação para o problema integrado que permite analisar o benefício de se investir em flexibilidade foi proposta e com os resultados computacionais obtidos, foi possível mostrar que não é necessário que cada fornecedor entregue/produza todos os produtos para se obter benefícios similares aos da flexibilidade total



(a) Configuração dedicada de flexibilidade. (b) Configuração limitada de flexibilidade.

Figura 2: Valor da flexibilidade de aquisição de produtos na redução dos fornecedores selecionados.

(onde cada fornecedor entrega/produz todos os produtos). Além disso, foi observado que com a flexibilidade de aquisição de produtos é possível reduzir a quantidade de fornecedores selecionados, o que na prática significa redução de custos pela simplificação da gestão dos fornecedores.

O segundo artigo foi intitulado "*Evaluating process flexibility in lot sizing problems: an approach based on multicriteria decision making*". O principal objetivo desse trabalho consiste em cobrir um *gap* da literatura quanto a maneira de analisar os benefícios da flexibilidade de máquina. Até o momento, os trabalhos abordados na literatura apresentavam estudos para analisar os benefícios de diferentes configurações de flexibilidade considerando somente a função objetivo (custo ou lucro) como critério. No entanto, na prática, existem outros critérios operacionais que são relevantes e devem ser levados em conta para a análise do desempenho das configurações de flexibilidade. O artigo estendeu o trabalho de Fiorotto et al. [2018] aplicando um método multicritério compensatório para ranquear as configurações de flexibilidade (alternativas) no problema de dimensionamento de lotes considerando máquinas paralelas e possibilidade de atraso. Quanto aos resultados obtidos, mostramos que a flexibilidade total aparece sempre nas últimas posições do ranking (independente do peso escolhido para os critérios e do cenário). Isso indicou que a flexibilidade total, embora seja a melhor configuração, quando analisada sob a ótica apenas da função objetivo, não conseguiu alcançar posições superiores no ranking já que outras configurações apresentaram bom desempenho tanto na função objetivo quanto nos outros critérios analisados. Os resultados computacionais mostraram ainda que é interessante investir em flexibilidade desde as capacidades mais apertadas. Finalmente, a configuração da cadeia longa, conhecida na literatura pelo bom desempenho apareceu em posições intermediárias no ranking.

O terceiro artigo foi intitulado "*Machine flexibility for the lot-sizing problem for unbalanced systems*". Esse trabalho expandiu e formalizou conceitos de flexibilidade para sistemas não balanceados. Até o momento, poucos trabalhos na literatura [Tanrisever et al., 2012; Deng e Shen, 2013; Feng et al., 2017] estudaram a flexibilidade de máquinas para o caso não balanceado e, pela primeira vez, é analisado os benefícios da flexibilidade de máquinas para o problema de dimensionamento de lotes não balanceado em contexto não determinístico. Diversos desafios se apresentam quando o sistema é não balanceado, como construir as configurações de flexibilidade já conhecidas

na literatura, qual configuração utilizar como caso de comparação, entre outros. Nesse trabalho foi proposto uma maneira de se representar as configurações de flexibilidade através de uma abordagem utilizando conjuntos. Nessa abordagem considera-se a noção de intensidade de compartilhamento entre às máquinas, o que permite analisar diferentes configurações de flexibilidade com o mesmo perfil. Foi proposto uma nova formulação que considera o perfil da configuração de flexibilidade. Também foi proposto alguns indicadores de desempenho das configurações, entre eles, o índice de similaridade que permite analisar a discrepância entre a configuração permitida e aquela de fato utilizada na solução ótima. Os resultados obtidos demonstram que mesmo quando a alocação dos itens às máquinas é ótima, a flexibilidade tem impacto na redução do custo (e um impacto ainda maior quando a alocação não é ótima). Outro resultado importante é que somente uma configuração atingiu o máximo de similaridade entre a configuração permitida e a utilizada.

3. Considerações finais

Esse trabalho apresenta um resumo do desenvolvimento da dissertação de mestrado com mesmo título. Na dissertação foi abordado diferentes aspectos de flexibilidade no problema de dimensionamento de lotes. Em um primeiro momento, foi estudado a flexibilidade de aquisição de produtos no problema integrado de dimensionamento de lotes e seleção de fornecedores. As principais contribuições envolvem a proposta de uma nova formulação matemática e análises do benefício da flexibilidade. Com as contribuições, um artigo científico foi produzido e aceito para publicação na revista internacional TOP. Em um segundo momento, desenvolveu-se uma análise multicritério das configurações de flexibilidade. É importante ressaltar que esse foi o primeiro trabalho que abordou de modo multicritério o desempenho das configurações de flexibilidade. Como resultado, observou-se que configurações bem conhecidas na literatura, como a regra da cadeia, ranquearam em posições intermediárias enquanto que a flexibilidade total, ranqueou nas últimas posições mesmo apresentando os melhores valores para a função objetivo. Finalmente, foi estudado a flexibilidade de máquinas em sistemas não balanceados. Poucos trabalhos na literatura abordam a flexibilidade em sistemas não balanceados e, até o momento, nenhum trabalho analisou os benefícios da flexibilidade, em contexto determinístico, para sistemas não balanceados. Diversas dificuldades se apresentam ao analisar a flexibilidade em sistemas não balanceados. Foi proposto uma maneira de se construir as configurações utilizando uma abordagem em conjuntos que permitiu comparar diferentes configurações de flexibilidade com o mesmo perfil, além disso, foi proposto novos indicadores para se analisar o desempenho das configurações de flexibilidade. Os resultados computacionais mostraram que a maior parte das configurações não utilizaram toda a flexibilidade permitida. Em segundo lugar, a decisão de alocação dos itens às máquinas tem impacto substancial nos indicadores. Ainda, mesmo quando a alocação é ótima, aumentar a flexibilidade pode melhorar o desempenho em relação a um cenário sem flexibilidade. Finalmente, a quantidade de ligações utilizada na solução ótima esteve entre n e $1.5n$, em que n é a quantidade de produtos. Quanto as perspectivas de trabalho futuro, sugere-se estudar métodos de solução para o problema de dimensionamento de lotes, considerando flexibilidade limitada, com objetivo de resolver instâncias de tamanho maior e avaliar o impacto nos benefícios da flexibilidade.

Referências

Deng, T. e Shen, Z. J. M. (2013). Process flexibility design in unbalanced networks. *Manufacturing and Service Operations Management*, 15(1):24–32.

Feng, W., Wang, C., e Shen, Z. J. M. (2017). Process flexibility design in heterogeneous and unbalanced networks: A stochastic programming approach. *IISE Transactions*, 49(8):781–799.

Fiorotto, D. J., Araujo, S. A., e Jans, R. (2015). Hybrid methods for lot sizing on parallel machines. *Computers and Operations Research*, 63:136–148.

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

Gupta, Y. P. e Goyal, S. (1989). Flexibility of manufacturing systems: Concepts and measurements. *European Journal of Operational Research*, 43(2):119–135.

Gupta, Y. P. e Somers, T. M. (1992). The measurement of manufacturing flexibility. *European Journal of Operational Research*, 60(2):166–182.

Jordan, W. C. e Graves, S. C. (1995). Principles on the Benefits of Manufacturing Process Flexibility. *Management Science*, 41(4):577–594.

Koste, L. L. e Malhotra, M. K. (1999). Theoretical framework for analyzing the dimensions of manufacturing flexibility. *Journal of Operations Management*, 18(1):75–93.

Sethi, A. K. e Sethi, S. P. (1990). Flexibility in manufacturing: a survey. *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 2(4):289–328.

Tanrisever, F., Morrice, D., e Morton, D. (2012). Managing capacity flexibility in make-to-order production environments. *European Journal of Operational Research*, 216(2):334–345.